



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**Análise da eficiência termoenergética de
sistemas de coberturas para o clima subtropical
úmido de edificações residenciais em Foz do
Iguaçu, Paraná**

Patricia Soares Teixeira

Foz do Iguaçu, 2022.



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TERMOENERGÉTICA DE SISTEMAS DE
COBERTURAS PARA O CLIMA SUBTROPICAL ÚMIDO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS EM FOZ DO IGUAÇU, PARANÁ**

PATRICIA SOARES TEIXEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi

Foz do Iguaçu, PR
2022

PATRICIA SOARES TEIXEIRA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TERMOENERGÉTICA DE SISTEMAS DE
COBERTURAS PARA O CLIMA SUBTROPICAL ÚMIDO DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS EM FOZ DO IGUAÇU, PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi
UNILA

Prof.^a Dr.^a Helenice Maria Sacht
UNILA

Prof.^a Dr.^a Laline Elisangela Cenci
UFSM

Foz do Iguaçu, PR
setembro de 2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

T266

Teixeira, Patricia Soares.

Análise da eficiência termoenergética de sistemas de coberturas para o clima subtropical úmido de edificações residenciais em Foz do Iguaçu, Paraná / Patricia Soares Teixeira. - Foz do Iguaçu, 2022. 225 f.: il., color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu - PR, 2022. Orientador: Prof. Dr. Egon Vettorazzi.

1. Cobertura. 2. Eficiência Energética. 3. Desempenho Termoenergético. 4. EnergyPlus. 5. NBR 15575. I. Vettorazzi, Prof. Dr. Egon. II. Título.

CDU 699.86(816.2)

*“A gente tem que sonhar, senão as coisas
não acontecem”*
Oscar Niemeyer

RESUMO

As edificações construídas sem preocupações com os aspectos climáticos locais tem aumentado consideravelmente o consumo de energia no Brasil, e no mundo. Destaque para o setor residencial, um dos principais responsáveis pelo elevado consumo energético no país. Os sistemas de coberturas das edificações, se bem especificados, podem atuar como mecanismos que contribuem efetivamente para a melhoria da eficiência termoenergética das edificações. Com a finalidade de identificar as soluções de coberturas que auxiliam no conforto térmico e na redução do consumo energético das edificações, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência termoenergética de diferentes sistemas de coberturas, de uma edificação residencial, unifamiliar térrea, em Foz do Iguaçu, Paraná, classificada na Zona Bioclimática 3 - ZB3, clima subtropical úmido, Região Sul-Brasileira. Para tal, foi elaborado o projeto da edificação fundamentado no programa habitacional Casa Verde e Amarela. Com base na norma de desempenho NBR 15575-2021. Foram feitas as avaliações de desempenho termoenergético das coberturas, por meio de comparativos entre o percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), carga térmica de resfriamento (CgTR), aquecimento (CgTA), e total (CgTT), bem como, análises da temperatura operativa máxima (Tomáx) e mínima (Tomín), utilizando a simulação computacional com o *EnergyPlus*. O estudo avaliou a eficiência termoenergética de 32 composições de coberturas combinadas com 4 tipos de telhas, 1 tipo de forro, 1 tipo de isolante térmico, com e sem laje, totalizando 66 simulações. Os resultados apresentaram que as soluções de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético, são as que possuem a telha termoacústica, porém, as composições com as telhas convencionais (fibrocimento, cerâmica e aço trapezoidal) aliadas a manta aluminizada obtiveram resultados relativamente eficientes. De um modo geral, as composições sem laje apresentaram resultados mais eficientes comparadas as composições com laje, com exceção dos resultados das Tomín. Os resultados demonstraram que as coberturas têm uma contribuição significativa para a melhoria do desempenho termoenergético de uma habitação, especificamente para a região climática da cidade analisada. Houve uma diminuição considerável no consumo energético total da edificação para a melhor composição em relação ao modelo referência, chegando a 43% de redução de carga térmica total (RedCgTT) e um aumento considerável de 10,6% no PHFT, demonstrando, portanto, a relevância do sistema de cobertura para a edificação do ponto de vista termoenergético.

Palavras-chave: Cobertura; Eficiência Energética; Desempenho Termoenergético; *EnergyPlus*; NBR 15575.

ABSTRACT

Buildings built without concern for local climatic aspects have considerably increased energy consumption in Brazil, and in the world. Highlight for the residential sector, one of the main responsible for the high energy consumption in the country. Building roofing systems, if well specified, can act as mechanisms that effectively contribute to improving the thermoenergetic efficiency of buildings. In order to identify roofing solutions that help in thermal comfort and in the reduction of energy consumption in buildings, the objective of the present work was to evaluate the thermo-energetic efficiency of different roofing systems in a single-family residential building in Foz do Iguaçu, Paraná, classified in Bioclimatic Zone 3 - ZB3, humid subtropical climate, South Brazilian Region. To this end, the building project was designed based on the Casa Verde e Amarela housing program. Based on the performance standard NBR 15575-2021. The thermoenergetic performance evaluations of the coverings were made, through comparisons between the percentage of hours within the operating temperature range (PHFT), cooling thermal load (CgTR), heating (CgTA), and total (CgTT), as well as, analysis of the maximum (Tomáx) and minimum (Tomín) operating temperature, using computer simulation with EnergyPlus. The study evaluated the thermoenergetic efficiency of 32 roofing compositions combined with 4 types of tiles, 1 type of lining, 1 type of thermal insulation, with and without slab, totaling 66 simulations. The results showed that the most efficient roofing system solutions from a thermoenergetic point of view are those that have the thermoacoustic tile, however, the compositions with the conventional tiles (fiber cement, ceramic and trapezoidal steel) combined with the aluminized blanket obtained relatively efficient results. . In general, the compositions without slab presented more efficient results compared to the compositions with slab, with the exception of the Tomín results. The results showed that the roofs have a significant contribution to the improvement of the thermoenergetic performance of a house, specifically for the climatic region of the analyzed city. There was a considerable decrease in the total energy consumption of the building for the best composition in relation to the reference model, reaching a 43% reduction in total thermal load (RedCgTT) and a considerable increase of 10.6% in the PHFT, demonstrating, therefore, the relevance of the roofing system for the building from a thermoenergetic point of view.

Keywords: Roof; Energy Efficiency; Thermoenergetic Performance; EnergyPlus; NBR 15575.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1-1: Relação dos ganhos térmicos da cobertura de uma residência térrea, em relação a um sobrado e um edifício de cinco pavimentos.....23

Figura 1-2: Representação esquemática, gabarito baixo e gabarito alto.....24

Figura 1-3: Tipologia de edificação predominante de acordo as Grandes Regiões.....25

Figura 1-4: Quadro síntese da introdução e justificativa.....26

CAPÍTULO 2

Figura 2-1: Esquema simplificado das 5 etapas da revisão bibliográfica.....29

Figura 2-2: Formações geológicas naturais..32

Figura 2-3: Moradia africana, exemplo de moradia natural.....32

Figura 2-4: A Cabana Primitiva, imaginada em 1753, por Marc-Antoine Laugier em sua obra *Essai sur l'architecture* (ensaio da arquitetura).....33

Figura 2-5: Cabana Terra Amata, abrigo do Homo erectus, Nice – França (400.000 – 300.000 a.C.).....33

Figura 2-6: Dintel, lintel ou viga.....34

Figura 2-7: Arcos falsos ou adintelados..... 34

Figura 2-8: Arco, sistema autoportante.....34

Figura 2-9: Imagem esquemática, Círculo megalítico de Stonehenge, Wiltshire, Inglaterra (c. 2000 a.C.).....34

Figura 2-10: Túmulos Aquemênidas, Naksh-I-Rustam, Irã (c. 600 a.C.).....34

Figura 2-11: Caverna artificial neolítica, Micenas, conhecida como Tesouro de Atreu (c.

15 mil a.C.).....34

Figura 2-12: Zigurate de Urnammu, Ur, Iraque (cerca de 2125 a.C.).....35

Figura 2-13: Impressão artística dos Jardins Suspensos da Babilônia (cerca de 700 a.C.)..35

Figura 2-14: Corte longitudinal e Planta baixa, Templo Partenon da Acrópole de Atenas (447-438 a.C.).....36

Figura 2-15: Perspectiva da Acrópole de Atenas (450 a.C.).....36

Figura 2-16: Abóboda Cilíndrica.....36

Figura 2-17: Abóboda de Arestas.....36

Figura 2-18: Planta baixa que representa os vários pavimentos do Coliseu, Roma (72-80 d.C.).....37

Figura 2-19: Banhos romanos (século primeiro a.C.).....38

Figura 2-20: Antiga cidade de Herculano, a sudeste de Nápoles, (79 d.C.).....38

Figura 2-21: Planta baixa e corte longitudinal, Panteon de Roma (115 d.C.).....38

Figura 2-22: Elementos principais da construção gótica.....38

Figura 2-23: *École de Médecine*, Paris (1771).....39

Figura 2-24: Louvre (1776).....39

Figura 2-25: Fontaine, Galerie d'Orléans (1829).....39

Figura 2-26: Projeto Hospital, com ventilação na cobertura (1809).....40

Figura 2-27: Fábrica *Menier, Noisiel-sur-Marne*, (1871-72).....41

Figura 2-28: Estufas, Inglaterra Vitoriana (1850).....41

Figura 2-29: *Great Conservatory*, Joseph Paxton, Inglaterra (1836).....41

Figura 2-30: Palácio de Cristal, Joseph Paxton, Paris (1850-51).....41

Figura 2-31: Galeria das Máquinas, Paris

(1889).....	41	Figura 2-51: Cabana, exemplo de moradia - Tundra.....	56
Figura 2-32: Aquecedor solar <i>Climax</i> (1890).....	42	Figura 2-52: Cabana com estrutura diferente - Tundra.....	56
Figura 2-33: Aquecedor solar <i>Day and Night</i> (1911).....	42	Figura 2-53: Moradias no solo - Tundra.....	56
Figura 2-34: MIT <i>Solar House</i> (1939).....	42	Figura 2-54: Regiões da Alta Montanha.....	57
Figura 2-35: Willis Carrier e o motor do primeiro sistema de ar-condicionado do mundo (1902).....	43	Figura 2-55: Celeiros das montanhas, edificação dos Alpes (1951).....	57
Figura 2-36: <i>Vila Sovoye</i> , Poissy, Paris (1928-1829).....	44	Figura 2-56: Casa de Pedra do Valle Verzasca, Suíça.....	57
Figura 2-37: Terraço jardim <i>Vila Sovoye</i> , Poissy, Paris (1928-1829).....	44	Figura 2-57: Regiões de Clima Continental..	58
Figura 2-38: Pavilhão de música da <i>Federal Garden Exhibition</i> , Kassel, Alemanha (1955).	45	Figura 2-58: Moradias trogloditas feitas no solo, Xicun e Tunghwan, China.....	58
Figura 2-39: <i>Dance Pavilion Garden Exhibition</i> , Cologne, Alemanha (1957).....	45	Figura 2-59: (1) Construção rústica canadense (1920); (2) Casa de troncos russa; (3) Casa europeia.....	58
Figura 2-40: Fábrica da Tecelagem Parahyba S.A., Rino Levi, São José dos Campos (1953).....	46	Figura 2-60: Regiões do Clima Marinho.....	59
Figura 2-41: Fábrica da Tecelagem Parahyba S.A., Rino Levi, São José dos Campos (2015).....	46	Figura 2-61: Casas com cobertura de palha (1) Casa de campo, Longstock Hampshire, Londres; (2) Casa rural, Donegal, Irlanda.....	59
Figura 2-42: <i>Solar Shingle, Powerhouse</i> (2009).....	47	Figura 2-62: Regiões do Clima Mediterrâneo.....	60
Figura 2-43: <i>Solar Roof</i> , Tesla (2017).....	47	Figura 2-63: Casas Georgianas, Inglaterra (1800).....	60
Figura 2-44: <i>Solar Panel</i> , Tesla (2017).....	47	Figura 2-64: Inércia térmica utilizando o solo.....	60
Figura 2-45: Telha solar fotovoltaica <i>Intersolar South América</i> (2020).....	47	Figura 2-65: Casa-pátio, com sacadas, Marrocos.....	60
Figura 2-46: Mapa com as variações das classificações climáticas do SCC de Köppen-Geiger.....	53	Figura 2-66: Regiões do Clima Subtropical...	61
Figura 2-47: Diversificação das regiões climáticas.....	54	Figura 2-67: Casas Japonesas.....	61
Figura 2-48: Regiões do Ártico.....	55	Figura 2-68: Casa circular chinesa (1680)....	61
Figura 2-49: Iglu, exemplo de moradia - Clima polar.....	55	Figura 2-69: Regiões da Selva.....	62
Figura 2-50: Regiões de Tundra / Taiga.....	56	Figura 2-70: Edificação em Sumatra, Indonésia.....	62
		Figura 2-71: Edificação em Sulawesi, Indonésia.....	62
		Figura 2-72: Celeiros de arroz, Indonésia....	62
		Figura 2-73: Regiões da Savana.....	63

Figura 2-74: Casa com cobertura de palha, Shinaka, Madagascar.....	63	Figura 2-95: Componentes do subsistema de cobertura com telhado.....	78
Figura 2-75: Cobertura para proteção solar, Sadia Masli, Máli.....	63	Figura 2-96: Classificação das principais formas de telhados citadas acima.....	80
Figura 2-76: Casas transportáveis, Mudanza, Guínea.....	63	Figura 2-97: Configurações mais empregadas nos telhados de uma e duas águas.....	81
Figura 2-77: Regiões Estepe.....	64	Figura 2-98: Sistema de referência para análise da inclinação do telhado através da hipotenusa.....	81
Figura 2-78: Torre de ventos, Hyderabad, Paquistão.....	64	Figura 2-99: Tipos de apoios para as terças.....	83
Figura 2-79: Edificação histórica reconstruída em Dubai.....	64	Figura 2-100: Apoio das telhas.....	84
Figura 2-80: Ventilação dos “ <i>bagdir</i> ”, torres de vento em edificações sem pátios.....	64	Figura 2-101: Esforços atuantes na tesoura.....	84
Figura 2-81: Regiões de Deserto.....	65	Figura 2-102: Componentes da tesoura.....	85
Figura 2-82: Tendas, Qshgasi, Irã.....	65	Figura 2-103: Representação das calhas em coberturas com telhado aparente e coberturas com platibanda.....	86
Figura 2-83: Kashbah, Vale de Draa, Marrocos.....	65	Figura 2-104: Transferência de calor por meio de diferentes mecanismos.....	90
Figura 2-84: Comércio marroquino, ruas estreitas, cobertas.....	65	Figura 2-105: Transmissões de calor opção com forro ou laje e apenas com a cobertura...	91
Figura 2-85: Edificações de adobe, sudoeste americano.....	65	Figura 2-106: Esquema da abertura em beirais, para ventilação do ático.....	96
Figura 2-86: Tipos de sistemas de coberturas predominantes das edificações no Brasil, de acordo as Grandes Regiões.....	67	Figura 2-107: Esquema da abertura em beirais, para ventilação do ático.....	97
Figura 2-87: Dimensões da telha de fibrocimento adotada.....	71	Figura 2-108: Características dos procedimentos de avaliação de desempenho térmico.....	105
Figura 2-88: Exemplos de telhas cerâmicas categoria planas.....	74	Figura 2-109: Esquema das três etapas do programa <i>EnergyPlus</i>	107
Figura 2-89: Exemplos de telhas cerâmicas simples (capa-canal).....	74		
Figura 2-90: Exemplos de telhas cerâmicas categoria compostas.....	75		
Figura 2-91: Perfil das telhas metálicas sem isolamento (ondulada e trapezoidal).....	76		
Figura 2-92: Perfil das telhas metálicas com isolamento.....	76		
Figura 2-93: Dimensões da telha metálica trapezoidal adotada.....	77		
Figura 2-94: Dimensões da telha de aço termoacústica adotada.....	77		

CAPÍTULO 3

Figura 3-1: Etapas da metodologia adotada.....	114
Figura 3-2: Zoneamento bioclimático brasileiro.....	116
Figura 3-3: Zoneamento bioclimático brasileiro e demarcação da cidade de Foz do Iguaçu na ZB3.....	117

Figura 3-4: Localização geográfica da cidade e Foz do Iguaçu - PR.....	118
Figura 3-5: Temperatura de Bulbo Seco (TBS) e Umidade Relativa (UR).....	118
Figura 3-6: Carta solar de Foz do Iguaçu.....	119
Figura 3-7: Ângulos solares ao meio-dia.....	119
Figura 3-8: Relação da Temperatura de Bulbo Seco e da Radiação Solar durante o ano.....	119
Figura 3-9: Rosa dos Ventos para Foz do Iguaçu.....	120
Figura 3-10: Planta Baixa da edificação modelo real.....	123
Figura 3-11: Fachadas da edificação modelo real.....	123
Figura 3-12: Perspectivas da edificação modelo real.....	124
Figura 3-13: Percentual de radiação solar em cada fachada da edificação durante o ano..	124
Figura 3-14: Classificação dos ambientes, conforme a norma NBR 15575-1 (2021).....	125
Figura 3-15: Parede equivalente interna e externa.....	128
Figura 3-16: Laje pré-moldada de isopor equivalente.....	128
Figura 3-17: Cenários avaliados.....	136
Figura 3-18: Esquema simplificado das 5 principais etapas do método de modelagem da edificação e configuração dos parâmetros para simulação.....	137
Figura 3-19 Modelagem da edificação com as zonas térmicas.....	138
Figura 3-20: Zonas térmicas da edificação modelo.....	139
Figura 3-21: Quadro esquemático da análise horária dos dados de saída dos modelos com e sem o uso da ventilação natural, para o cálculo do PHFT _{APP} , da CgTR _{APP} e da CgTA _{APP}	145
Figura 3-22: Esquema simplificado das 4 principais etapas de avaliação para os níveis mínimo, intermediário e	

superior..... 150

CAPÍTULO 4

Figura 4-1: Esquema simplificado das 3 etapas da avaliação dos resultados.....	155
Figura 4-2: PHFT _{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....	156
Figura 4-3: Tomáx _{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....	158
Figura 4-4: Tomín _{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....	159
Figura 4-5: CgTR _{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....	160
Figura 4-6: CgTA _{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....	161
Figura 4-7: CgTT _{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....	162
Figura 4-8: PHFT _{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.....	165
Figura 4-9: Tomáx _{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.....	166
Figura 4-10: Tomín _{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.....	166
Figura 4-11: CgTR _{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.....	167
Figura 4-12: CgTA _{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.....	168
Figura 4-13: CgTT _{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.....	169
Figura 4-14: PHFT _{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal..	171
Figura 4-15: Tomáx _{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal..	172
Figura 4-16: Tomín _{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal..	173
Figura 4-17: CgTR _{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal..	174
Figura 4-18: CgTA _{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal..	174

- Figura 4-19:** $CgTT_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal...175
- Figura 4-20:** $PHFT_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica....177
- Figura 4-21:** $Tomáx_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica....177
- Figura 4-22:** $Tomín_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica....178
- Figura 4-23:** $CgTR_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica...179
- Figura 4-24:** $CgTA_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica....179
- Figura 4-25:** $CgTT_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica....180
- Figura 4-26:** $PHFT_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.....182
- Figura 4-27:** $Tomáx_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.....183
- Figura 4-28:** $Tomín_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.....183
- Figura 4-29:** $CgTR_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.....184
- Figura 4-30:** $CgTA_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.....185
- Figura 4-31:** $CgTT_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.....185
- Figura 4-32:** Análise comparativa entre o $PHFT$ e a $CgTT$ das composições.188
- Figura 4-33:** Melhores sistemas de coberturas, de acordo o desempenho térmico da edificação ($PHFT$) de acordo cada tipo de telha.....189
- Figura 4-34:** Melhores sistemas de coberturas, de acordo o desempenho energético da edificação ($CgTT$) de acordo cada tipo de telha.....190

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2-1: Normas vigentes referente a telha de fibrocimento.....71

Tabela 2-2: Norma vigente referente a telha cerâmica.....72

Tabela 2-3: Normas vigentes referente a telhas metálicas.....75

Tabela 2-4: Comparativo entre o poliuretano (PU) e o poliestireno (EPS).....77

Tabela 2-5: Normas vigentes referente a NBR 15220.....94

Tabela 2-6: Diretrizes construtivas relativas à transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para paredes externas e coberturas.....96

Tabela 2-7: Limites de aplicação do método simplificado para a cobertura, variáveis da UH.....99

Tabela 2-8: Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$105

CAPÍTULO 3

Tabela 3-1: Dados climáticos mensais de Foz do Iguaçu.....120

Tabela 3-2: Área das esquadrias divididas de acordo a classificação dos ambientes.....125

Tabela 3-3: Diretrizes construtivas relativas à transmitância térmica, para as paredes e coberturas para a ZB3.....126

Tabela 3-4: Resumo das propriedades dos materiais do Modelo Real.....127

Tabela 3-5: Características das esquadrias para o modelo real.....129

Tabela 3-6: Síntese da entrevista aplicada ao Diretor de análise e aprovação de projetos..130

Tabela 3-7: Sistemas de coberturas para as simulações formados a partir das combinações

das telhas com os materiais.....131

Tabela 3-8: Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao $PHFT_{UH}$132

Tabela 3-9: Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$133

Tabela 3-10: Critério da $CgTT_{UH}$ nos níveis de desempenho intermediário e superior.....134

Tabela 3-11: Propriedades térmicas dos materiais para o modelo de referência.....134

Tabela 3-12: Características das esquadrias para o modelo de referência.....135

Tabela 3-13: Características das zonas térmicas dos ambientes de permanência prolongada (APP) e ambientes de permanência transitória (APT) da edificação.....140

Tabela 3-14: Número de pessoas por ambiente.....140

Tabela 3-15: Padrão de ocupação diários.....141

Tabela 3-16: Taxa metabólica e fração radiante para os usuários.....141

Tabela 3-17: Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP.....141

Tabela 3-18: Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação.....141

Tabela 3-19: Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos APP.....142

Tabela 3-20: Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico intermediário.....148

Tabela 3-21: Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico superior.....149

Tabela 3-22: Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco.....151

Tabela 3-23: Faixas de temperaturas operativas para a determinação do

PHFT_{APP}.....151

Tabela 3-24: Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto ao PHFT_{UH}.....152

Tabela 3-25: Valores de temperatura operativa para o cálculo da CgTR_{APP} e da CgTA_{APP}....153

Tabela 3-26: Critério da CgTT_{UH} nos níveis de desempenho intermediário e superior.....154

CAPÍTULO 4

Tabela 4-1: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha de fibrocimento.....164

Tabela 4-2: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha de cerâmica.....170

Tabela 4-3: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal.....176

Tabela 4-4: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha Termoacústica.181

Tabela 4-5: Resultados geral das simulações com os 4 modelos de telhas.....186

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Quadro 2-1: SCC de Köppen-Geiger.....51

Quadro 2-2: Variações do SCC de Köppen-Geiger.....52

Quadro 2-3: Características básicas do modelo de telha adotado.....71

Quadro 2-4: Características técnicas do modelo de telha adotado.....72

Quadro 2-5: Características básicas do modelo de telha adotado.....75

Quadro 2-6: Características técnicas do modelo de telha adotado.....75

Quadro 2-7: Características básicas da telha de aço trapezoidal.....77

Quadro 2-8: Características básicas da telha de aço termoacústica.....78

Quadro 2-9: Características técnicas da telha de aço trapezoidal.....78

Quadro 2-10: Características técnicas da telha de aço termoacústica.....78

Quadro 2-11: Definição dos termos das partes de uma cobertura com telhado.....79

Quadro 2-12: Classificação das principais formas de telhados.....80

Quadro 2-13: Definição dos termos das partes da estrutura da cobertura.....85

Quadro 2-14: Modelo Real e Modelo de Referência.....101

Quadro 2-15: Avaliação do desempenho térmico para o atendimento do nível mínimo, intermediário e superior.....102

Quadro 2-16: Parâmetros para serem usados na simulação 1, com o uso da ventilação natural.....102

Quadro 2-17: Parâmetros para serem determinados a partir da simulação 2, sem o

uso da ventilação natural.....103

Quadro 2-18: Níveis de Desempenho Térmico mínimo (M); intermediário (I) e superior (S)..104

Quadro 2-19: Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à $C_{gTT_{UH}}$105

CAPÍTULO 3

Quadro 3-1: Resumo dos dados climáticos de Foz do Iguaçu.....121

Quadro 3-2: Simulação com o uso de ventilação natural para o modelo real e de referência.....142

Quadro 3-3: Critérios de temperatura.....142

Quadro 3-4: Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas nos APP e APT.....143

Quadro 3-5: Critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior.....148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas		uma faixa de temperatura operativa
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>	PHFT_{UH}	Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa da unidade habitacional
APP	Ambientes de Permanência Prolongada	PPGECI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
APT	Ambientes de Permanência Transitória	PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional	RAC-R	Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
BLAST	Building Loads Analysis and Thermodynamics	RTQ-C	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
CA	Consumo relativo de energia para aquecimento	RTQ-R	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
COPEL	Companhia Paranaense de Energia	TBS	Temperatura de Bulbo Seco
CR	Consumo relativo de energia para refrigeração	To	Temperatura Operativa
CgTA	Carga Térmica de Aquecimento	Tomáx_{APP}	Temperatura operativa anual máxima de cada APP
CgTR	Carga Térmica de Refrigeração	Tomín_{APP}	Temperatura operativa anual mínima de cada APP
CgTT	Carga Térmica Total	UH	Unidade Habitacional
CVA	Programa Casa Verde e Amarela	UR	Umidade Relativa
DOE	<i>Department of Energy</i>	UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
EPW	<i>Energy Plus Weather File</i>	ZB	Zona Bioclimática
GEE	Gases de Efeito Estufa	ZT	Zona Térmica
IEA	<i>International Energy Agency</i>		
ILATIT	Instituto Latino-Americano De Tecnologia, Infraestrutura E Território		
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia		
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina		
MEC	Ministério da Educação e Cultura		
MMA	Ministério do Meio Ambiente		
NBR	Norma Brasileira		
PHFT	Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa		
PHFT_{APP}	Percentual de horas de ocupação dos APP dentro de		

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	21
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E IMPORTÂNCIA	21
1.2 JUSTIFICATIVA.....	24
1.3 OBJETIVOS	26
1.3.1 Objetivo Geral	26
1.3.2 Objetivos Específicos.....	26
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 DEFINIÇÃO DO TERMO SISTEMA DE COBERTURA.....	30
2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE OS SISTEMAS DE COBERTURAS NA ARQUITETURA MUNDIAL.....	32
2.2.1 Período anterior a Revolução Industrial (3 milhões de anos a 10 mil a.C.)	32
2.2.2 Período pós-Revolução Industrial (século XVIII à XIX).....	38
2.2.3 Século XX.....	41
2.2.4 Século XXI - Atualidade	46
2.3 SISTEMAS DE COBERTURAS E O CLIMA	48
2.3.1 Clima	48
2.3.2 Sistema de Classificação Climática Köppen-Geiger.....	50
2.3.2 Regiões climáticas e os sistemas de coberturas	54
2.4 SISTEMAS DE COBERTURA UTILIZADOS NO BRASIL	67
2.4.1 Elementos constituintes em coberturas com telhados.....	68
2.4.2 Telhado	69
2.4.3 Estrutura.....	82
2.4.4 Captação	86
2.5 DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS DE COBERTURAS	87
2.5.1 Conforto Térmico.....	87

2.5.2	Normatizações	93
2.5.3	Simulação Computacional Termoenergética	106
2.5.4	Estudos de Desempenho Térmico relacionados a Cobertura	109
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA.....		113
3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROJETO ARQUITETÔNICO PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO		114
3.1.1	Programa Habitacional Casa Verde e Amarela	115
3.1.2	Zona Bioclimática de Foz do Iguaçu - PR	116
3.1.3	Definição do projeto arquitetônico do modelo real.....	121
3.1.4	Definição dos materiais construtivos do modelo real.....	126
3.1.5	Composição do modelo referência.....	134
3.1.6	Resumo dos cenários que serão avaliados	136
3.2 ETAPA 2: MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO		137
3.2.1	Método de avaliação segundo a NBR 15575-1.....	137
3.2.2	Modelagem da edificação	138
3.2.3	Configuração do uso e ocupação do modelo real.....	140
3.2.4	Modelagem com e sem o uso da ventilação natural.....	142
3.2.5	Dados de saída dos modelos com e sem o uso de ventilação natural ..	143
3.2.6	Arquivo climático utilizado.....	150
3.3 ETAPA 3: CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA OS NÍVEIS MÍNIMO, INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR DE ACORDO COM A NORMA DE DESEMPENHO ABNT NBR 15575-1		150
3.3.1	Requisito – Desempenho térmico da envoltória.....	151
3.3.2	Critério – Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT _{UH}).....	151
3.3.3	Critério – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH (Tomáx _{UH} e Tomín _{UH}).....	152
3.3.4	Critério – Carga térmica total da UH (CgTT _{UH})	153

CAPÍTULO 4. RESULTADOS	155
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA TELHA.....	156
4.1.1 Modelo real com a telha de fibrocimento.....	156
4.1.2 Modelo real com a telha cerâmica.....	164
4.1.3 Modelo real com a telha de aço trapezoidal	170
4.1.4 Modelo real com a telha termoacústica	176
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS GERAIS COMPARATIVOS ENTRE AS TELHAS	181
4.3 RELAÇÃO DOS SISTEMAS DE COBERTURAS MAIS EFICIENTES	188
CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	192
5.1 DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DOS SISTEMAS DE COBERTURAS AVALIADOS PARA FOZ DO IGUAÇU, ZB3.....	192
5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	194
5.3 TRABALHOS FUTUROS	194
REFERÊNCIAS	196
APÊNDICE A - SÍNTESE DA CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS DE COBERTURAS NO MUNDO.....	197
APÊNDICE B – PLANTA BAIXA COMPLETA	198
APÊNDICE C – TABELA DE PROPRIEDADE DOS MATERIAIS.....	199
APÊNDICE D – ENTREVISTA COM O DIRETOR DE ANÁLISE E APROVAÇÃO DE PROJETOS DA PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU (PMFI)	200
APÊNDICE E – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	204
APÊNDICE F - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE RESISTÊNCIA TÉRMICA, TRANSMITÂNCIA, CAPACIDADE TÉRMICA E ABSORTÂNCIA DOS SISTEMAS DE COBERTURAS	210
ANEXO A - SÍNTESE DA TABELA DO PROGRAMA CASA VERDE E AMARELA.....	214
ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN PARA O BRASIL	218

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E IMPORTÂNCIA

O Brasil está entre os dez maiores geradores e consumidores de energia elétrica do mundo, sendo o maior gerador e consumidor da América Latina. Dados do Balanço Energético Nacional (BEN), em 2021, ano base 2020, apontam que o setor residencial é o segundo maior consumidor energético do país, com cerca de 27,6% do consumo total, ficando atrás apenas do setor Industrial (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Estima-se que o consumo de energia elétrica por condicionadores de ar, no setor residencial, tenha aumentado cerca de 237% entre 2005 e 2017, isso se deve principalmente devido a necessidade de manter o conforto térmico no interior das edificações (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2018). Segundo dados da Agência Internacional de Energia “*International Energy Agency*” (IEA, 2018), resfriar as edificações é o que mais tem consumido energia nos edifícios, o que contribui cada vez mais com o aumento da demanda global de energia. De acordo com Schiermeier (2018) a crescente demanda pelo uso de ar-condicionado é impulsionada principalmente nas regiões mais quentes, constituídos por países em desenvolvimento, nos quais estão mais suscetíveis aos efeitos das mudanças climáticas. É um fato, o avanço tecnológico possibilitou trabalhar com edificações fechadas, cujo o clima interior se regula artificialmente, indiferente das características climáticas da região e que para manter um nível elevado de conforto, a arquitetura passou a não se adaptar mais ao entorno natural, isolando o clima interno e externo sem considerar o aumento no consumo de energia (BEHLING; BEHLING, 2002).

O estudo de Bezerra *et al.* (2021) “*Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households*”, publicado na revista científica *Energy and Buildings*, indicou que até 2035, a cada 100 residências 96 terão ar-condicionado no Brasil, com uma projeção no aumento da demanda energética de 125%. De acordo com a pesquisa, as regiões Sul e Sudeste terão os maiores aumentos na demanda de energia para resfriamento das edificações.

Apesar da demanda por energia ser um indicador de desenvolvimento econômico para o país, a intensificação da produção de energia elétrica requer que se construam novas usinas geradoras, infraestrutura de transmissão e distribuição,

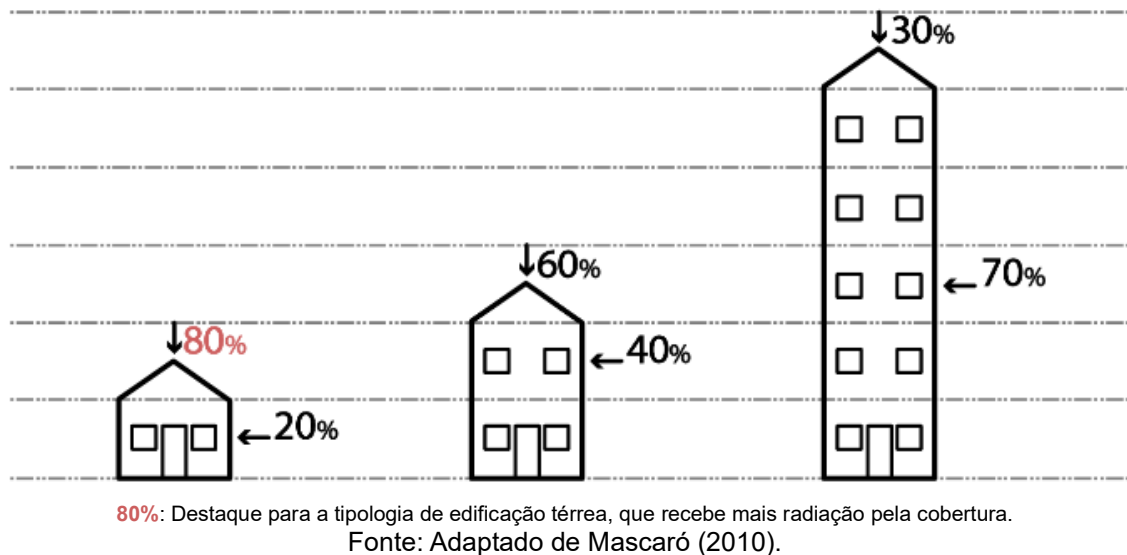
desencadeando problemas que impactam negativamente nas questões ambientais (BRAGA; FERREIRA, 2015). Outro fator decorrente do aumento na demanda energética são os problemas que ocorrem com a ausência de estrutura para garantir o abastecimento de eletricidade, como ocorreu no Brasil entre os anos de 2001 e 2002, nesse período houve a crise do “apagão”¹ que afetou o fornecimento e a distribuição de energia elétrica em todo o país (BRASIL, 2001). Vinte anos após o apagão, no ano de 2021, o Brasil passou por um novo risco de racionamento de energia, semelhante ao ocorrido em 2001, houve alta nos preços da conta de energia, não foi preciso cortes de energia, porém, a deficiência nas precipitações trouxe escassez hídrica, proporcionando preocupações nesse período (BRASIL, 2021).

Como visto anteriormente, o consumo energético das edificações está atrelado diretamente as regiões nas quais para se obter conforto térmico é necessário o uso de climatização artificial, sendo essa, uma condição factual na cidade de Foz do Iguaçu – PR. Segundo o estudo de Kramel *et al.* (2022), “Amplitudes Térmicas Diárias no Estado do Paraná e Níveis de Inércia Térmica para Habitações com Baixo Consumo Energético”, através de uma análise que teve como parâmetro os períodos de 2012 a 2019, a média das temperaturas máximas registradas na cidade foi de 28,04°C e a média das temperaturas mínimas registradas foi de 16,97°C, o que evidencia uma grande amplitude térmica na cidade (entende-se que, quanto maior a amplitude térmica de uma cidade, maior o desconforto térmico).

Sabe-se ainda que em edificações térreas, o maior percentual de ganho térmico ocorre principalmente por meio da cobertura, devido a cobertura ser a superfície mais exposta à radiação solar (SANTOS *et al.*, 2020). Nas edificações de um único andar, estima-se que 80% da radiação solar atinge a cobertura e 20% as fachadas. Essa diferença entre a quantidade de calor recebida pela cobertura e fachadas, está totalmente atrelada à altura da edificação, e a dimensão da superfície exposta diretamente a radiação; quanto mais baixa a edificação, maior será incidência de radiação sobre o plano horizontal (ver definição do termo “plano horizontal” Capítulo 2 – item 2.1.1), ou seja, maior será a carga térmica recebida pela cobertura, a situação inverte quando se trata de edifícios com mais de cinco andares (Figura 1-1) (MASCARÓ, 2010).

¹A expressão “apagão” refere-se a crise energética que ocorreu no Brasil entre os anos de 2001 e 2002. No início da crise, levantou-se a hipótese de que talvez seria necessário fazer longos cortes forçados de energia elétrica, por fim, as cidades adotaram diversas medidas de racionamento de energia (Brasil, 2001).

Figura 1-1: Relação dos ganhos térmicos da cobertura de uma residência térrea, em relação a um sobrado e um edifício de cinco pavimentos.



Para Cunha (2010), em um projeto de arquitetura existem várias soluções e estratégias que devem ser avaliadas para garantir a ambientação agradável dos espaços internos, o autor destaca que: “[...] as características da envolvente (transmitância térmica, fator de calor solar e atraso térmico), a orientação solar, a permeabilidade interna dos espaços, são fundamentais na consolidação da melhor ambiência interna possível” (CUNHA, 2010, p. 105).

O conjunto dos elementos construtivos que compõem a cobertura como um todo é denominado como Sistema de Cobertura (SC), este sistema exerce predominante influência na carga térmica transmitida aos ambientes, principalmente das casas térreas e último pavimento de sobrados ou prédios (LABEEE, 2016). Sabe-se que, o sistema de cobertura desempenha um papel importante em uma edificação, atua como proteção dos usuários, interferindo diretamente na durabilidade da construção, assegura estanqueidade às águas pluviais e contribui efetivamente para o conforto térmico (ABNT, 2021a), sendo a parte do edifício habitacional mais exposta à radiação solar direta, se tratando das edificações térreas (LABEEE, 2016). Portanto, considerando os argumentos anteriores, o estudo e avaliação de diferentes sistemas de coberturas, para um modelo de edificação residencial unifamiliar, para a cidade de Foz do Iguaçu – PR, apresenta grande relevância para o contexto atual.

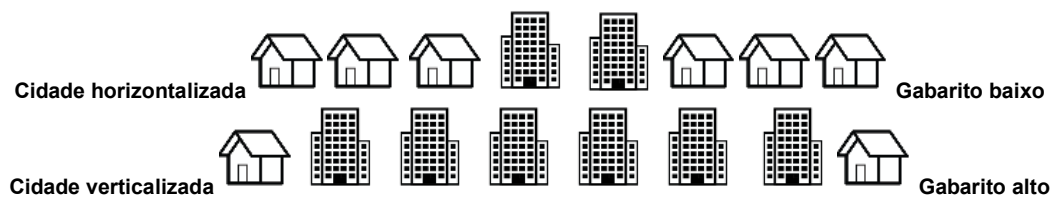
1.2 JUSTIFICATIVA

A demanda de energia em um edifício é influenciada por muitos fatores, dentre eles, destacam-se: a finalidade, uso, localização e os materiais empregados. As propriedades térmicas dos materiais empregados nas superfícies externas, paredes e coberturas, exercem grande influência na temperatura, por sua vez, influencia diretamente na quantidade de calor conduzida através das superfícies do edifício até o interior dos ambientes (KOLOKOTRONI *et al.*, 2018).

Segundo Kolokotroni *et al.* (2018), o Brasil, é um país que recebe alta intensidade de radiação solar ao longo do ano, acarretando em altas temperaturas, e como consequência desencadeia grande demanda de resfriamento das edificações devido as condições de superaquecimento. Em localidades em que os edifícios recebem alta energia solar, os níveis de radiação criam condições internas desconfortáveis, principalmente para as populações mais vulneráveis (BORGE-DIEZ *et al.*, 2012). Quando as pessoas utilizam o ar-condicionado para manter o conforto térmico, resulta no aumento da demanda de eletricidade, o que desencadeia impactos ambientais. Sendo assim, são necessários estudos relacionados a eficácia dos sistemas de coberturas e o desempenho perante as condições climáticas da região.

Outro fator importante no estudo, é a relação do gabarito² das edificações na cidade. Foz do Iguaçu, é considerada uma cidade de crescimento horizontal, ou seja, com gabarito baixo (Figura 1-2), conta com um índice médio de verticalização de 8,37% onde, 91,62% das edificações são em sua maioria térreas ou com menos de 5 pavimentos (SEBRAE, 2019). Conforme descrito anteriormente, a altura da edificação influencia diretamente no ganho térmico da edificação.

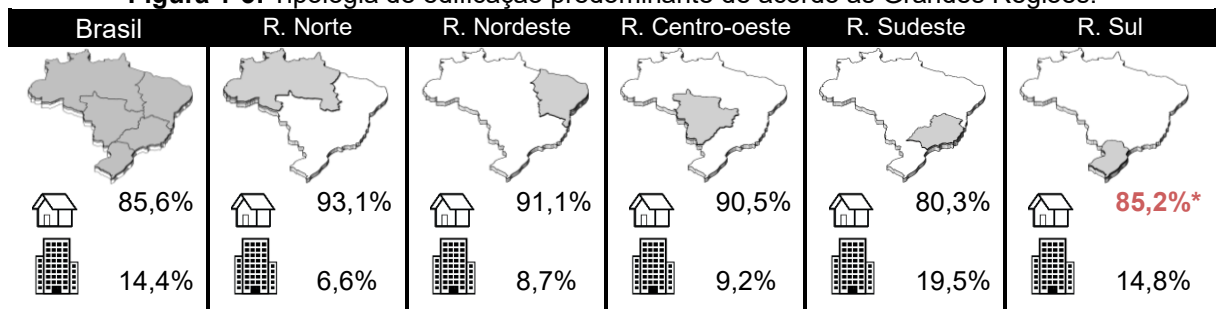
Figura 1-2: Representação esquemática, gabarito baixo e gabarito alto.



² Gabarito é a altura da edificação, a partir do nível do piso do térreo até a cobertura do último andar habitável (CÂMARA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2017).

Para o presente estudo, optou-se pela tipologia da edificação residencial e unifamiliar por dois fatores: O primeiro deles é o fato de no Brasil o setor residencial é o segundo setor que mais consome energia elétrica no país (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021); o outro fator, é a tipologia de habitação predominante, em todo o país, edificações unifamiliares representam uma média de 85,6% (62,0 milhões), segundo dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD). Em todas as Grandes Regiões, as unidades unifamiliares são predominantes, na região Sudeste (80,3%); região Norte (93,1%); região Centro-Oeste (90,5%); região Nordeste (91,1%) e a região Sul, em que será desenvolvida a pesquisa (85,5%) são unidades habitacionais unifamiliares (IBGE, 2020) (Figura 1-3).

Figura 1-3: Tipologia de edificação predominante de acordo as Grandes Regiões.



R.= Região; **85,2%*** destaque para a região Sul, na qual será desenvolvida a pesquisa.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com os dados do IBGE (2020).

Analisando os problemas supracitados: o país está entre os maiores consumidores e geradores de energia elétrica do mundo; o setor residencial é um dos principais no consumo energético do país, com ênfase para o aumento do consumo de energia elétrica das edificações residenciais com uso de ar-condicionado; e a relação direta do ganho térmico das edificações através das coberturas, o presente trabalho propõe um estudo que visa identificar as soluções de sistemas de coberturas que contribuem no conforto termoenergético das edificações.

Tal pesquisa tem como propósito avaliar o desempenho termoenergético dos sistemas de coberturas comumente utilizados na cidade de Foz do Iguaçu, por meio da simulação computacional e analisar a pertinência da escolha adequada dos sistemas de coberturas, quanto ao cenário térmico e energético para as edificações.

Por fim, segue um quadro síntese com os principais pontos que embasaram a introdução e justificativa do presente trabalho (Figura 1-4).

Figura 1-4: Quadro síntese da introdução e justificativa.

Brasil entre os 10 maiores	Setor Residencial	Aumento de 237%	Regiões Quentes	Degradação Ambiental	Tipologia das Edificações	Relação 80/ 20%
					 BR 85,6% Foz 91,62%	 80%
consumidores e geradores de energia elétrica no mundo	é o 2º que mais consome energia no país	no consumo de ar-condicionado entre 2005 e 2017	grande demanda por resfriamento das edificações	demanda por energia impactam no meio ambiente	no Brasil o predomínio é de residências unifamiliares térreas	80% da radiação solar atinge as coberturas em casas térreas

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a eficiência termoenergética de diferentes sistemas de coberturas, de uma edificação residencial, unifamiliar, inserida em Foz do Iguaçu, Paraná, clima subtropical úmido, classificada na Zona Bioclimática 3 (ZB3).

1.3.2 Objetivos Específicos

Para desenvolver a presente pesquisa, será necessário atender os seguintes objetivos específicos:



- a) Descrever um breve histórico do uso dos sistemas de coberturas no mundo;



- b) Definir e simular um modelo real, representativo de uma residência unifamiliar, para Foz do Iguaçu – PR, clima subtropical úmido, Zona Bioclimática 3 (ZB3);



- c) Analisar a eficiência termoenergética do modelo residencial, por meio de simulação computacional, testando diferentes sistemas de coberturas utilizados em Foz do Iguaçu;



- d) Elencar os tipos de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em 5 capítulos, do seguinte modo:

Capítulo 1: Trata-se da introdução geral do tema, aborda a descrição do problema, importância, justificativa e os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Este capítulo está destinado a revisão da literatura sobre o tema, embasando o conhecimento teórico. Descreve um breve histórico dos sistemas de coberturas no mundo e correlaciona os sistemas de coberturas com as regiões climáticas.

Disserta sobre o sistema de cobertura com telhado, suas funções, definições, tipos de telhas que serão empregadas no projeto, estrutura do telhado com cobertura e seus componentes. Aborda os requisitos energéticos exigidos para desempenho térmico e as normatizações existentes referentes a cobertura. Assim como, uma breve revisão da literatura sobre simulação computacional termoenergética em edificações, sobre o programa *EnergyPlus* e sobre estudos de desempenho térmico relacionados a cobertura.

Capítulo 3: Apresenta as etapas da metodologia que foi utilizada na pesquisa, os métodos para avaliar a eficiência termoenergética de diferentes sistemas de coberturas, para uma residência unifamiliar inserida na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, contexto climático sul-brasileiro, clima subtropical úmido. Aborda os critérios para a elaboração do projeto do modelo para o estudo representativo, denominado modelo real, e as configurações dos parâmetros para a simulação computacional. Também trata dos critérios de avaliação do modelo real, para os níveis mínimo, intermediário e superior para a norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021b) usando o modelo real e o modelo de referência.

Capítulo 4: Apresenta os resultados das simulações realizadas com os diferentes sistemas de coberturas, descrevendo os desempenhos das variadas composições de coberturas simuladas, conforme a NBR 15575-1.

Capítulo 5: Apresenta as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em um primeiro momento, o Capítulo 2, iniciará com a definição do termo Sistemas de Coberturas (SC), para que haja entendimento em relação ao seu significado, as funções, bem como as definições utilizadas neste trabalho. Na sequência, será apresentado o breve histórico sobre os SC. Foram realizadas pesquisas da história dos sistemas de coberturas no contexto mundial, visando verificar as variadas formas, materiais e aplicações das coberturas; correlacionando com cada período da história e com o clima. É importante conhecer a história para ampliar o entendimento da evolução dos sistemas de coberturas, os novos conceitos e as soluções que estão sendo pensadas para reduzir o consumo de energia das edificações.

A revisão bibliográfica foi desenvolvida em cinco etapas, as quais foram ilustradas na Figura 2-1 e detalhadas nos itens subsequentes.

Figura 2-1: Esquema simplificado das 5 etapas da revisão bibliográfica.

	1	2	3	4	5
ETAPA	Definição do termo sistema de cobertura	Contextualização histórica sobre os sistemas de coberturas na arquitetura mundial	Sistemas de coberturas e o clima	Sistemas de cobertura utilizados no Brasil	Desempenho térmico dos sistemas de coberturas
OBJETIVO	Definir o termo sistema de cobertura e apresentar as funções da cobertura	Descrever um breve histórico da evolução dos sistemas de coberturas no mundo	Relacionar os sistemas de coberturas com algumas das regiões climáticas, utilizando o sistema de classificação climática (SCC) de Köppen-Geiger	Definir o tipo de sistema de cobertura mais utilizado no Brasil	Fazer uma análise da relação do desempenho e conforto térmico com os sistemas de coberturas
RESULTADO	Os sistemas de coberturas (SC) podem ser definidos como o conjunto dos elementos construtivos, materiais e tecnologias que compõem a cobertura de uma edificação	Ampliar o conhecimento, estudando as variadas formas, materiais e aplicações empregadas nas coberturas correlacionando as com cada período da história	Definição e conceito de clima; Apresentação e funcionalidade do SCC Köppen-Geiger; Relação dos sistemas de coberturas com algumas regiões climáticas	O Sistema de cobertura com telhado, é o tipo de sistema mais empregado no Brasil. Estudo dos elementos desse tipo de sistema de cobertura	Estudos referentes ao tema conforto térmico e a cobertura; normatizações relacionadas (15220; INI-R e 15575) e simulação computacional termoenergética

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

2.1 DEFINIÇÃO DO TERMO SISTEMA DE COBERTURA

Segundo a NBR 15575-1, Norma de Desempenho Térmico (ABNT, 2021b), sistema de cobertura (SC) é considerado:

Conjunto de elementos ou componentes, dispostos no topo da construção, com a função de assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, bem como auxiliar na proteção dos demais sistemas da edificação habitacional ou dos elementos e componentes da deterioração por agentes naturais (ABNT, 2021a, p. 3).

Com base na informação acima, os sistemas de cobertura (SC) podem ser definidos como o conjunto dos elementos construtivos, materiais e tecnologias que compõem a cobertura de uma edificação. Quando compostos por telhado, conta com a estrutura do telhado, além de acabamentos pertinentes ao tipo de telha.

Sendo o SC, a parte do edifício habitacional mais exposta à radiação direta do sol, exercendo influência direta na carga térmica transmitida ao interior dos ambientes, principalmente em casas térreas e no último pavimento dos sobrados ou prédios, interfere diretamente no aquecimento dos ambientes e no consumo de energia com o uso de equipamentos de resfriamento e aquecimento, como ventiladores e ar-condicionados. Quando previsto em projeto, os SC podem interagir com os sistemas de aquecimento solar de água, sistemas de instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos, sistemas de instalações hidrossanitárias, sistemas de proteção de descargas atmosféricas, sistemas de isolamento térmica, entre outros (LABEEE, 2016).

Devido à falta de igualdade nos significados de termos técnicos na literatura com relação as definições de cobertura e telhado, serão apresentados alguns conceitos que são frequentemente utilizados em citações e as que serão empregadas neste trabalho.

De acordo com Reis e Souza (2007), é comum os termos cobertura e telhado serem utilizados na literatura técnica como se fossem sinônimos, de forma redundante. Junior e Salgado (2018), definiram a cobertura como sendo a parte superior da construção composta pelas telhas, estruturas para sustentação do telhado, estrutura principal, estrutura responsável para manter a estabilidade do conjunto e, sistema de captação de águas pluviais. Moliterno (2011, p. 2), explica que “[...] nem todo sistema de proteção superior de um edifício, obrigatoriamente, constitui-

se num telhado como, por exemplo, lajes com espelho d'água, terraços e jardins suspensos.” Pode-se identificar ainda sistemas de coberturas que diferem de telhados e lajes planas, como coberturas com cúpulas, coberturas tensionadas com membranas, dentre outras.

Segundo a NBR 15310 (ABNT, 2009), telhado é denominado como a parte do sistema de cobertura de uma edificação constituída pelas telhas e acessórios. Cardoso (2000), divide a cobertura em dois grupos principais: lajes de concreto impermeabilizadas e coberturas em telhado.

Após analisar os diferentes conceitos envolvendo as coberturas e telhados, para não ocorrer imprecisão em relação aos termos, neste trabalho, serão utilizadas as seguintes definições:

- a) Sistema de Cobertura ou Cobertura: conjunto de elementos ou componentes de fechamento no superior da edificação (ABNT, 2021a);
- b) Telhado: elemento constituído por um conjunto de telhas de materiais diversos (fibrocimento, cerâmica, concreto, metálica, termoacústica, etc.) (ABNT, 2009);
- c) Laje Plana de cobertura: fechamento superior da edificação, constituído apenas da laje impermeabilizada com declividade menor ou igual a 5 % (ABNT, 2021a) (REIS; SOUZA, 2007);
- d) Planos Horizontais: em uma edificação, são terminologias designadas as coberturas (LABEEE, 2016);
- e) Planos Verticais: em uma edificação, os planos verticais são designados as paredes (LABEEE, 2016).
- f) Água, pano ou vertente: cada um dos planos inclinados que constituem um telhado (ABNT, 2021a).

Muito mudou quanto aos materiais empregados, técnicas construtivas, tipos de acabamentos, elementos estruturais, características e formas das coberturas, o que permaneceu até os dias de hoje, é a sua função principal, proteção. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1988, p. 1), a cobertura é a “[...] parte superior da edificação que a protege das intempéries [...]”. Salgado (2018), comenta que a finalidade da cobertura é proteger a obra contra as intempéries e ações da natureza. Rossignolo e Fabrício (2004), consideram as coberturas como estruturas que se definem pela forma, estilo arquitetônico e pelas seguintes funções: Utilitária: isolamento térmico e acústico, impermeabilidade e

leveza; Estética: aspectos da forma, textura e coloração; Econômica: durabilidade e custo da solução adotada.

2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA SOBRE OS SISTEMAS DE COBERTURAS NA ARQUITETURA MUNDIAL

A seguir, será apresentado, um breve histórico da evolução dos sistemas de coberturas no mundo. A pesquisa será apresentada de forma cronológica, parte dos primórdios da humanidade, desde a época das cavernas até os tempos atuais.

2.2.1 Período anterior a Revolução Industrial (3 milhões de anos a 10 mil a.C.)

Desde os tempos mais remotos de sua existência, o ser humano buscou meios para assegurar a sua sobrevivência e se proteger dos rigores climáticos, adotando várias estratégias arquitetônicas com diferentes tipos de coberturas (SALGADO, 2018). A resposta ao clima é uma das principais razões para as diferenças regionais na arquitetura (LECHNER, 2014). À medida que o homem foi avançando sobre novos territórios, teve que desenvolver tecnologias para assegurar a sua sobrevivência as diferentes regiões climáticas. Segundo Behling e Behling (2002), o homem pré-histórico, enfrentou as adversidades climáticas com uma “segunda ou terceira pele”, a segunda pele trata-se de utilizar uma vestimenta com peles de animais, e a terceira pele, é relativa a um abrigo, utilizando inicialmente as cavernas como abrigos naturais para se proteger principalmente das intempéries (Figura 2-2). Montenegro (1984), descreve o homem pré-histórico manuseando materiais local, construindo alguns abrigos provisórios, utilizando de cobertura esteiras trançadas de palha, folhas, galhos de árvores e madeira (Figura 2-3).

Figura 2-2: Formações geológicas naturais.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-3: Moradia africana, exemplo de moradia natural.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Na ausência das formações geológicas, havia outras soluções que eram aplicadas para compor um abrigo e se proteger das intempéries, como à utilização das cabanas (Figuras 2-4 e 2-5). Avaliadas como as primeiras residências construídas por seres humanos (BEHLING; BEHLING, 2002), consideradas edificações improvisadas, muito semelhante as barracas atuais, de estrutura triangular, suas paredes e cobertura eram envolvidas por um mesmo elemento, folhas, fibras ou pele (PEREIRA, 2010).

Figura 2-4: A Cabana Primitiva, imaginada em 1753, por Marc-Antoine Laugier em sua obra *Essai sur l'architecture* (ensaio da arquitetura).



Fonte: Pereira (2010).

Figura 2-5: Cabana Terra Amata, abrigo do Homo erectus, Nice – França (400.000 – 300.000 a.C.).

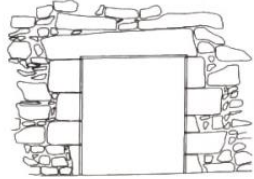


Fonte: Behling e Behling (2002).

Há cerca de 10 mil anos atrás, o planeta Terra passou por uma brusca mudança climática, o clima interglacial se atenuou no início do período Neolítico, o ser humano teve que se ajustar a um novo ambiente e clima, ocasionando uma série de modificações nos hábitos do homem pré-histórico, como sair das cavernas e desenvolver atividades externas (PEREIRA, 2010).

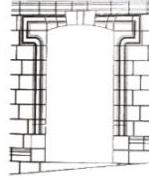
Escavações revelaram casas feitas anteriores a 8000 a.C. (GLANCEY, 2007) provável período em que as cabanas primitivas passaram por um processo evolutivo, transformando-se em casas fixas. Houve o desmembramento entre a cobertura e os fechamentos verticais, além das paredes autoportantes, surgem os suportes verticais, denominados colunas, pilares e as pilastras, cuja principal função é transmitir a carga da cobertura para o solo. Quanto as estruturas das coberturas, existiam duas configurações, adintelada, um elemento horizontal, cuja função é estruturar um vão, a partir do seu apoio direto em dois suportes (Figuras 2-6 e 2-7), e a estrutura em arco, uma cobertura curva, que permite cobrir grandes vãos (Figura 2-8) (PEREIRA, 2010).

Figura 2-6: Dintel, lintel ou viga.



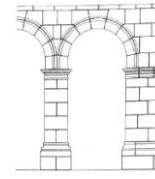
Fonte: Pereira (2010).

Figura 2-7: Arcos falsos ou adintelados.



Fonte: Pereira (2010).

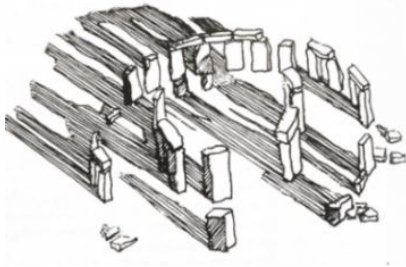
Figura 2-8: Arco, sistema autoportante.



Fonte: Pereira (2010).

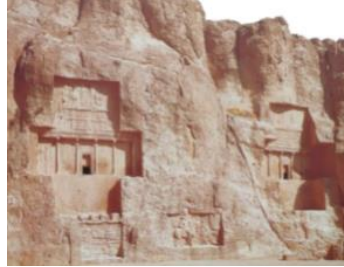
Pereira (2010), retrata que a primeira relação do homem com a arquitetura começou de fato com a cabana, porém, segundo o autor, é válido analisar o menir³, o dólmen ou trilitos⁴ (Figura 2-9) e a caverna, como arquitetura primária, iniciais da humanidade. As primeiras manifestações arquitetônicas com intervenção direta do homem, foram os sepulcros (Figuras 2-10 e 2-11), eram escavações diretas nas rochas, formando uma cavidade interna, divididas em cavernas totêmicas⁵ e as cavernas funerárias⁶. As cavernas naturais eram utilizadas apenas como abrigo, já os sepulcros eram utilizados para cultos religiosos (PEREIRA, 2010).

Figura 2-9: Imagem esquemática, Círculo megalítico de Stonehenge, Wiltshire, Inglaterra (c. 2000 a.C.).



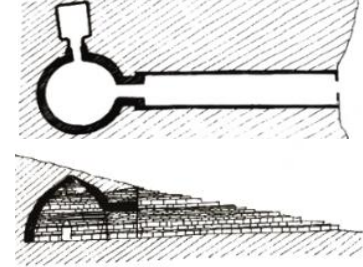
Fonte: Pereira (2010).

Figura 2-10: Túmulos Aquemênidas, Naksh-I-Rustam, Irã (c. 600 a.C.).



Fonte: Glancey (2007).

Figura 2-11: Caverna artificial neolítica, Micenas, conhecida como Tesouro de Atreu (c. 15 mil a.C.).



Fonte: Pereira (2010).

As primeiras civilizações nasceram por volta de 3.500 a.C. (JAGUARIBE, 2007). Assim como no vale do Nilo, a Mesopotâmia foi um dos lugares onde se desenvolveram algumas das mais antigas sociedades humanas, formando as civilizações primárias, mesopotâmica e egípcia (GLANCEY, 2007). Diferente do vale do Nilo, na Mesopotâmia havia escassez de pedras, no lugar, utilizava-se o tijolo de

³ Menir é considerado o monumento mais primitivo, monolítico, cravado verticalmente no solo, sendo uma única pedra vertical (PEREIRA, 2010).

⁴ Dólmen ou Trilito, monumentos megalíticos, com duas pedras fixadas verticalmente no solo, nas quais sustentam uma terceira pedra na posição horizontal (PEREIRA, 2010).

⁵ Cavernas totêmicas, são construções ou escavações, em pró de cultos religiosos, localizadas no subsolo ou na superfície (PEREIRA, 2010).

⁶ Cavernas funerárias, fazem referência à *casa dos mortos*, pensada para a eternidade e lavrada em enormes blocos de pedras, constitui a arquitetura megalítica (PEREIRA, 2010).

barro seco nas construções das residências (STRICKLAND, 2014). Osmundson (1999) comenta que um dos primeiros registros do emprego de coberturas verdes surgiu por volta de 2500 a.C. na Mesopotâmia, entre os rios Tigre e Eufrates. A técnica foi aplicada nos Zigurates. Martínez (2005) complementa, à utilização da cobertura como um espaço para ser utilizado e vivido remonta aos construtores vernaculares. O clima, a cultura e as possibilidades locais eram o ponto de partida, conforme suas necessidades e recursos naturais. Os Zigurates (Figura 2-12) eram um dos maiores e mais importantes templos primitivos, as paredes e a cobertura possuíam uma única estrutura, feitos de tijolos de barro, com o plantio de vegetações nas camadas das coberturas (GLANCEY, 2007). Posteriormente, foi construída uma das Sete Maravilhas do Mundo Antigo, os Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 2-13), cerca de 700 a.C. às margens do rio Eufrates (STRICKLAND, 2014). Segundo Glancey (2007), os Jardins Suspensos, eram compostos por terraços jardins, construídos sobre coberturas com estruturas abobadadas, em andares, dando a sensação de estarem suspensos. Como as pedras eram muito raras no território da Babilônia, grande parte da construção da estrutura dos Jardins Suspensos eram sustentadas por tijolos, incluindo a cobertura.

Figura 2-12: Zigurate de Urnammu, Ur, Iraque (cerca de 2125 a.C.).



Fonte: Glancey (2007).

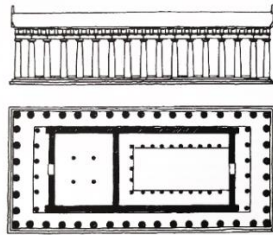
Figura 2-13: Impressão artística dos Jardins Suspensos da Babilônia (cerca de 700 a.C.).



Fonte: Glancey (2007).

No primeiro milênio a.C. surgiram em todo o nordeste da Espanha os povoados fortificados, os *castros* e celtas, cujas moradias, eram em formato circular, cobertas por palha, sustentadas por vigas de madeira. Na Grécia Antiga, por volta de 800 anos a.C., as construções mais comuns eram compostas por pedras ou tijolos de barro. As grandes obras, como o templo grego Partenon – *Parthenon*, projetado pelos arquitetos Ictinos e Calícrates 447-438 a.C. (PEREIRA, 2010) (Figura 2-14 e 2-15), já se assemelhavam ao sistema moderno de pilares, vigas e laje, através do sistema estrutural trilítico composto de colunas, arquitraves e cobertura (SANTOS; OLIVEIRA, 2008).

Figura 2-14: Corte longitudinal e Planta baixa, Templo Partenon da Acrópole de Atenas (447-438 a.C.).



Fonte: Strickland (2014).

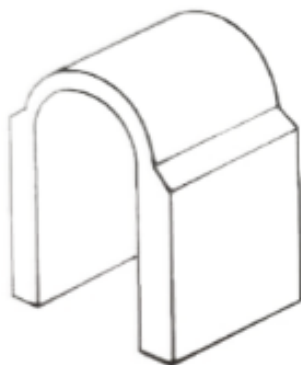
Figura 2-15: Perspectiva da Acrópole de Atenas (450 a.C.).



Fonte: Strickland (2014).

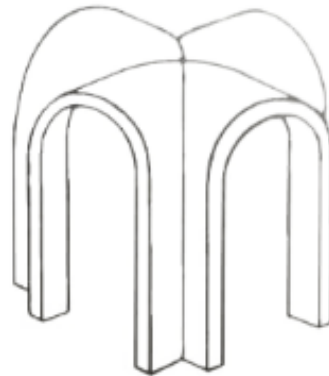
Posteriormente o Império Romano em seu auge, estendia-se da Inglaterra ao Egito e Espanha ao sul da Rússia, abrangia todo o mundo ocidental conhecido. Marcados pelo forte processo de miscigenação cultural, os arquitetos romanos absorveram os elementos das culturas mais antigas, principalmente da Grécia. Os construtores romanos desenvolveram novas formas de construções e estruturas das coberturas, como a abóboda e o domo, sendo os pioneiros no uso do concreto. Com o emprego da abóboda cilíndrica (formando um teto em semicírculo) e a abóboda de aresta (duas abóbodas cilíndricas da mesma altura, em inserção de modo a formar um ângulo reto) (Figuras 2-16 e 2-17) possibilitou a flexibilização dos projetos e cobrir grandes vãos sem a necessidade de suportes internos (STRICKLAND, 2014).

Figura 2-16: Abóboda Cilíndrica.



Fonte: Strickland (2014).

Figura 2-17: Abóboda de Arestas.

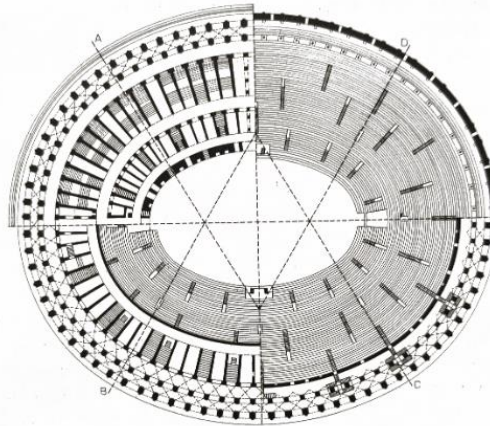


Fonte: Strickland (2014).

O anfiteatro Flaviano ou Coliseu (72-80 d.C.) (Figura 2-18), é uma edificação de lazer característica da arquitetura romana, dedicado aos combates, lutas e espetáculos. O anfiteatro tem a estrutura de um teatro, porém, em dois pavimentos, possui planta elíptica, rodeado de arquibancadas. O centro ou arena, é destinado ao espetáculo. Embaixo da arena, no pavimento inferior, existem numerosas circulações, câmaras e escotilhas que eram destinadas para as apresentações com os animais,

gladiadores e artistas (PEREIRA, 2010). O Coliseu de Roma, é um exemplo de engenhosidade nos sistemas de coberturas e nos demais sistemas, incorporando elementos arquitetônicos cinéticos na edificação, nos quais destacam-se: os sistemas de coberturas retráteis, pisos com elevadores e os alçapões (RIBERICH, 2009).

Figura 2-18: Planta baixa que representa os vários pavimentos do Coliseu, Roma (72-80 d.C.).



Fonte: Strickland (2014).

No primeiro século a.C., o arquiteto romano Vitrúvio aconselhou que os desenhos das casas deveriam ser projetados considerando a região climática, tomando notas do país e do clima local. Nesse mesmo período, os banhos romanos passaram a ser projetados para receber luz solar através de uma pequena abertura na cobertura (Figura 2-19). Por volta do primeiro século d.C. os romanos já estavam empregando nas coberturas das edificações dos mais ricos o vidro ou *mica*⁷, formando uma lâmina fina de pedra transparente, atuando como retentor do calor solar, batizada como *heliocaminus* (forno solar), a edificação esquentava muito mais que as demais, devido ao aquecimento retido pela cobertura (BUTTI; PERLIN, 1985).

A partir do ano de 79 d.C. o principal material empregado nas coberturas de toda a população era a telha de barro e o concreto nas varandas e sacadas (Figura 2-20). O emprego do concreto na cobertura permitiu a construção plástica como a obra do Panteão, na Roma Antiga, em 115 d.C. (Figura 2-21), com uma cúpula de concreto de 43,2 m de diâmetro, aberta em seu centro, com um óculo de 9 metros de diâmetro, no qual permite tanto a entrada de luz natural, quanto a chuva no interior do Panteão (GLANCEY, 2007). O próximo grande avanço da arquitetura das coberturas, surge na

⁷ *Mica*, é considerada um grupo de minerais, com alta resistência dielétrica e excelente estabilidade química (BUTTI; PERLIN, 1985).

França, em 1140, na idade Média, com o estilo gótico, superando a arquitetura clássica em termos de engenharia aplicada e tecnologia das coberturas (PEREIRA, 2010). Segundo Strickland (2014, p. 28), “o que tornou possível a catedral gótica foram dois desenvolvimentos da engenharia: abóboda com traves e suportes externos chamados arcobotantes, ou contrafortes” (Figura 2-22).

Figura 2-19:
Banhos romanos
(século
primeiro a.C.).



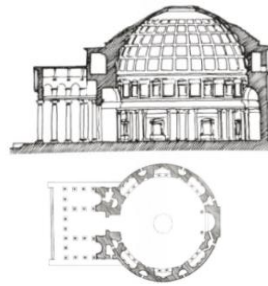
Fonte: Butti e Perlin
(1985).

Figura 2-20:
Antiga cidade de
Herculano, a sudeste de
Nápoles, (79 d.C.).



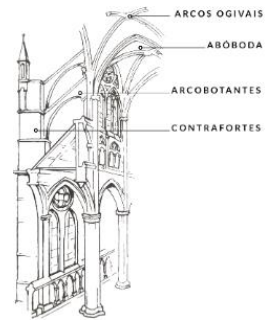
Fonte: Glancey
(2007).

Figura 2-21:
Planta baixa e corte
longitudinal, Panteon
de Roma (115 d.C.).



Fonte: Pereira
(2010).

Figura 2-22:
Elementos principais
da construção gótica.



Fonte: Adaptado de
Strickland (2014).

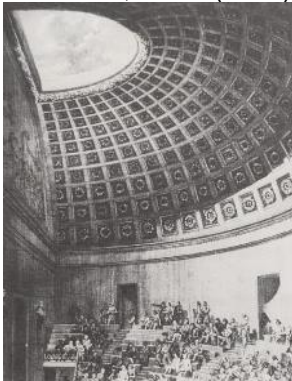
O emprego do metal em coberturas se inicia em 1700, quando o cobre e o chumbo se tornaram as principais escolhas. No Canadá, no século XVIII, passou a ser empregado o ferro em folha de flandres comumente conhecido como telhado de estanho. Mais tarde, o presidente dos Estados Unidos, Thomas Jefferson, tornou-se um defensor da cobertura de estanho. Tal cobertura era leve, de baixa manutenção e relativamente barata, o que a fez permanecer popular até o século XIX. Em 1727, o primeiro projeto aplicado a telha de cobre foi nos Estados Unidos, com a Igreja de Cristo na Filadélfia, as cúpulas foram cobertas de cobre. Durante a Guerra Revolucionária Americana (1775–1783), a chapa metálica foi desenvolvida, o político Robert Morris usou em sua mansão na Filadélfia (IRONCLAD ROOFING, 2021).

2.2.2 Período pós-Revolução Industrial (século XVIII à XIX)

Em 1750 irrompeu na Inglaterra a Revolução Industrial, as novas tecnologias permitiram aos arquitetos e engenheiros superar os limites impostos, ocasionando mudanças a nível mundial em todos os sistemas construtivos e técnicas até então já empregadas. Nesse período havia projetos que refletiam o estilo barroco na arquitetura, empregado inclusive o óculo na cobertura, proporcionando o efeito de luz

abstrata, desconsiderando à utilização das janelas nas fachadas, como exemplo a *En la École de Médecine* de Paris (Figura 2-23), do arquiteto francês Jacques Gondoin. A era industrial proporcionou a produção e o uso de diversos tipos de materiais, transformando as cidades e a arquitetura (PEREIRA, 2010). Surge nesse período, a energia a vapor e o alto-forno de coque que permitiram abastecer o mundo com os materiais mais consumidos no momento, o ferro e o cimento (GLANCEY, 2007). O ferro passou a ser empregado nas edificações, porém, era utilizado mais em edifícios com finalidades transitórias, como em galerias, salões de exposições, estações ferroviárias e pontes (STRICKLAND, 2014). Em 1776, *Soufflot* propôs uma cobertura com armação de ferro forjado para uma parte do *Louvre* (Figura 2-24). A partir desse efeito, iniciou-se várias construções utilizando na cobertura o ferro forjado, como em 1786, *Palais Royal* em 1790, o *Royal* foi combinado uma cobertura de ferro com o *Théâtre Français* uma estrutura côncava. Em 1829, o ferro corrugado foi patenteado na Inglaterra, às chapas metálicas utilizadas nas coberturas adquiriram rigidez devido a ondulação do formato, o que permitiu maior cobrimento da área de cobertura com o uso de esquadrias mais leves, reduzindo o tempo de instalação e os custos com mão de obra (IRONCLAD ROOFING, 2021). A *Galerie d'Orléans de Fontaine*, no *Palais Royal* também foi construída em 1829 (Figura 2-25), sendo a primeira galeria a ter uma abóboda de berço envidraçada, com estrutura em ferro fundido (FRAMPTON, 2015).

Figura 2-23: *École de Médecine*, Paris (1771).



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-24: Louvre (1776).



Fonte: Blot (2020).

Figura 2-25: Fontaine, Galerie d'Orléans (1829).

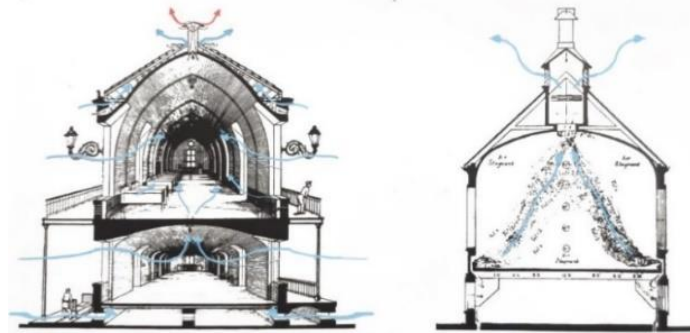


Fonte: Frampton (2015).

Em 1809 os arquitetos Tenon e Poyet, propuseram uma arquitetura pensada no bem estar humano, aproveitando ao máximo a luz e ventilação natural. Fizeram o projeto de um hospital introduzindo sistemas de ventilação por dutos externos que

passavam por baixo do solo, renovando o ar do interior dos ambientes, através da entrada e saída do ar, com o efeito chaminé na cobertura, além da ventilação promovida no interior dos ambientes, no projeto, foi introduzido a ventilação na cobertura do telhado (Figura 2-26) (BEHLING; BEHLING, 2002).

Figura 2-26: Projeto Hospital, com ventilação na cobertura (1809).



Fonte: Behling e Behling (2002).

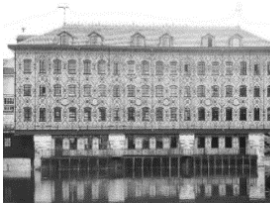
No século XIX surgiram algumas variações nas coberturas. Na França, o arquiteto francês François Mansard, inspirado nas obras italianas, populariza o uso das mansardas⁸ (COLE, 2013) (Figura 2-27). Na Inglaterra, durante o século XIX, a estufa passou a ser empregada nas casas dos mais ricos, vista como objeto de luxo. Além da estética, as estufas proporcionavam luz natural e aquecimento aos salões através das coberturas envidraçadas (Figura 2-28).

Em 1836, Joseph Paxton constrói na Inglaterra uma estrutura totalmente envidraçada, o *Great Conservatory* (Figura 2-29) (BEHLING; BEHLING, 2002). A primeira cobertura de zinco, produzida na França, em 1837. Esse metal com tratamento galvanizado ofereceu proteção contra a ferrugem. Posterior foi utilizado em galpões de trens, correios, prédios governamentais e fábricas (IRONCLAD ROOFING, 2021). Em 1850 surge nos EUA e na Inglaterra, as primeiras construções de *lighting steel frame*, ou estrutura em aço leve, em obras de caráter experimental, esse sistema inovou na questão da agilidade do processo construtivo, pela leveza e processo de construção. Nesse sistema as paredes e a cobertura formam uma estrutura monolítica. (ALLEN, 2006). Posteriormente, Paxton surge com a obra ícone da engenharia, o Palácio de Cristal (Figura 2-30), para a exposição universal de 1851, com uma estrutura de ferro

⁸ Mansarda é um elemento acoplado a cobertura da edificação, em síntese, são telhados que sobressaem em relação à cobertura principal, formado por duas águas com inclinações diferentes, constituindo-se de quatro planos inclinados dois a dois, na qual os superiores têm inclinações menores (MARQUES, 1990).

fundido, coberta com múltiplos painéis de vidro (STRICKLAND, 2014). Em 1857, um dos primeiros telhados de metal foi instalado no Sul dos EUA, na Casa da Moeda, em Nova Orleans. As chapas de ferro galvanizado e corrugado adicionaram um elemento “à prova de fogo” às estruturas em que foram usadas (IRONCLAD ROOFING, 2021). Em 1889, na exposição universal de Paris, houve avanços tecnológicos, a Galeria das Máquinas (Figura 2-31), obra do arquiteto Dutert e do engenheiro Contamin, uma referência à arquitetura funcionalista e industrial, cuja estrutura comportava a cobertura em um vão de 115 metros (PEREIRA, 2010).

Figura 2-27:
Fábrica *Menier*,
Noisiel-sur-Marne,
(1871-72).



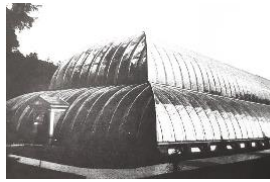
Fonte: Glancey
(2007)

Figura 2-28:
Estufas, Inglaterra
Vitoriana
(1850).



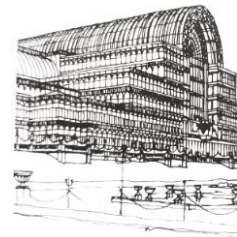
Fonte: Butti e
Perlin (1985).

Figura 2-29:
Great Conservatory,
Joseph Paxton,
Inglaterra (1836).



Fonte: Behling e
Behling (2002).

Figura 2-30:
Palácio de Cristal,
Joseph Paxton,
Paris (1850-51).



Fonte: Pereira
(2010).

Figura 2-31:
Galeria das
Máquinas, Paris
(1889).



Fonte: Pereira
(2010).

As versões precursoras das telhas asfálticas, foram desenvolvidas inicialmente em 1893 e eram chamadas de coberturas asfálticas. Essa versão era bastante semelhante às coberturas feitas com rolos de asfalto, mas sem os grânulos na superfície. Posteriormente o material foi cortado em tiras e empregado o uso de telha (ASPHALTROOFING ORG, 2021).

2.2.3 Século XX

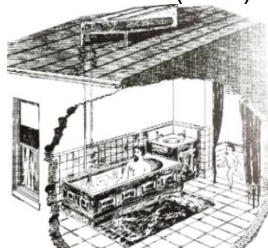
Em 1901, nos Estados Unidos, foi usado pela primeira vez as telhas asfálticas, comumente conhecidas como *shingles*. O uso das telhas popularizou em 1911. Em 1926, o Instituto de Pesquisa com *National Bureau of Standards* (NBS) e *Asphalt Shingle* testou vinte e dois tipos de feltros experimentais e descobriu que não havia diferenças substanciais no desempenho em relação à resistência. Em 1939, passou a ser produzida em larga escala, com aproximadamente 11 milhões de telhas sendo produzidas. Em 1987, houve a adição de grânulos de ardósia à superfície para tornar

o material muito mais durável. Alguns dos grânulos testados incluíam conchas de ostras, mica, cinzas volantes, ardósia, argila e sílica (CULLEN; SNOKE, 1959).

Apesar do sucesso das estufas durante o século XIX, no início do século XX houve um racionamento de combustível, essa preocupação começou durante a Primeira Guerra Mundial (1914), com o aumento do uso e popularidade das estufas, a população passou a não se preocupar com a orientação solar ao implantar o sistema no projeto, ao invés de aquecer os ambientes mediante os raios solares, através das coberturas, as estufas passaram a contar com sistemas de climatização artificial para conseguir manter o ambiente aquecido, o que as tornaram insustentáveis do ponto de vista termoenergético.

O final do século XIX e início do século XX, foram marcados por transformações impulsionadas pela tecnologia e industrialização. Nesse período, vários sistemas de aquecimento de água por energia solar foram desenvolvidos utilizando a cobertura como sustentação. O *Climax*⁹ e o *Day and Night*¹⁰, (Figuras 2-32 e 2-33) foram um dos primeiros sistemas de aquecedores solares com armazenamento de água aquecida. Em 1880, foi registrado o primeiro estudo de caso do emprego de coletores solares na cobertura para o aquecimento interno da edificação, experimentando os princípios básicos de casas solares passivas, mas foi em 1938, pouco antes da Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), que o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), construiu a primeira casa solar, com aquecimento passivo pela cobertura (Figura 2-34) (BUTTI; PERLIN, 1985). Em 1954, nos Estados Unidos, as tecnologias avançaram rumo a maior eficiência energética, o químico Calvin Fuller, o engenheiro Daryl Chapin e o físico Gerald Pearson, desenvolveram a primeira célula solar que convertia energia do Sol para energia elétrica, publicaram no *Journal of Applied Physics* (CHAPIN; FULLER; PEARSON, 1954).

Figura 2-32: Aquecedor solar *Climax* (1890).



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-33: Aquecedor solar *Day and Night* (1911).



Fonte: Butti e Perlin (1985).

Figura 2-34: MIT *Solar House* (1939).



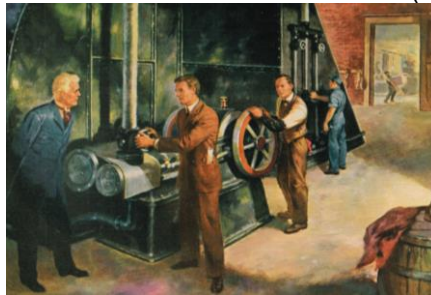
Fonte: Butti e Perlin (1985).

⁹ O aquecedor solar *Day and Night* era composto por uma trama de tubos de cobre.

¹⁰ O aquecedor solar *Climax* era composto por coletores cilíndricos pintados de pretos.

Em 1902, nos EUA, o engenheiro Willis Haviland Carrier, inventou um processo mecânico para condicionar o ar, possibilitando o controle da temperatura e da umidade (Figura 2-35). E em 1920, o ar-condicionado passou a ser utilizado em edificações comerciais. Em 1928, foi criada uma versão do equipamento para uso doméstico. Mas foi em 1950, que houve a popularização nas residências, e em 1960, houve a expansão mundial (CARRIER, 2022). Conforme citado anteriormente, na introdução, o uso de aparelhos condicionadores de ar, possibilitou trabalhar com edificações fechadas, cujo clima interior se regula artificialmente, desconsiderando as características climáticas da região, os materiais empregados na edificação, isolando o clima interno e externo, sem considerar o aumento no consumo de energia (BEHLING; BEHLING, 2002).

Figura 2-35: Willis Carrier e o motor do primeiro sistema de ar-condicionado do mundo (1902).



Fonte: Carrier (2022).

No século XX, o uso de novos materiais e tecnologias construtivas, como o concreto junto do aço, o aço e o vidro, transformaram a composição dos materiais das edificações e conseqüentemente das coberturas. Em 1924, o arquiteto Le Corbusier publica o livro “*Vers une Architecture*” (“Por uma arquitetura”) (CORBUSIER, 1924), no qual propõem os cinco pontos fundamentais da arquitetura moderna. Pilotis, planta livre, fachada livre, janelas em fita e o terraço jardim foram os princípios apresentados pelo arquiteto (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). A *Vila Savoye*, 1928-1931 (Figura 2-36), é uma residência projetada e construída em Poissy, Paris, na qual, pela primeira vez o arquiteto teve a possibilidade de aplicar integralmente suas proposições apresentadas nos cinco pontos para uma nova arquitetura. O terraço jardim, proposto por Le Corbusier, é um conceito no qual introduz à cobertura da edificação um novo uso, em contraposição aos telhados inclinados das construções, transformando as coberturas tradicionais em terraços habitáveis (Figura 2-37) (MACIEL, 2002). Observa-se nessa proposta do terraço-jardim, traços das técnicas das coberturas

verdes empregadas nos Zigurates (2500 a.C.), e nos Jardins Suspensos da Babilônia (700 a.C.). Para Bruand (2010), em países de clima quente, seria necessário adaptar a aplicação desses princípios para combater a insolação e o calor excessivo.

Figura 2-36: *Vila Sovoye*, Poissy, Paris (1928-1929).



Fonte: Maciel (2002).

Figura 2-37: Terraço jardim *Vila Sovoye*, Poissy, Paris (1928-1929).



Fonte: Maciel (2002).

Os painéis isolados estruturais (*Structural Insulated Panels - SIPs*) foram as próximas inovações na construção civil e nos sistemas das coberturas. Desenvolvidos pela primeira vez na década de 1930, em uma série de casas de teste construídas pelo laboratório nacional de pesquisa do Serviço Florestal dos Estados Unidos o *Forest Products Laboratory (FPL)* (SIPA, 2022). Os SIPs são placas compostas, que consistem em um “sanduíche” de duas camadas estruturais com uma camada isolante de espuma plástica entre elas (OWENS, 2015). Em 1950, Alden B. Bown, aluno do arquiteto Frank Lloyd Wright, propôs o painel com isolamento. A primeira casa construída com os painéis, foi em Madison, Wisconsin (SIPA, 2022).

Em 1937, o professor Otto Bayer desenvolveu o Poliuretano (BAYER, 2022). “Os poliuretanos são polímeros preparados a partir da reação entre isocianatos polifuncionais e polióis, contendo ligações uretano intramoleculares” (CARMO; DA SILVA; MORELLI, 2020, p. 1). Ainda no final da década de 30, começou na Alemanha a produção comercial de poliuretano nos tipos de espumas rígidas. Na década de 1960, as espumas rígidas foram empregadas na construção civil como material isolante dos SIPs (*structural insulated panels*) (CHUA, 2016). Em 1960, o poliuretano (PU) e poliestireno (EPS) passaram a ser empregados entre duas chapas de aço, formando as telhas termoacústicas. Popularmente chamadas de telha “sanduíche”, as telhas termoacústicas, geralmente contêm duas chapas metálicas convencionais com uma camada isolante no centro, ou também, uma única chapa metálica para o exterior e para o interior outro revestimento (ABCCEM, 2005).

Em 1960, outro material isolante foi acoplado as telhas de aço termoacústicas, a lã de rocha. Esse isolante é composto por fibras minerais de rochas vulcânicas, como o basalto e o calcário. Em 1981 a 1988 o grupo *Rockwool*, desenvolveu tetos acústicos e revestimentos de fachadas com o uso da lã de rocha (ROCKWOOL, 2017).

Na década de 1950, surgem as estruturas tensionadas, inspiradas nas tendas dos primeiros abrigos concebidos pelo Homem. Em inglês *tensile structures* é o termo empregado às estruturas que associam membranas a cabos de aço no cobrimento das coberturas. As principais características desse sistema de cobertura, estão na trabalhabilidade dos esforços de tração, redução na quantidade dos materiais na obra, pré-fabricação, maleabilidade formal e a capacidade de cobrir grandes vãos. Geralmente empregadas nos projetos de coberturas de estádios, centros esportivos, arenas culturais, comerciais, edificações industriais e comerciais. Esse tipo de estrutura tem como base os antigos sistemas de coberturas do império romano, que cobriam os teatros e anfiteatros com tecidos em linho, em grandes dimensões, junto a cordas de cânhamo. O Coliseu Romano (72-80 d.C.), é um exemplo de edificação que usou essa estrutura na cobertura. Desde o período romano até meados do século XX, houve poucos avanços tecnológicos (PEREIRA, 2018). O progresso desse sistema ocorreu a partir de 1950, quando o arquiteto e engenheiro alemão Frei Otto, a partir de estudos científicos, possibilitou o resgate das coberturas com elementos tensionados, empregando cabos de aço junto às membranas (Figura 2-38). Posterior, em 1958, Otto fundou o *Institute for Development of Lightweight Construction*, em Stuttgart, Alemanha, no qual desenvolve pesquisas que procuram associar as possibilidades construtivas a elementos da natureza, como folhas, teias de aranha, esqueletos, galhos de árvores, asas de libélulas, etc. Um de seus primeiros projetos foi o pavilhão de dança para o Jardim Federal de Colônia, 1957. Projetado para durar um ano, o pavilhão permanece até hoje (Figura 2-39) (ROSENFELD, 2015).

Figura 2-38: Pavilhão de música da *Federal Garden Exhibition*, Kassel, Alemanha (1955).



Fonte: Lanna (2020).

Figura 2-39: *Dance Pavilion Garden Exhibition*, Cologne, Alemanha (1957).



Fonte: Rosenfield (2015).

No Brasil, em 1953, o arquiteto Rino Levi junto dos arquitetos Roberto Cerqueira César e Luiz Roberto Carvalho Franco, fizeram a Fábrica da Tecelagem Parahyba S.A., em São José dos Campos (Figuras 2-40 e 2-41). Experimentando de sistemas e recursos estruturais de aço para a obra, empregaram a solução no sistema estrutural da cobertura, formada por arcos, soldados, formando uma sequência de arcos armados por um sistema de terças, fixados por tirantes metálicos, cobertas por telhas metálicas (SANTOS, 2015).

Figura 2-40: Fábrica da Tecelagem Parahyba S.A., Rino Levi, São José dos Campos (1953).



Fonte: Lanna (2020).

Figura 2-41: Fábrica da Tecelagem Parahyba S.A., Rino Levi, São José dos Campos (2015).



Fonte: Santos (2015).

2.2.4 Século XXI - Atualidade

Desde os tempos do Coliseu Romano, a utilização de coberturas retráteis tem se propagado de forma lenta. Nas últimas décadas os profissionais da arquitetura e engenharia incorporaram o projeto de mecanização em seus projetos de coberturas retráteis. O principal benefício dessas estruturas mecanizadas é a adaptam às mudanças do tempo e do clima e flexibilidade em relação as necessidades de projeto (RIBERICH, 2009).

Após as inovações nos sistemas de coberturas, os próximos avanços foram nas tecnologias dos materiais de fechamentos principalmente as telhas com sistemas fotovoltaicos adaptados. Segundo Tokusumi e Foiato (2018), a telha é um elemento que possui influência direta sobre o conforto térmico e acústico de uma edificação, conforme o material, modelo e coloração possuem propriedades térmicas e acústicas distintas.

A tecnologia que uniu a telha com as placas fotovoltaicas, dando origem a telha solar (*solar shingle*), surgiu em 2009 com as telhas *Powerhouse* (Figura 2-42).

Criada pela *DOW Chemical Company*. As telhas foram projetadas para se compor com as telhas tradicionais de asfalto, o que tornou uma alternativa esteticamente agradável em relação aos painéis solares tradicionais. Também possui facilidade de instalação, pois não há necessidade de localizar vigas e pontos de ancoragem na cobertura para aparafusar, como nos painéis solares. As telhas funcionaram da mesma forma que a maioria dos painéis padrão, convertendo os raios do sol em eletricidade, antes de transferi-los para a caixa inversora. Em 2016, a empresa Tesla, do empresário Elon Musk, comprou a *Solar City*. Em 2017, foram lançadas as duas primeiras variações do *Solar Roof* (telha solar) (Figura 2-43) na forma de vidro texturizado e o *Solar Panels* (painéis solares) vidro liso (Figura 2-44).

Figura 2-42: *Solar Shingle*, *Powerhouse* (2009).



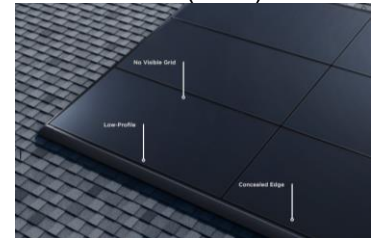
Fonte: Pennell (2019).

Figura 2-43: *Solar Roof*, Tesla (2017).



Fonte: Tesla (2022).

Figura 2-44: *Solar Panel*, Tesla (2017).



Fonte: Tesla (2022).

No Brasil, o grupo Eternit, apresentou em agosto de 2019, a primeira telha solar de concreto (Figura 2-45). Em 2021, obtiveram certificado do Inmetro para serem produzidas (Portaria Inmetro 004/2011, registro 005443/2021). As telhas são produzidas com células fotovoltaicas acopladas a elas, cada telha tem as seguintes dimensões 36,5 por 47,5cm e produz 9,16 watts, com uma capacidade de produção média mensal de 1,15 Kilowatts hora por mês (KWh/mês) (SOUSA, 2020). As telhas são fornecidas em conjunto com o cabeamento exclusivo para conexão, cada telha incorpora células solares de silício monocristalino (TEGULASOLAR, 2021).

Figura 2-45: Telha solar fotovoltaica *Intersolar South América* (2020).



Fonte: Tegulasolar (2021).

2.3 SISTEMAS DE COBERTURAS E O CLIMA

A resposta ao clima é uma das principais razões para as diferenças regionais na arquitetura (BEHLING; BEHLING, 2002), conseqüentemente isso reflete nos diferentes sistemas de coberturas. Baseado na afirmação acima, será apresentado, uma pesquisa que relaciona os sistemas de coberturas com algumas das regiões climáticas, utilizando o sistema de classificação climática de Köppen-Geiger.

Essa parte da pesquisa foi dividida em três etapas, sendo elas: Etapa 1, definição e conceito de clima; Etapa 2, apresentação e funcionalidade do sistema de classificação climática de Köppen-Geiger, e por fim, Etapa 3, apresentação da relação dos sistemas de coberturas com algumas regiões climáticas.

2.3.1 Clima

Não existindo um consenso na literatura com relação a definição de clima, serão apresentados alguns conceitos que são frequentemente utilizados. Segundo Silva (2012), a maior dificuldade ocorre exatamente em definir o significado de clima. Grande parte dos autores considera o clima como sendo o conjunto de fenômenos meteorológicos de uma determinada região, caracterizado pelo estado “médio” da atmosfera em um determinado local e tempo. Para o autor, existem muitos fatores climáticos, considerados complexos e dinâmicos, tornando-se impossível definir o seu funcionamento com precisão. Por fim, o autor define o clima como sendo: “[...] o ambiente troposférico resultante da ação e interação do conjunto heterogêneo de características físicas dos elementos atmosféricos que o definem num determinado período e numa determinada zona, região ou local” (SILVA, 2012, p. 1057).

De acordo Ayoade (2003), em seu livro “Introdução à Climatologia para os Trópicos”, o clima influencia diferente as plantas, os animais e o solo, o autor explica que “na ciência da atmosfera, usualmente é feita uma distinção entre *tempo* e *clima* [...]” (AYOADE, 2003, p. 2). Com base nas definições, tempo é o “[...] estado médio da atmosfera numa dada porção de tempo e em determinado lugar [...]” (AYOADE, 2003, p. 2). O clima, por sua vez:

[...] refere-se às características da atmosfera, inferidas de observações contínuas durante um longo período. O clima abrange um maior número de dados do que as condições médias do tempo numa determinada área. Ele inclui considerações dos desvios em relação às médias (isto é a variabilidade), condições extremas, e as probabilidades de frequência de ocorrência de determinadas condições de tempo. Desta forma, o clima apresenta uma generalização, enquanto o tempo lida com eventos específicos (AYOADE, 1996, p. 2).

Segundo o autor, destaca-se as seguintes subdivisões do estudo do clima:

1. Climatologia Regional- é a definição dos climas em áreas selecionadas da Terra;
2. Climatologia sinótica- é o estudo do tempo e do clima em uma área com relação ao padrão de circulação atmosférica predominante [...].
3. Climatologia física- que envolve a investigação do comportamento dos elementos do tempo ou processos atmosféricos em termos de princípios físicos. Neste, dá-se ênfase à energia global e aos regimes de balanço hídrico da Terra e da atmosfera.
4. Climatologia dinâmica- enfatiza os movimentos atmosféricos em várias escalas, particularmente na circulação geral da atmosfera.
5. Climatologia aplicada- enfatiza a aplicação do conhecimento climatológico e dos princípios climatológicos nas soluções dos problemas práticos que afetam a humanidade.
6. Climatologia histórica- é o estudo do desenvolvimento dos climas através dos tempos (AYOADE, 2003, p. 3).

Torres e Machado (2008), em seu livro, "Introdução à Climatologia", descrevem o clima como o fator determinante para a diferenciação das paisagens de um lugar para outro. Resultante de diversos agentes naturais, tais como; o clima, relevo, solo, vegetação, estrutura geológica, rios, a fauna, etc., sendo o clima, o que influencia diretamente o meio e o principal agente a ser influenciado pelos outros elementos naturais. De acordo Torres e Machado (2008, *apud* Troppe, 2004), é constatado a relação direta do clima com os biomas, no caso, a distribuição das formações e associações das coberturas vegetais dessas regiões possuem semelhanças tanto climáticas quanto na paisagem.

Rafferty (2011), cita duas vertentes para as classificações climáticas, sendo as: genéticas e empíricas. As genéticas, são baseadas nas causas: determinantes geográficas, balanço energético de superfície e na análise das características das massas de ar. As empíricas, por sua vez, agrupam os tipos de clima de acordo com um ou mais aspectos do sistema climático, como por exemplo a predominância de cobertura vegetal, tipos de vegetação e tipos de solos, que ao se adaptar a região refletem determinadas características do clima.

A posição do sol em relação à Terra é o fator que determina a distribuição das

zonas climáticas e as variações sazonais ocasionadas devido a inclinação dos raios solares. A palavra “CLIMA” deriva do grego antigo “KLIMA” no qual significa inclinação. Os continentes e oceanos possuem distribuições distintas, com diferentes características termodinâmicas, que também determina as diferenças climáticas, associadas ao movimento da terra, fazem circular as massas de ar por todo o planeta através dos sistemas de alta e baixa pressão, ligadas as células dinâmicas em um determinado espaço, outros fatores determinantes na distribuição das zonas climáticas é o relevo dos continentes e os oceanos (SILVA, 2012).

Varejão-Silva (2006), define o clima pelo conjunto de fenômenos meteorológicos; temperatura, umidade relativa, chuva, pressão atmosférica, e os ventos de uma determinada região. Para estabelecer o clima de um local é necessário a observação e análise dos fenômenos por vários anos. O autor complementa distinguindo tempo de clima; tempo é o conjunto de condições atmosféricas momentâneas que atuam em um dado instante sobre um determinado local.

Com base nas citações acima, o clima pode ser definido como um conjunto de informações: temperatura, pressão e umidade, referentes as condições atmosféricas de um determinado local, área ou região. O tipo de clima de um local depende de fatores, como altitude, latitude, radiação solar, solo, relevo, dentre outros. Para caracterizar e definir o clima é necessário o monitoramento contínuo e interpretação do comportamento médio do conjunto de informações citadas acima, baseado em dados diários da condição atmosférica dessa determinada região. O tempo, por sua vez, é a condição atmosférica momentânea, analisada por um curto período de horas, dias ou até semanas. O estudo do tempo é fundamental para o estabelecimento do clima de uma determinada região. Não existem dois lugares que tenham exatamente o mesmo clima, porém, as similaridades no clima das regiões permitem dividir a Terra em regiões climáticas.

2.3.2 Sistema de Classificação Climática Köppen-Geiger

Os sistemas de classificações climáticas (SCC) propõe-se a analisar, identificar e definir as características climáticas das diferentes regiões. Um dos SCC mais abrangentes é o de Köppen-Geiger. Segundo Beck *et al.* (2018), a primeira versão dessa classificação foi desenvolvida no final do século XIX, pelo geógrafo, meteorologista e climatologista Wladimir Peter Köppen, e foi aperfeiçoado com a

colaboração do meteorologista e climatologista alemão Rudolf Oskar Robert Williams Geiger em 1918, 1927 e 1936. O SCC de Köppen considera valores limiares e sazonalidade da temperatura do ar, temperatura média anual, temperatura média mensal, precipitação e a vegetação nativa. Os cinco tipos climáticos principais são baseados nessas médias mensais e anuais de temperatura e precipitação, cada tipo é designado pela primeira letra maiúscula. Os demais tipos são classificados com a segunda letra, que representa as particularidades dos regimes de chuvas e pela terceira letra, que representa a temperatura característica da região (Quadro 2-1):

Quadro 2-1: SCC de Köppen-Geiger.

1ª letra maiúscula (representa a característica geral do clima de uma região)	
A	Climas mesotérmicos Equatorial ou Tropical úmido, chuvosos todos os meses (temperatura média do mês mais frio superior a 18°C)
B	Climas secos, com precipitação deficiente durante a maior parte do ano, evapotranspiração média anual é maior do que a precipitação média anual (chuvas anuais abaixo de 500mm)
C	Climas mesotérmicos temperados, chuvosos e quentes, de latitude média úmida, com invernos mais frios (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e superior a -3°C, ao menos um mês com média igual ou superior a 10°C) Climats de latitudes médias/ Subtropical (próximo aos trópicos, até 40° de latitude)
D	Climas continental microtérmicos frio com neve-floresta, climas de latitudes médias com invernos rigorosos, (temperatura média do mês mais frio i varia entre -3°C e 18°C)
E	Climas polares, com invernos e verões extremamente frios, (temperatura média de todos os meses do ano inferior a 10°C)
2ª letra minúscula (representa as particularidades do regime de chuva (apenas valem para os casos "A", "C" e "D"))	
f	Úmido o ano todo (A, C, D)
s	Chuvas de inverno
m	De monção, breve estação seca com chuvas intensas durante o resto do ano (A)
w	Chuvas de verão (A, C, D)
2ª letra maiúscula (apenas caso "B")	
S	Clima semiárido (chuvas anuais entre 250 e 500mm)
W	Clima árido ou desértico (chuvas anuais menores que 250mm)
2ª letra maiúscula (apenas caso "E")	
T	Clima de tundra (pelo menos um mês com temperaturas médias entre 0°C e 10°C)
F	Clima de calota de gelo (todos os meses do ano com médias de temperatura inferiores a 0°C)
3ª letra minúscula (representa a temperatura característica de uma região (apenas valem para os casos "C" e "D"))	
a	Verões quentes (mês mais quente com média igual ou superior a 22°C)
b	Verões brandos (mês mais quente com média inferior a 22°C)
c	Verão breve e moderadamente frio (no máximo três meses com médias acima de 10°C)
d	Inverno muito frio, sendo a temperatura média menor do que -38°C para o mês mais frio
3ª letra minúscula (regiões áridas, apenas caso "B": – h: deserto ou semideserto quente (temperatura anual média igual ou superior a 18°C))	
h	Deserto ou semideserto quente (temperatura anual média igual ou superior a 18°C)
k	Deserto ou semideserto frio (temperatura anual média inferior a 18°C)

Fonte: Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados de Beck *et al.* (2022).

Segundo Beck *et al.* (2018), o sistema Köppen-Geiger classifica o clima em cinco tipos principais e trinta subtipos (Quadro 2-2), isso ocorre porque o resultado da precipitação no desenvolvimento das plantas não depende apenas da precipitação, mas também da intensidade da evaporação e da transpiração, combinando os valores de precipitação e de temperatura.

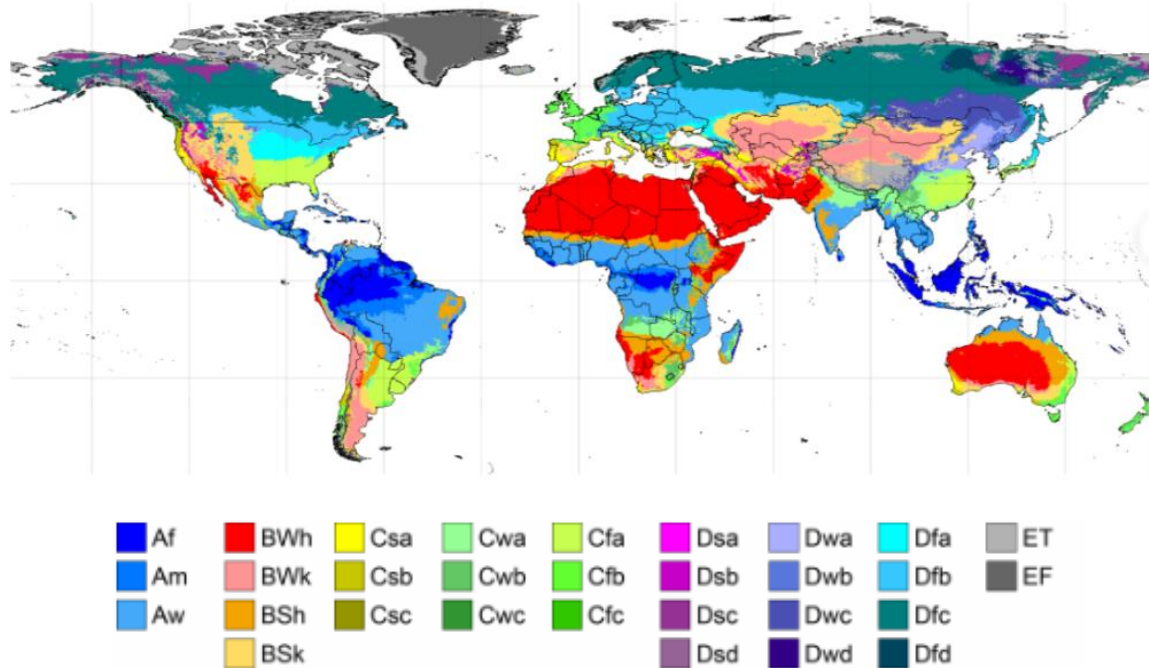
Quadro 2-2: Variações do SCC de Köppen-Geiger.

A	Climas tropicais chuvosos
Af	Clima tropical chuvoso de floresta ou clima equatorial
Am	Clima tropical de monção
Aw	Clima de savana
B	Climas secos
BWh	Clima frio de deserto
BWk	Clima árido frio
BSh	Clima quente de estepe
BSk	Clima frio de estepe
C	Climas mesotérmico, temperados chuvosos e quentes
Csa	Chuva de inverno, verão quente
Csb	Chuva de inverno, verão moderadamente quente
Csc	Chuva de inverno, verão frio
Cwa	Chuva de verão, verão quente
Cwb	Chuva de verão, verão moderadamente quente
Cwc	Chuva de verão, verão breve e moderadamente frio
Cfa	Úmido em todas as estações, verão quente
Cfb	Úmido em todas as estações, verão moderadamente quente
Cfc	Úmido em todas as estações, verão moderadamente frio e curto
D	Clima continental frio com neve-floresta
Dsa	Chuvas de inverno, verão quente
Dsb	Chuvas de inverno, verão brando
Dsc	Chuvas de inverno, verão breve e moderadamente frio
Dsd	Chuvas de inverno, inverno muito frio
Dwa	Chuva de verão, verão quente
Dwb	Chuva de verão, verão moderadamente quente
Dwc	Chuva de verão, verão moderadamente frio
Dwd	Úmido em todas as estações, verão quente
Dfa	Chuva de verão, inverno intenso
Dfb	Úmido em todas as estações, verão frio
Dfc	Úmido em todas as estações, verão moderadamente frio e curto
Dfd	Úmido em todas as estações, inverno intenso
E	Climas polares
ET	Tundra
EF	Neve e gelo perpétuos

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados de Beck *et al.* (2022).

A Figura 2-46 apresenta o mapa global da classificação climática de Köppen-Geiger em uma resolução para os dias atuais (1980–2016) marcando os trinta subtipos apresentados anteriormente no Quadro 2-2.

Figura 2-46: Mapa com as variações das classificações climáticas do SCC de Köppen-Geiger.



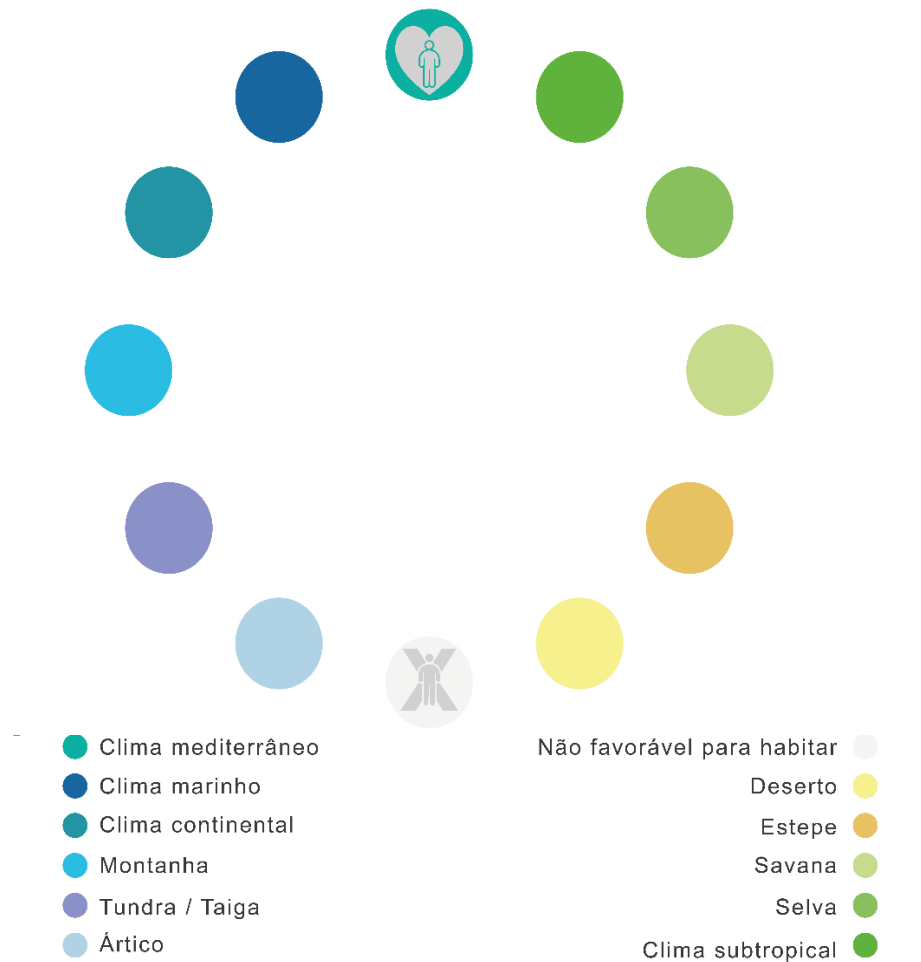
Fonte: Beck *et al.* (2022).

Segundo Alvares *et al.* (2013), no estudo, “*Köppen’s climate classification map for Brazil*”, o sistema de classificação climática de Köppen é o mais utilizado no Brasil e no mundo. Dentre as áreas que mais utilizam o SCC de Köppen, destacam-se geografia, biologia, ecologia, meteorologia, hidrologia, agronomia, silvicultura e ciências ambientais. Na pesquisa, os autores desenvolveram um sistema de informações geográficas para identificar os tipos climáticos de Köppen para o Brasil, o que permitiu identificar as variações climáticas em nível de paisagem. “[...] Nesta escala fina os três tipos de clima do Brasil (A, 81,4%; B, 4,9% e C, 13,7%) foram descritos com os seguintes subtipos; Af, Am, Aw, As, Bsh, Cfa, Cfb, Cwa, Cwb, Cwc, Csa, Csb [...]” (ALVARES *et al.*, 2013, p. 15) (Anexo B). Conforme a pesquisa, a característica do grupo (A) são para os climas mesotérmicos Equatorial ou Tropical úmido; Os climas secos são característicos do grupo (B), e os climas mesotérmicos temperados o grupo (C).

2.3.3 Regiões climáticas e os sistemas de coberturas

A seguir, serão descritas onze das regiões climáticas da Terra que representam as diversificações do extremo de conforto térmico, clima Mediterrâneo, ao extremo do desconforto, clima do Ártico e de Desertos (Figura 2-47), e a relação com as construções tradicionais dessas regiões, consideradas com bom desempenho térmico. Os dados se baseiam em uma pesquisa realizada para a Comissão Europeia, *Renewable Energies in Architecture and Design* (READ), contidos no livro “*Sol Power*”¹¹ dos autores Behling e Behling (2002). Segundo a pesquisa, as regiões climáticas da terra oferecem espaços muito diversificados, do extremo das temperaturas frias ao extremo das temperaturas quentes.

Figura 2-47: Diversificação das regiões climáticas.



Fonte: Adaptado de Behling e Behling (2002).

¹¹ O texto referente as “Regiões climáticas e os sistemas de coberturas” foi elaborado baseado na pesquisa contida no livro de Behling e Behling (2002), “*Sol Power*”.

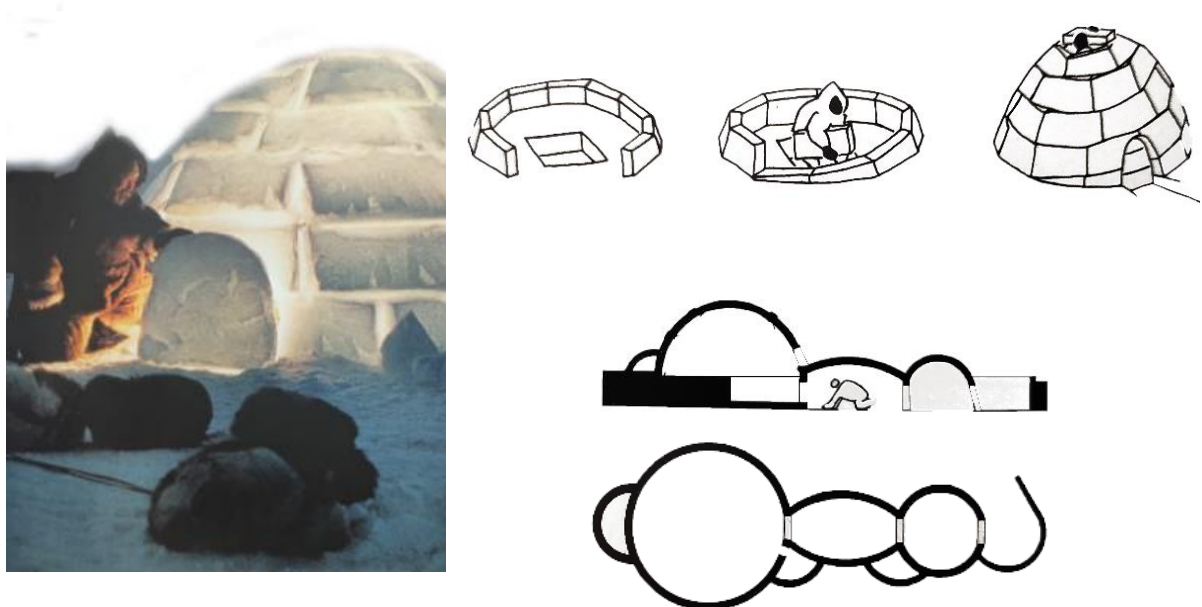
2.3.2.1 Ártico



Figura 2-48: Regiões do Ártico.
Fonte: Behling e Behling (2002).

Nos locais com temperaturas abaixo de zero, o único material disponível e abundante para construção é o gelo. As roupas são feitas com as peles de animais. O gelo, a pele e a gordura animal são a base para a sobrevivência. No clima polar, o iglu é uma solução para enfrentar o frio, a parede e a cobertura feitas de blocos de gelo formam uma estrutura monolítica (Figura 2-49). A diferença entre as temperaturas pode chegar em 5°C no interior do iglu, para -40°C na temperatura exterior. Os climas polares estão agrupados na classificação climática de Köppen-Geiger no grupo E, sendo EF - neve e gelo perpétuos.

Figura 2-49: Iglu, exemplo de moradia - Clima polar.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.2 Tundra / Taiga



Figura 2-50: Regiões de Tundra / Taiga.
Fonte: Behling e Behling (2002).

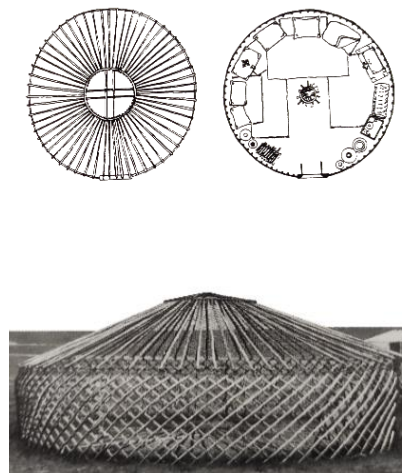
Os verões são considerados quentes, porém os invernos são frios e de difícil adaptabilidade ao local, a agricultura e as construções são muito limitadas. Alguns países dessa região climática, Rússia, Mongólia, Afeganistão entre outros. Devido ao clima, os moradores dessas regiões eram nômades e suas moradias eram transportáveis. As cabanas, cobertas com peles costuradas de rena ou foca, tornou-se uma moradia dominante (Figura 2-51 e 2-52). A madeira é o único material abundante, dada a escassez de outros materiais, as moradias eram feitas no solo para proteção do inverno. As casas eram feitas com toras e seu perímetro e coberturas com camadas de grama. A ventilação, realizada com uma abertura na cobertura, formada por vértebras dorsais de osso de baleia (Figura 2-53). Na classificação climática de Köppen-Geiger, Tundra/ Taiga está no grupo E, ET – clima de tundra, pelo menos um mês com temperaturas médias entre 0°C e 10°C.

Figura 2-51: Cabana, exemplo de moradia - Tundra.



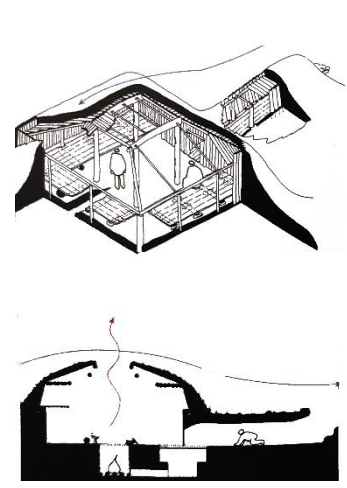
Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-52: Cabana com estrutura diferente - Tundra.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-53: Moradias no solo - Tundra.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.3 Alta Montanha

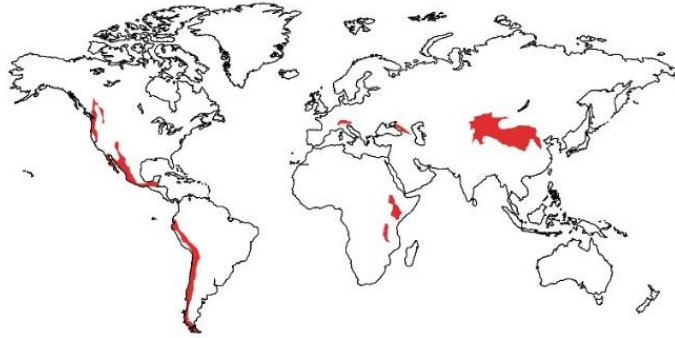


Figura 2-54: Regiões da Alta Montanha.
Fonte: Behling e Behling (2002).

A neve das montanhas, o vento e a chuva representam os desafios dessas regiões com o clima frio, úmido e seco (Figura 2-55). Devido a logística, os materiais de construção na montanha tornam-se escassos, os principais materiais são pedra, madeira e palha. Os telhados são de duas águas, telhado formado por dois planos inclinados que concorrem na linha de cumeeira para escoar a água da chuva e a neve. As residências geralmente também possuem coberturas de varandas para proteção das paredes de madeira, e são orientadas ao equador, para receber o máximo de radiação solar. A cobertura é feita de pedra, para proteção dos ventos, em alguns casos os caimentos são feitos até o solo (Figura 2-56). À medida que a altitude aumenta, o clima muda para um clima continental úmido, na classificação climática de Köppen-Geiger, Montanha ou Alta montanha está no grupo D - Clima continental frio com neve-floresta.

Figura 2-55: Celeiros das montanhas, edificação dos Alpes (1951).



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-56: Casa de Pedra do Valle Verzasca, Suíça.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.4 Clima continental com verões quentes e frios



Figura 2-57: Regiões de Clima Continental.
Fonte: Behling e Behling (2002).

Em algumas regiões as temperaturas podem oscilar entre -10°C no inverno até 30°C no verão. Nessas regiões, as residências devem suportar as grandes variações na temperatura, os materiais de construção devem isolar tanto o calor como o frio extremo. Em Xicun e Tunghwan, na China, para obter isolamento as construções são feitas no solo, escavadas, a cobertura por sua vez passa a ser o solo (Figura 2-58). Já no caso da Rússia, Bielorrússia e Canadá, as casas precisavam ser preparadas para os verões frios. As coberturas são feitas com telhados inclinados como proteção da neve (Figura 2-59). Na classificação climática de Köppen-Geiger, o clima continental está no grupo D, variando conforme a região.

Figura 2-58: Moradias trogloditas feitas no solo, Xicun e Tunghwan, China.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-59: (1) Construção rústica canadense (1920); (2) Casa de troncos russa; (3) Casa europeia.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.5 Clima Oceânico, quente e temperado



Figura 2-60: Regiões do Clima Marinho.
Fonte: Behling e Behling (2002).

Os oceanos suavizam as temperaturas na Terra. Essas regiões são úmidas e chuvosas, com verões quentes, e muita exposição ao vento. Atualmente, como as pessoas passam a maior parte do tempo em ambientes fechados, essas zonas passaram a oferecer boas condições de vida, desde que haja isolamento. Nessas regiões, os marinheiros aplicaram nas residências, técnicas de construções de barcos, utilizaram nas coberturas a palha, considerando o material uma ótima proteção a edificação, se assemelhando a pele de animais (Figura 2-61). Como proteção da chuva e do vento, as casas devem ser orientadas a oeste, ou ter coberturas que alcancem o chão, isolando totalmente a casa. Climas oceânicos, na classificação climática de Köppen-Geiger, está no grupo C - Climas mesotérmico, temperados chuvosos e quentes.

Figura 2-61: Casas com cobertura de palha (1) Casa de campo, Longstock Hampshire, Londres; (2) Casa rural, Donegal, Irlanda.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.6 Clima Mediterrâneo

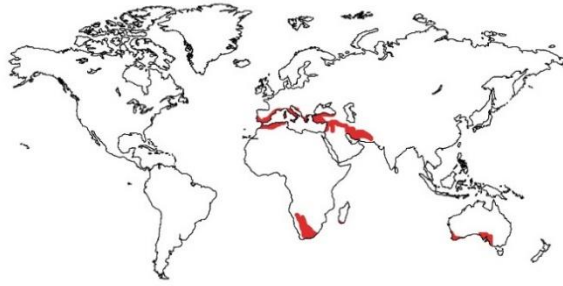


Figura 2-62: Regiões do Clima Mediterrâneo.
Fonte: Behling e Behling (2002).

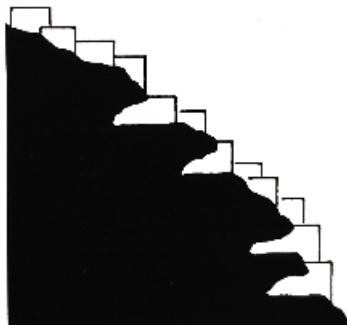
Segundo a pesquisa, essa região possui o clima considerado quase ideal para o ser humano habitar, a única proteção necessária é do calor do verão. Nas regiões do mediterrâneo, as soluções construtivas se baseiam em estratégias de sombreamentos das edificações, principalmente com a sombra de outras edificações (Figura 2-63). Muitas construções são feitas escavadas diretas no solo (Figura 2-64), ou próximas umas das outras. As varandas e sacadas, são muito empregadas para projetar sombreamentos nas fachadas. Outra característica, são as casas-pátios, conservadas há milênios (Figura 2-65). Na classificação climática de Köppen-Geiger, esta região está no grupo C – Clima mediterrânico verão quente.

Figura 2-63: Casas Georgianas, Inglaterra (1800).



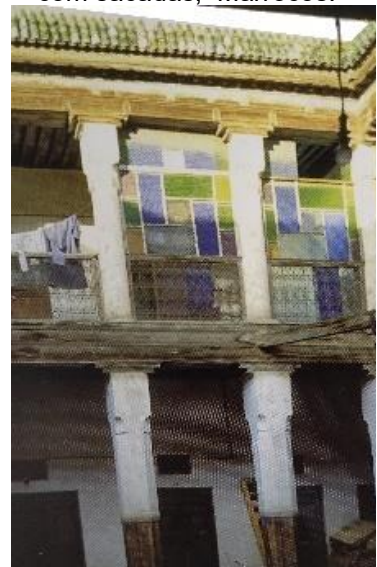
Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-64: Inércia térmica utilizando o solo.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-65: Casa-pátio, com sacadas, Marrocos.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.7 Clima Subtropical



Figura 2-66: Regiões do Clima Subtropical.
Fonte: Behling e Behling (2002).

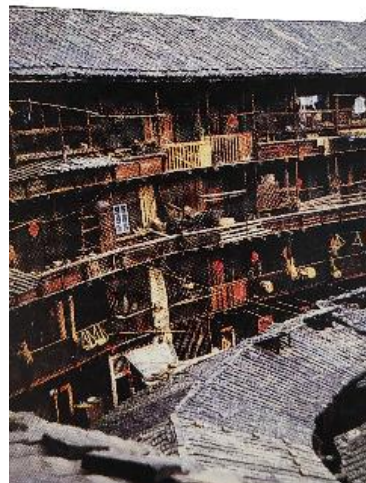
Nesse tipo de região climática, a maior parte do ano se mantém em temperaturas agradáveis. Os verões são considerados úmidos e causam até sensações de mal estar. Devido ao calor e a umidade elevada, é necessário trabalhar com estratégias de ventilações nas habitações. Normalmente as casas são elevadas do solo. No Japão, as coberturas são inclinadas, de palha, com beirais baixos, para passar o sol do inverno e bloquear a radiação no verão. As coberturas de palha proporcionam evaporação da água da chuva (Figura 2-67). Na China, existe a casa circular, um edifício fortificado, com aproximadamente 250 habitações. As paredes externas são compactas, de 65m de diâmetro, com a cobertura de pedra (Figura 2-68). Na classificação climática de Köppen-Geiger, as regiões citadas estão no grupo C – Cfa - Úmido em todas as estações, verão quente. Dentre os climas do Brasil, o subtropical é encontrado na região sul do país. A cidade de Foz do Iguaçu-PR, objeto do estudo, é uma região do grupo Cfa.

Figura 2-67: Casas Japonesas.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-68: Casa circular chinesa (1680).



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.8 Selva



Figura 2-69: Regiões da Selva.
Fonte: Behling e Behling (2002).

Clima predominante quente e úmido, nessas regiões o sistema de refrigeração do corpo humano, se baseia na evaporação, o que torna facilmente suportável a adaptação. É necessária eficácia no sistema de ventilação das edificações, junto com a proteção contra os raios solares e da chuva. Paredes, pisos e coberturas devem ser compostos de materiais que secam com facilidade. Em outras regiões com o clima quente e úmido, como em Sumatra, na Indonésia, adaptaram a elevação do forro e do telhado e aplicaram a técnica de ventilação vertical para aliviar o superaquecimento das edificações, as casas possuem grandes coberturas, com cumeeiras altas, proporcionando a entrada de ventilação natural através das empenas abertas na cobertura, para a entrada de ventilação e para sombrear as fachadas (Figuras 2-70, 2-71 e 2-72). Na classificação climática de Köppen-Geiger, as regiões citadas estão no grupo A - Climas tropicais chuvosos, no subgrupo Af - Clima tropical chuvoso de floresta.

Figura 2-70: Edificação em Sumatra, Indonésia.



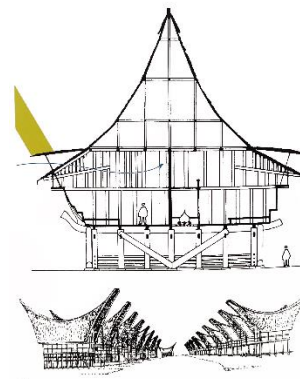
Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-71: Edificação em Sulawesi, Indonésia.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-72: Celeiros de arroz, Indonésia.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.9 Savana

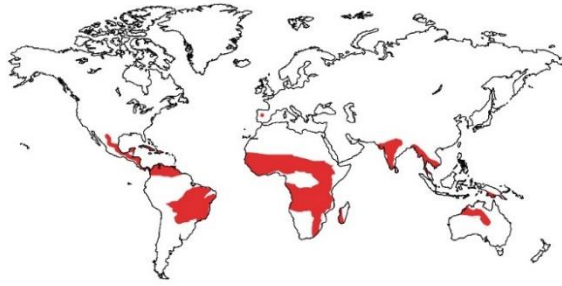


Figura 2-73: Regiões da Savana.
Fonte: Behling e Behling (2002).

A origem do ser humano estão nas savanas. Considerada uma região com ótimas condições climáticas para viver, sem oscilações das temperaturas exterior. As exigências para as construções são mínimas, as casas precisam proporcionar sombra e proteção das chuvas, sem a necessidade de materiais isolantes, com pouco se consegue condições muito favoráveis de conforto ambiental. Em Bamileke, Camarões, África Central, a única exigência é exatamente na cobertura, para proteger da chuva exige uma camada considerável de relva (vegetação), que são recolhidas a cada ano de acordo uma cerimônia ancestral da população de Bamileke (Figura 2-74). Em Sadia Masli, Máli, África Ocidental, a cobertura é construída com hastes secas e os suportes são troncos de madeira, talhados, que representam seus ancestrais (Figura 2-75). As casas transportáveis são outra opção nessa região, alguns povos levam as suas casas inteiras ou por partes como na Figura 2-76. Na classificação climática de Köppen-Geiger, as regiões citadas estão no grupo A - Climas tropicais chuvosos, no subgrupo Aw - Clima de savana.

Figura 2-74: Casa com cobertura de palha, Shinaka, Madagascar.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-75: Cobertura para proteção solar, Sadia Masli, Máli.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-76: Casas transportáveis, Mudanza, Guínea.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.10 Estepe



Figura 2-77: Regiões Estepe.
Fonte: Behling e Behling (2002).

As residências dessa região climática usam sistemas de resfriamento evaporativo e inércia térmica. Em algumas regiões do Oriente Médio, as casas possuem dispositivos na cobertura para promover a climatização nos ambientes (Figura 2-78). Os “*roof monitorstorres*”, “*badgir*” em espanhol ou torre de ventos, assemelhando-se a uma chaminé, suas aberturas em diagonal estão direcionadas aos ventos dominantes, capta e aumenta o fluxo de ventilação natural no interior do edifício através da cobertura. Quando capta o ar, sua umidade relativa aumenta, o ar passa pelo duto fresco e a sua temperatura baixa ao descer (Figuras 2-79). Para edificações sem pátio (Figura 2-80), o ar captado sobe através de um espaço central equipado com aberturas na sua extremidade superior, atuando como canais de ar vertical, que passam nos pavimentos da edificação, proporcionando um microclima agradável, com a troca de temperatura. A diferença de temperatura entre o térreo e a cobertura pode chegar até 20°C. Na classificação climática de Köppen-Geiger, clima quente e seco, estão no grupo B.

Figura 2-78: Torre de ventos, Hyderabad, Pakistan.



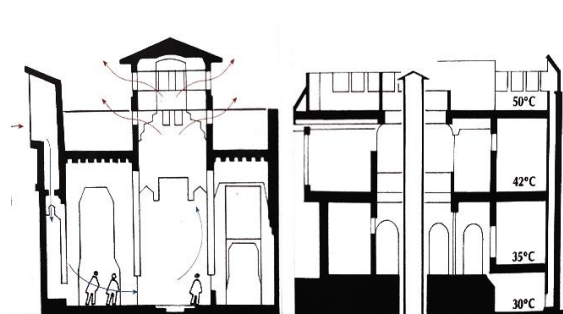
Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-79: Edificação histórica reconstruída em Dubai.



Fonte: Lechner (2014).

Figura 2-80: Ventilação dos “*badgir*”, torres de vento em edificações sem pátios.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.11 Deserto

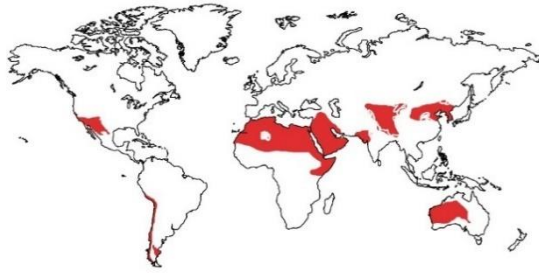
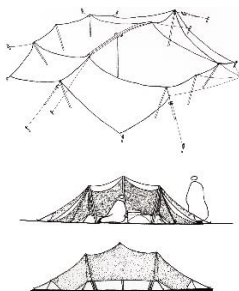


Figura 2-81: Regiões de Deserto.
Fonte: Behling e Behling (2002).

As regiões desérticas se resumem no calor extremo somado a grande escassez de água. A escassez obriga os moradores dessas regiões a serem nômades, e depender de moradias transportáveis, como tendas. As tendas, normalmente são de cor escura, feitas de pele de cabra (Figura 2-82). As edificações de climas quentes e secos, como há pouca chuva, usam paredes e coberturas maciças, construídas de taipa batida, para poder absorver o máximo de calor possível durante o dia (Figura 2-83). Em alguns locais as ruas são estreitas, cercadas de edificações altas e cobertas, filtrando a entrada dos raios do sol (Figura 2-84). Segundo Lechner (2014), a cobertura costuma ser usada como área de estar e de dormir durante as noites de verão. Isso ocorre, porque as coberturas tornam-se mais confortáveis do que no interior dos ambientes que ficam quentes, devido ao calor diurno armazenado na construção (Figura 2-85). Essas construções possuem grande inércia térmica e suas espessas paredes de adobe, assim como a cobertura, atenuam o calor do deserto. Geralmente as regiões desse clima estão na classificação de Köppen-Geiger no grupo B – climas secos.

Figura 2-82:
Tendas, Qshgasi, Irán.



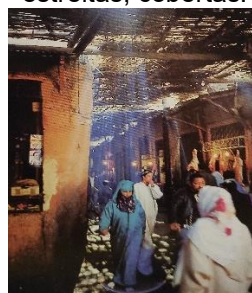
Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-83:
Kashbah, Vale de Draa, Marrocos.



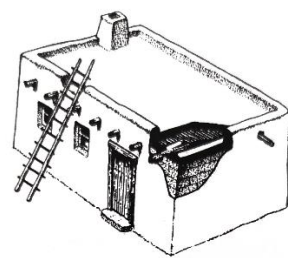
Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-84: Comércio marroquino, ruas estreitas, cobertas.



Fonte: Behling e Behling (2002).

Figura 2-85:
Edificações de adobe, sudoeste americano.



Fonte: Behling e Behling (2002).

2.3.2.12 Considerações do histórico dos sistemas de cobertura no mundo e a relação com o clima

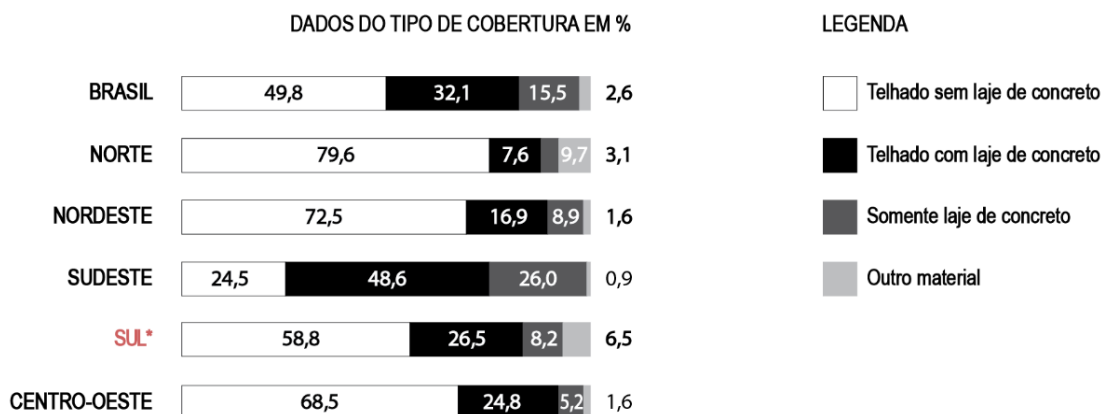
O histórico dos sistemas de coberturas no mundo proporcionou o entendimento da relação do clima e as diferenças regionais dos sistemas de coberturas na arquitetura. A cobertura é um elemento determinante no conforto térmico das edificações e claramente as tipologias das coberturas que foram desenvolvidas ao longo da história da arquitetura estão relacionadas com as características climáticas.

Nas zonas quentes e desérticas, por exemplo, a predominância é a cobertura plana. As lajes planas na cobertura das casas de adobe, exercem um papel importante na edificação, atuam no controle do conforto térmico (AGUIAR, 2015). As coberturas inclinadas, por sua vez, são comuns em territórios mais úmidos e frios e em climas temperados com verões muito secos (OLGYAY, 1963). De acordo o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN (1999, p. 10), “[...] A inclinação depende das condições climáticas e do tipo de telha utilizado e, nos locais onde o clima é mais rigoroso, com a ocorrência de neve, os telhados apresentam maiores inclinações (portanto são agudos) o que possibilita o rápido escoamento da neve, cujo acúmulo acarretaria grandes sobrecargas à estrutura [...]”. Devido a maior facilidade de execução, os telhados com águas e de superfícies planas são os mais comuns na arquitetura tradicional brasileira, a classificação destes são de acordo a sua respectiva forma (IPHAN, 1999). As formas arredondadas de coberturas abobadadas ou cúpulas, foram atribuídas a fundamentos filosóficos, mas também pela facilidade de moldar. Tanto as abóbodas quanto as cúpulas são muito populares em regiões áridas e calorosas, onde o baixo nível de umidade e intensa radiação originam variações de temperaturas extremas entre a noite e o dia (OLGYAY, 1963). No clima continental, as temperaturas podem oscilar entre -10° até 30° , geralmente as casas são feitas em estrutura de madeira, mas em alguns lugares como em Xicun, na China, as residências trogloditas são casas escavadas, utilizando o solo como material predominante nas paredes e coberturas. No Tibete, clima continental, quente e úmido no verão e frio e seco no inverno, algumas edificações usam a laje plana como cobertura, e as impermeabilizam com uma camada de argila, as coberturas das edificações também são usadas como meio de deslocamento na cidade (AGUIAR, 2015).

2.4 SISTEMAS DE COBERTURA UTILIZADOS NO BRASIL

O Sistema de cobertura com telhado, é o tipo de sistema mais empregado nas edificações do Brasil. Segundo dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD), em 2019, verificou-se que a tipologia mais empregada de cobertura é com telhado, variando a composição de telhado com e sem a laje ou nos casos menos frequentes apenas o sistema de cobertura com a laje. De acordo com os dados dos domicílios avaliados, 49,8% (36,0 milhões) utiliza apenas o telhado como material predominante na cobertura, sem a laje de concreto; 32,1% (23,2 milhões) possuem telhado com laje de concreto; 15,5% (11,2 milhões) utilizam apenas a laje de concreto; e 2,6% (1,9 milhões) utilizam outro tipo de material. A Região Sudeste em relação as demais regiões, teve a maior participação tanto no percentual do uso do telhado com a laje de concreto (48,6%) quanto nos domicílios que utilizam somente a laje de concreto na cobertura (26,0%). Nas demais regiões, o predomínio é no uso apenas do telhado sem a laje. Na região Sul, delimitação do estudo deste trabalho, (58,8%) das edificações predominam a cobertura apenas com o telhado, (26,5%) dos domicílios utilizam o telhado com a laje, (8,2%) somente a laje de concreto e (6,5%) outro tipo de material (Figura 2-86) (IBGE, 2020).

Figura 2-86: Tipos de sistemas de coberturas predominantes das edificações no Brasil, de acordo as Grandes Regiões.



SUL* destaque para a região, na qual será desenvolvida a pesquisa.

Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

O Brasil possui um clima predominantemente tropical, situado entre as latitudes de 5° N à 34° S, a maior parte de seu território está localizado entre o equador e o trópico de capricórnio. A influência da radiação solar sobre as edificações é crítica, bem como o clima, caracterizado pelo excesso de insolação, umidade relativa elevada

e a predominância de períodos quentes, na maior parte do território brasileiro (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). No sistema de classificação climática de Köppen, o Brasil se encontra nos grupos (A,B e C) (ver mapa, Anexo B). O Grupo (A) a característica é para climas mesotérmicos Equatorial ou Tropical úmido, chuvosos todos os meses temperatura média do mês mais frio superior a 18°C; O Grupo (B) são climas secos, com precipitação deficiente durante a maior parte do ano, chuvas anuais abaixo de 500mm e o Grupo (C), considerados climas mesotérmicos temperados, chuvosos e quentes, de latitude média úmida, com invernos mais frios, temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e superior a -3°C, ao menos um mês com média igual ou superior a 10°C (ALVARES *et al.*, 2013). Como visto anteriormente (itens 2.2 e 2.3), as questões climáticas, interferem diretamente na tipologia das coberturas desenvolvidas em uma determinada região. Nas edificações residências brasileiras, o tipo de sistema de cobertura com telhado é o mais utilizado (IBGE, 2020). As residências geralmente possuem telhados, tanto para amenizar o calor proveniente da insolação direta na cobertura, quanto para a proteção da edificação das precipitações pluviométricas (OLGYAY, 1963). Rossignolo e Fabrício (2004), enfatizam a importância de analisar o clima local para a escolha do tipo de cobertura, segundo os autores, o profissional deve observar a temperatura do bulbo seco, predominância e velocidade dos ventos, umidade relativa, índice de chuvas, granizo ou neve na região.

2.4.1 Elementos constituintes em coberturas com telhados

Para avaliar o desempenho térmico das coberturas, neste trabalho, a tipologia do projeto desenvolvido e analisado considerou os critérios citados acima (item 2.4), sendo assim, será apresentado apenas os tipos de elementos que constituem as coberturas com telhados, uma vez que, as coberturas com telhados (com e sem laje) são as mais empregadas no Brasil e em Foz do Iguaçu, (dados referente a tipologia de cobertura da cidade, foram extraídos da entrevista aplicada ao diretor de análises de projetos da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu (ver Anexo D)).

A seguir, serão apresentados os elementos constituintes de um sistema de cobertura com telhado e suas funções principais:

- a) Telhado: constituído por telhas de diversos materiais (fibrocimento, cerâmica, concreto, metálica e outros), dimensões, formatos, acabamentos e

- propriedades variadas, possui a função de vedação;
- b) Estrutura: varia de acordo o tipo de telha, e material, geralmente constituída por terças, caibros e ripas, tendo como função a sustentação das telhas e distribuição do peso da cobertura no restante da estrutura do edifício;
 - c) Captação de águas pluviais: constituídos geralmente por rufos, calhas e condutores verticais, tendo como função a drenagem das águas pluviais.

2.4.2 Telhado

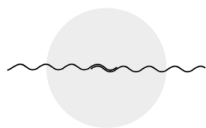
Para se ter uma cobertura eficiente, o primeiro passo é a escolha da telha. A partir do tipo de telha, pode-se definir as inclinações das águas, o tipo de estrutura e o desempenho termoacústico que a edificação terá através da cobertura (CALIL; MOLINA, 2010). O telhado está relacionado diretamente com o ganho térmico das edificações, é o elemento construtivo mais importante de uma construção devido ao resfriamento que este pode proporcionar ao interceptar a radiação solar. A escolha adequada de uma telha, afeta significativamente o conforto e o desempenho térmico, conseqüentemente o consumo energético dos edifícios. Em regiões tropicais, a escolha adequada da telha torna-se o fator principal para o conforto térmico da edificação (SAMPAIO; CARDOSO; GEOVANI, 2011). Segundo Michels (2007), o desconforto térmico torna-se maior com o uso de telhas metálicas sem isolamento e telhas de vidro, ou translúcidas, quando comparadas as telhas de fibrocimento e de cerâmica.

A estanqueidade e o desempenho térmico constituem os dois principais pontos na escolha do tipo de telha ideal (CARDOSO, 2000). Para Rossignolo e Fabrício (2004), a escolha de uma telha para o projeto depende de diversos fatores, entre eles o custo, este irá determinar a exigência com relação à qualidade final. Os autores complementam, para a escolha da telha deve-se considerar as seguintes condições mínimas:

- a) Ser impermeável, condição fundamental e mais relevante;
- b) Resistente, o suficiente a impactos;
- c) Leveza, exigir menos das estruturas de apoio;
- d) Durável;
- e) Proporcionar isolamento térmico e acústico considerável.

Existe uma diversidade grande de tipos de telhas no mercado, dentre elas, estão as telhas cerâmicas, de fibrocimento e as metálicas (CALIL; MOLINA, 2010). Segundo o Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) e a Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM), em 2014 (ano base), o tamanho total do mercado nacional de coberturas foi estimado em 659 milhões de m², através da pesquisa constatou que os principais tipos de telhas utilizadas nas coberturas no mercado brasileiro são: Telhas de fibrocimento; Telhas cerâmica; Telhas metálicas (telha de aço trapezoidal e telha termoacústica) e Telhas de concreto (ABCEM, 2015).

No presente trabalho, será apresentado um breve descritivo das telhas empregadas nesta pesquisa (telha de fibrocimento, cerâmica, Telha de aço trapezoidal e telha termoacústica), excetuando a telha de concreto, devido à baixa utilização da mesma na cidade de Foz do Iguaçu-PR, local de estudo (ver Capítulo 3 – item: 3.1.4.1 Entrevista com o diretor de análise e aprovação de projetos da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu (PMFI)).



2.4.2.1 Telha de fibrocimento

No Brasil, as telhas onduladas de fibrocimento possuem um papel importante na construção das habitações de interesse social (HIS), pois são elementos construtivos de baixo custo. Depois da lona preta, a telha de fibrocimento é o primeiro produto empregado no telhamento das coberturas das HIS, devido à acessibilidade econômica do produto (COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017). A predominância do uso da telha de fibrocimento nas coberturas das edificações, tanto nas edificações só com telhado ou compostas de telhado e laje, se dá em virtude do menor custo (BALHAZAR, 2012). O fibrocimento é um material compósito, ou seja, formado a partir da união de outros materiais, utiliza como ligante o cimento Portland (COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017). Segundo a Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto (ABREA), o amianto, material de origem mineral, era a principal fibra utilizada na fabricação das telhas de fibrocimento até a sua proibição no ano de 2017 (ABREA, 2018). O amianto foi substituído pela tecnologia das fibras sintéticas (polipropileno). A Tabela 2-1, apresenta as normas vigentes relativas à telha de fibrocimento.

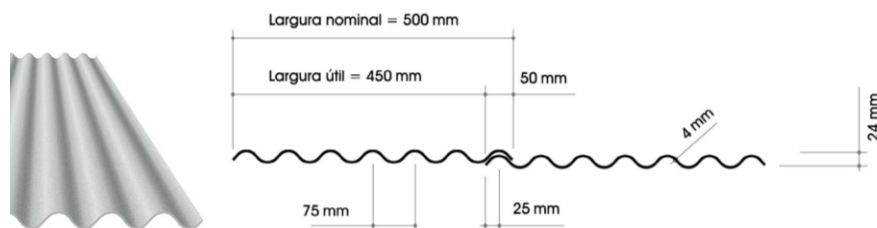
Tabela 2-1: Normas vigentes referente a telha de fibrocimento.

ABNT NBR	Título
5643:2022	Telhas onduladas de fibrocimento sem amianto - Verificação da resistência a cargas uniformemente distribuídas
7196:2020	Telhas de fibrocimento sem amianto - Execução de coberturas e fechamentos laterais – Procedimento
15210-1:2019	Telhas onduladas e peças complementares de fibrocimento sem amianto
15210-1	Cimento reforçado com fios sintéticos
7581:2012	Emenda 1:2014 - Telha ondulada de fibrocimento

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nas ABNT (2022); ABNT (2020); ABNT (2019); ABNT (2015) e ABNT (2014).

“As telhas de fibrocimento possuem dimensões que podem suprir grandes vãos, proporcionando facilidade e rapidez na execução de coberturas [...]” (SALGADO, 2018, p. 160). As telhas de fibrocimento possuem variados modelos e espessuras, são incombustíveis, leves, resistentes e duráveis; é um material de fácil instalação, exige estrutura de apoio de pouco volume (ROSSIGNOLO; FABRÍCIO, 2004).

Para este trabalho, será adotado o modelo de telha de fibrocimento ondulada da marca Eternit – modelo vogatex de 4mm de espessura (Figura 2-87) (ver Capítulo 3 – item 3.1.4 Definição dos materiais construtivos do modelo real) (ETERNIT, 2020). As características básicas, dimensões e peso da telha encontra-se no Quadro 2-3, e as características técnicas no Quadro 2-4.

Figura 2-87: Dimensões da telha de fibrocimento adotada.

Fonte: Eternit (2020).

Quadro 2-3: Características básicas do modelo de telha adotado.

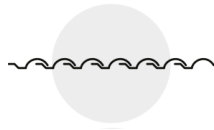
Comprimento (m)	Peso Nominal (kg)
1,22	4,5
2,13	7,8
2,44	9,00
Espessura	4mm
Peso médio em cobertura	10kg/m ²
Vão livre máximo	1,10 m
Inclinação mínima	15° (27%)

Fonte: Eternit (2020).

Quadro 2-4: Características técnicas do modelo de telha adotado.

Composição básica	Cimento reforçado com fios sintéticos
Condutividade térmica	0,31 W/m °C
Peso específico	$\gamma = 1,6 \text{ g/cm}^3$
Isolamento sonoro	Bom, inerte a vibrações

Fonte: Eternit (2020).



2.4.2.2 Telha cerâmica

Com presença marcante na arquitetura brasileira, as telhas cerâmicas, popularmente conhecidas como telhas de barro, são consideradas as de uso mais tradicional no Brasil, em residenciais unifamiliares (ROSSIGNOLO; FABRÍCIO, 2004). Segundo Salgado (2018), as telhas cerâmicas continuam sendo muito empregadas, principalmente nas edificações de pequeno porte.

De acordo com Yazigi (2021), a moldagem das telhas pode ser feita diretamente por prensagem ou por extrusão, seguida de prensagem. O resultado é um material compacto, mais leve e impermeável. A Tabela 2-2, apresenta as normas vigentes relativas à telha cerâmica.

Tabela 2-2: Norma vigente referente a telha cerâmica.

ABNT NBR	Título
15310	Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio
8039	Projeto e execução de telhados com telhas cerâmicas tipo francesa - Procedimento

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na ABNT (2009) e (ABNT, 1983) .

As telhas cerâmicas são feitas de barro cozido, apresentam bom desempenho térmico, durabilidade e resistência mecânica, são muito empregadas em edificações residenciais (CALIL; MOLINA, 2010). Possuem formatos e dimensões variadas, entre 10 a 25mm de espessura, são comumente empregadas nas construções principalmente pela durabilidade e economia (PIANCA, 1979). Esse tipo de telhado necessita de uma estrutura mais reforçada, não permite telhados com pouca inclinação (CALIL; MOLINA, 2010). São vendidas no acabamento natural, resinada, esmaltada ou hidrofugada. A esmaltação, garante texturização lisa às telhas cerâmicas com a técnica de coloração. A impermeabilização ou hidrofugação, é um processo para repelir a água através da aplicação de componentes impermeabilizantes, ambos os processos de acabamentos proporcionam maior tempo de vida útil da telha cerâmica sem a formação de manchas (ANICER, 2022).

Não existindo um consenso na literatura com relação aos modelos e tipologias das telhas cerâmicas, serão apresentadas algumas definições que são frequentemente utilizadas.

Segundo Pianca (1979), os modelos são classificados como curvos ou planos. As telhas curvas, chamadas também de coloniais ou canudo, possuem o formato de um tronco de cone. As telhas planas, possuem em uma das bordas longitudinais canais para encaixe e nas bordas inferiores e superiores cutelos em sentidos opostos, as telhas francesas são exemplos das telhas planas.

As telhas cerâmicas podem ser classificadas dos seguintes modelos segundo Calil e Molina (2010, p. 10):

- a) *Paulista*: composta por duas partes denominadas capa e bica”.[...] apresenta a capa com largura ligeiramente inferior ao canal. É também conhecida como *Colonial Redonda*;
- b) *Colonial*: essa telha caracteriza-se por apresentar o mesmo tipo de peça para a capa e bica (larguras iguais), e é também conhecida como *Paulistinha*;
- c) *Plan*: é uma variação da telha colonial, que apresenta formas retas, e é também conhecida como *Planzinha*;
- d) *Romana*: esta telha é uma evolução da telha *Plan*;
- e) *Francesa*: tem forma quadrada e é composta de uma só peça, algumas reentrâncias e pequenas saliências para fixação.

A norma 15310 - Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2009, p. 5), denomina os principais modelos de telhas como sendo:

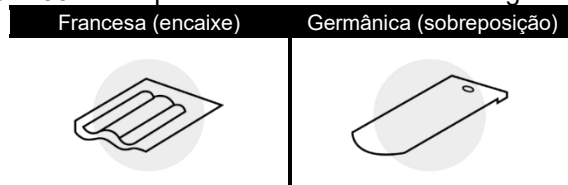
- f) Telhas planas de encaixe: Telhas cerâmicas planas que se encaixam por meio de sulcos e saliências, apresentando pinos, ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio [...];
- g) Telhas compostas de encaixe: Telhas cerâmicas planas que possuem geometria formada por capa e canal no mesmo componente, para permitir o encaixe entre si, possuem pinos, ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio [...];
- h) Telhas simples de sobreposição: Telhas cerâmicas formadas pelos componentes capa e canal independentes. A concavidade ou convexidade define a utilização como canal ou capa respectivamente. O canal deve apresentar pinos, furos ou pinos e furos de amarração, para fixação na estrutura de apoio; a capa está dispensada de apresentar furos ou pinos [...];
- i) Telhas planas de sobreposição: Telhas cerâmicas planas que somente se sobrepõem e que podem ter pinos para o encaixe na estrutura de apoio ou pinos e furos de amarração para fixação [...].

De acordo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), com base na (ABNT, 2009). As telhas cerâmicas podem ser divididas em três categorias: planas, simples e compostas (ANICER, 2022).

a) Planas:

“Telhas usadas em telhados com maior inclinação. Além de sua função estética, foram projetadas para regiões com condições climáticas desfavoráveis, como ventanias e nevascas. Isso garante tanto maior proteção para a construção assim como prolonga o tempo de vida útil das telhas sob essas condições” (ANICER, 2022, p. 3) (Figura 2-88).

Figura 2-88: Exemplos de telhas cerâmicas categoria planas.

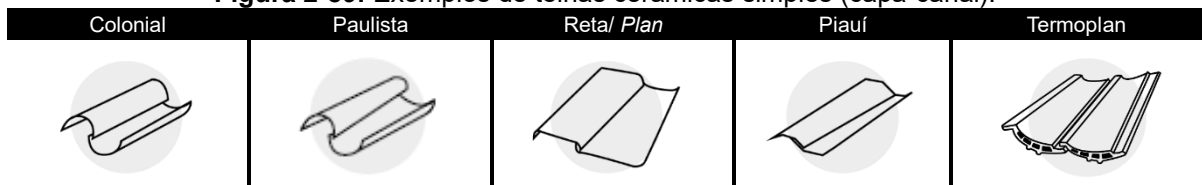


Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABNT (2009) e ANICER (2022).

b) Simples:

“Telhas de sobreposição. São dispostas alternadamente: uma côncava para proteger da chuva (telha capa), e outra convexa para escoá-la (telha canal/bica). Alguns modelos têm pares iguais tanto para a telha capa quanto para a canal, bastando girar 180° para ser posicionada” (ANICER, 2022, p. 1) (Figura 2-89).

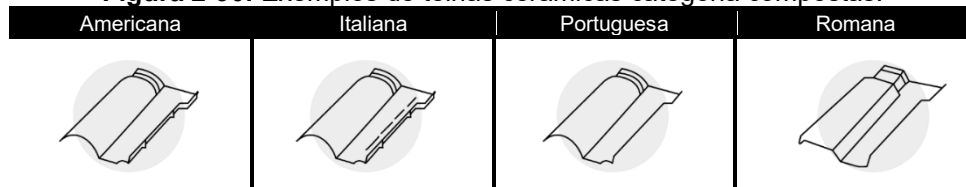
Figura 2-89: Exemplos de telhas cerâmicas simples (capa-canal).



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABNT (2009), ANICER (2022) e de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1988).

c) Compostas:

“Telhas de encaixe. Têm as funções de capa e canal na mesma peça. Sobrepõem e encaixam-se umas às outras e geralmente cobrem mais área por unidades de telha [...]” (ANICER, 2022, p. 2) (Figura 2-90).

Figura 2-90: Exemplos de telhas cerâmicas categoria compostas.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABNT (2009) e ANICER (2022).

O Quadro 2-5, apresenta as características básicas, dimensões e peso da telha cerâmica, e o Quadro 2-4, as características técnicas.

Quadro 2-5: Características básicas do modelo de telha adotado.

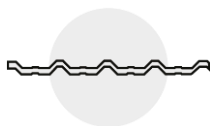
Comprimento / Largura (cm)	Peso Nominal (kg)
24,5 x 45,5	2,60
Espessura	15mm
Peso médio em cobertura	44,2kg/m ²
Inclinação mínima	19,29° (35%)

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base Salgado (2018).

Quadro 2-6: Características técnicas do modelo de telha adotado.

Composição básica	Argila
Condutividade térmica	1,05 W/m °C

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base (LABEEE, 2010).



2.4.2.3 Telhas metálicas (telha de aço e telha termoacústica)

As telhas metálicas empregadas nas coberturas das edificações são dos seguintes materiais: zinco, alumínio, ferro, cobre e chumbo. “Esses metais são empregados sob as formas de chapas planas sendo que o zinco, o alumínio e o ferro aplicam-se também sob a forma de chapas onduladas” (PIANCA, 1979, p. 540). Em 2014, as telhas de aço representaram 18,9% do mercado brasileiro de coberturas, com cerca de 124 milhões m² do mercado. O tipo de telha trapezoidal e ondulada corresponde a 66% da produção total, o tipo de acabamento sem pintura corresponde a 60% do total (ABCCEM, 2015). A Tabela 2-3, apresenta as normativas vigentes relativas às telhas metálicas.

Tabela 2-3: Normas vigentes referente a telhas metálicas.

ABNT NBR	Título
16373	Telha Termoacústica
14514	Telha de aço Trapezoidal

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nas ABNT (2015) e ABNT (2008).

Um fator positivo das coberturas metálicas é o pouco peso, exigindo menores dimensões das estruturas dos vigamentos, tornando-as mais econômicas no âmbito estrutural. O zinco e alumínio, são produzidos na forma de chapas onduladas ou planas, quando planas possuem relevos. As folhas pesam de 3 a 5 kg a unidade. A diferença do ferro para o zinco é que este deve ser galvanizado, devido a facilidade na oxidação. O cobre é considerado um excelente material para as coberturas, resiste a intempéries, pois adquire uma camada protetora de óxido, denominada patina, que o protege da oxidação (PIANCA, 1979).

Segundo o Manual Técnico Telhas de Aço da Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM, 2009), as telhas metálicas (de zinco e alumínio) são fornecidas com e sem isolamento termoacústico (Figuras 2-91 e 2-92). Quando possuem isolamento termoacústico, proporcionam redução do ruído externo e alto isolamento térmico para as coberturas. As telhas termoacústicas são produzidas em dois perfis: o primeiro perfil (P1), é constituído de duas telhas trapezoidais com núcleo de material isolante, constituindo camadas, essas telhas são comumente chamadas de “sanduíche”, o segundo formato (P2), é constituído de uma única telha metálica trapezoidal com o isolamento acoplado a ela (Figura 2-92), sendo o P1 o mais empregado em edificações residenciais.

Figura 2-91: Perfil das telhas metálicas sem isolamento (ondulada e trapezoidal).



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Figura 2-92: Perfil das telhas metálicas com isolamento.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

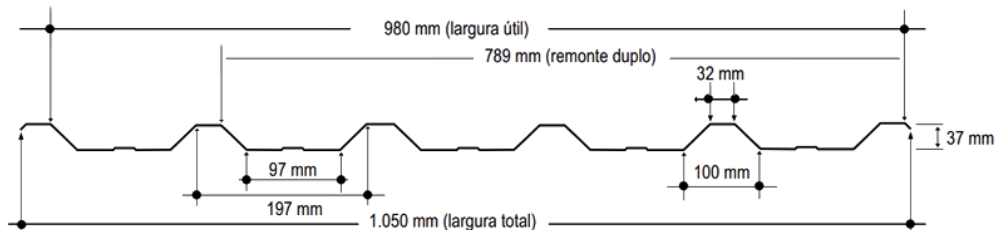
Nas telhas termoacústicas são utilizados os seguintes materiais: poliuretano (PUR), poliestireno (EPS), poliisocianurato (PIR) e a lã de rocha. O isolamento térmico varia de acordo com os materiais, no caso o poliestireno comparado aos outros isolantes é o mais utilizado, pois tem um bom desempenho termoacústico a um custo menor (ABCEM, 2009). Para avaliação térmica foi relacionado um comparativo de condutividade térmica entre o poliestireno e o poliuretano. Para o seu cálculo são utilizados, a espessura e a condutividade térmica (k), entre outros fatores (Tabela 2-4).

Tabela 2-4: Comparativo entre o poliuretano (PU) e o poliestireno (EPS).

Material	Espessura (mm)	Densidade (Kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/(m.K))
Poliuretano	50	35/45	0,016
	30	35/45	0,016
Poliestireno	48	20/25	0,26
	35	20/25	0,26
	14	20/25	0,26
	50	13/16	0,29
	40	13/16	0,29
	20	13/16	0,29

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABCEM (2009).

Para este trabalho será adotado o modelo de “telha de aço trapezoidal” de 5mm de espessura (Figura 2-93), e a “telha termoacústica” de 30mm de espessura com poliestireno (Figura 2-94) (ver Capítulo 3 – item 3.1.4 Definição dos materiais construtivos do modelo real). Os Quadros 2-7 e 2-8, apresentam as características básicas, dimensões e peso, e os Quadro 2-9 e 2-10, apresentam as características técnicas das telhas metálicas.

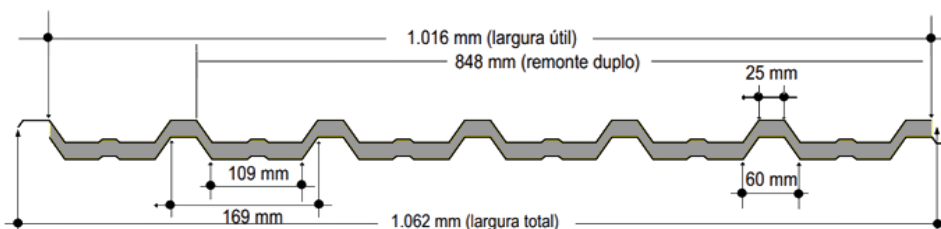
Figura 2-93: Dimensões da telha de aço trapezoidal adotada.

Fonte: Adaptado de ABCEM (2009).

Quadro 2-7: Características básicas da telha de aço trapezoidal.

Largura (m)	Peso Nominal (kg)
0,98	4,85
Espessura	5mm
Peso médio em cobertura	4,85kg/m ²
Inclinação mínima	2,86° (5%)

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABCEM (2009).

Figura 2-94: Dimensões da telha de aço termoacústica adotada.

Fonte: Adaptado de ABCEM (2009).

Quadro 2-8: Características básicas da telha de aço termoacústica.

Largura (m)	Peso Nominal (kg)
1,016	varia de 7 a 10
Espessura	30mm
Peso médio em cobertura	7 a 10 kg/m ²
Inclinação mínima	2,86° (5%)

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABCEM (2009).

Quadro 2-9: Características técnicas da telha de aço trapezoidal.

Composição básica	Zincados por imersão a quente
Condutividade térmica	55 W/m°C

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABCEM (2009).

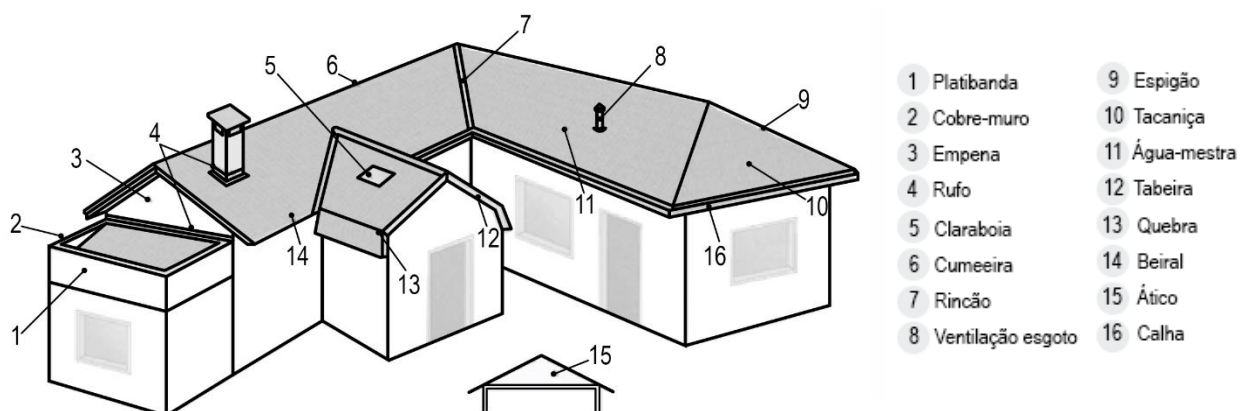
Quadro 2-10: Características técnicas da telha de aço termoacústica.

Composição básica	Zincados por imersão a quente
Condutividade térmica	0,47 W/m°C

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base ABCEM (2009).

2.4.2.4 Componentes do subsistema de cobertura com telhado

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1988) e a (ABNT, 2021a), o telhado é a parte da cobertura constituída pelas telhas e peças complementares, seus componentes são definidos conforme a Figura 2-95 e o Quadro 2-11:

Figura 2-95: Componentes do subsistema de cobertura com telhado.

Fonte: Adaptado de ABNT (2021a).

Quadro 2-11: Definição dos termos das partes de uma cobertura com telhado.

Termos	Definição
1 Platibanda	Espécie de mureta construída na parte superior das construções, delimita o telhado ou terraço, na maioria dos casos esconde o telhado
2 Cobre-muro	Trata-se de uma peça moldada, geralmente um elemento metálico, que tem como função evitar infiltrações da água da chuva ou umidade
3 Empena	Parte superior das paredes externas, acima do forro, fechando o vão formado pelas duas águas do telhado
4 Rufo	Geralmente um elemento metálico, cuja função é a proteção contra infiltração em relação os encontros entre o telhado e a construção (parede)
5 Claraboia	Abertura na cobertura para iluminar o interior da edificação
6 Cumeeira	Aresta horizontal na parte mais alta do telhado, delimitada pelo encontro entre duas águas
7 Rincão	Aresta inclinada e reentrante. É também chamado de água furtada
8 Ventilação do esgoto	Tem a função de emitir os gases contidos no interior das tubulações dos sanitários
9 Espigão	Aresta inclinada, formada pelo encontro de duas águas, formando um ângulo saliente. É um divisor de águas
10 Tacaniça	Plano do telhado em forma triangular originada por dois rincões
11 Água-mestra	Água principal de maior área, geralmente trapezoidal, existente em telhados de três ou quatro águas
12 Tabeira	São peças de madeira, utilizadas para fazer o acabamento do beiral
13 Quebra	Mudança no caimento de uma água, ocorrendo uma quebra na seção
14 Beiral	Projeção do telhado para fora do alinhamento da parede externa.
15 Ático ou desvão	Espaço compreendido entre o telhado e forro ou laje de forro
16 Calha	Coletores de águas pluviais, instaladas nas extremidades dos beirais, com ramificações até o solo

Fonte: Adaptado Salgado (2018), Junior e Cesar (2010) e ABNT (2021a).

2.4.2.5 Classificação das coberturas com telhados

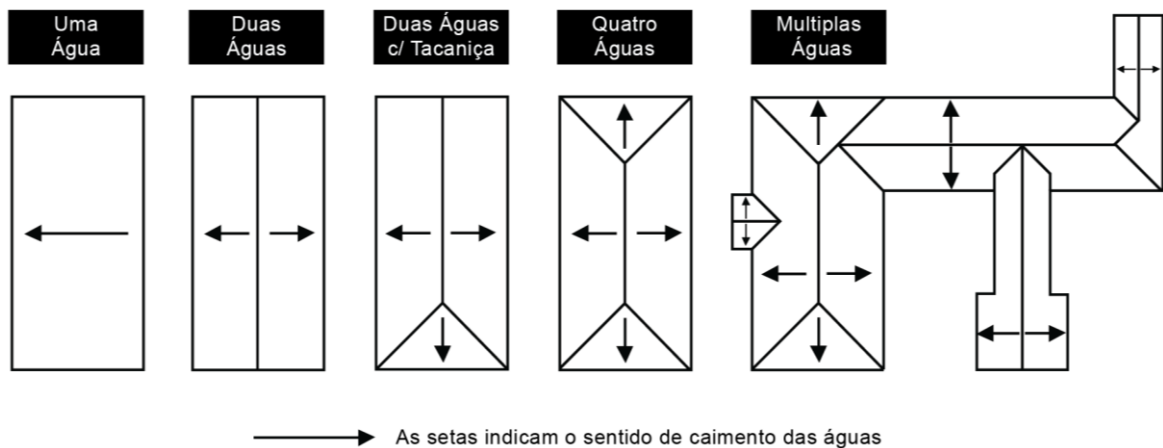
De acordo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1988), a planta da edificação a ser coberta é o que influencia diretamente na configuração (forma, quantidade de águas, armação) de um telhado. Após definir que a edificação será coberta com telhado, a próxima etapa será analisar o formato da planta baixa do projeto, e essa, por sua vez, direcionará para o formato da cobertura e sequentemente para a escolha do tipo de estrutura. Quanto a forma do telhado, será apresentado no Quadro 2-12 e Figura 2-96 as principais classificações.

Quadro 2-12: Classificação das principais formas de telhados.

Classificação	Definição
Simples ou de uma água	Telhado de alpendre ou simplesmente alpendre, telhado constituído ou formado por uma única água, formando um plano inclinado, que encaminha a água para uma das fachadas
Duas águas	Telhado composto por dois planos inclinados, podendo ser iguais ou distintas, geralmente são unidos por uma linha central denominada cumeeira ou distanciadas decorrentes as elevações serem de alturas distintas
Duas águas c/ Tacaniça	Telhado de três águas, composto por dois planos inclinados principais e um outro plano em forma de triângulo, que recebe o nome de tacaniça.
Quatro águas	Telhado composto de quatro planos inclinados, duas águas mestras e duas tacaniça, podendo ser regulares ou irregulares, cujas vertentes se intersectam definindo uma cumeeira e quatro rincões
Múltiplas águas	Telhado composto de múltiplos planos inclinados, as plantas desses telhados são determinadas por superfícies poligonais

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1988), ABNT (2021a) e Salgado (2018).

Figura 2-96: Classificação das principais formas de telhados citadas acima.



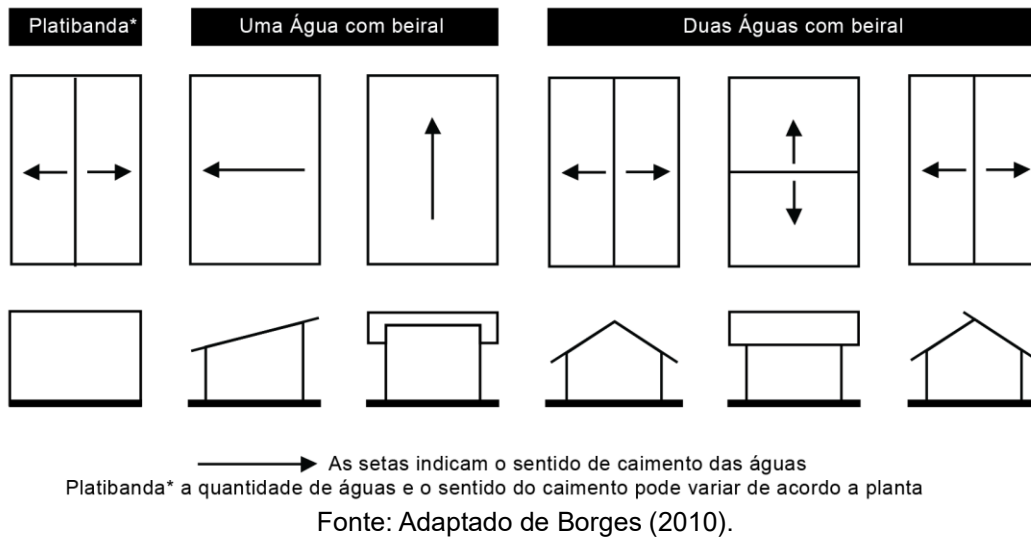
→ As setas indicam o sentido de caimento das águas

Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1988).

As quatro primeiras configurações do telhado são consideradas as formas fundamentais, as quais podem ser combinadas resultando em formas mais complexas, como o caso do telhado de múltiplas águas (Figura 2-96) (IPT, 1988).

Do ponto de vista projetual e construtivo os telhados de uma e duas águas são as soluções mais adotadas nos projetos, pois são mais simples a execução (CALIL; MOLINA, 2010). A Figura 2-97, apresenta algumas das configurações mais empregadas nos telhados de uma e duas águas.

Figura 2-97: Configurações mais empregadas nos telhados de uma e duas águas.

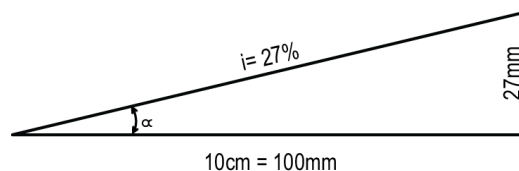


2.4.2.6 Inclinação do telhado

A inclinação do telhado pode ser medida por meio de 3 sistemas de referência, de acordo Montenegro (1984, p. 103):

1. Grau: Fora de uso pela dificuldade de leitura de ângulos com transferidor na obra.
2. Ponto: Corresponde à razão ou relação entre a altura (flecha) e o vão. Por exemplo, para o ponto de 1/5, uma tesoura de 10m de vão teria 2m de altura. Foi o sistema adotado na arquitetura colonial, porém está em desuso [...].
3. Porcentagem: Representa pela inclinação da hipotenusa de um triângulo retângulo tendo o cateto maior na horizontal e medindo 10cm = 100mm. O cateto menor (vertical) terá tantos milímetros quanto a porcentagem usada. Por exemplo: a inclinação (i) ou declive de 27% corresponde ao ângulo do triângulo onde o cateto menor mede 27mm (Figura 2-98).

Figura 2-98: Sistema de referência para análise da inclinação do telhado através da hipotenusa.



Fonte: Montenegro (1984).

De acordo com o autor, a escolha da inclinação do telhado deve ser baseada em função do clima da região (exemplo, de acordo a quantidade de chuva da região, nos casos de regiões que possuem uma média anual com muita chuva considerar aumentar a inclinação do telhado em relação ao mínimo exigido), e do tipo de telha (ver as recomendações do fabricante da inclinação mínima de acordo o modelo).

2.4.3 Estrutura

Entende-se que a cobertura de uma edificação com telhado é composta basicamente de dois elementos principais, a estrutura, destinada a suportar os elementos da cobertura, e o telhado, que cobre a estrutura, dando proteção à obra (CALIL; MOLINA, 2010). A estrutura dos telhados tem como função a sustentação e fixação das telhas, transmitindo os esforços solicitantes para os elementos estruturais da edificação, garantindo assim a estabilidade do telhado. Para a estrutura dos telhados, é necessário obedecer às especificações e dimensões de cada tipo de telha, respeitando a distância dos apoios, considerando a resistência à flexão (ROSSIGNOLO; FABRÍCIO, 2004).

O material das estruturas pode ser de madeira, metal e até mesmo de concreto segundo Salgado (2018). Moliterno (2011, p. 2) complementa, “as estruturas que compõem a armação dos telhados podem ser totalmente ou parcialmente executadas em madeira, aço, alumínio ou concreto armado. A armação dos telhados executados em madeira denomina-se também madeiramento”. Para as estruturas de madeira, deve-se tomar alguns cuidados, a madeira deve ser realmente de lei (madeira dura e compacta) e isenta de umidade (madeira seca) para não haver comprometimento da estrutura por retração (SALGADO, 2018).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente - ABIMCI (2009), o setor florestal na construção civil está concentrado nos produtos de acabamento, esquadrias, molduras, pisos e estruturas de telhados. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 2009) reforça, que o uso concentrado de madeira na construção civil está também nas estruturas de telhados. Mesmo que para âmbitos de simulação computacional não seja necessária a análise do tipo e material da estrutura da cobertura, a seguir, como complemento do tema, será apresentado alguns dos componentes principais das estruturas de telhados feitos em madeira.

2.4.3.1 Componentes da estrutura de madeira

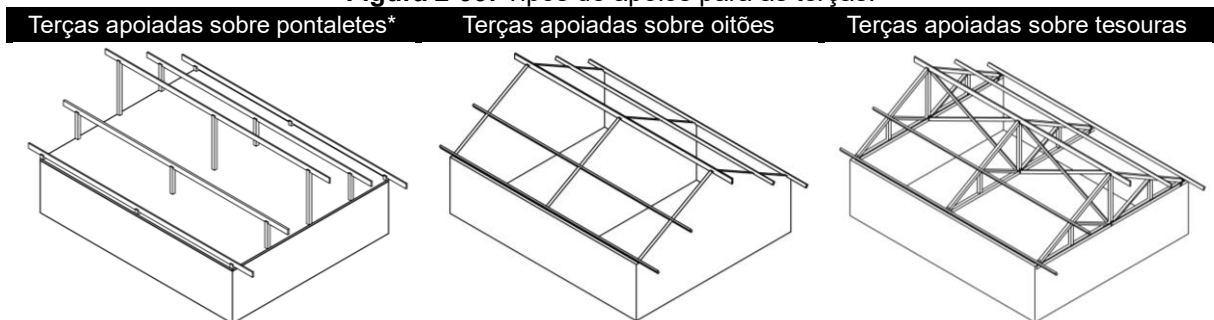
A estrutura do telhado geralmente é composta de um sistema treliçado destinado a suportar todo o carregamento da cobertura, além dos esforços provenientes da ação das intempéries (SALGADO, 2018). A disposição dos elementos

estruturais dos telhados, também denominado como armação¹², depende em grande parte da planta do edifício (PIANCA, 1979). O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1988), caracteriza a estrutura do telhado pela união da estrutura principal e pela estrutura secundária. Os itens que compõem a estrutura principal e a estrutura secundária segundo Borges (2010), são:

- a) Estrutura Principal ou Apoio: tem a função de receber e distribuir adequadamente as cargas do telhado ao restante da edificação, constituída geralmente por pontaletes, vigas ou lajes, tesouras e oitões (Figura 2-99);
- b) Estrutura Secundária ou Trama: a função principal a sustentação das telhas, constituída geralmente por terças, caibros e ripas (Figura 2-100).

Às terças, são peças muito importantes em um telhado, são dispostas horizontalmente, colocadas na direção perpendicular à estrutura de apoio, são utilizadas tanto para a estrutura das telhas cerâmicas quanto para as telhas de fibrocimento, metálicas e demais. Essas peças geralmente estão apoiadas sobre: pontaletes, oitões ou paredes intermediárias, ou sobre tesouras ou treliças, como apresenta abaixo Figura 2-99.

Figura 2-99: Tipos de apoios para as terças.



Pontaletes*: Nesse tipo de estrutura as terças podem ser apoiadas direto na laje, como na imagem ou nas paredes da edificação, que servem de apoio, nesse caso dependerá do projeto.

Fonte: Adaptado de Cardoso (2000).

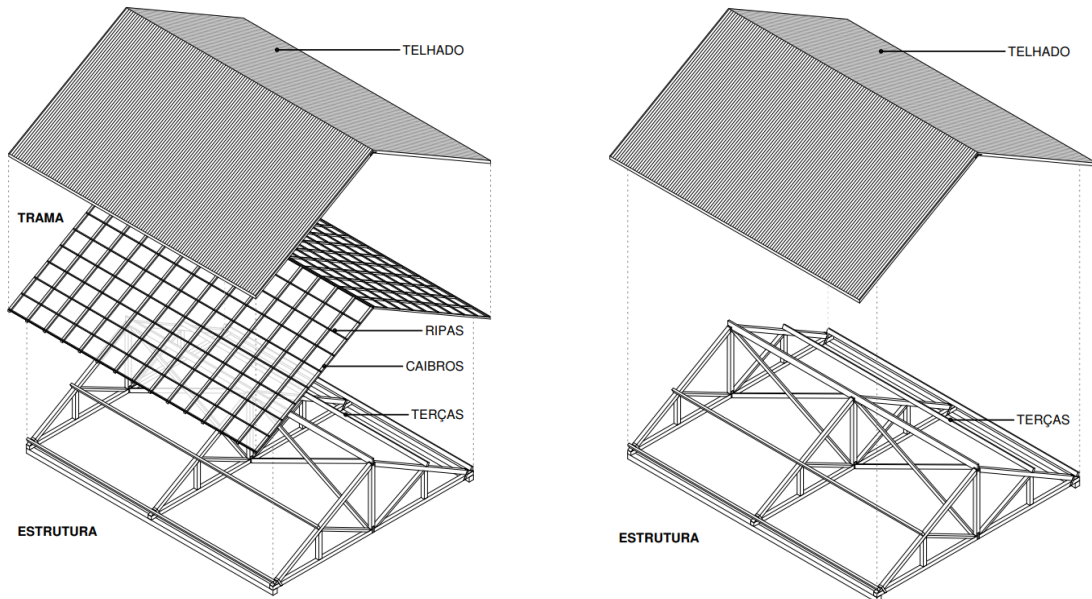
De acordo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1988), na estrutura de um telhado, a trama, serve de sustentação e fixação para telhas menores, com pequenas dimensões, como as telhas cerâmicas e de concreto. A trama geralmente é constituída por terças, caibros e ripas de madeira. No caso das telhas de dimensões maiores, como as telhas de fibrocimento e metálicas, não é necessário os caibros e ripas, dispensando a trama nesse caso (Figura 2-100).

¹² Armação, “[...] corresponde ao conjunto de elementos estruturais para sustentação da cobertura, tais como: ripas, caibros, terças, tesouras e contraventamentos” (MOLITERNO, 2011, p. 2).

Figura 2-100: Apoio das telhas.

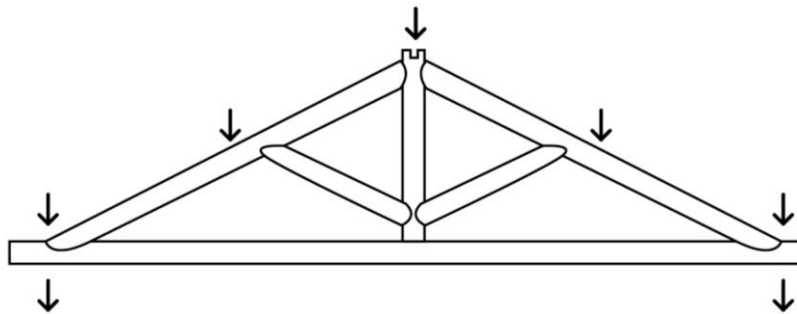
Trama e terças, uso para telhas menores
(cerâmica, concreto...)

Apenas terças, para telhas maiores
(fibrocimento, metálicas...)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na Associação Brasileira de Cimento Portland (2013) e Salgado (2018).

Em um telhado de duas águas, a tesoura é considerada a estrutura principal adotada. Serve para transferir o carregamento do telhado às estruturas verticais da edificação (MOLITERNO, 2011). A tesoura funciona como elemento de absorção, esse processo ocorre através da distribuição das cargas do telhado e ações do vento, transmitindo através da estrutura secundária (terças, caibros e ripas) as cargas do telhado e descarregando nos pontos denominados nós. Os esforços atuantes nessa estrutura são de compressão e tração, recebendo assim apenas carga vertical (MONTENEGRO, 1984) (Figura 2-101).

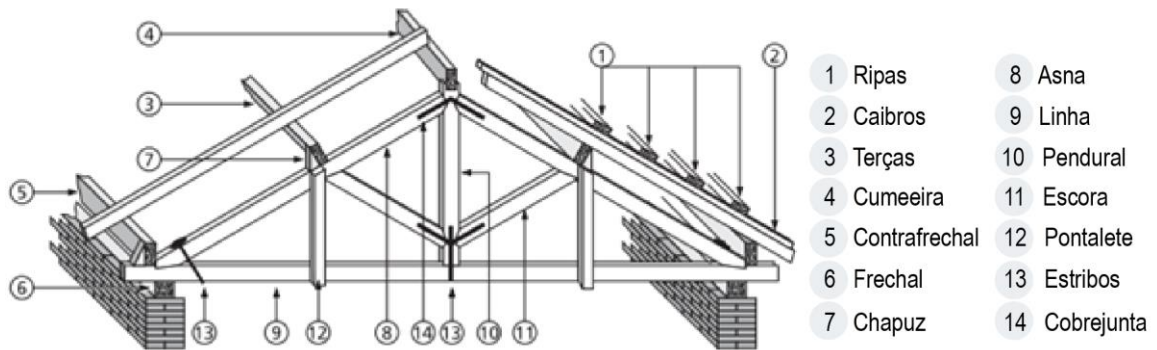
Figura 2-101: Esforços atuantes na tesoura.

As setas indicam as cargas do telhado, consideradas cargas exclusivamente verticais nos apoios

Fonte: Adaptado de Montenegro (1984).

As tesouras são muito eficientes para vencer vãos sem apoios intermediários. São estruturas planas verticais que recebem cargas paralelamente ao seu plano, transmitindo-as aos seus apoios. São consideradas estruturas autoportantes constituídas de diversas peças formando uma estrutura treliçada (SALGADO, 2018). Abaixo, será apresentado os principais componentes da estrutura da tesoura (Figura 2-102) (Quadro 2-13).

Figura 2-102: Componentes da tesoura.



Fonte: Adaptado de Moliterno (2011).

Quadro 2-13: Definição dos termos das partes da estrutura da cobertura.

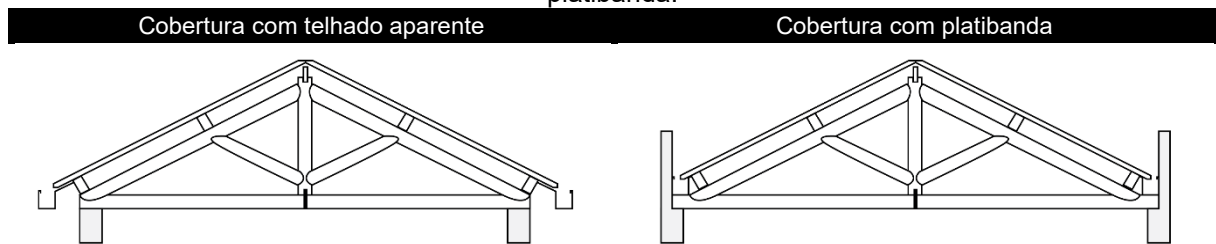
Termos	Definição
1 Ripas	Peça de apoio das telhas, pregada sobre os caibros.
2 Caibros	Peças de apoio para as ripas, pregadas sobre as terças.
3 Terças	Peça localizada entre o frechal e a cumeeira que tem a finalidade de travar as tesouras e suportar a estrutura de caibros.
4 Cumeeira	Parte mais elevada de um telhado, na interseção de duas águas-mestras; cumeada, cavalete de telhado.
5 Contrafrechal	Considerada a terça menos elevada, se apoia sobre a peça horizontal da tesoura, na mesma perpendicular do frechal.
6 Frechal	Peça colocada sobre a parede e sob a tesoura, para distribuir a carga do telhado.
7 Chapuz	Peça de madeira com formato geralmente triangular, é fixada na tesoura, tem como objetivo servir de apoio para a terça.
8 Asna	Asna ou escoras: São peças de ligação entre a linha e a perna, encontram-se, geralmente, em posição oblíqua ao plano da linha, denomina-se asna a que sai do pé do pendural, as demais de escoras. Geralmente trabalham à compressão.
9 Linha	Peça que corre ao longo da parte inferior de tesoura e vai de apoio a apoio, geralmente trabalham à tração; Peça de alinhamento da tesoura que recebe todos os esforços da tesoura e pela qual é transmitida a estrutura principal da obra.
10 Pendural/ Tirante	Peça em diagonal destinada ao travamento, absorvendo os esforços de tração da tesoura. São peças que ligam a linha à perna. Denomina-se pendural quando a sua posição é no cume, e nos demais tirante.
11 Escora	Elemento oblíquo de distribuição das cargas de um telhado.
12 Pontalete	Peça de madeira na posição vertical, utilizada como escora nas asnas.
13 Estribos	São ferragens que garantem a união entre as peças das tesouras. Podem trabalhar à tração ou cisalhamento. Servem para resistir as forças verticais.
14 Cobre-junta	Elemento metálico que garante a união entre as peças.

Fonte: Adaptado de Salgado (2018) e Moliterno (2011).

2.4.4 Captação

Tanto nos telhados de platibanda ou de beirado (telhado aparente) (Figura 2-103), as águas pluviais, são recolhidas por meio de condutores, estes são constituídos pelas calhas e rincões (ver Figura 2-95), as águas da chuva são coletadas através das tubulações de queda e são encaminhadas ou em um reservatório (cisterna), ou a estação de tratamento de água (ETA). A platibanda é um muro, geralmente de alvenaria, com altura e espessura variável, tem a função de esconder o telhado, ou as bordas do telhado (PIANCA, 1979).

Figura 2-103: Representação das calhas em coberturas com telhado aparente e coberturas com platibanda.



Fonte: Adaptado de Pianca (1979).

Nas edificações precisam ser previsto o sistema de captação das águas pluviais recolhido das coberturas. Os sistemas de captação de águas pluviais são compostos basicamente de calhas e condutores (SALGADO, 2018). Segundo Rossignolo e Fabrício (2004), em uma cobertura com telhado “[...] o sistema de drenagem das águas pluviais, por meio de elementos de proteção, captação e escoamento [...]”, deverá ser especificado, sendo estes:

- a) Projeto arquitetônico: indicação dos rufos, contra-rufos, calhas, coletores e canaletas;
- b) Projeto hidráulico: indicação dos tubos de queda, caixas de derivação e redes pluviais.

Assim como as estruturas, o sistema de captação das águas pluviais indefere no quesito das simulações computacionais termoenergéticas. O que importa nessa questão, são as duas tipologias avaliadas. Para as simulações foi testado a tipologia de cobertura de telhado aparente (ver Capítulo 3 – item 3.1.3 Definição do projeto arquitetônico do modelo real).

2.5 DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS DE COBERTURAS

Primeiramente será apresentado os conceitos de conforto térmico e desempenho termoenergético, para que seja entendido a relação direta dos sistemas de coberturas e o desempenho térmico.

2.5.1 Conforto Térmico

De acordo Simmonds (2022, *apud* ASHRAE, 2020b, p. 1), “o conforto é definido como as condições sob as quais oitenta por cento ou mais dos ocupantes do edifício encontrarão uma área termicamente aceitável em condições de ar calmo e sombra.” Segundo LABEEE (2016, p. 6), “o conceito de conforto térmico se refere ao estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda [...]”. A insatisfação é causada pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, isso ocorre, quando não há estabilidades entre o calor produzido pelo corpo humano e o calor perdido para o ambiente. O conforto térmico depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos.

Os fatores físicos determinam as trocas de calor do corpo com o meio; já os fatores fisiológicos referem-se a alterações na resposta fisiológica do organismo, resultantes da exposição contínua a determinada condição térmica; e finalmente os fatores psicológicos, que são aqueles que se relacionam às diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, frutos da experiência passada e da expectativa do indivíduo (LABEEE, 2016, p. 6).

Os fatores citados acima têm relação direta com as variáveis ambientais, sendo essas: a temperatura do ar; temperatura radiante média; velocidade do ar e umidade relativa do ar (ABNT, 2021b).

Os estudos relacionados ao conforto térmico estabelecem métodos e princípios para análise térmica de um ambiente, bem como estabelecem as condições necessárias para avaliar e conceber ambientes com condições térmicas adequadas ao clima da região e às atividades desenvolvidas no ambiente. Esses estudos são baseados em três fatores: na satisfação do usuário em sentir-se termicamente confortável; na produtividade do ser humano (o desconforto térmico reduz a produtividade); e na redução de energia (as pessoas passam grande parte de suas vidas em ambientes condicionados artificialmente) (LABEEE, 2016).

Quando se propõem adaptar a edificação ao modelo de conforto térmico ideal são realizadas medidas necessárias para manter a temperatura interna confortável em relação a temperatura externa predominante. Esse tipo de estudo proporciona saber quais temperaturas serão aceitáveis em um edifício em um determinado clima, essa análise torna-se muito útil, principalmente quando um edifício está operando sem aquecimento ou resfriamento artificial ou quando deseja proporcionar a redução no consumo de energia. Essa relação entre a diferença da temperatura externa e interna necessária, permite que os profissionais da construção verifiquem, “[...] por meio de simulação térmica computacional, se um projeto proposto seria capaz de fornecer conforto térmico durante o clima quente sem resfriamento mecânico e durante o clima mais frio sem aquecimento” (HUMPHREYS; RIJAL; NICOL, 2013, p. 40).

2.5.1.2 Definição de Desempenho Termoenergético

Como visto anteriormente, o conforto térmico é fundamental para a satisfação do usuário, à ausência deste em uma edificação influencia diretamente no consumo energético, devido a necessidade de usar sistemas de refrigeração ou de aquecimento para atingir o conforto térmico. De acordo Roaf *et al.* (2010), um dos fatores que são responsáveis pelo aumento dos níveis de consumo de energia nos edifícios é o incentivo a construção de edificações menos saudáveis e menos confortáveis, o que levam os profissionais a projetarem ambientes que requerem um maior uso de ar condicionado. Segundo Vettorazzi (2019, p. 31), “[...] a arquitetura não tem se mostrado preocupada com os fatores locais, consumindo de maneira descomedida recursos para obtenção de conforto térmico.” Logo, uma edificação que proporcione conforto térmico contribui efetivamente para a conservação de energia, evitando desperdícios desnecessários com climatização artificial sendo uma edificação considerada com desempenho termoenergético (térmico e energético).

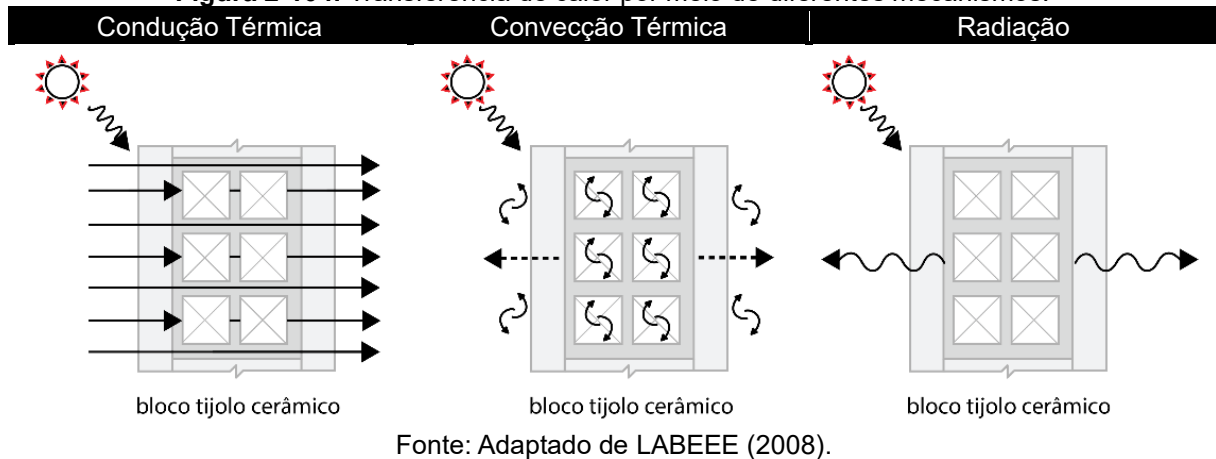
Segundo Brito e Akutsu (2015, p. 2), “o desempenho térmico das edificações é influenciado por diversos fatores como o clima, o projeto arquitetônico, a implantação, os sistemas construtivos utilizados, os revestimentos e cores empregados em fachadas e coberturas.” Para edificações unifamiliares, de baixo padrão, consideradas de pequeno porte, a envoltória torna-se o fator determinante das condições térmicas no interior dos ambientes, pois descarta-se a possibilidade de condicionamento térmico artificial.

2.5.1.3 Sistemas de Coberturas e o desempenho termoenergético

Em residências térreas, o telhado é a parte da edificação mais exposta à radiação solar, absorvendo grande parte da energia e posteriormente transferindo-a para o interior das edificações, conseqüentemente, eleva os ganhos térmicos e, aumenta a temperatura interna das edificações dessa tipologia (MICHELIS, 2007). Santos *et al.* (2020, p. 66), destaca, “[...] o aumento da temperatura interna é constatado principalmente nas residências que possuem telhas aparentes, ou seja, quando a mesma não possui forro (ou laje) para separar o espaço do teto do restante da edificação.” Michels (2007), complementa, em regiões com climas quentes, quando há a ausência de forro e laje, desencadeia o aumento significativo de desconforto dentro da edificação, pois não separa a cobertura do restante da edificação, logo, todo o calor retido pelo telhado é transmitido diretamente aos ambientes.

A transferência de calor pode acontecer por meio de diferentes mecanismos (Figura 2-104), esses são (LABEEE, 2008, p. 5,6):

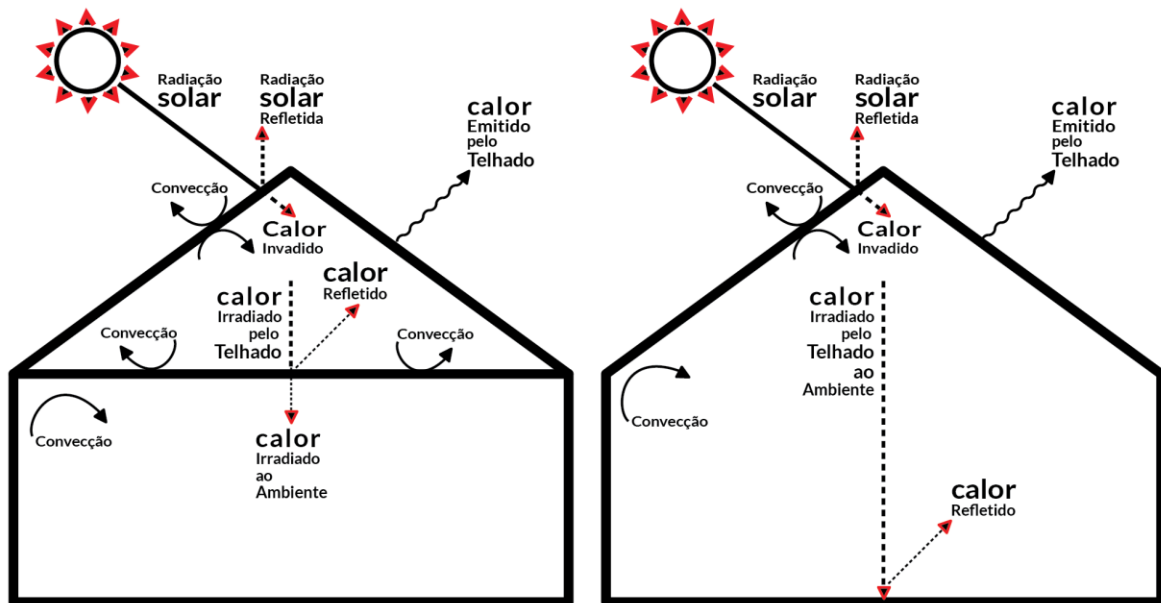
- i. **Condução Térmica:** “A condução é o transporte de energia térmica (calor) em um meio sólido devido ao gradiente de temperatura”. A transferência de calor por condução requer a presença de um meio sólido. Há materiais com alta condutividade térmica, como exemplo os metais (20 – 700 W/m K) e outros materiais que possuem baixa condutividade, como o poliestireno (EPS) (~ 0,04 W/m K) considerados isolantes térmicos. Os demais materiais sólidos, não metálicos, possuem condutividade térmica menor (0,5 e 30 W/m K);
- ii. **Convecção Térmica:** A convecção pode ocorrer de forma natural (deslocamento de ar quente para cima, e o ar frio para baixo), mista ou forçada, mediante ventiladores. Através de materiais e fluidos que transferem o calor à medida que se movimentam. A transferência de calor por convecção requer a presença de um meio fluido em movimento e uma superfície quando os dois se encontram em diferentes temperaturas. A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório, quanto pelo movimento global do fluido.
- iii. **Radiação:** Diferente dos demais, é um fenômeno superficial em que a energia do campo de radiação é transportada por ondas longas eletromagnéticas. A radiação ocorre no vácuo, sem precisar de meio sólido ou fluido.

Figura 2-104: Transferência de calor por meio de diferentes mecanismos.

É de extrema importância o entendimento do funcionamento das transferências de calor que ocorrem na envolvente da edificação. Na etapa projetual, ajuda na escolha dos melhores materiais e soluções técnicas, que garantam um desempenho térmico adequado à região climática. A análise da transferência de calor na envolvente, é uma ferramenta importante no diagnóstico do desempenho termoenergético de uma edificação (LABEEE, 2008).

Entender os processos físicos que participam na envolvente, torna fácil a compreensão do processo de aquecimento das coberturas, através da incidência da radiação solar. A radiação solar, por sua vez, é composta por radiação infravermelha de onda curta, ao incidir sobre a superfície das telhas gera o aquecimento. Uma parcela desse calor é perdida e outra parcela é absorvida pelas telhas, parte do calor perdido ao ambiente externo ocorre por convecção e irradiação, e a outra parcela, que é absorvida pelas telhas, é transmitida ao espaço correspondente ao ático. No interior do ático, ocorre a transferência de calor das telhas até a superfície da laje (ou do forro para o caso de casas sem laje), essa transferência dá-se por convecção e radiação. A laje ou forro absorve parte desse calor retido, reflete parte desse calor e irradia parte para o interior da edificação, conforme representado na Figura 2-105 (MICHELS, 2007).

Figura 2-105: Transmissões de calor opção com forro ou laje e apenas com a cobertura.



Fonte: Adaptado de Moliterno (2011).

Segundo os autores Rossignolo e Fabrício (2004) e Coelho, Gomes e Dornelles (2017), o envelhecimento das telhas é um dos fatores que pode alterar as absorvâncias desses materiais. No caso das telhas onduladas de fibrocimento, o processo de envelhecimento natural passam por três etapas ao longo de sua vida útil, que podem alterar a absorvância solar de sua superfície e o seu desempenho térmico, sendo: a carbonatação; a eflorescência e o desenvolvimento de fungos (COELHO; GOMES; DORNELLES, 2017). Pelo baixo custo, as telhas onduladas de fibrocimento são bastante utilizadas em edifícios habitacionais de padrão popular, inclusive unifamiliares, embora não proporcionem adequado conforto térmico (ROSSIGNOLO; FABRÍCIO, 2004).

As telhas cerâmicas, diferentes das telhas de fibrocimento apresentam bom desempenho termoacústico (CALIL; MOLINA, 2010). O envelhecimento das telhas cerâmicas também altera no seu desempenho térmico. Quando ocorre a mudança da coloração de avermelhada para tonalidades escuras aumenta a quantidade de calor de radiação gerada na cobertura, o que ocasiona a queda na qualidade das condições de conforto térmico (ROSSIGNOLO; FABRÍCIO, 2004). O que torna as telhas cerâmicas melhores no desempenho térmico em relação as telhas de fibrocimento é a capacidade de absorção de água (no caso da telha cerâmica natural). Durante a noite a temperatura superficial da telha é menor que a do ar, uma quantidade de água pode condensar e ser absorvida pela telha, parte da radiação que incide durante o dia é gasta no processo de evaporação da água absorvida pela telha. O aquecimento das

telhas ocorrem somente após o término desse processo. Outra questão que corrobora em um melhor desempenho das telhas cerâmicas é à infiltração de ar pelos vãos entre as telhas (MICHELS, 2007).

Quanto as telhas metálicas, seu fator negativo está exclusivamente na alta condutividade térmica do metal, sendo um material que exige pensar no isolamento térmico, tornando-o um material menos econômico em relação aos demais (PIANCA, 1979).

Para alcançar o conforto térmico, o isolamento em edifícios é um fator importante, tanto para invernos frios e verões quentes em um clima composto. “O isolamento reduz a perda ou ganho de calor indesejado e diminui as demandas de energia dos sistemas de aquecimento e refrigeração” (KUMAR; SUMAN, 2013, p. 1). Segundo Ionescu *et al.* (2015), se acrescentar uma camada de barreira radiante sob o telhado consegue evitar mais de 95% da radiação solar que incide sob a superfície. As barreiras riantes são isolantes, formadas por um material refletivo e de baixa emissividade. O material mais utilizado é o alumínio (WILKES, 1991). “Barreiras riantes são utilizadas para reduzir a transferência de calor por radiação entre as telhas e o forro (ou laje) da edificação” (MICHELS, 2007, p. 23). O *United States Department of Energy* - Departamento de Energia dos Estados Unidos (WILKES, 1991), define as barreiras riantes como sendo materiais que promovem a redução dos ganhos térmicos das edificações no verão e as perdas do calor no inverno, como consequência diminui o consumo de energia para o aquecimento ou resfriamento da edificação, através da redução da emissão da radiação de onda longa.

Conforme comentado, “[...] a cobertura da edificação, por ser o elemento mais exposto à ação da radiação solar, influencia significativamente o desempenho térmico de habitações” (BRITO; AKUTSU, 2015, p. 2). De acordo com o LABEEE (2016), é necessário trabalhar com requisitos de isolamento térmico na cobertura, garantindo desta forma um bom desempenho térmico. Para o trabalho, será considerada nas simulações computacionais, a manta aluminizada como material isolante por baixa emissividade, combinada aos demais materiais (ver Capítulo 3 – item 3.4.1 Definição dos materiais construtivos do modelo real).

2.5.2 Normatizações

Nas últimas duas décadas houve um aumento do incentivo na normatização das edificações quanto ao desempenho energético. No ano 2000, foi publicado o Decreto Federal nº 3330, que dispõem sobre a redução do consumo de energia elétrica (BRASIL, 2000). Em 2001, foi regulamentada a “Lei de Eficiência Energética” Lei nº 10.295, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia Elétrica (BRASIL, 2001). A lei estabelece níveis de consumo energético de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no país (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014). Em 2003, foi instituído pela Eletrobrás e PROCEL o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações - PROCEL EDIFICA, com o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais nas edificações (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014).

Em 2005, foi aprovada a norma de Desempenho Térmico de Edificações - NBR 15220, que apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social, estabelece o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e faz recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo. A norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013), foi outro passo importante em busca da normatização das edificações, quanto ao desempenho energético, os edifícios residenciais passaram a ser objeto da regulamentação da avaliação de desempenho. Em 2009, foi publicado a primeira versão, em parceria com Inmetro, LabEEE, UFSC, Procel Edifica e Eletrobras, o RTQ-C, um manual com requisitos técnicos da qualidade para nível de eficiência de edifícios comerciais, de serviços e públicos. Em 2010, foi publicada a primeira versão do RTQ-R, que trata de edificações residenciais (PROCEL; ELETROBRÁS, 2013).

No início de 2011, foi publicado os Requisitos de Avaliação da Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais RAC-R (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014). Em 2018 a norma 15575 passou por revisão e análise, em 29 de setembro de 2021 a emenda foi publicada e entrou em vigor. Ainda em 2021, o Ministério da Economia/Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro publicou a proposta de alteração do RTQ-R (Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012), para Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R), por meio da Consulta

Pública nº 18, de 12 de julho de 2021 (PBE EDIFICA, 2021). Em fevereiro de 2022 a última norma atualizada foi a 15220, Desempenho térmico de edificações - Parte 2 - Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo.

A seguir, será descrito as principais características das três principais normas empregadas nas avaliações computacionais para simulações termoenergéticas (NBR 15220, INI-R e NBR 15575).

2.5.2.1 ABNT NBR 15220

A norma de Desempenho Térmico de Edificações – NBR 15220 está dividida em cinco partes, das quais estão descritas na Tabela 2-5. Como citado anteriormente a Parte 2 dessa norma passou por atualização recentemente e entrou em vigor em fevereiro de 2022. No entanto, para este trabalho será abordado os conteúdos normativos referente a norma 15220-2 Edição de 2005, isso porque, as simulações foram iniciadas antes da atualização, considerando os conteúdos referente a edição de 2005, inviabilizando nesta etapa final da dissertação interpretar e trabalhar com a norma atualizada, ficando a sugestão de trabalhos futuros (ver Capítulo 5).

Tabela 2-5: Normas vigentes referente a NBR 15220.

ABNT NBR	Título
15220-1:2005	Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades
15220-2:2022 15220-2:2005	Desempenho térmico de edificações Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD) (foi empregada a versão anterior neste trabalho)
15220-3:2005	Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social
15220-4:2005	Desempenho térmico de edificações Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida
15220-5:2005	Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nas ABNT (2005a), (ABNT, 2005b), ABNT (2005b), ABNT (2005c) e ABNT (2005d).

A Parte 1 (NBR 15220-1, p. 1), “[...] estabelece as definições e os correspondentes símbolos e unidades de termos relacionados com o desempenho térmico de edificações” (ABNT, 2005a).

A Parte 2 (NBR 15220-2, p. 2), “especifica o método de cálculo da resistência térmica e da transmitância térmica de elementos e componentes de edificações, excluindo portas, janelas e outros elementos envidraçados, fachadas-cortina, componentes que envolvem transferência de calor com o solo [...]” (ABNT, 2005b).

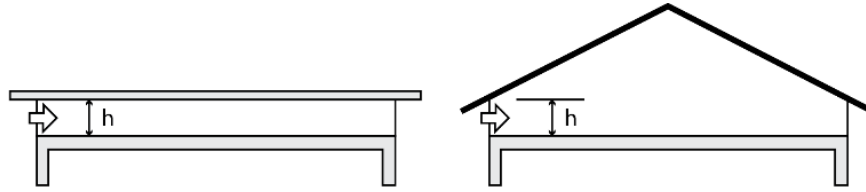
A Parte 3 (NBR 15220-3, p. 2), “[...] estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro, abrangendo um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social” (ABNT, 2005b) (ver item 3.1.2 Zona Bioclimática da cidade objeto de estudo).

A Parte 4 (NBR 15220-4, p. 1), “[...] estabelece o método absoluto para medição, em regime permanente, da resistência térmica e da condutividade térmica de materiais sólidos, usando-se a aparelhagem denominada placa quente protegida [...]” (ABNT, 2005c).

A Parte 5 (NBR 15220-5, p. 1), “[...] estabelece o método de utilização de técnicas fluximétricas para medir a resistência térmica em regime estacionário, através de corpos-de-prova na forma de placas planas, podendo-se deduzir por cálculo a condutividade térmica” (ABNT, 2005d).

Quanto à cobertura, na NBR 15220-3, recomenda-se: das zonas bioclimáticas ZB1 a ZB6, as coberturas devem ser leves isoladas; na zona bioclimática 7 (ZB7), a cobertura deve ser pesada e na zona bioclimática 8 (ZB8), recomenda-se a cobertura de material leve e refletor, telha de barro sem forro é aceita apenas nesta zona (ZB8), desde que as telhas sejam naturais (sem ser pintadas ou esmaltadas). Também é aceito nas ZB8 as coberturas com transmitâncias térmicas acima dos valores tabelados, desde que, contenham aberturas para ventilação cruzada, no mínimo, dois beirais opostos; e, as aberturas para ventilação devem ocupar toda a extensão das respectivas fachadas. A norma descreve o cálculo para estabelecer a altura da ventilação (ABNT, 2005b) (Figura 2-106) (ABNT, 2005e).

Figura 2-106: Esquema da abertura em beirais, para ventilação do ático.



Fonte: (ABNT, 2005b).

A norma 15220-3 também oferece recomendações e diretrizes construtivas para adequação da edificação de acordo o clima local, considerando a cidade e o zoneamento bioclimático (Tabela 2-6):

Tabela 2-6: Diretrizes construtivas relativas à transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar para paredes externas e coberturas.

Vedações externas		Transmitância Térmica U (W/m ² .K)	Atraso Térmico ϕ (Horas)	Fator Solar FSo (%)
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	FSo $\leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	FSo $\leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,$	FSo $\leq 3,5$
Coberturas	Leve Isolada*	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	FSo $\leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30.FT^*$	$\phi \leq 3,3$	FSo $\leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	FSo $\leq 6,5$

Parede Leve: ZB1, ZB2, ZB8; Parede Leve refletora: ZB3, ZB5; Parede Pesada: ZB4, ZB6, ZB7.

Cobertura **Leve Isolada***: ZB1 a ZB6, (ZB3 Foz do Iguaçu-PR, cidade de estudo); Cobertura Leve Refletora: ZB8; Cobertura Pesada: ZB7.

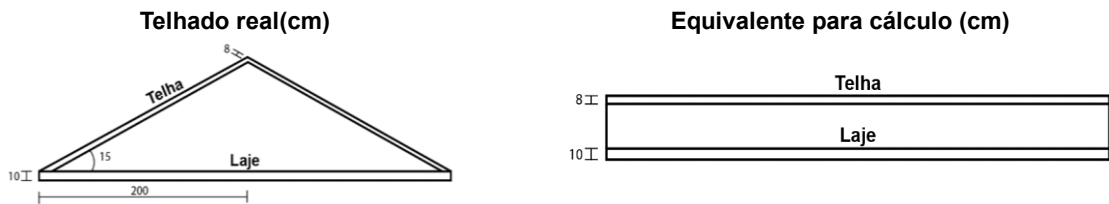
FT* igual ao fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona 8 (adimensional); h igual à altura da abertura em dois beirais opostos, em centímetros (Para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, FT = 1).

Fonte: ABNT (2005e).

Os dados referentes a condutividade térmica (λ), ao calor específico (c) e a densidade de massa aparente (ρ), para diversos materiais de construção encontra-se na NBR 15220-2. Explicações relativas aos cálculos de resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar também constam nessa parte da norma (ABNT, 2005b).

Por fim, a norma orienta, para os casos que existem espaços entre os materiais, em casos de elementos com câmaras de ar circulares, como os tijolos, "[...] deve-se transformar a área da circunferência em uma área equivalente a um quadrado com centros coincidentes". Para coberturas, considera-se a câmara de ar o espaço entre o telhado e a laje ou forro. Independentemente do número de águas, a altura equivalente da câmara de ar para cálculo é determinada dividindo-se por dois a altura da cumeeira (Figura 2-107) (ABNT, 2022b, p. 3).

Figura 2-107: Esquema da abertura em beirais, para ventilação do ático.



Fonte: ABNT (2005b).

2.5.2.2 INI-R

A partir de 12 de julho de 2021 o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), mudou para Instrução Normativa para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (PBE EDIFICA, 2021). O RTQ-R apresentava “requisitos para a classificação da eficiência energética de unidades habitacionais autônomas (UH), edificações unifamiliares, edificações multifamiliares e áreas de uso comum” (INMETRO, 2012b, p. 5). O INI-R é uma atualização do RTQ-R em relação a atualização da norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021b). As edificações submetidas ao INI-R atendem às normas vigentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O objetivo do INI-R é “[...] estabelecer os critérios e os métodos para classificação de edificações residenciais [...] em projeto ou construídos, quanto à sua eficiência energética, visando à etiquetagem de edificações [...]” (INMETRO, 2021, p. 1), portanto, “[...] especifica os critérios e os métodos para classificação de edificações residenciais quanto à sua eficiência energética, visando à etiquetagem de edificações [...]” (INMETRO, 2021, p. 12).

Para a avaliação das edificações residenciais, “[...] a estimativa do consumo de energia pode ser realizada por meio dos métodos prescritivo, simplificado e de simulação” (INMETRO, 2021, p. 12).

No método prescritivo, a classificação da envoltória é obtida por meio da comparação de características geométricas dos APPs e de propriedades térmicas dos sistemas construtivos, em relação aos valores de referência destes parâmetros, determinados no procedimento simplificado da ABNT NBR 15575:2021, partes 4 e 5, nas seções 11 de ambas as partes. Seguindo o procedimento simplificado da NBR 15575, o desempenho térmico mínimo equivale à classe C de eficiência energética da envoltória. Para obtenção de classificação mais elevada na envoltória (classes A e B), esta deve ser

avaliada pelo método simplificado ou de simulação. Nos métodos simplificado e de simulação, a classificação da UH é realizada com base no consumo de energia primária, comparando-se o consumo da edificação no modelo real com a mesma edificação com características de referência (modelo de referência).

A classificação é realizada por meio do percentual de redução do consumo estimado de energia primária das áreas de uso comum ($Red_{CEP,AUC}$), comparando-se a área de uso comum na condição real com uma condição de referência, equivalente à classe C. Estão incluídos nesta avaliação as áreas comuns de uso frequente e áreas comuns de uso eventual (INMETRO, 2021, p. 13).

Entende-se como envoltória, “o conjunto de planos que separam o ambiente interno do ambiente externo, tais como fachadas, empenas, cobertura, aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem” (INMETRO, 2021, p. 13).

- Requisitos de aplicação dos métodos de avaliação prescritivo, simplificado e de simulação:

- Método prescritivo

“[...] é aplicável à envoltória de qualquer edificação residencial unifamiliar ou unidade habitacional de edificação multifamiliar, mas permite, apenas, a classificação da envoltória em classe C de eficiência energética.” (INMETRO, 2021, p. 14)

No que se trata das coberturas, neste método são “avaliadas quanto à sua transmitância térmica (U_{cob}), adotando-se o mesmo procedimento de comparação com um valor de referência, conforme descritos na NBR 15575-5 (ABNT, 2021a) [...]” (INMETRO, 2021, p. 33).

- Método simplificado

Este método abrange grande parte das soluções arquitetônicas das edificações residenciais, “[...] porém, sua aplicação é restrita às edificações que tenham os seus parâmetros construtivos compreendidos entre os intervalos utilizados na proposição do método [...]” (INMETRO, 2021, p. 14), será apresentado na Tabela 2-7 os parâmetros construtivos para à avaliação da cobertura no método simplificado. Para os casos que não se encaixam nos limites de aplicação do método simplificado, deverão ser avaliados pelo método de simulação. Às propriedades térmicas da envoltória para o modelo real, são relativas à carga térmica anual de refrigeração

($C_{gTR_{real}}$) e de aquecimento ($C_{gTA_{real}}$) assim como do PHFT, Tomáx, Tomín. Estas devem ser calculadas conforme a parte 2 da NBR 15220.

Tabela 2-7: Limites de aplicação do método simplificado para a cobertura, variáveis da UH.

Parâmetro	Limites do método	
	mínimo	máximo
Absortância solar da cobertura	0,20	0,20
Capacidade térmica da cobertura	25 kJ/(m ² .K)	25 kJ/(m ² .K)
Transmitância térmica da cobertura	0,45 W/m ² .K	3,80 W/(m ² .K)

Fonte: Adaptado de INMETRO (2021).

Dentre as limitações do método simplificado, as análises são aplicadas apenas “[...] em ambientes de permanência prolongada definidos como sala ou dormitório, sendo restringida a sua aplicação em ambientes de uso misto, onde quarto e sala estão contidos num mesmo espaço” (INMETRO, 2021, p. 15).

- Método de simulação

O método de simulação incorpora o procedimento de simulação computacional para avaliações de desempenho térmico segundo a ABNT NBR 15575-1: 2021, considerando as seguintes subseções:

Os métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos conforme subseção 11.2;
 O procedimento de simulação computacional conforme subseção 11.4;
 As características do programa de simulação computacional conforme subseção 11.4.1; As características do arquivo climático conforme subseção 11.4.2;
 O requisito e os critérios das subseções 11.4.3 a 11.4.6, considerando as equivalências entre o desempenho térmico da NBR 15575 e a classe de eficiência energética, descritos no item 8.2.1 desta INI;
 A modelagem da unidade habitacional conforme a subseção 11.4.7.1;
 As características do modelo de referência conforme a subseção 11.4.7.2;
 A modelagem da ocupação e das cargas internas conforme a subseção 11.4.7.3;
 A modelagem com e sem o uso da ventilação natural conforme a subseção 11.4.7.4;
 O processamento dos dados de saída dos modelos simulados com e sem o uso da ventilação natural conforme a subseção 11.4.7.5;
 O cálculo dos indicadores para a UH conforme as subseções 11.4.7.6 a 11.4.7.8. 52

- Condições de elegibilidade para a classificação A

Indiferente do método de avaliação aplicado (prescritivo, simplificado ou simulação), “para a edificação ser elegível à classificação A de eficiência energética,

todas as condições dos sistemas individuais, quando aplicáveis, devem ser atendidas” ” (INMETRO, 2021, p. 16). Dentre as condições constam, o sistema de aquecimento de água da edificação e seus pré-requisitos.

- Procedimentos para a determinação da classificação de eficiência energética das unidades habitacionais (UHs) e dos sistemas individuais

“A classificação de eficiência energética das unidades habitacionais (UHs) deve ser realizada por meio do seu percentual de redução do consumo estimado de energia primária (Red_{CEP}), comparando-se o modelo real com o modelo de referência.” (INMETRO, 2021, p. 17). Independentemente do método utilizado (prescritivo, simplificado ou simulação), são avaliados a envoltória e o aquecimento de água.

A avaliação da envoltória pelos métodos simplificado e de simulação considera a carga térmica de aquecimento (Cg_{TA}), quando houver, e a de refrigeração (Cg_{TR}) dos ambientes de permanência prolongada (APPs), bem como considera o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT) e as temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx$) e mínima ($Tomín$). A UH e os sistemas individuais são classificados da classe A (mais eficiente) à classe E (menos eficiente). O consumo de energia primária da edificação resulta da soma das energias elétrica e térmica, que devem ser devidamente transformadas a partir de seus fatores de conversão, descontando-se a parcela de energia primária referente à geração local de energia renovável, quando existente (INMETRO, 2021, p. 17).

- Classificação da eficiência energética da unidade habitacional

A classificação da eficiência energética é realizada com base no percentual de redução do consumo de energia primária (Red_{CEP}) da UH no modelo real em comparação ao modelo de referência.

A classificação da envoltória segue o procedimento de simulação computacional de avaliação do desempenho térmico, descrito na subseção 11.4 da ABNT NBR 15575:2021-1, apresentando as seguintes equivalências:

- Classe A= Desempenho superior da ABNT NBR 15575:2021-1: avalia o modelo real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do $PHFT_{UH}$ e à redução da carga térmica total ($Cg_{TT_{UH}}$) do modelo real em relação ao modelo de referência. Em comparação com o nível intermediário, o atendimento ao nível superior diferencia-se na obtenção de reduções mais elevadas da carga térmica total ($Cg_{TT_{UH}}$);
- Classe B= Desempenho intermediário da ABNT NBR 15575:2021-1: avalia o modelo real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do $PHFT_{UH}$ e à redução da carga térmica total ($Cg_{TT_{UH}}$) do modelo real em relação ao modelo de referência;

- Classe C= Desempenho mínimo da ABNT NBR 15575:2021-1 com adição de critério de carga térmica: avalia o PHFT_{UH} e a temperatura operativa anual máxima (Tomáx_{UH}) da UH do modelo real em relação ao modelo de referência. Para edificações localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, também deve ser avaliada a temperatura operativa anual mínima (Tomín_{UH}). Adicionalmente aos critérios da NBR 15575:2021-1 para o nível mínimo de desempenho térmico, o atendimento à classe C requer que a carga térmica total (CgTT_{UH}) do modelo real seja menor ou igual à CgTT_{UH} do modelo de referência;
- Classe D= Desempenho mínimo da ABNT NBR 15575:2021-1, considerando também um critério de carga térmica que permite que o modelo real obtenha carga térmica total (CgTT_{UH}) superior ao modelo de referência, dentro de uma proporção preestabelecida.
- Classe E= Desempenho inferior ao mínimo da ABNT NBR 15575:2021-1 e em desacordo com o critério de carga térmica total da classe D de eficiência energética.

A seguir será descrito as principais características da norma de Desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). Sendo a normativa aplicada para os procedimentos de simulações computacionais deste trabalho.

2.5.2.3 ABNT NBR 15575-1

A NBR 15575 é uma norma que trata do desempenho de edificações habitacionais e apresenta características indispensáveis de requisitos e critérios mínimos relacionados a qualidade e conforto das edificações. Como citado anteriormente, a NBR 15575 passou em 2018 por revisão e análise, em março de 2021 a emenda foi publicada e entrou em vigor.

Segundo a norma de Desempenho NBR 15575-1, o desempenho térmico das edificações, deve considerar para critério de avaliação a simulação. O “[...] procedimento de simulação computacional avalia o desempenho térmico anual da envoltória da edificação em relação a esta envoltória com características de referência” (ABNT, 2021b, p. 19). Deste modo, devem ser elaborados dois modelos para tal avaliação, o modelo real e o modelo de referência (Quadro 2-14).

Quadro 2-14: Modelo Real e Modelo de Referência.

Modelo Real	Conserva as características geométricas da unidade habitacional (UH), as propriedades térmicas e as composições dos materiais, dos pisos, paredes, cobertura e dos elementos transparentes.
Modelo de Referência	Representa a edificação avaliada, conservando as características geométricas da unidade habitacional (UH), mas emprega as propriedades térmicas e as composições dos materiais as características de referência da norma 15575-1.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

O modelo real será configurado com os materiais e as características da edificação, como de fato é, de acordo elaborado o projeto. O modelo referência será configurado com os materiais e as características da norma. Para avaliar o desempenho térmico para o atendimento do nível mínimo¹³, os modelos real e de referência devem ser simulados considerando somente o uso da ventilação natural nos ambientes de permanência prolongada (APP)¹⁴. Quanto os demais níveis, para a obtenção dos níveis intermediário e superior, os modelos real e de referência devem ser simulados em duas condições de utilização dos APP, com o uso da ventilação natural (VN) e sem o uso da ventilação natural, no caso, condicionada artificialmente (CA) (Quadro 2-15).

Quadro 2-15: Avaliação do desempenho térmico para o atendimento do nível mínimo, intermediário e superior.

Nível Mínimo (M)		Nível Intermediário (I)	Nível Superior (S)
M. Real	M. Referência	M. Real	M. Referência
Considerar somente o uso da ventilação natural nos APP		Simular em duas condições de utilização dos APP: Com uso da ventilação natural (VN) Sem o uso da ventilação natural, condicionada artificialmente (CA)	

M.: Modelo.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

A norma determina como “simulação 1” a simulação com o uso da ventilação natural (VN), e “simulação 2” sem o uso da ventilação natural, nesse caso com o uso de condicionamento artificial (CA). O Quadro 2-16 apresenta os parâmetros que devem ser determinados com o uso da ventilação natural (VN) para a simulação 1.

Quadro 2-16: Parâmetros para serem usados na simulação 1, com o uso da ventilação natural.

PHFT_{APP} percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa	Percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT _{APP}). A faixa de temperatura operativa considerada varia com o clima local, sendo possíveis três intervalos: de 18 °C a 26 °C, até 28 °C e até 30 °C;
Tomáx_{APP} temperatura operativa anual máxima de cada APP	Temperatura operativa anual máxima (Tomáx _{APP}) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação dos APP. Quando a edificação estiver localizada nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3* ou 4 (ver ABNT NBR 15220-3), também deve ser determinada a temperatura operativa anual mínima (Tomín _{APP}) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP.

3*: (ZB3) Zona Bioclimática de Foz do Iguaçu.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

¹³ Nível mínimo: A norma não justificativa o porquê no nível mínimo deve ser considerado apenas com o uso de ventilação natural, apenas estabelece que esse é o critério adotado para o atendimento do nível mínimo.

¹⁴ (APP): A norma determina ambiente/ambientes de permanência prolongada como (APP) sem variações das siglas para o uso quando singular ou plural.

O percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa é o (PHFT) este é a “razão entre as horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa estabelecida e o total de horas de ocupação do ambiente” (ABNT, 2021b, p. 11), ou seja, a partir dos valores de $PHFT_{APP}$ (Percentual de horas de ocupação dos APP dentro de uma faixa de temperatura operativa nos ambientes de permanência prolongada), dos valores da $Tomáx_{APP}$ (Temperatura operativa anual máxima de cada APP) e dos valores da $Tomín_{APP}$ (Temperatura operativa anual mínima de cada APP) para cada APP, deve-se determinar o $PHFT_{UH}$ (Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa da unidade habitacional), $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$ da UH. O Quadro 2-17 apresenta os parâmetros que devem ser determinados a partir da simulação 2, sem o uso da ventilação natural:

Quadro 2-17: Parâmetros para serem determinados a partir da simulação 2, sem o uso da ventilação natural.

CgTR_{APP} carga térmica de refrigeração	Somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração (CgTR _{APP} - quantidade de calor a ser retirada do ar para manter as condições desejadas em um ambiente)
CgTA carga térmica de aquecimento	Somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento (CgTA _{APP} - quantidade de calor a ser fornecida ao ar para manter as condições desejadas em um ambiente)

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Como o estudo de caso deste trabalho avaliará variadas combinações de materiais na cobertura, deverá ser simulado para cada combinação uma situação com ventilação natural (VN) e outra simulação sem o uso de ventilação natural, no caso com o uso de condicionamento artificial (CA).

A partir dos valores de carga térmica de refrigeração (CgTR_{APP}) e carga térmica de aquecimento (CgTA_{APP}) para cada APP (ambientes de permanência prolongada), deve-se determinar o somatório anual dos valores horários da carga térmica total da UH (CgTT_{UH}). Conforme citado anteriormente, o procedimento de simulação computacional permite a avaliação dos três níveis de desempenho térmico: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). Sendo, a obtenção do nível mínimo obrigatória, enquanto a obtenção dos níveis intermediário ou superior é facultativa. Os níveis de desempenho térmico da UH são determinados a partir dos seguintes critérios (Quadro 2-18):

Quadro 2-18: Níveis de Desempenho Térmico mínimo (M); intermediário (I) e superior (S).

Mínimo	Avalia o $PHFT_{UH}$ e a temperatura operativa anual máxima ($Tomáx_{UH}$) da UH do modelo real em relação ao modelo de referência. Para edificações localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3* ou 4, também deve ser avaliada a temperatura operativa anual mínima ($Tomín_{UH}$).
Intermediário	Avalia o modelo real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do $PHFT_{UH}$ e à redução da carga térmica total ($CgTT_{UH}$) do modelo real em relação ao modelo de referência
Superior	Avalia o modelo real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do $PHFT_{UH}$ e à redução da carga térmica total ($CgTT_{UH}$) do modelo real em relação ao modelo de referência. Em comparação com o nível intermediário, o atendimento ao nível superior diferencia-se na obtenção de reduções mais elevadas da carga térmica total ($CgTT_{UH}$)

3*: (ZB3) Zona Bioclimática objeto de estudo .

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base na NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Caso um ou mais ambiente de permanência prolongada (APP) da UH adotem soluções construtivas que impossibilitem o uso de sistemas de condicionamento de ar (como aberturas fixas para ventilação sem a possibilidade de fechamento), estes podem ser analisados apenas quanto ao seu $PHFT_{APP}$, $Tomáx_{APP}$ e $Tomín_{APP}$. Os demais APP da UH devem incluir a modelagem do sistema de condicionamento de ar, quando avaliado o atendimento dos níveis intermediário e superior.

Caso seja atestado que a UH em análise não necessita do uso de sistemas de climatização de ar, ao longo de todo o ano, o nível superior de desempenho térmico pode ser obtido se o $PHFT_{UH}$ do modelo real for igual ou superior a 95%. O modelo real também deve atender ao critério de temperaturas operativas anuais máxima e mínima ($Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$).

- Critério – Carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$)

Este critério avalia a carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$) no modelo de simulação sem o uso da ventilação natural, nos períodos em que os APP do modelo com o uso de ventilação natural estiverem ocupados e com as temperaturas operativas dentro dos limites determinados na Tabela 2-8. A $CgTT_{UH}$ é resultado da avaliação individual das cargas térmicas de refrigeração e aquecimento de cada APP da UH ($CgTR_{APP}$ e $CgTA_{APP}$).

Tabela 2-8: Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.

Intervalos de temperaturas Externas	Faixa de temperatura Operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$	Faixa de temperatura Operativa para o cálculo da $CgTA_{APP}$
Intervalo 1*	$ToAPPa \geq 26,0^{\circ}C$	$ToAPP \leq 18,0^{\circ}C$
Intervalo 2	$ToAPPa \geq 26,0^{\circ}C$	Não considera
Intervalo 3	$ToAPPa \geq 26,0^{\circ}C$	Não considera

ToAPP: É a temperatura operativa do APP considerada para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$;

Intervalo 1*: Onde se enquadra a cidade de Foz do Iguaçu objeto de estudo.

Fonte: ABNT (2021).

O critério da $CgTT_{UH}$ é considerado nos níveis de desempenho intermediário e superior, de caráter não obrigatório, conforme a Quadro 2-19.

Quadro 2-19: Critério de avaliação de desempenho térmico da envoltória quanto à $CgTT_{UH}$.

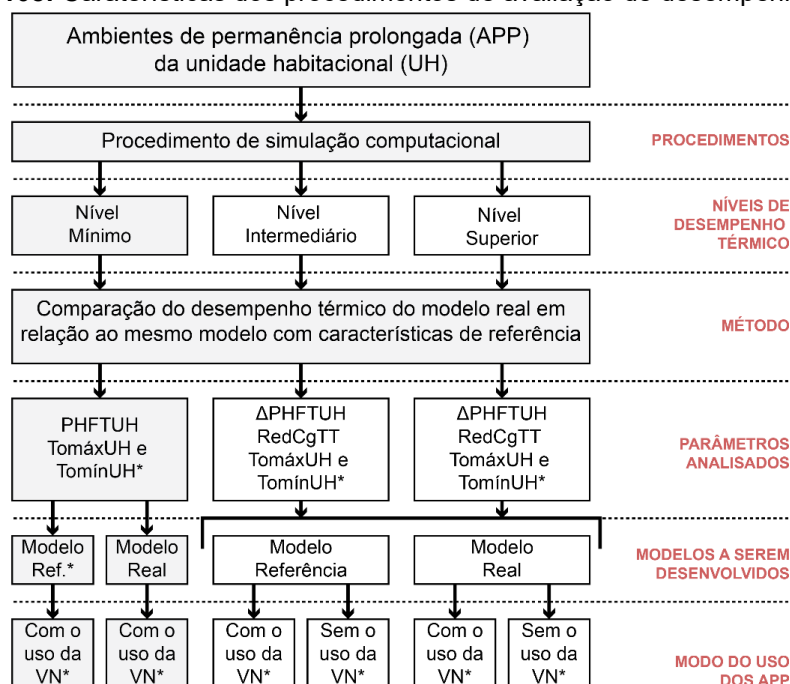
Nível de Desempenho	Critério
Mínimo (M)	Não Considera
Intermediário (I)	$RedCgTT^a \geq RedCgTT_{mín}$
Superior (S)	$RedCgTT \geq RedCgTT_{mín}$

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

b) $RedCgTT_{mín}$ 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 (2021).

A Figura 2-108 resume as principais características dos procedimentos de avaliação de desempenho térmico com a norma NBR 15575.

Figura 2-108: Características dos procedimentos de avaliação de desempenho térmico.

TomínUH*: Necessário apenas para as zonas bioclimáticas 1,2,3 e 4.

VN*: Ventilação Natural.

Etapas obrigatórias para a avaliação de desempenho pelo procedimento de simulação computacional.

Fonte: Adaptado de ABNT (2021b).

2.5.3 Simulação Computacional Termoenergética

A simulação computacional é uma importante ferramenta na busca de soluções para o desempenho energético das edificações. Segundo Veiga *et al.* (2020), o uso de programas computacionais contribuem diretamente na escolha de um sistema de condicionamento de ar eficiente, de lâmpadas de alto rendimento; no projeto de proteções solares; na instalação de um sistema de cogeração; na análise das contas de energia elétrica de uma edificação, entre outros. A seguir, será apresentado as características que um programa de simulação deve ter, segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021, p. 20).

O programa de simulação computacional deve ser capaz de estimar as variações da temperatura operativa, das cargas térmicas de refrigeração e de aquecimento e do uso da ventilação natural na unidade habitacional (UH), definidos separadamente em 8.760h ao longo do ano, considerando as variações horárias de ocupação, de potência de iluminação e de equipamentos. O programa de simulação computacional deve, ainda:

- a) estar de acordo com a *ASHRAE 55-2020* (verificar a mais atualizada);
- b) modelar efeitos de inércia térmica;
- c) modelar trocas de calor entre a edificação e o solo;
- d) calcular cargas térmicas latente e sensível;
- e) ser capaz de simular o sombreamento proveniente de elementos externos às zonas térmicas, como brises, sacadas e entorno;
- f) ser capaz de simular os efeitos da ventilação cruzada em um ambiente, ou entre dois ou mais ambientes.

Para este trabalho foi escolhido o programa *EnergyPlus* para realizar as simulações termoenergéticas da edificação, o mesmo comporta todas as premissas citadas acima.

2.5.3.2 *EnergyPlus* programa de simulação computacional para análises termoenergéticas

O *EnergyPlus*, é um *software* internacionalmente conhecido, de simulação de carga térmica e análise energética, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, a partir de dois outros *software*, o BLAST e o DOE-2, possibilita simulações confiáveis de diversas tipologias arquitetônicas, sistemas construtivos e condicionamento de ar (VEIGA *et al.*, 2020). Um dos principais benefícios do *EnergyPlus* é fato do seu código fonte ser disponível e aberto para consulta, revisão e manipulação (INMETRO, 2013).

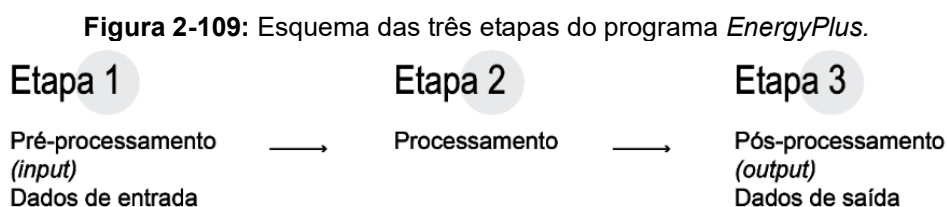
Segundo Vettorazzi (2019, p. 155), “o programa não apresenta interface gráfica amigável. A configuração da simulação é baseada em um sistema de parâmetros e tabelas editáveis, o que dificulta a operação e restringe seu uso”. Segundo o autor, exige o conhecimento de muitas variáveis, e “[...] diversidade dos dados de entrada aumenta a precisão dos resultados, mas também pode gerar dúvidas quanto ao preenchimento de parâmetros, além de levar a resultados de simulação errôneos”.

O programa *EnergyPlus*, é um mecanismo de simulação, funciona calculando a carga de energia e análise térmica das edificações. Através dos dados de texto de entrada e saída (CRAWLEY *et al.*, 2008).

As cargas calculadas (por um mecanismo de equilíbrio térmico) em uma etapa de tempo especificada pelo usuário (padrão de 15 minutos) são passadas para o módulo de simulação de sistemas prediais na mesma etapa de tempo. O módulo de simulação de sistemas de construção *EnergyPlus*, com um passo de tempo variável, calcula o sistema de aquecimento e refrigeração e a resposta da planta e do sistema elétrico. Esta solução integrada fornece uma previsão mais precisa da temperatura do espaço [...]. [...] A simulação integrada também permite que os usuários avaliem controles realistas do sistema, adsorção e dessorção de umidade em elementos de construção, sistemas de aquecimento e resfriamento radiantes e fluxo de ar entre zonas (CRAWLEY *et al.*, 2008, p. 664).

Como arquivos de entrada, tem-se os dados climáticos do local de projeto; a descrição da geometria da edificação; descrição das propriedades físicas de todos os materiais empregados no projeto; os equipamentos de iluminação e de condicionamento térmico e, informações pertinentes ao uso e ocupação dos ambientes de permanência prolongada (no caso deste trabalho, de acordo a NBR 15575). São inseridos os dados físicos da edificação, por meio do arquivo de entrada com extensão “.IDF” (*Input Data File*) e os dados climáticos do local, também por meio de um arquivo com extensão (CRAWLEY *et al.*, 2008).

A Figura 2-109, mostra de forma simplificada o funcionamento do programa *EnergyPlus*, e as três etapas principais.



Fonte: Adaptado de Vettorazzi (2019).

Mais informações dos detalhes dos programas utilizados estão na metodologia, Capítulo 3, no item 3.2.2. Modelagem da edificação.

2.5.3.3 Característica do arquivo climático segundo a NBR 15575-1

Os dados climáticos da região onde uma edificação será construída são parâmetros importantes para à avaliação do desempenho térmico da mesma, sendo indispensável o arquivo climático nos estudos relativos a desempenho termoenergético das edificações. O arquivo climático deve possuir informações que sejam representativas do clima da cidade onde a unidade habitacional está localizada. Caso a cidade de estudo, não possua arquivo climático, deve ser utilizado o arquivo climático de uma cidade próxima com o clima semelhante. A semelhança entre os climas deve considerar a comparação da distância euclidiana, ponderando latitude, longitude e altitude, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021b, p. 21):

O arquivo climático utilizado deve fornecer valores mensais de temperatura média do solo, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), para todos os meses do ano, além dos seguintes valores horários representativos das 8.760h do ano meteorológico típico:

- a) temperatura de bulbo seco, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);
- b) temperatura do ponto de orvalho, expressa em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);
- c) umidade relativa, expressa em porcentagem (%);
- d) pressão atmosférica, expressa em Pascal (Pa);
- e) intensidade de radiação horizontal de onda longa, expressa em watts-hora por metro quadrado (Wh/m^2);
- f) radiação horizontal global, expressa em watts-hora por metro quadrado (Wh/m^2);
- g) radiação normal direta, expressa em watts-hora por metro quadrado (Wh/m^2);
- h) radiação horizontal difusa, expressa em watts-hora por metro quadrado (Wh/m^2);
- i) direção do vento, expressa em graus ($^{\circ}$), considerando o sentido horário a partir da direção Norte;
- j) velocidade do vento, expressa em metros por segundo (m/s).

A cidade de Foz do Iguaçu, possui os dados climáticos tanto no formato .EPW (*EnergyPlus Weather File*) e também o TMYx (arquivos meteorológicos típicos derivados do ISD *Integrated Surface Database*), formato este utilizado para o trabalho, os dados utilizados foram extraídos do arquivo climático “BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx.” disponíveis em *Climate One Building* (2018).

Os arquivos TMYx são arquivos meteorológicos típicos derivados do ISD (US NOAA's *Integrated Surface Database*) com dados horários até 2021 usando as metodologias TMY/ISO 15927-4:2005. Os arquivos de ano individual ISD são criados usando os princípios gerais do IWECC (*International Weather for Energy Calculations*) *Typical Meteorological Years* que foi publicado em 2001. Os arquivos resultantes foram revisados por partes interessadas. Para 2022, os dados solares de cada local têm a radiação solar correspondente do conjunto de dados de reanálise ERA5 [...] (*CLIMATE ONE BUILDING*, 2022, p. 1).

2.5.4 Estudos de Desempenho Térmico relacionados a Cobertura

A seguir, será apresentado a análise da literatura de trabalhos relacionados ao desempenho térmico de coberturas, foram utilizados os seguintes critérios para a busca dos trabalhos: estudos atuais, dos últimos 6 anos; pesquisas por estudos relacionados ao clima da região, clima subtropical úmido; e pesquisas realizadas com simulação computacional.

A especificação adequada dos materiais que compõe a cobertura pode contribuir efetivamente para a melhoria da eficiência termoenergética das edificações bem como para a redução do efeito de ilhas de calor localizados nas áreas urbanas (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018).

No estudo de Yang *et al.* (2018), "*Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical Climate*", foram analisados e comparados através de simulação computacional como o telhado refletor (*cool roof*) e o telhado verde (*green roof*), podem auxiliar na diminuição das temperaturas da superfície da cobertura e, conseqüentemente, diminuir o fluxo de calor liberado para a atmosfera. O estudo de caso é um edifício de escritórios de pesquisas, situado dentro do campus da Universidade de Cingapura, caracterizado com o clima subtropical. Os resultados das simulações mostraram que a utilização das coberturas com os telhados verdes e os refletores contribuíram na mitigação de ilhas de calor urbano, e no consumo de energia elétrica, devido à redução do calor no interior dos ambientes. O estudo comprovou a eficiência de desempenho termoenergético dos dois sistemas de coberturas analisados, e que o telhado refletor obteve melhores resultados para o clima de Cingapura em relação ao telhado verde, de acordo os autores, isso porque a vegetação pode aumentar o fluxo de calor latente devido à evapotranspiração.

Outro estudo no âmbito de desempenho termoenergético de coberturas para o clima subtropical foi o de Fernandes *et al.* (2018), "Desempenho termoenergético de coberturas vegetadas em clima subtropical", esse artigo comparou através da

simulação computacional, o desempenho térmico de diferentes sistemas de coberturas vegetadas com sistemas de coberturas com a telha de fibrocimento de edificações condicionadas artificialmente, aplicados em um edifício de escritórios na cidade de Pelotas-RS, Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2). Foram simulados 7 modelos de sistemas de coberturas, com diferentes composições vegetações e comparadas a coberturas com fibrocimento. Os resultados das simulações apresentaram que o menor consumo energético foi para o sistema de cobertura vegetada de 50cm de altura de substrato (84,3 KWh/m².ano), seguido do sistema de cobertura de fibrocimento com isolamento de poliestireno extrudado (88,2 KWh/m².ano). Dentre todos os sistemas de coberturas analisados, o menor desempenho termoenergético foi para a cobertura de fibrocimento, com um consumo total energético de 103,5 KWh/m².ano. Por fim, todas as coberturas vegetadas simuladas, obtiveram os melhores resultados comparadas com as coberturas com o uso da telha de fibrocimento. Segundo os autores, o “[...] bom desempenho termoenergético das coberturas vegetadas se deve às propriedades de evapotranspiração das plantas, através das trocas de calor latente que não ocorrem nas demais coberturas, além da contribuição do substrato como forma de isolamento e inércia térmica da edificação [...]” (FERNANDES *et al.*, 2018, p. 273).

Gomes, Gomes e Hackenberg (2020), utilizaram o *software Autodesk Revit*®, junto com a ferramenta *Insight* e *Green Building Studio Autodesk*®, para simularem o desempenho termoenergético de uma cobertura com a utilização de madeira laminada colada (MLC), para uma residência unifamiliar localizada na cidade de Balneário Rincão, Santa Catarina, Zona Bioclimática 2 (ZB2), clima subtropical. Segundo a pesquisa, o consumo médio mensal de uma residência na ZB2 é de 178,22 KWh/mês, a edificação simulada com a cobertura de MLC possui um consumo médio mensal similar de 175,5 kWh/mês.

O estudo a seguir analisa o desempenho térmico de cobertura vegetada sobre guaritas de fibra de vidro, na cidade de Curitiba, Paraná, clima mesotérmico e temperado oceânico úmido - Cfb de acordo com a classificação Köppen-Geiger. O trabalho desenvolvido por Krüger *et al.* (2019), foi realizado através comparações de guaritas em condição experimental e de controle, foi considerado três configurações de sistema coberturas (substrato; substrato e vegetação; substrato, vegetação e tela de sombreamento). Os resultados mostraram que houve uma redução da temperatura da face interna da cobertura, porém, pouca redução na temperatura interna da guarita.

Por fim, segundo os autores, o estudo comprova “[...] a precariedade da construção de guaritas em fibra de vidro, sob o aspecto de desempenho térmico nas condições climáticas analisadas [...]”, “[...] verificou-se que a melhoria térmica do ambiente interno exigiria uma otimização de todo o conjunto, não apenas da cobertura [...]” (KRÜGER *et al.*, 2019, p. 17).

No estudo, “Eficiência térmica de materiais de cobertura”, os autores Muniz-Gäal *et al.* (2018) analisaram as propriedades térmicas de refletância solar de diferentes tipos de telhas, sendo: catorze unidades das telhas cerâmicas esmaltadas; oito unidades das telhas cerâmicas rústicas e; nove unidades das telhas de concreto, totalizando trinta e uma amostras de diferentes cores. O estudo demonstrou que a variabilidade de cores e o tipo de material impactam diretamente no desempenho térmico relacionado a refletância solar. As cores claras foram as mais eficientes com maiores valores de refletância solar.

Outro trabalho referente a investigação da importância da refletância solar nos materiais das coberturas foi o de Silva, Deivis e Guths (2020), de acordo os autores, telhados com alta refletância solar é uma estratégia para reduzir a carga de resfriamento das edificações. Foi avaliado o desempenho termoenergético, através da simulação computacional, da telha de fibrocimento em duas colorações: telha natural na cor cinza (correspondendo a um telhado convencional); e a telha na cor branca (representando um telhado de alta refletância solar). O projeto no qual foram feitos as simulações, foi uma residência unifamiliar de padrão popular, com base no programa da Caixa Econômica Federal de 2007, na cidade do Rio de Janeiro-RJ. Os resultados da pesquisa mostraram que a emitância térmica para as duas cores das telhas de fibrocimento avaliadas foram muito semelhantes. A maior diferença foi para os valores da refletância solar, a telha branca resultou em um valor 50,7% superior à telha natural. O índice de refletância solar da telha de fibrocimento branca tem maior contribuição na redução do fenômeno de ilha de calor. No que se refere ao desempenho térmico, a telha de fibrocimento branca “[...] diminuiu em até 60% o ganho de calor por condução da cobertura para o interior da edificação.”

Os autores PIMENTA *et al.*, 2016, desenvolveram uma pesquisa comparativa entre três tipos de telhas, sendo elas: fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica. Diferente dos estudos apresentados até então, essa pesquisa utilizou como base para as avaliações de desempenho termoenergético medições diretas no local, para tal, foi construído um protótipo, representando uma residência, porém, em escala

reduzida. As medições ocorreram na Universidade Oeste Paulista, situada em Presidente Prudente, Zona Bioclimática 6. Foram realizadas medições simultâneas, externas e internas, de temperatura do ar; temperatura radiante média e umidade relativa do ar *in loco*. Com base nas temperaturas máximas e mínimas, foi possível observar que a cobertura de cerâmica obteve o menor ganho térmico quando comparada com as outras telhas avaliadas. A cobertura de celulose e betume obtiveram as maiores temperaturas. O ganho térmico no interior do protótipo para a telha de fibrocimento foi significativamente maior em relação a telha cerâmica.

O trabalho a seguir avaliou o desempenho termoenergético, através da simulação computacional, de uma edificação modelo de referência, para a cidade de Joinville, Santa Catarina. A pesquisa analisou as paredes e coberturas com o agregado miúdo de vermiculita, comparando os resultados das simulações com materiais convencionais. Concluiu-se que os modelos analisados com o uso de vermiculita na composição dos materiais obtiveram redução do consumo anual total de energia para aquecimento e resfriamento quando comprados com a edificação com materiais construtivos convencionais, resultando em edificações mais eficientes. Outra observação da pesquisa é que a utilização de materiais com propriedades isolantes foi uma alternativa adequada para melhorar o desempenho termoenergético da edificação (GRUBER *et al.*, 2020).

Pode-se notar, pela bibliografia aqui referenciada, que os materiais empregados nos sistemas de coberturas têm grande influência no desempenho termoenergético das edificações, afetando diretamente o conforto térmico de seus usuários. Os estudos de coberturas demonstraram importante contribuição na redução do fluxo térmico para o interior das edificações. No entanto, há a carência de estudos relacionados a eficiência termoenergética de diferentes composições de sistemas de coberturas, com ênfase para estudos de coberturas relacionados ao clima subtropical úmido.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos, a metodologia foi desenvolvida em três etapas, as quais serão apresentadas, nos próximos parágrafos, ilustradas na Figura 3-1 e detalhadas nos itens subsequentes.

Etapa 1, definição dos parâmetros do projeto arquitetônico para modelagem e simulação. Foi projetada uma edificação, denominada modelo real, para a realização do estudo, foram considerados os seguintes critérios: localização, Região Sul-Brasileira, Zona Bioclimática ZB3; clima subtropical úmido, cidade de Foz do Iguaçu - PR, com disponibilização dos dados climáticos; o projeto do modelo real é do tipo residencial, unifamiliar, com os critérios do programa habitacional Casa Verde e Amarela (descrição sobre o programa, ver item 3.1.1);

Etapa 2, modelagem da edificação e configuração dos parâmetros para simulação. Foi destinada à modelagem e configurações dos parâmetros para as simulações computacionais dos variados sistemas de coberturas, da edificação desenvolvida na Etapa 1. A modelagem é a base para o desenvolvimento das simulações computacionais termoenergéticas, para tal foi utilizado o programa *EnergyPlus* v.9.3.0. A edificação foi modelada com o uso do *plugin Euclid* v.0.9.4.2 no programa *Sketchup* v.2021. Nessa Etapa, também são configurados no *EnergyPlus* o uso, ocupação, iluminação, equipamentos, ventilação natural e sistema de ar-condicionado indicados atendendo aos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021b) (ver item 3.2);

Etapa 3, critérios de avaliação para os níveis mínimo, intermediário e superior para a norma de desempenho ABNT NBR 15575-1. O diagnóstico termoenergético dos sistemas de coberturas da edificação é realizado por meio da NBR 15575-1 (ABNT, 2021), avaliando o modelo real e o modelo de referência. O modelo de referência consiste em avaliar o nível de desempenho da edificação, adotando-se dos materiais construtivos e características de referência da norma de desempenho, o modelo real, conserva as características geométricas, propriedades térmicas e composições construtivas do projeto da edificação. Em seguida, foi realizada uma avaliação para identificar o comportamento termoenergético da edificação modelo durante o ano, com cada tipo de combinação dos sistemas de coberturas simulados (ver item 3.3).

Figura 3-1: Etapas da metodologia adotada.

	1	2	3
ETAPA	Definição dos parâmetros do projeto arquitetônico para modelagem e simulação	Modelagem da edificação e configuração dos parâmetros para simulação	Critérios de avaliação para os níveis mínimo, intermediário e superior para a norma de desempenho ABNT NBR 15575-1
OBJETIVO	Definir um modelo real de edificação unifamiliar, para Foz do Iguaçu, Zona Bioclimática 3 (ZB3)	Analisar a eficiência termoenergética dessa residência através da simulação computacional, testando diferentes sistemas de coberturas comumente utilizados na cidade	Elencar os tipos de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético, para uma residência, na cidade de Foz do Iguaçu, ZB3, de acordo a NBR 15575
RESULTADO	Avaliação de múltiplas combinações de coberturas com 4 tipo de telhas (com e sem manta aluminizada; com e sem forro de PVC; com e sem laje)	Análise comparativa de desempenho termoenergético a partir do modelo referência e do modelo real com as variações dos sistemas de coberturas	Análise de atendimento a norma de desempenho 15575, por meio dos níveis (mínimo, intermediário e superior) de eficiência energética dos diferentes sistemas de coberturas

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Foram realizadas um total de 66 simulações, sendo 64 variações no modelo real (32 variações com ventilação natural (VN); 32 variações com condicionamento artificial (AC), e 2 simulações no modelo de referência). As diferentes combinações de sistemas de coberturas são produto de todas as variações entre os materiais, sendo estes, telhas, com e sem forro, com e sem a manta aluminizada e com e sem laje.

3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROJETO ARQUITETÔNICO PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

O estudo de caso é uma edificação modelo, projetada com os parâmetros do Programa Habitacional Casa Verde e Amarela. A seguir, serão apresentados os critérios utilizados para definição da edificação modelo real:

1. Ter como base um programa habitacional para delimitar o programa de necessidades da edificação. O Casa Verde e Amarela (CVA) é um programa do Governo Federal, sendo, o mais utilizado para regularizações e financiamentos de moradias para a população brasileira (ver item 3.1.1);
2. Projeto elaborado para a Região Sul-Brasileira, na Zona Bioclimática ZB3, clima subtropical úmido, cidade de Foz do Iguaçu (ver item 3.1.2);
3. A cidade deve possuir os dados climáticos conhecidos e disponibilizados em arquivos nos formatos TMYX ou EPW Motivo: Os arquivos climáticos e a compatibilidade dos formatos, são necessários para realizar as simulações computacionais com o programa *EnergyPlus* (ver item 3.1.2);
4. Tipologia da edificação, unifamiliar, térrea, projetada conforme as solicitações do Programa Casa Verde e Amarela (CVA), juntamente com o Código de Obras do município e Foz do Iguaçu. Motivo: No Brasil, entre os setores, o setor residencial é o segundo maior consumidor de energia; da Região Sul do país as residências unifamiliares representam a maioria dos domicílios (ver item 3.1.3);
5. Uso dos materiais construtivos empregados no contexto analisado. Motivo: para a elaboração dos projetos e para a realização dos ensaios termoenergéticos por meio de simulações computacionais, são necessárias informações dos materiais adotados para que o estudo seja possível (ver item 3.1.4).

3.1.1 Programa Habitacional Casa Verde e Amarela

Em 2009, com o objetivo de reduzir o déficit habitacional¹⁵ do país, foi criado o Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), direcionado para famílias com rendimento entre 0 à 10 salários mínimos. O MCMV foi a principal política habitacional do país, para o público de menor renda. Até 2020, subsidiou mais de R\$ 6 milhões de Unidades Habitacionais (UHs) nos seus 11 anos de existência (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2020).

Atualmente, o Programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), passou por uma

¹⁵ “[...] o déficit habitacional se concentra no segmento populacional de baixa renda, em razão da dificuldade dessa população em acessar financiamento e outros mecanismos de aquisição de moradia que demandem comprovação, regularidade e suficiência de renda” (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2020).

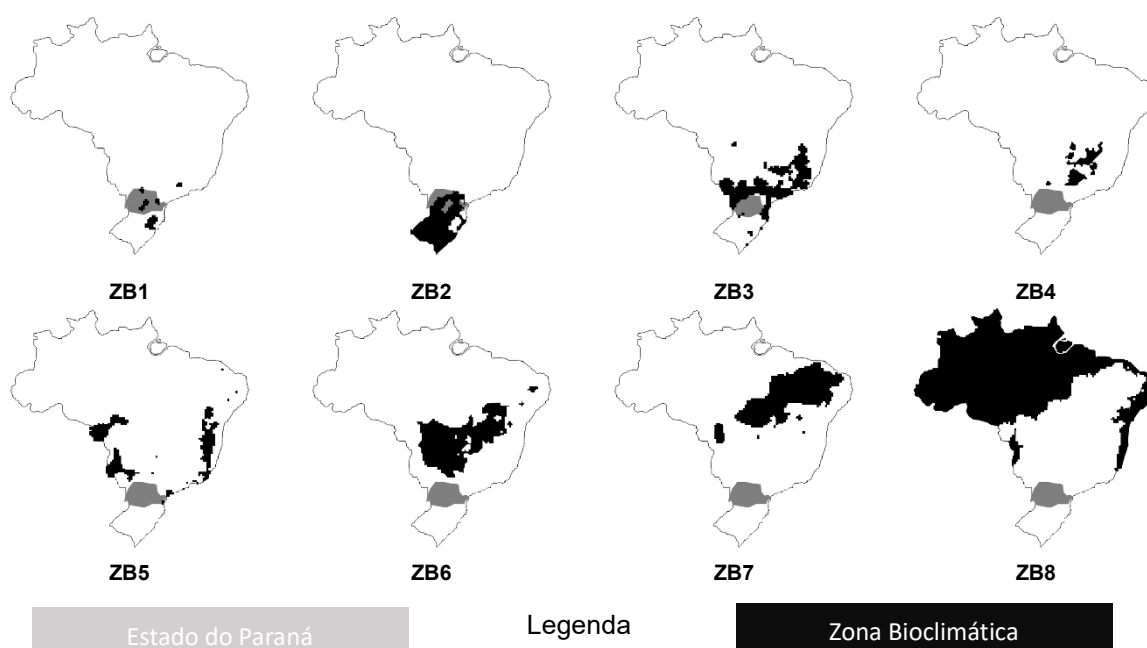
reformulação, por meio da instituição do Programa Casa Verde e Amarela. Das mudanças entre os programas, destacam-se, a modalidade de atendimento, no qual, o MCMV possuía uma única modalidade, que era a produção habitacional e o CVA atua com mais modalidades, produção subsidiada, regularização fundiária, melhoria e produção habitacional financiada, e também, novas taxas de juros, de acordo grupos (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2021).

Para este trabalho, foi desenvolvido um projeto de edificação modelo, com as especificações e solicitações que constam no site do Governo Federal (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2021) para o atual programa habitacional, Casa Verde e Amarela (CVA) (Anexo A-1).

3.1.2 Zona Bioclimática de Foz do Iguaçu - PR

O zoneamento bioclimático brasileiro compreende oito zonas diferentes (Figura 3-2), conforme estabelece a NBR 15220-3 (ABNT, 2005e), “Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social”. A cidade de Foz do Iguaçu está inserida na Zona Bioclimática 3 (ZB3) na Região Sul Brasileira (Figura 3-3).

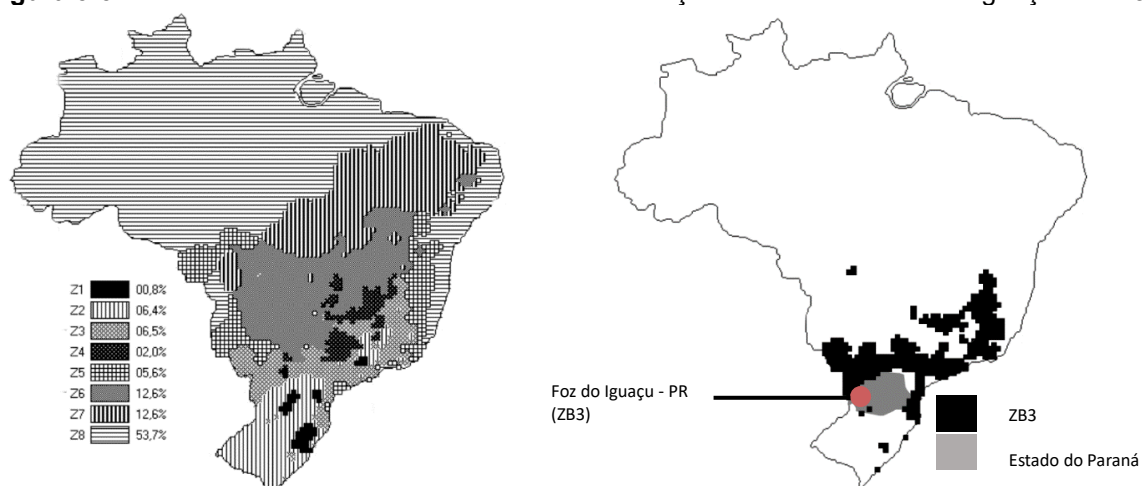
Figura 3-2: Zoneamento bioclimático brasileiro.



Fonte: Adaptado de ABNT (2005d).

Em relação às estratégias e diretrizes projetuais que a norma cita para a ZB3, estão: (i) adotar aberturas para ventilação e o sombreamento das aberturas, durante o inverno permitir a entrada de sol nas aberturas; (ii) para as vedações externas, parede leve refletora e a cobertura isolada; (iii) estratégias de condicionamento térmico passivo: no verão ventilação cruzada, no inverno aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica). Quanto a cobertura, na NBR 15220-3, recomenda-se: nas zonas bioclimáticas ZB1 a ZB6, coberturas leves e isoladas (ABNT, 2005e).

Figura 3-3: Zoneamento bioclimático brasileiro e demarcação da cidade de Foz do Iguaçu na ZB3.



Fonte: Adaptado de ABNT (2005d).

A seguir será descrito as principais características climáticas da cidade de Foz do Iguaçu - PR. Os dados apresentados foram extraídos do arquivo climático “BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx” disponíveis em *Climate One Building* (2018).

- Foz do Iguaçu - PR

A cidade de Foz do Iguaçu-PR (Figura 3-4), situada na latitude -25°36' sul, longitude de 54°29' oeste, possui 240m de altitude, está inserida na Zona Bioclimática 3 (ZB3). De acordo com a classificação Köppen-Geiger o clima de Foz do Iguaçu é classificado como “Cfa”, considerado um clima subtropical úmido, ou seja, mesmo no mês mais seco, a umidade e as precipitações pluviométricas são consideráveis.

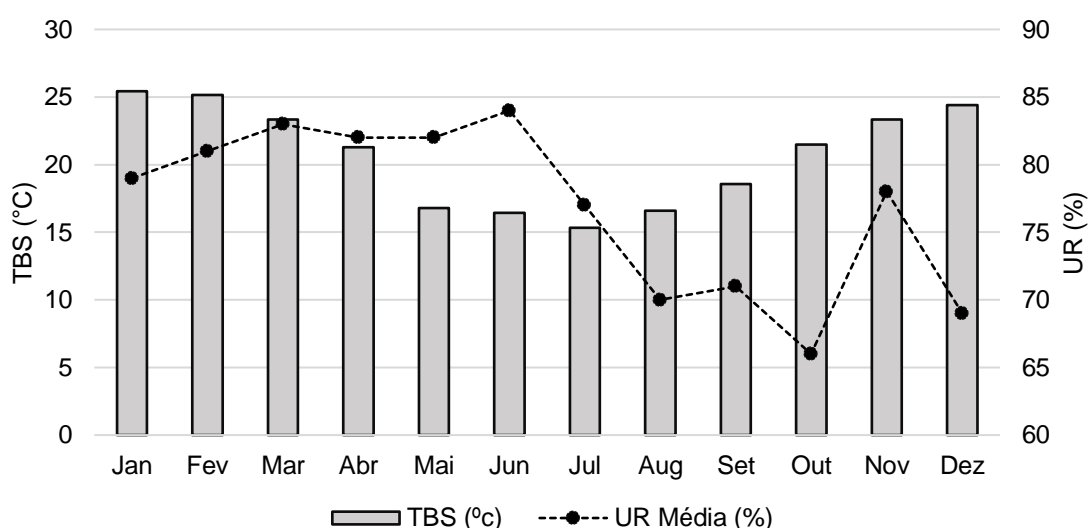
Figura 3-4: Localização geográfica da cidade e Foz do Iguaçu - PR.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

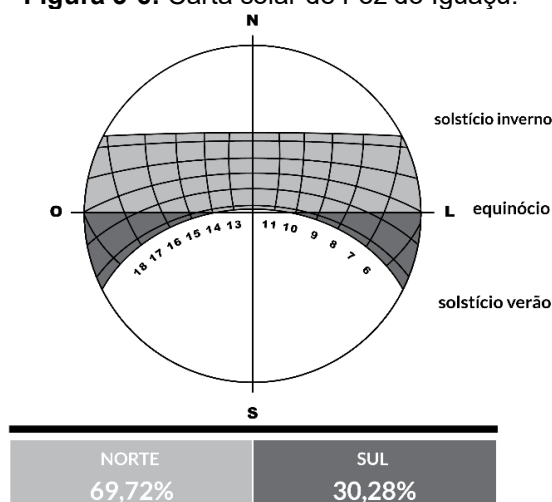
A temperatura média mais quente do ano é em janeiro, $25,4^{\circ}\text{C}$, e a mais fria é em julho, $15,3^{\circ}\text{C}$. A Figura 4-5 ilustra a variação de temperatura ao longo do ano (TBS) e a relação com a umidade do ar (UR). Observa-se no gráfico que, quanto menores as temperaturas, maiores são os valores da umidade relativa, ou seja, durante o verão a umidade relativa é mais baixa e no inverno mais alta (Figura 3-5).

Figura 3-5: Temperatura de Bulbo Seco (TBS) e Umidade Relativa (UR).

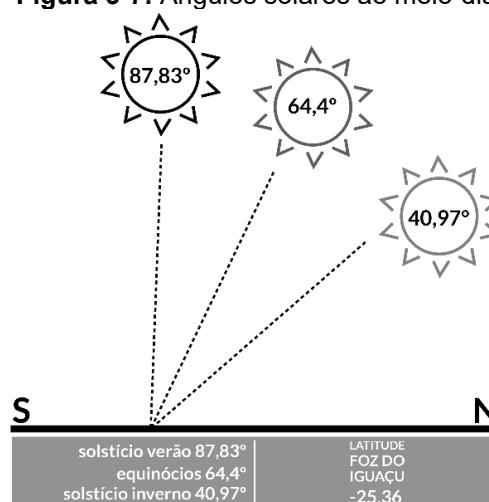


Fonte: Dados do arquivo BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx, *Climate One Building* (2018).

No decorrer do ano, a latitude de Foz do Iguaçu recebe uma maior incidência de radiação solar direta ao norte (69,72%) e menor ao sul (30,28%) (Figura 3-6). Ao meio-dia, na fachada norte, a radiação solar direta incide em ângulos mais altos no verão e mais baixos no inverno (Figura 3-7).

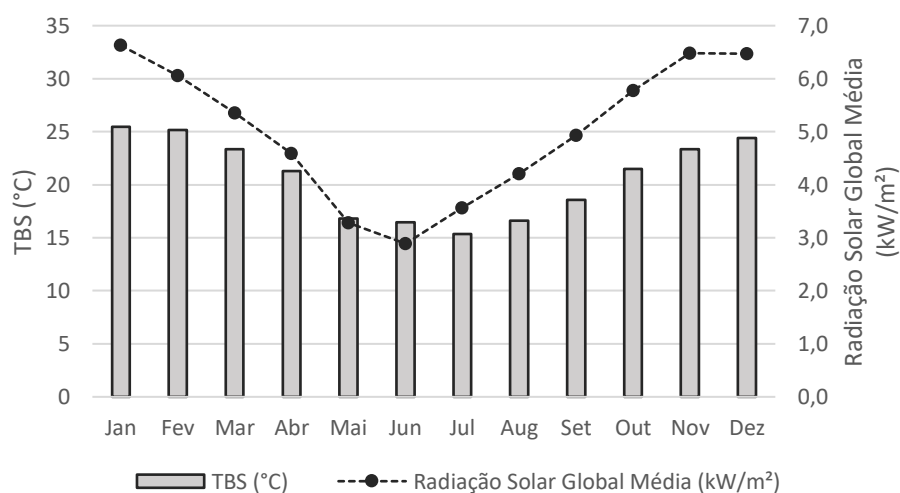
Figura 3-6: Carta solar de Foz do Iguaçu.

Fonte: Adaptado do programa EPview - Beta Version, Roriz (2012).

Figura 3-7: Ângulos solares ao meio-dia.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

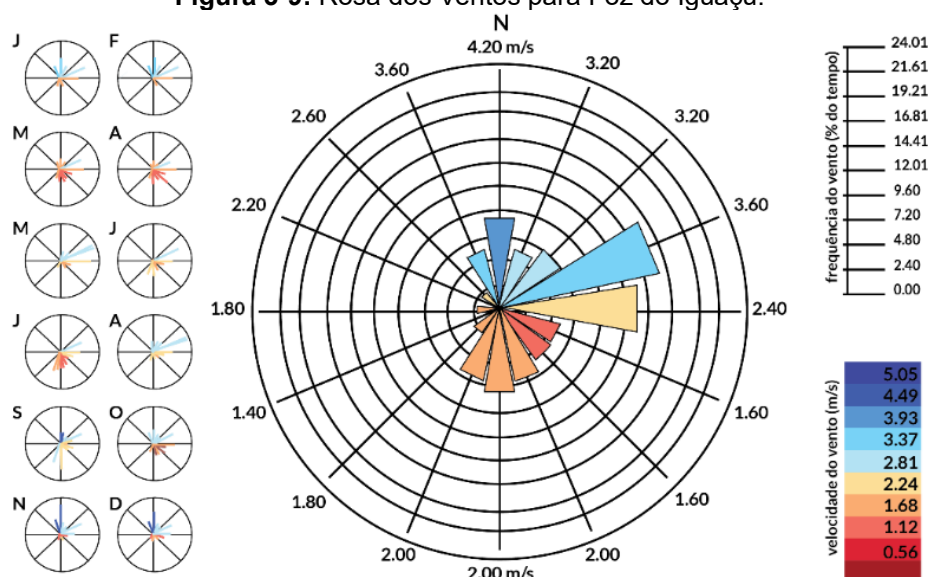
A Figura 3-8 representa a variação da radiação solar global durante todo o ano com a temperatura média do ar (TBS) em Foz do Iguaçu. Nota-se que, a radiação solar é mais intensa no verão, e menos intensa no inverno. Isso ocorre porque no hemisfério sul, durante o verão as alturas do Sol são maiores, os dias são mais longos e há mais radiação solar. Durante o inverno inverte, as alturas do Sol são menores, os dias são mais curtos e há menos radiação solar. De acordo com Frota (2004), quanto maior a altura solar, mais intensa é a radiação, e menos difusa, influenciando diretamente na variação da temperatura média, o mesmo ocorre de maneira inversa.

Figura 3-8: Relação da Temperatura de Bulbo Seco e da Radiação Solar durante o ano.

Fonte: Dados do arquivo BRA_PR_Foz.do.Iguaçu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx, Climate One Building (2018).

A Figura 3-9 representa a variação da Rosa dos Ventos durante todo o ano para a cidade de Foz do Iguaçu. Nota-se que, ao longo do ano existe a predominância da orientação nordeste, seguido da orientação leste, com uma frequência aproximada de 12% do tempo.

Figura 3-9: Rosa dos Ventos para Foz do Iguaçu.



Fonte: Adaptado do programa EPview - Beta Version, Roriz (2012).

O resumo das principais informações climáticas da cidade de Foz do Iguaçu se encontram na Tabela 3-1 e no Quadro 3-1.

Tabela 3-1: Dados climáticos mensais de Foz do Iguaçu.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS mínima (°C)	21,7	22	20,6	18,1	14,8	13,8	11,9	12,4	14,8	16,6	19,6	19,6
TBS máxima (°C)	31,2	30	29,5	27,4	21,9	21,4	22,4	24,3	24,8	28,7	28,8	30
TBS média (°C)	25,4	25,1	23,3	21,3	16,8	16,4	15,3	16,6	18,5	21,5	23,3	24,4
UR média (%)	79	81	83	82	82	84	77	70	71	66	78	69
Vento velocidade média (m/s)	2,3	2,3	2,2	3,2	2,7	2,8	2,8	2,8	3,4	3,1	2,4	2,7
Radiação Solar Global Média (kW/m²)	6,6	6,1	5,4	4,6	3,3	2,9	3,6	4,2	4,9	5,8	6,5	6,5

Menor Valor Legenda Maior Valor

Fonte: Dados do arquivo BRA_PR_Foz.do.Iguaçu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx, Climate One Building (2018).

Quadro 3-1: Resumo dos dados climáticos de Foz do Iguaçu.

Dados Climáticos	Valores
Latitude / Longitude	25°36' Sul / 54°29' Oeste
Fuso horário	-3.0 horas GMT (<i>Greenwich Mean Time</i>)
Elevação (acima do nível do mar)	240m
TBS máxima (°C) / dia	31,2°C / Janeiro
TBS mínima (°C) / dia	11,9°C / Julho
TBS média (°C) / ano	20,65°C
Köppen classificação	Cfa / Clima subtropical úmido
ASHRAE Zona Climática	3A / Quente úmido
Zona Bioclimática NBR 15220	ZB 3

Fonte: Dados do arquivo BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx, *Climate One Building* (2018).

3.1.3 Definição do projeto arquitetônico do modelo real

O motivo para a escolha do modelo da edificação estudo de caso ser unifamiliar e de um pavimento foi fundamentado em quatro fatores: primeiramente, no alto e crescente consumo energético despendido por edificações residenciais; em segundo lugar, no Brasil, a maioria das moradias são construídas na tipologia unifamiliar; em terceiro lugar a relação do ganho de calor recebido pela cobertura em edificações de um único andar. O setor residencial é um dos principais consumidores energético do país, com cerca de 27,6% do consumo total (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021). Os edifícios unifamiliares constituem 85,2% dos domicílios brasileiros da Região Sul do país (IBGE, 2020). Nas edificações de um único andar, estima-se que 80% da radiação solar atinge a cobertura e 20% as fachadas (MASCARÓ, 2010); e, em quarto lugar, a tipologia dos projetos residenciais da cidade, local de estudo, em sua maioria são residências unifamiliares de um único andar, informações referente as tipologias foram obtidas através dos dados do Estudo do Mercado Imobiliário de Foz do Iguaçu, (SEBRAE, 2019), e também da entrevista realizada com o Diretor de Análise e Aprovação de Projetos da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu- PMFI, Mario Junior Petrucci (Apêndice D).

A entrevista foi embasada no levantamento das características de edifícios residenciais brasileiros do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) (TEIXEIRA *et al.*, 2015), foi dividida em 2 etapas, a Etapa 1, avalia a tipologia dos projetos e a Etapa 2, as características dos sistemas de coberturas de habitações de interesse social (será descrita no próximo tópico, item 3.1.4). Segundo o diretor, as principais tipologias arquitetônicas são, residências unifamiliares, edificações térreas.

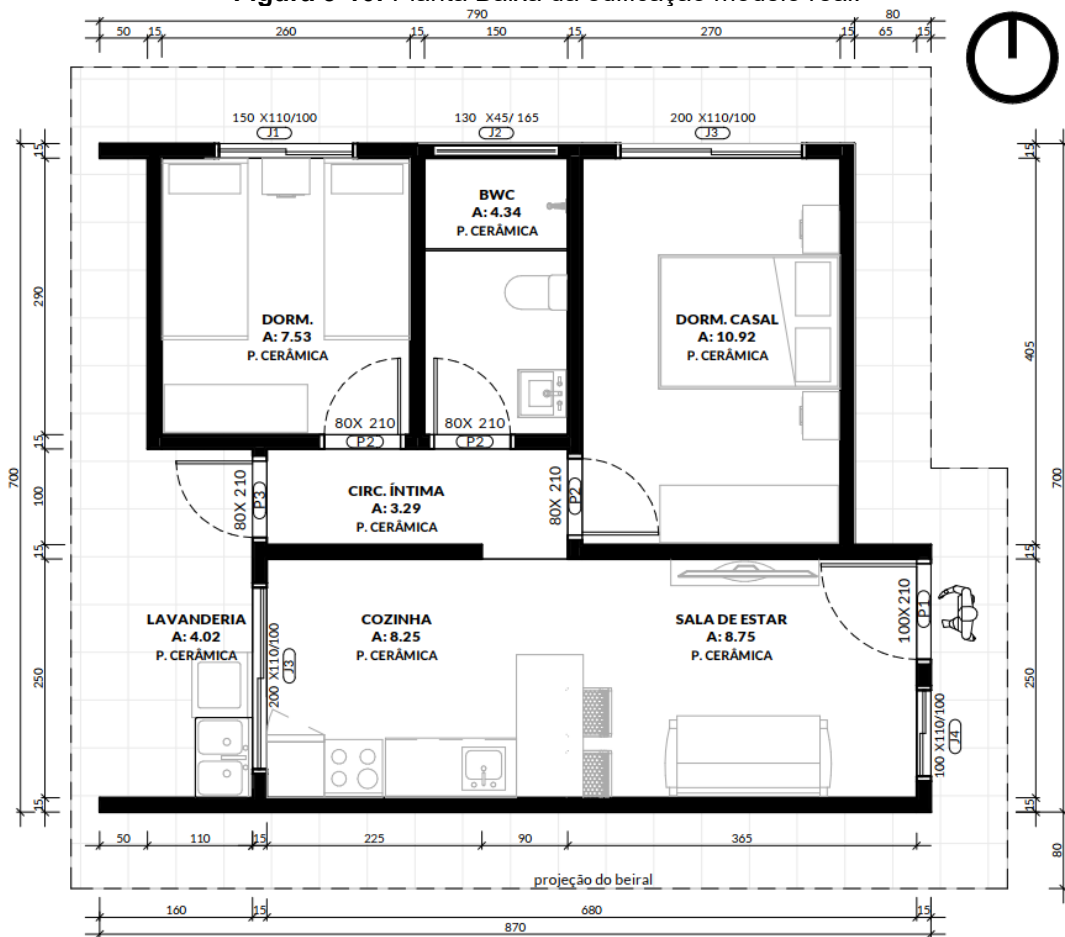
Conforme mencionado, foi empregado os parâmetros do programa Casa Verde e Amarela (CVA) para a elaboração do projeto da edificação modelo, utilizando também, o código de obras do município de Foz do Iguaçu (FOZ DO IGUAÇU, 1991) para atender as solicitações exigidas quanto aos parâmetros construtivos.

O projeto da residência é constituído por um pavimento, o programa de necessidades é composto por dois dormitórios, um banheiro, sala de estar integrada com a cozinha e uma lavanderia externa, totalizando 54,00m² de área total e 67,21m² somando a área total considerando à ampliação prevista (de acordo exigências do CVA).

O estudo de caso, modelo real, foi elaborado considerando a orientação solar da cidade de Foz do Iguaçu (item 3.1.2), para tal, o projeto foi implantado no eixo leste/oeste. A escolha dessa implantação teve como base os estudos de Cunha (2010, p. 51), no qual apresenta os princípios estruturadores bioclimáticos, estes “estão relacionados às estratégias projetuais necessárias para uma maior compatibilização entre a arquitetura e o clima local”. Através dessa implantação, os dormitórios foram voltados para a fachada norte, logo, a maior área de esquadrias foram voltadas para essa fachada, de acordo Cunha (2010, p. 59), no verão, na orientação norte, “o movimento aparente do sol é caracterizado por raios solares de alturas maiores”, o que torna relativamente simples controlar a radiação solar, “tanto no fechamento opaco, ou paredes, como no transparente ou nas esquadrias”. No período de inverno, a radiação solar direta atinge a fachada norte durante todo o dia, considera nesse período as menores alturas solares. Sobre o comportamento térmico das fachadas nos períodos quentes e frios pode-se afirmar que para uma melhor habitabilidade, deve-se considerar o máximo de exposição solar no inverno e mínima no verão, o que ocorre na fachada norte. As demais fachadas, leste e oeste inevitavelmente tornam os ambientes mais quentes no verão e mais frios no inverno, comparados aos que estão com exposição para norte, nordeste e noroeste (OLGYAY, 2008).

De forma simplificada, será apresentada na Figura 3-10 a planta baixa do modelo real, e de forma completa, a planta baixa com mais detalhes, conforme exigências do programa CVA no Apêndice B. Em seguida, a Figura 3-11 apresenta as fachadas, por fim, a Figura 3-12 apresenta as perspectivas da edificação.

Figura 3-10: Planta Baixa da edificação modelo real.

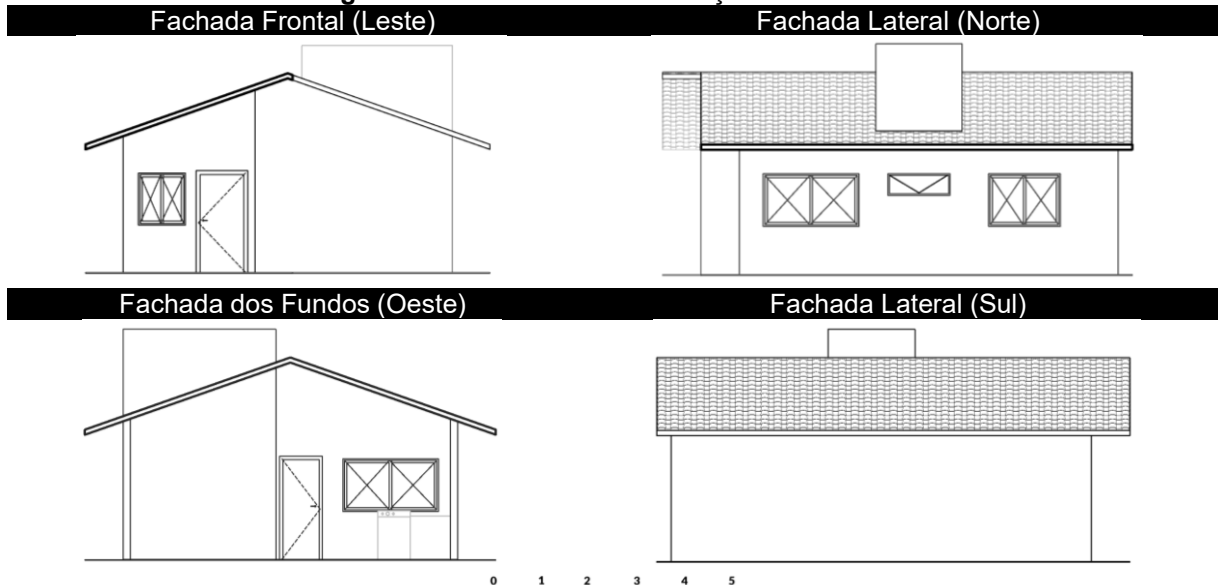


PLANTA BAIXA SIMPLIFICADA



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Figura 3-11: Fachadas da edificação modelo real.

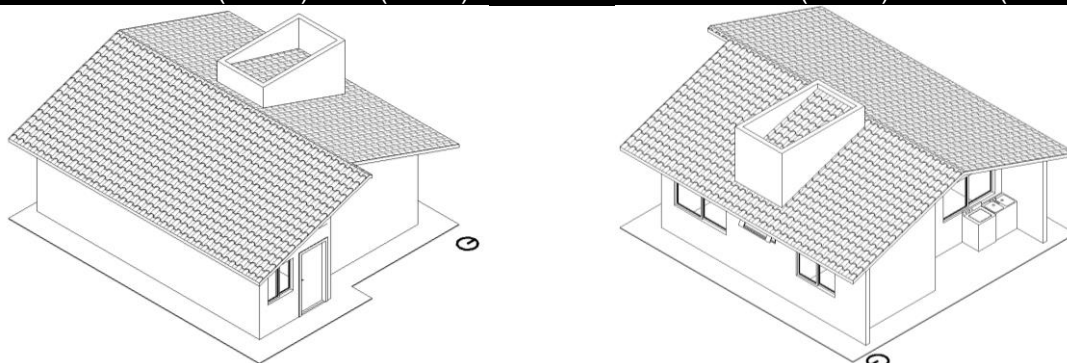


Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Figura 3-12: Perspectivas da edificação modelo real.

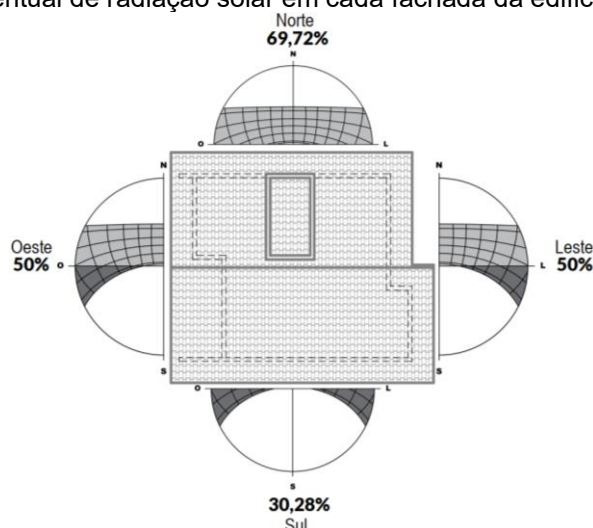
Fachadas Leste (frontal) - Sul (lateral)

Fachadas Norte (lateral) – Oeste (fundos)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 3-13, apresenta por meio da carta solar, o percentual de horas de incidência de radiação solar em cada fachada da edificação. A fachada norte recebe maior incidência solar durante o ano, (69,72%) e a sul recebe menos incidência solar (30,28%), sendo (12,5%) no período do começo da manhã e (12,5%) no final da tarde. Para essa implantação, tanto a fachada leste, quanto a oeste recebem (50%) da radiação solar, a diferença é que a fachada leste recebe no período da manhã e a fachada oeste no período da tarde.

Figura 3-13: Percentual de radiação solar em cada fachada da edificação durante o ano.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

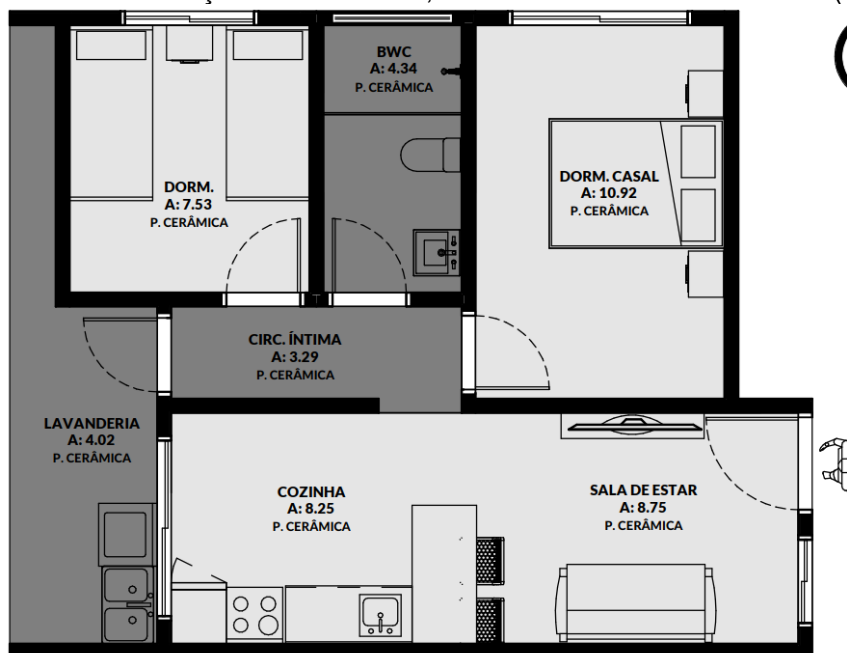
Para o dimensionamento das esquadrias, foi empregado o projeto a Lei Complementar Nº 3 data 16 de julho de 1991, que dispõem sobre o Código de Obras e Edificações do Município (FOZ DO IGUAÇU, 1991). Em ambiente de permanência prolongada (APP), considera 1/6 da área do ambiente; e ambiente de permanência transitória (APT), considera 1/8 da área do piso (Tabela 3-2).

Tabela 3-2: Área das esquadrias divididas de acordo a classificação dos ambientes.

APP	Ambiente	Área do piso (m ²)	Área mínima Janela (m ²)	Área proposta Janela (m ²)
ambiente de permanência prolongada (1/6)	Dormitório Casal	10,92	1,82	2,20
	Dormitório 02	7,53	1,25	1,65
	Sala e Cozinha Integradas	17,00	2,83	3,30
APT	Ambiente	Área do piso (m ²)	Área mínima janela (m ²)	Área proposta janela (m ²)
ambiente de permanência transitória (1/8)	Banheiro	4,34	0,54	0,58
	Circulação Íntima	3,15	-/-	-/-
	Lavanderia	4,01	-/-	-/-

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados do Código de Obras de Foz do Iguaçu, Foz do Iguaçu (1991).

Na Figura 3-14, será apresentada a classificação dos ambientes conforme a NBR15575-1 (ABNT, 2021), na qual classifica os ambientes de ocupação contínua, como APP (Ambiente de Permanência Prolongada), sendo estes: sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, sala de TV ou ambientes de usos similares aos citados, e os ambientes de ocupação transitória, como APT (Ambiente de Permanência Transitória), sendo estes: cozinha, lavanderia ou área de serviço, banheiro, circulação, varanda aberta ou fechada com vidro, solarium, garagem ou ambientes de usos similares aos citados.

Figura 3-14: Classificação dos ambientes, conforme a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021).**LEGENDA - CLASSIFICAÇÃO DOS AMBIENTES**

- APP - Ambiente de Permanência Prolongada
- APT - Ambiente de Permanência Transitória

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

3.1.4 Definição dos materiais construtivos do modelo real

Para determinar os materiais empregados no modelo real foram utilizados os dados coletados na entrevista aplicada ao diretor de análise e aprovação de projetos da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu (PMFI), Mario Junior Petrucci (Apêndice D).

Os materiais empregados na habitação foram conferidos com os parâmetros da norma NBR 15220-3 (ver item 3.1.2), que trata dos componentes e elementos construtivos das edificações, de acordo o Zoneamento Bioclimático Brasileiro. Constatou-se que o modelo real se enquadra dentro dos parâmetros para a ZB3. A norma recomenda para as vedações externas parede leve, quanto a cobertura, recomenda-se leve e isolada (Tabela 3-3) (ABNT, 2005e).

Tabela 3-3: Diretrizes construtivas relativas à transmitância térmica, para as paredes e coberturas para a ZB3.

Vedações externas		Transmitância Térmica (U) Norma (W/m ² .K)	Transmitância Térmica (U) Modelo Real (W/m ² .K)
Paredes	Leve refletora	U ≤ 3,60	Parede Externa: 2,48
			Parede Interna: 2,00
Cobertura	Leve Isolada	U ≤ 2,00	1,18

Fonte: (ABNT, 2005e).

Nas paredes externas e internas foi empregado o sistema de fechamento de alvenaria, composto pelo bloco cerâmico vazado de 6 furos (9x14x19cm), com argamassa de ambos os lados (2,5cm) (Figura 3-14). Para o sistema de cobertura do modelo real, foi utilizado o telhado cerâmico, junto da manta aluminizada, seguido do forro de PVC. Segundo o entrevistado, Mario Junior Petrucci, esses materiais são os mais utilizados em habitações de interesse social em Foz do Iguaçu (Apêndice D). A Tabela 3-4 apresenta de forma resumida todos os materiais construtivos que foram utilizados para o modelo real e de forma completa consta no Apêndice C.

Tabela 3-4: Resumo das propriedades dos materiais do Modelo Real.

Composição dos Elementos Construtivos da Edificação Modelo Real		RT (m ² /W.k)	U (W/(m ² .K))	CT (kJ/(m ² .K))	α* (adm.)
Sistema de Cobertura	Telha Cerâmica (e= 0,01) Manta aluminizada (e= 0,002) Forro de PVC (e= 0,006)	0,85	1,18	355	0,52
Parede Externa	Argamassa reboco externo (e=0,0025m) Cerâmica (e= 0,09m) Tijolo cerâmico 6 furos (9x14x19) Argamassa reboco interno (e= 0,0025m)	0,40	2,48	158	0,20
Parede Interna	Argamassa reboco interno (e= 0,0025m) Cerâmica (e= 0,09m) Tijolo cerâmico 6 furos 9x14x19 Argamassa reboco interno (e= 0,0025m)	0,49	2,00	158	0,20
Piso Externo	Radier concreto (e= 0,16m) Argamassa piso (e= 0,02m) Cerâmica interna (e= 0,01m)	0,26	3,86	312	0,20
Piso Interno	Radier concreto (e= 0,16m) Argamassa piso (e= 0,02m) Cerâmica interna (e= 0,01m)	0,26	3,86	312	0,20
Aberturas	Portas de Madeira	0,30	3,33	9,24	0,70
	Janelas** vidro simples incolor (3mm)	0,17	5,77	-	0,10

RT= Resistência Térmica; U= Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α*= Absortância à radiação solar; *tipo de superfície correspondente aos valores: 0,52 = telha cerâmica (nova); 0,2 = pintura ou revestimento branco; 0,7 = cor de madeira; 0,1 = vidro incolor.

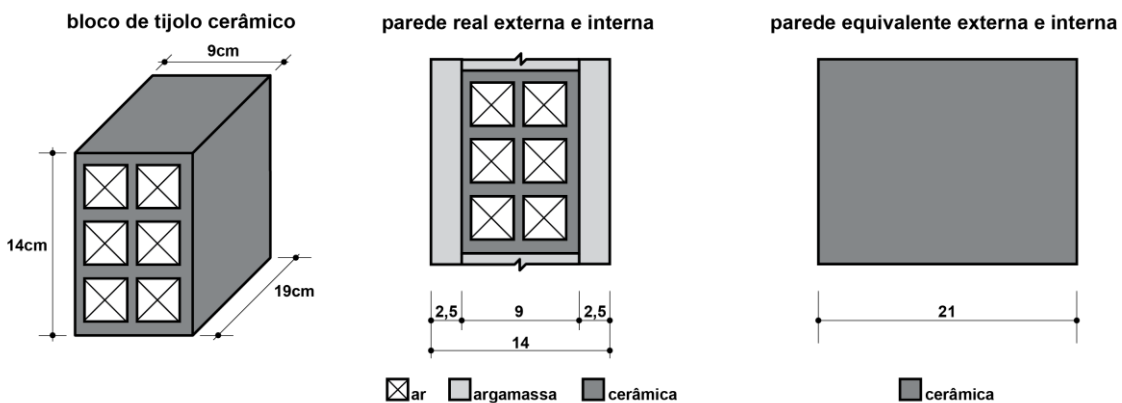
**FS = 0,87

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da ABNT (2005b).

As paredes externas e internas possuem as mesmas propriedades térmicas, excetuando a Resistência Térmica externa (Rse) que foi empregada apenas nas paredes externas. Nas paredes internas foi contabilizado a Resistência Térmica interna (Rsi), a diferença dos parâmetros (Rse e Rsi) é perceptível para os cálculos de Transmitância Térmica (U) e Resistência Térmica (RT) (Tabela 3-4).

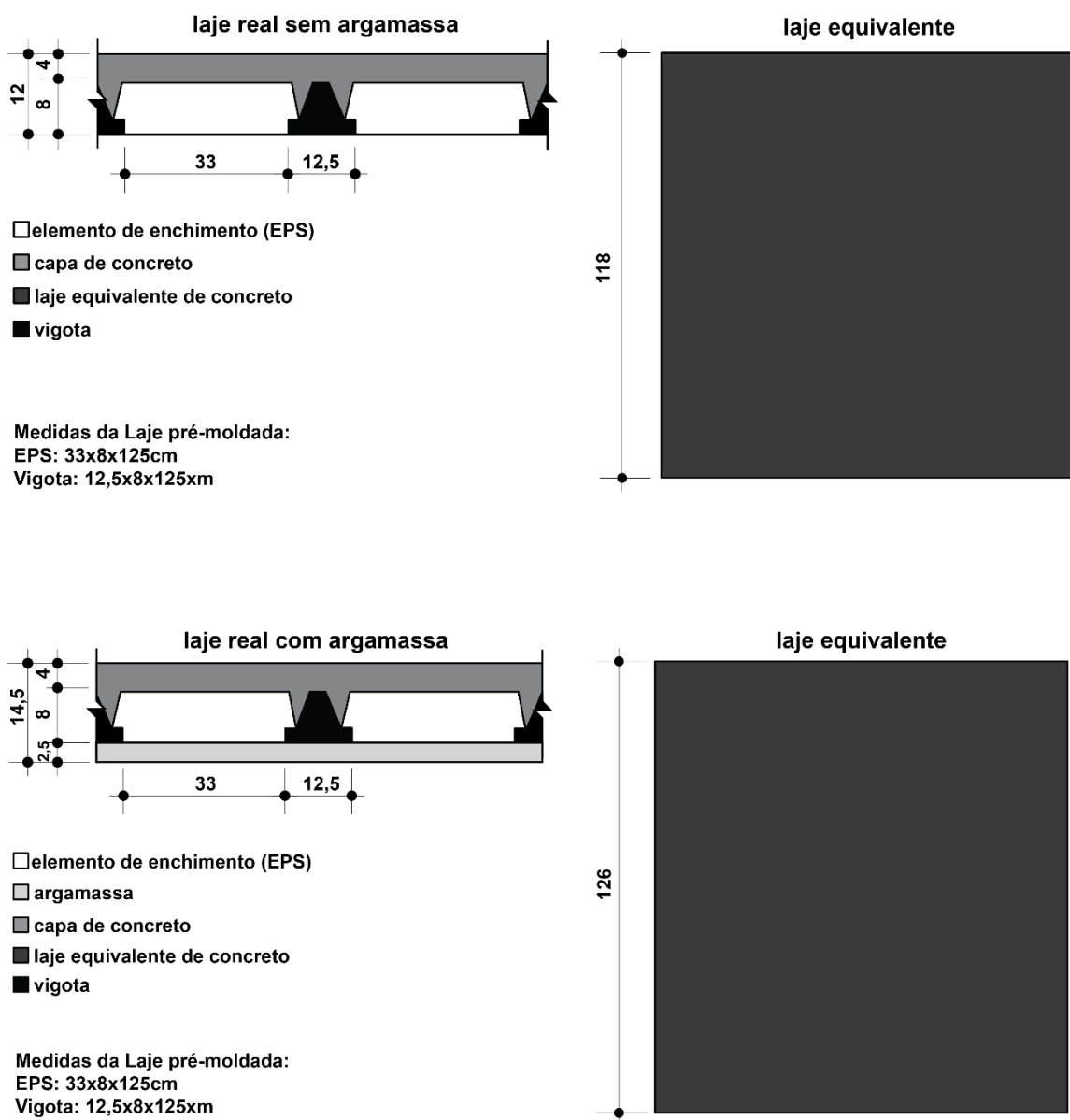
Para a simulação no programa *EnergyPlus*, é necessário que os materiais heterogêneos, formados por materiais e estruturas distintas, como o caso de paredes de blocos cerâmicos vazados, tenham um correspondente homogêneo para que o programa possa calcular as trocas térmicas por condução. Sendo assim, foi calculado o correspondente homogêneo para a laje, composta de vigotas e tabelas de isopor, e para as paredes compostas por blocos cerâmicos vazados, resultando em um material homogêneo de espessura equivalente com as mesmas propriedades termofísicas (Figuras 3-15 e 3-16).

Figura 3-15: Parede equivalente interna e externa.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Figura 3-16: Laje pré-moldada de isopor equivalente.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Os cálculos referentes ao tijolo e a laje pré-moldada de isopor equivalentes estão no Apêndice E.

As janelas apresentam diferentes percentuais de iluminação e ventilação devido as variadas dimensões. Para fins de simplificação da simulação, os descontos de área das esquadrias não foram considerados, a Tabela 3-5 apresenta os materiais construtivos das janelas.

Tabela 3-5: Características das esquadrias para o modelo real.

Elementos Transparentes				
Elemento	Fator solar (FS)	Transmitância térmica (Ut) W/(m².K)	Emissividade de onda longa ε	
Elementos transparentes	0,87	5,70	17,00	
Ventilação nas Esquadrias				
Elemento	Percentual de abertura para ventilação (Pv, APP) %			
Abertura para ventilação	50			
Perfis das Esquadrias				
Elemento	Absortância à radiação solar dos perfis	Emissividade de onda longa dos perfis	Condutância Térmica W/(m².K)	Largura dos perfis da esquadria (mm)
Perfis das esquadrias	0,58	0,90	56,00	50,00

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

3.1.4.1 Definição dos sistemas de coberturas para simulação

Nesta etapa, serão apresentados os materiais construtivos empregados nos variados sistemas de coberturas que foram utilizados para a simulação computacional.

Para a definição dos materiais construtivos pertinentes ao sistema de cobertura do modelo real e das variadas composições que serão testadas, como metodologia foi aplicada a pesquisa de campo. Marconi e Lakatos (2021), descrevem que os instrumentos mais empregados para se realizar a pesquisa de campo são a entrevista, o questionário e o formulário. A entrevista e o formulário contam com a presença do pesquisador, onde registra as informações, já o questionário é preenchido sem a presença do pesquisador. Para a realização da pesquisa, foi utilizada uma entrevista estruturada, na qual o entrevistador segue um roteiro estabelecido com perguntas previamente determinadas. O formulário consiste em obter informações diretamente do entrevistado pelo próprio investigador, no momento da entrevista (MARCONI; LAKATOS, 2021). Para a elaboração da pesquisa de campo foi realizada uma entrevista estruturada com o diretor de análise e aprovação de

projetos da Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu (PMFI), Mario Junior Petrucci (Apêndice D), na qual obteve-se dados referente aos sistemas de coberturas mais empregados na cidade.

A entrevista foi embasada no estudo de “Levantamento das Características de Edifícios Residenciais Brasileiros” do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) (TEIXEIRA *et al.*, 2015), foi dividida em 2 etapas: a Etapa 1, foi realizada a avaliação da tipologia dos projetos e o sistema de fechamentos verticais; e a Etapa 2, foram determinadas as características dos sistemas de coberturas de habitações de interesse social. Segundo o entrevistado, a principal tipologia arquitetônica é, residência unifamiliar, edificação térrea. Na Tabela 3-6 são apresentadas as respostas da entrevista, de forma resumida. O Apêndice D apresenta as perguntas e respostas de forma completa.

Tabela 3-6: Síntese da entrevista aplicada ao Diretor de análise e aprovação de projetos.

Tópico	Perguntas	Respostas	Observações
A. Sistemas de coberturas	Sistema de cobertura utilizado	(1) Telhado aparente (2) Platibanda	
B. Cobertura com laje impermeabilizada	Beiral	80cm	
	Forro	(1) PVC (2) Gesso	
	Isolamento térmico	Manta aluminizada	
C. Platibanda	Tipos de telha	(1) Fibrocimento (2) termoacústica (3) Cerâmica (4) Zinco	
	Beiral	70cm à 80cm	(foi adotado 80cm)
C1. Telhado com laje	Tipo de Laje	Pré-moldada isopor	
	Forro	PVC Gesso	
	Isolamento térmico	Nenhum	
C2. Telhado sem laje	Forro	PVC Gesso	
	Isolamento térmico	Manta aluminizada	
D. Telhado aparente	Tipos de telha	(1) Cerâmica (2) fibrocimento (3) Zinco (4) Concreto (5) termoacústica	(não foi adotado para simulação a telha de concreto, devido ser pouco utilizada)
	Beiral	70 a 120	(foi adotado 80cm)
D1. Telhado com laje	Tipo de Laje	Pré-moldada isopor	
	Forro	(1) PVC (2) Gesso (3) Madeira	
D2. Telhado sem laje	Forro	(1) PVC (2) Gesso (3) Madeira	
	Isolamento térmico	Manta aluminizada	
E. Complemento	Ventilação na cobertura	Não	(quando tem, geralmente nos banheiros dos geminados)
	Manta aluminizada	Junto a telha	
	Modelo de Platibanda mais utilizado	Beiral com marquise nas janelas laterais	

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Conforme apresentado na Tabela 3-6, descrito no Apêndice D, tanto o telhado aparente, quanto a platibanda são amplamente empregados nas coberturas em Foz do Iguaçu, com uma ressalva, em habitações de interesse social, o telhado aparente ainda é o mais empregado. Optou-se então, por simular um modelo de habitação com telhado aparente. Conforme a análise da entrevista, o modelo real será simulado com os materiais mais empregados, com as seguintes combinações: 4 tipos de telhas, 1 tipo de forro, 1 tipo de isolante térmico, combinados com e sem laje, conforme Tabela 3-7.

Tabela 3-7: Composições dos sistemas de coberturas para as simulações .

Tipo de Telha	Com Laje	Sem Laje
Fibrocimento 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fibrocimento + Laje 2. Fibrocimento + Laje + PVC 3. Fibrocimento + Laje + Manta 4. Fibrocimento + Laje + Manta + PVC 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Fibrocimento 6. Fibrocimento + PVC 7. Fibrocimento + Manta 8. Fibrocimento + Manta + PVC
Cerâmica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cerâmica + Laje 2. Cerâmica + Laje + PVC 3. Cerâmica + Laje + Manta 4. Cerâmica + Laje + Manta + PVC 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Cerâmica 6. Cerâmica + PVC 7. Cerâmica + Manta 8. Cerâmica + Manta + PVC
Aço Trapezoidal 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aço Trapezoidal + Laje 2. Aço Trapezoidal + Laje + PVC 3. Aço Trapezoidal + Laje + Manta 4. Aço Trapezoidal + Laje + Manta + PVC 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Aço Trapezoidal 6. Aço Trapezoidal + PVC 7. Aço Trapezoidal + Manta 8. Aço Trapezoidal + Manta + PVC
Termoacústica 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Termoacústica + Laje 2. Termoacústica + Laje + PVC 3. Termoacústica + Laje + Manta 4. Termoacústica + Laje + Manta + PVC 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Termoacústica 6. Termoacústica + PVC 7. Termoacústica + Manta 8. Termoacústica + Manta + PVC

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Para o presente trabalho foi adotada a inclinação de (35%) para os 4 modelos de telhas escolhidas (fibrocimento; cerâmica; aço trapezoidal e termoacústica). Foi considerada a que possui maior inclinação (telha cerâmica) dentro do mínimo exigido de acordo os modelos e recomendações normativas. Desta forma, foi empregado a mesma inclinação do telhado para os demais modelos de telhas, uma vez que as recomendações por normativas orientam apenas considerar a inclinação mínima. Adotando uma única inclinação evita a criação de um modelo real e referência (ver item 3.4.1 ABNT NBR 15575-1 (2021)) para cada tipo de telha. Totalizando 66 simulações (sendo 32 combinações entre os materiais, somado aos dois modelos referência (com ventilação natural (VN) e com condicionamento artificial (CA)).

Neste trabalho foi desenvolvido um projeto de uma edificação padrão de interesse social (HIS). Como citado anteriormente, tanto do ponto de vista projetual e construtivo os telhados de uma e duas águas são as soluções mais adotadas nos projetos (CALIL; MOLINA, 2010). Sendo assim, foi a adotado para o projeto a solução

de telhado com duas águas. Quanto ao material, para fins de simulação computacional, não é necessário descrever o tipo de material da estrutura da cobertura. No entanto, se houvesse a necessidade de escolher um material para a estrutura do telhado, para a simulação, seria a madeira. Conforme visto no Capítulo 2, historicamente a madeira é um dos materiais mais antigos e empregados na construção civil.

Para realizar as simulações finais foi determinado uma única espessura por cada tipo de telha, para a escolha das espessuras das telhas foram realizadas simulações com o modelo real, trocando apenas as espessuras de cada tipo e comprando-as. Constatou-se que nas horas ocupadas, a variação entre as espessuras para a mesma telha foi mínima em termos percentuais de atendimento à faixa de temperatura ideal dos ambientes de permanência prolongada (PHFT) (Tabelas 3-8 e 3-9). Desta forma, a menor espessura de cada solução foi considerada para a realização das simulações finais, sendo em função do menor custo para a construção de uma habitação de interesse social.

Tabela 3-8: Resultados das simulações para cada espessura das telhas.

Tipo de Telha	Espessura (mm)	PHFT mod. Real	PHFT mod. Ref.
Telha de Fibrocimento	4	68,61	
	5	68,59	
	6	68,53	
	8	68,55	
	10	68,51	
Telha Cerâmica	10	69,39	64,67
	15	69,28	
	25	69,04	
Telha de aço Trapezoidal	0,32	67,46	
	0,5	67,43	
	0,8	67,42	
Telha Termoacústica	30	71,50	
	50	72,39	

PHFT: Percentual de horas de ocupação do ambiente de permanência prolongada (APP) dentro da faixa de temperatura operativa.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Os valores de condutividade térmica, calor específico, emissividade de onda longa e densidade de massa aparente, foram obtidos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). A absorvância à radiação solar (α) das telhas, foram definidas e baseadas de acordo com (DORNELLES, 2021).

Tabela 3-9: Espessuras escolhidas para realizar as simulações finais.

Tipo de Telha	Espessura (mm)
Telha de Fibrocimento	4
Telha Cerâmica	10
Telha de aço Trapezoidal	0,32
Telha Termoacústica	30

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Para a coleta de dados referente as telhas foram utilizadas as seguintes referências:

- a) Telha de Fibrocimento NBR 5643 (ABNT, 2022); NBR 7196 (ABNT, 2020); NBR 15210-1 (ABNT, 2019); NBR 7581 (ABNT, 2014);
- b) Telha Cerâmica NBR 15310 (ABNT, 2009);
- c) Telha de aço Trapezoidal NBR 14514 (ABNT, 2008);
- d) Telha Termoacústica NBR 16373 (ABNT, 2015).

Para o trabalho, nas simulações, foi utilizada a manta aluminizada como material isolante por baixa emissividade. De acordo os dados coletados na entrevista com o diretor de análise e aprovação de projetos, (ver item 4.1.4.1), este material é muito empregado nas edificações em Foz do Iguaçu. A norma 15220-2 enfatiza, “para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas [...] desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies - a inferior – continuará limpa, sem poeira” (ABNT, 2005b), para a composição das combinações com o material isolante, no arquivo *Input Data File - IDF* (do *EnergyPlus*) a manta aluminizada foi posicionada logo abaixo das telhas.

De forma resumida, serão apresentados, os materiais construtivos empregados nos sistemas de coberturas do modelo real (Tabela 3-10), e de forma completa no Apêndice F.

Tabela 3-10: Propriedades térmicas dos materiais empregados nos sistemas de coberturas para o modelo real.

Cobertura						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Telha fibrocimento	0,004	0,65	0,84	0,6	0,9	1600
Telha cerâmica	0,01	0,7	0,92	0,52	0,9	1600
Telha aço trapezoidal	0,00032	55	0,46	0,4	0,25	7800
Telha termoacústica	0,03	0,03	1,67	0,4	0,25	20
Laje pré-moldada de isopor	1,18	1,75	1	0,65	0,9	93
Forro						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Forro de PVC	0,008	0,20	1,47	0,4	0,9	1.400

e= espessura dos materiais.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), (DORNELLES, 2021), (OLIVEIRA, 2012), NBR 5640 (ABNT, 1995), NBR 15310 (ABNT, 2009), NBR 14514 (ABNT, 2008), NBR 13858-2 (ABNT, 1997) e (DIAS, 2011).

3.1.5 Composição do modelo referência

No modelo de referência, deve adotar a cobertura externa composta por telha com 6mm de espessura, câmara de ar com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e laje com 100mm de espessura. Devem-se adotar paredes e pisos, de ambientes de permanência prolongada (APP) e ambientes de permanência transitório (APT), referentes a um elemento de vedação com 100mm de espessura (Tabela 3-11).

Tabela 3-11: Propriedades térmicas dos materiais para o modelo de referência.

Cobertura					
Elementos construtivos	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Telha com 6mm de espessura	0,65	0,840	0,65	0,9	1 700
Laje	1,75	1	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2 200
Paredes e Pisos					
Paredes Internas	1,75	1	0,58	0,90	2 200
Paredes Externas	1,75	1	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2 200
Pisos	1,75	1	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2 200
Isolante da Cobertura					
Elementos construtivos	Resistência térmica (m ² .K)/W	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ		
Isolamento térmico	0,67	0,70	0,90		

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

Os elementos transparentes da envoltória dos ambientes de permanência prolongada são descritos pelo percentual de sua área em relação à área de piso do APP. O percentual dos elementos transparentes dos ambientes de permanência prolongada ($P_{t,APP}$) deve ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$P_{t,APP} = 100 \cdot \frac{A_{t,APP}}{A_{p,APP}}$$

Onde:

$P_{t,APP}$	é o percentual de elementos transparentes na envoltória do APP, expresso em porcentagem (%)
$A_{t,APP}$	é a área de superfície dos elementos transparentes do APP, expressa em metros quadrados (m^2)
$A_{p,APP}$	é a área de piso do APP, expressa em metros quadrados (m^2)

Para o cálculo da área efetiva de abertura para ventilação do APP, devem ser consideradas as aberturas que permitam a livre circulação do ar, devendo ser descontadas as áreas de perfis, de vidros e de qualquer outro obstáculo. No cálculo da área efetiva de abertura para ventilação do APP, não podem ser consideradas as áreas de portas internas. As portas constituídas exclusivamente por elementos opacos devem apresentar a mesma geometria e as propriedades térmicas das portas do modelo real. A existência de outras aberturas para a ventilação do APP, como grelhas e chaminés, deve ser considerada apenas no modelo real (ABNT, 2021b, p. 29).

Deve-se considerar, os valores da Tabela 3-12 para o fator solar e a transmitância térmica dos elementos transparentes, preservar o percentual dos elementos transparentes e modelar os perfis da esquadria, considerando as características apresentadas na Tabela 3-12 (ABNT, 2021b).

Tabela 3-12: Características das esquadrias para o modelo de referência.

Elementos Transparentes				
Elemento	Fator solar (FS)	Transmitância térmica (U_t) $W/(m^2.K)$	Emissividade de onda longa ϵ	
Elementos transparentes	0,87	5,70	17	
Ventilação nas Esquadrias				
Elemento	Percentual de abertura para ventilação (P_v, APP)* %			
Abertura para ventilação	7,65			
Perfis das Esquadrias				
Elemento	Absortância à radiação solar dos perfis	Emissividade de onda longa dos perfis	Condutância Térmica $W/(m^2.K)$	Largura dos perfis da esquadria (mm)
Perfis das esquadrias	0,58	0,90	56	50

Percentual de abertura para ventilação (P_v, APP)* trata-se do dimensionamento das janelas do modelo real.
Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

O percentual dos elementos transparentes e de abertura para ventilação, a transmitância térmica e o fator solar dos elementos transparentes de ambientes de permanência transitória (APT) devem ser modelados da mesma maneira tanto para o modelo real, quanto para o modelo de referência, considerando as características do modelo real (ABNT, 2021b).

3.1.6 Resumo dos cenários que serão avaliados

Serão realizadas um total de 66 simulações, seguindo os parâmetros estabelecidos pela NBR 15575-1 (ABNT, 2021b). O modelo será combinado mediante:

- 4 tipos de telhas: telha de fibrocimento - telha cerâmica - telha de aço trapezoidal - telha termoacústica;
- 1 tipo de forro: PVC;
- 1 tipo de isolante: manta aluminizada;
- Com e sem laje;
- Com ventilação natural na edificação (VN), conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021);
- Com condicionamento artificial, (CA), conforme NBR 15575-1 (ABNT, 2021);

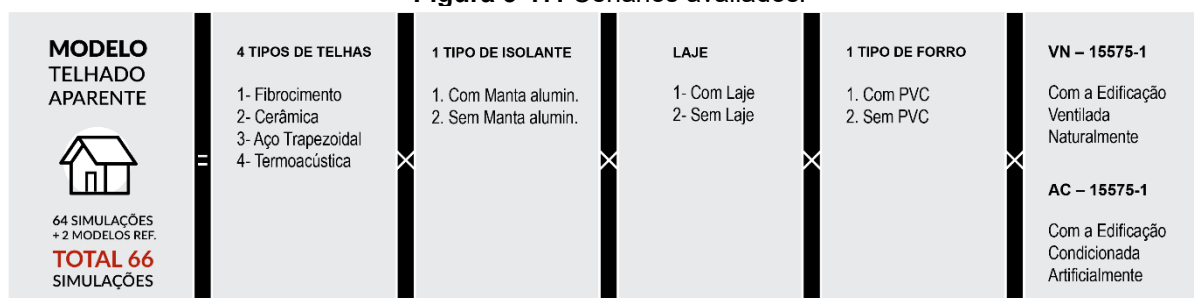
Os sistemas de coberturas que foram simulados, são provenientes de uma análise combinatória representada na Figura 3-17. As combinações são produtos de todas as variações, representadas pela seguinte fórmula:

$$C = p.n$$

Onde:

C	Combinação
p	variáveis
n	número de elementos em p

Figura 3-17: Cenários avaliados.



☒ representa a multiplicação entre todas as variações.
Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

3.2 ETAPA 2: MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO

Essa parte da pesquisa foi dividida em cinco etapas, as quais foram ilustradas na Figura 3-18 e detalhadas nos itens subsequentes.

Figura 3-18: Esquema simplificado das 5 principais etapas do método de modelagem da edificação e configuração dos parâmetros para simulação.

	1	2	3	4	5
ETAPA	Método de avaliação segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021)	Modelagem da edificação	Configuração do uso e ocupação do modelo real	Configuração com e sem o uso da ventilação natural	Dados de saída dos modelos com e sem o uso de ventilação natural
OBJETIVO	Modelo Real: Avaliar conservando todas as características do projeto Modelo de Referência: Avaliar adotando as características de referência da norma	Modelar a geometria no <i>SketchUp</i> v.2021 Pro Euclid v.0.9.4.2	Configurações de uso, ocupação e equipamentos no <i>Energy-Plus</i> v.9.3 para as simulações computacionais, de acordo determina a norma NBR 15575	VN - Ventilada naturalmente Avalia: (PHFT; Tomáx e Tomín) CA- Condicionada Artificialmente Avalia: (CgTR; CgTA e CgTT)	Os dados de saída das simulações serão solicitados a cada hora, para todos os modelos analisados, apresentando um total de 8 760 valores para cada variável
RESULTADO	Avaliar a eficiência termoenergética dos sistemas de coberturas, mediante comparativo com a norma, através do modelo de referência.	Definir os APP e APT do modelo real	Avaliar os APP de acordo o ambiente e os horários de uso estipulado pela norma	Para poder avaliar os sistemas de coberturas em todos os níveis (mínimo, intermediário e superior)	Análise dos dados de saídas: PHFT; Tomáx; Tomín; CgTR; CgTA e CgTT.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

3.2.1 Método de avaliação segundo a NBR 15575-1

Conforme a ABNT 15575 (ABNT, 2021b), para se realizar a simulação computacional é necessária a modelagem de toda unidade habitacional (UH), “[...] incluindo os ambientes de permanência prolongada (APP) e ambientes de permanência transitória (APT). Quando avaliadas unidades habitacionais de edificações multifamiliares, devem ser considerados o pavimento térreo, o(s) pavimento(s) tipo e o pavimento de cobertura [...]” (ABNT, 2021b, p. 24).

Para realizar as análises de desempenho térmico da edificação, devem ser elaborados dois modelos computacionais da edificação, sendo eles:

- a) modelo real;
- b) modelo de referência.

O modelo real deve representar a edificação a ser analisada, conforme as suas características volumétricas, percentuais de elementos transparentes e de aberturas para ventilação, propriedades térmicas dos sistemas construtivos e presença de elementos de sombreamento externos fixos na fachada, quando existentes (por exemplo, brises, beirais e venezianas).

O modelo de referência deve representar a edificação a ser analisada, adotando-se características de referência. Este modelo deve manter a volumetria do modelo real, alterando os percentuais de elementos transparentes e de aberturas para ventilação, bem como as propriedades térmicas dos sistemas construtivos.

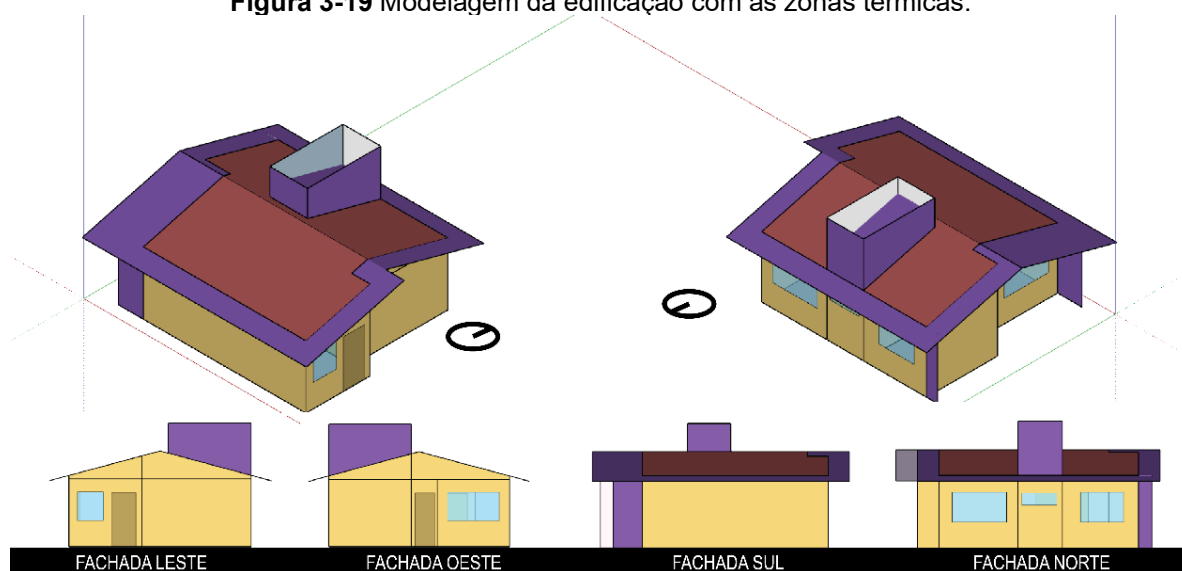
No modelo de referência não são considerados os elementos de sombreamento externos fixos na fachada, como brises e venezianas, assim como não é considerada a presença de sacadas.

Os modelos devem preservar as características de volume interno, as áreas de superfícies expostas ao exterior, o norte geográfico e a área de piso total dos ambientes da edificação projetada. O modelo real e o modelo de referência devem possuir a mesma divisão de ambientes. Quando existente, o ático entre a laje e a cobertura pode ser modelado como um ambiente (ABNT, 2021b, p. 25).

3.2.2 Modelagem da edificação

A modelagem da edificação modelo real (Figura 3-19) foi realizada no programa computacional *SketchUp* v.2021 Pro, com o uso do *plugin Euclid* v. 0.9.4.2. Durante a etapa de modelagem foram definidos os elementos construtivos (piso interno e externo, paredes internas e externas, teto, cobertura, janelas e portas), e as zonas térmicas. As simulações de desempenho termoenergético foram realizadas no programa computacional *EnergyPlus* v.9.3.

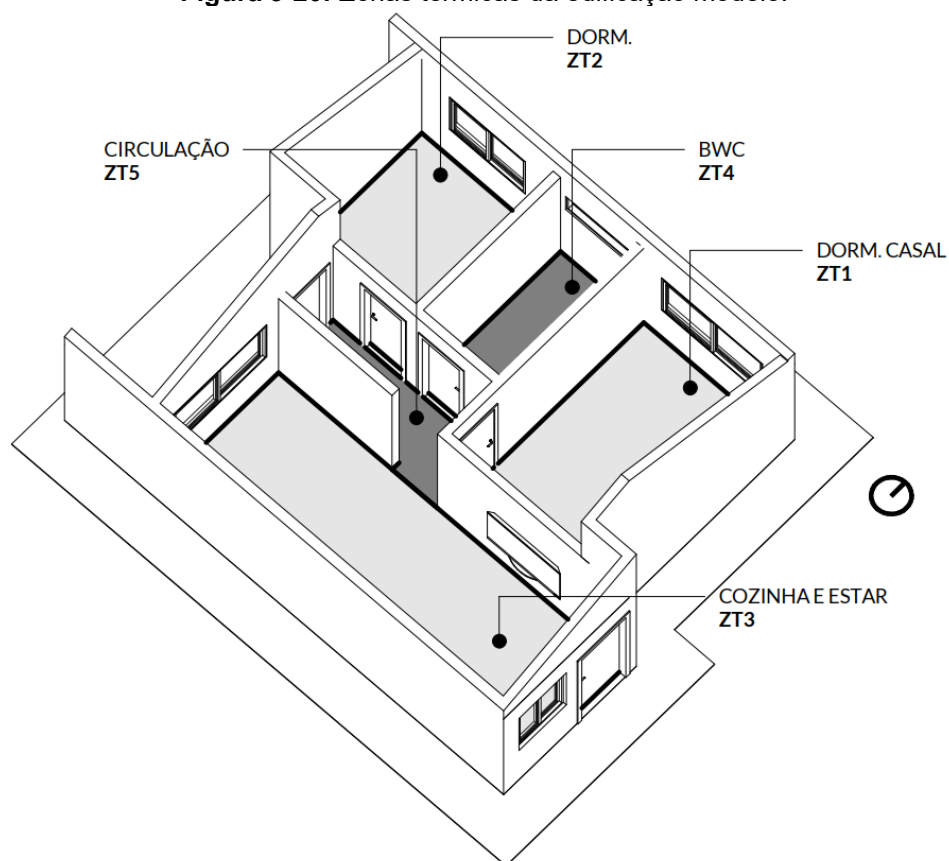
Figura 3-19 Modelagem da edificação com as zonas térmicas.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A edificação foi dividida em 5 zonas térmicas, as zonas térmicas de permanência prolongada (APP), consideradas nas simulações computacionais, são as seguintes: Dormitório Casal e Dormitório (ZT1 e ZT2); Cozinha e Estar (ZT3). Os demais ambientes correspondem as áreas de permanência transitórias (APT), sendo estes, sanitário e circulação, (ZT4, ZT5) e a lavanderia, por sua vez, por ser aberta não conta como uma zona (Figura 3-20).

Figura 3-20: Zonas térmicas da edificação modelo.



LEGENDA - CLASSIFICAÇÃO DOS AMBIENTES

- APP - Ambiente de Permanência Prolongada
- APT - Ambiente de Permanência Transitória

Fonte: Desenvolvida pela Autora (2022).

A Tabela 3-13 corresponde as características das zonas térmicas dos ambientes de permanência prolongada (APP) e dos ambientes de permanência transitória (APT) do modelo real, constam os seguintes dados: área, pé-direito e volume da edificação.

Tabela 3-13: Características das zonas térmicas dos ambientes de permanência prolongada (APP) e ambientes de permanência transitória (APT) da edificação.

	Ambiente	Zona Térmica (ZT)	Área (m ²)	Pé-direito (m)	Volume (m ³)
APP	Dormitório Casal	ZT1	10,92	2,60	28,39
	Dormitório	ZT2	7,53	2,60	19,58
	Cozinha e Sala e Estar	ZT3	17,00	2,60	44,20
	Ambientes de Permanência Prolongada	Total	35,45	2,60	92,17
APT	BWC	ZT1	4,34	2,60	11,28
	Circulação Íntima	ZT2	3,29	2,60	8,55
	Ambientes de Permanência Transitória	Total	7,63	2,60	19,84

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

3.2.3 Configuração do uso e ocupação do modelo real

Para a configuração do modelo real foram utilizados os valores padrões apresentados pela norma de Desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), sendo, o padrão de duas pessoas por dormitório, e, para a sala, o somatório de todos os usuários da edificação (Tabela 3-14).

Tabela 3-14: Número de pessoas por ambiente.

Ambiente (APP)	Zona Térmica (ZT)	Número de pessoas (n)
Dorm. Casal	ZT1	2
Dorm.	ZT2	2
Cozinha e Sala e Estar	ZT3	4

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575 ABNT (2021b).

A ocupação do ambiente é representada pela porcentagem das pessoas disponíveis no horário. As rotinas de ocupação foram configuradas separadamente para os ambientes, conforme descrito na Tabela 3-15. Foi considerado, a ocupação de duas pessoas (100% da ocupação) por dormitório existente na edificação. O valor total (100%) de ocupantes da sala é determinado em função do número de dormitórios.

Tabela 3-15: Padrão de ocupação diários.

Hora	Ocupação	
	Dormitório (%)	Sala (%)
00:00 – 07:59	100	0
08:00 - 13:59	0	0
14:00 – 17:59	0	50
18:00 – 21:59	0	100
22:00 – 23:59	100	0

Fonte: Adaptado de ABNT (2021b).

Tabela 3-16: Taxa metabólica e fração radiante para os usuários.

Ambiente	Período de Uso	Atividade Realizada	(W/m ²)*	(W)*	Fração radiante
Dormitório	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

(W/m²)* Calor produzido por área de superfície corporal.

(W)* Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal.

Fonte: Adaptado de ABNT (2021b).

É considerado um padrão de uso de sistema de iluminação artificial, sendo o mesmo para todos os dias do ano, incluindo finais de semana, conforme os valores apresentados na Tabela 3-17.

Tabela 3-17: Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP.

Hora	Iluminação	
	Dormitório (%)	Sala (%)
00:00 – 05:59	0	0
06:00 – 07:59	100	0
08:00 – 15:59	0	0
16:00 – 21:59	0	100
22:00 – 23:59	100	0

Fonte: Adaptado de ABNT (2021b).

O valor de densidade de potência instalada de iluminação (DPI) e os valores de fração radiante e visível estão de acordo com a Tabela 3-18.

Tabela 3-18: Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação.

Ambiente	DPI (W/m ²)	Fração radiante	Fração visível
Dormitório	5,00	0,32	0,23
Sala	5,00	0,32	0,23

Fonte: Adaptado de ABNT (2021b).

A carga interna dos equipamentos deve ser adicionada apenas nos APP referentes às salas, ou quando considerados de uso misto, conforme o período de uso. Os valores de densidade de cargas internas e da fração radiante são apresentados na Tabela 3-19. O padrão de uso de equipamentos deve ser considerado para todos os dias do ano, incluindo finais de semana.

Tabela 3-19: Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos APP.

Ambiente	Período de uso	Potência (W)	Fração radiante
Sala	14:00 – 21:59	120	0,30

Fonte: Adaptado de ABNT (2021b).

3.2.4 Modelagem com e sem o uso da ventilação natural

Um dos objetivos do trabalho é identificar se com a variação dos sistemas de coberturas o modelo real consegue atender ao nível de desempenho superior da norma. Segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), o modelo real e o modelo de referência podem ser simulados de duas formas, com o uso da ventilação natural (VN) e sem o uso da ventilação natural, com condicionamento artificial (CA) (Quadro 3-2):

Quadro 3-2: Simulação com o uso de ventilação natural para o modelo real e de referência.

Com o uso da ventilação natural	Para a determinação do $PHFT_{UH}$ e das temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx_{UH}$) e mínima ($Tomín_{UH}$), necessárias para as avaliações de todos os níveis de desempenho térmico
Sem o uso da ventilação natural	Para o cálculo das cargas térmicas anuais de refrigeração ($CgTR_{UH}$) e de aquecimento ($CgTA_{UH}$), necessárias para as avaliações dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior

Fonte: ABNT (2021b).

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021b, p. 34), “para o modelo simulado com o uso da ventilação natural, deve-se permitir a abertura das janelas apenas quando o APP estiver ocupado, e de acordo com dois critérios de temperatura” (Quadro 3-3):

Quadro 3-3: Critérios de temperatura.

Com o uso da ventilação natural	Quando a temperatura de bulbo seco interna do APP for igual ou superior a 19 °C
Sem o uso da ventilação natural	Quando a temperatura de bulbo seco interna for superior à temperatura de bulbo seco externa

Fonte: ABNT (2021b).

Devem ser consideradas a infiltração por frestas nas janelas dos APP quando fechadas, para isso deve adotar os coeficientes do Quadro 3-22. “O modelo real pode adotar valores relativos às esquadrias estabelecidas em projeto, quando estes forem disponibilizados pelo fabricante” (ABNT, 2021b, p. 34). São consideradas as janelas dos ambientes de permanência transitória (APT), “com exceção dos banheiros, são consideradas fechadas e com infiltração por frestas, durante todo o ano” (Quadro 3-4) (ABNT, 2021b, p. 34). No caso dos banheiros, considerar as janelas sempre abertas, o percentual de abertura para ventilação deverá ser igual ao estabelecido em projeto.

Quadro 3-4: Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas nos APP e APT.

Parâmetros	Portas	Janelas
Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada kg/(s.m)	0,0024	0,00063
Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada (adimensional)	0,59	0,63
Coeficiente de descarga (Cd) da abertura (adimensional)	0,60	0,60

Fonte: ABNT (2021b).

Para as simulações com o uso da ventilação natural, as portas internas serão:

[...] consideradas abertas entre os APP e os APT, com exceção de portas de banheiros, que devem ser consideradas sempre fechadas. As portas externas serão consideradas fechadas e com infiltração por frestas, durante todo o ano, de acordo com o Quadro 3-22. Portas externas de sacadas, que sejam constituídas por elementos transparentes, seguirão a mesma operação das janelas.

Os valores adotados para os coeficientes de pressão nas aberturas da envoltória da edificação serão os mesmos para o modelo real e para o modelo de referência (ABNT, 2021b, p. 34).

3.2.5 Dados de saída dos modelos com e sem o uso de ventilação natural

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021b, p. 35), “os dados de saída da simulação serão solicitados a cada hora, para todos os modelos analisados, apresentando um total de 8760 valores para cada variável.”

O modelo para a simulação com o uso da ventilação natural necessitará, como variável de saída, a temperatura operativa horária de cada APP da edificação. De acordo a NBR 15575 (ABNT, 2021b, p. 35), “a partir desta variável será calculado, para cada APP, o $PHFT_{APP}$ (percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa) conforme a seguinte equação”:

$$PHFT_{APP} = \frac{NhF_T}{NhOcup} \cdot 100$$

Onde:

PHFT _{APP}	é o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%)
NhFT	é o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa ao longo do ano
NhOcup	é o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2 920 h para salas e 3650 h para dormitórios

O PHFT_{APP} será calculado, separadamente, para todos os APP do modelo real e do modelo de referência. Considerando o arredondamento destes valores, adotando uma casa decimal.

Para as simulações com os modelos com o uso da ventilação natural serão identificados os valores das temperaturas operativas máximas e mínimas de cada APP (Tomáx_{APP} e Tomín_{APP}), durante o período de ocupação. Para a zona bioclimática 3, da cidade de Foz do Iguaçu, deverá considerar o valor de temperatura operativa anual mínima de cada APP (Tomín_{APP}). Para as avaliações, será considerado os valores arredondados de Tomáx_{APP} e Tomín_{APP}, adotando uma casa decimal. O modelo sem ventilação natural solicitará:

[...] como variável de saída horária, as cargas térmicas de refrigeração para cada APP da edificação. Deve ser realizado o somatório anual dos valores de carga térmica de refrigeração (CgTR_{APP}), do modelo sem ventilação natural, para os horários que atenderem às seguintes condições:

- a) o APP encontra-se com ocupação;
- b) a temperatura operativa do APP, no modelo com ventilação natural, encontra-se dentro dos limites de temperaturas operativas estabelecidas na Tabela 3-4.

O mesmo procedimento será adotado para o somatório anual da carga térmica de aquecimento (CgTA_{APP}), considerada apenas para as edificações localizadas em climas do Intervalo 1 (ABNT, 2021b, p. 36).

A Figura 3-21 ilustra a análise horária a ser desenvolvida, a partir dos dados de saída dos modelos com e sem ventilação natural, para o cálculo do PHFT_{APP}, da CgTR_{APP} e da CgTA_{APP}. Este processo deve ser adotado para todos os APP da UH.

Figura 3-21: Quadro esquemático da análise horária dos dados de saída dos modelos com e sem o uso da ventilação natural, para o cálculo do PHFT_{APP}, da CgTR_{APP} e da CgTA_{APP}

Hora ano	Horário	Ocupação do APP	MODELO			
			Com ventilação natural		Sem ventilação natural	
			TO _{APP}	PHFT _{APP}	CgTR _{APP}	CgTT _{APP}
1	00:00 - 00:59	sim	18°C < To < 26°C	sim	não	não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	05:00 - 05:59	sim	To ≥ 26°C	não	sim	não
7	06:00 - 06:59	sim	To ≥ 26°C	não	sim	não
8	07:00 - 07:59	não	To ≥ 26°C	não	não	não
9	08:00 - 08:59	não	To ≥ 26°C	não	não	não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4345	00:00 - 00:59	sim	To ≤ 18°C	não	não	sim
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8760	23:00 - 23:59	sim	18°C < To < 26°C	sim	não	não

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b).

- *Determinação do percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT_{UH}).*

O PHFT_{UH} do modelo real e do modelo de referência devem ser calculados pela seguinte equação:

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

Onde:

PHFT _{UH}	é o percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%)
PHFT _{APP}	é o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%)
n	é o número de ambientes de permanência prolongada da UH

- *Determinação da carga térmica total da unidade habitacional (CgTT_{UH})*

A carga térmica de refrigeração da unidade habitacional (CgTR_{UH}), dos modelos real e de referência, devem ser calculados através da seguinte equação:

$$CgTR_{UH} = \sum_{i=1}^n CgTR_{APPj}$$

Onde:

$CgTR_{UH}$	é a carga térmica de refrigeração da UH, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)
$CgTR_{APP}$	é a carga térmica de refrigeração do APP, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)
n	é o número de ambientes de permanência prolongada da UH

Para os climas enquadrados no Intervalo 1, como o caso de Foz do Iguaçu, a carga térmica de aquecimento da unidade habitacional ($CgTA_{UH}$), para o modelo real e para o modelo de referência, deve ser calculada pela seguinte equação:

$$CgTA_{UH} = \sum_{i=1}^n CgTA_{APPi}$$

Onde:

$CgTA_{UH}$	é a carga térmica de aquecimento da UH, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)
$CgTA_{APP}$	é a carga térmica de aquecimento do APP i , expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)
n	é o número de ambientes de permanência prolongada da UH

A carga térmica total da unidade habitacional ($CgTT_{UH}$), para o Intervalo 1, deve ser obtida conforme a equação a seguir:

$$CgTT_{UH} = CgTR_{UH} + CgTA_{UH}$$

Onde:

$CgTR_{UH}$	É a carga térmica total da UH, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)
-------------	--

- Níveis de desempenho térmico intermediário e superior

Segundo a ABNT 15575 (ABNT, 2021b), o atendimento ao nível intermediário e superior não são obrigatórios. Para realizar a avaliação destes níveis é necessário:

A avaliação destes níveis baseia-se na capacidade de incremento do $PHFT_{UH}$, real ($\Delta PHFT$) e de redução da carga térmica total ($RedCgTT$) do modelo real em relação ao modelo de referência. O $\Delta PHFT$ e a $RedCgTT$ são analisados em comparação com os valores mínimos estabelecidos, determinados como $\Delta PHFT_{min}$ e $RedCgTT_{min}$. Assim como na análise de desempenho mínimo, o critério de temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx_{UH}$) e mínima ($Tomín_{UH}$) também deve ser atendido para a obtenção dos níveis intermediário e superior (ABNT, 2021b, p. 38).

O incremento do $PHFT_{UH,real}$ do modelo real em relação ao $PHFT_{UH,ref}$ do modelo de referência é determinado pela seguinte equação:

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

Onde:

$\Delta PHFT$	É o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$ expresso em porcentagem (%)
$PHFT_{UH,real}$	É o percentual de horas de ocupação da UH no modelo real dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%)
$PHFT_{UH,ref}$	É o percentual de horas de ocupação da UH no modelo de referência dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%)

A redução da $CgTT_{UH,real}$ do modelo real em relação à $CgTT_{UH,ref}$ do modelo de referência é dada pela seguinte equação:

$$RedCgTT = \left[1 - \frac{(CgTT_{UH,real})}{(CgTT_{UH,ref})} \right] \cdot 100$$

Onde:

$RedCgTT$	É a redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência, expressa em porcentagem (%)
$CgTT_{UH,real}$	É a redução da carga térmica total da UH no modelo real em relação ao modelo de referência, expressa em porcentagem (%)
$CgTT_{UH,ref}$	É a carga térmica total da UH no modelo de referência, expressa em quilowatts-hora por ano (kWh/ano)

- Critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior

Para o atendimento dos níveis de desempenho intermediário e superior devem ser analisados os valores de $PHFT_{UH,ref}$ e de $CgTT_{UH,ref}$ do modelo de referência (Quadro 3-5). Para o nível intermediário os valores de $\Delta PHFT_{mín}$ e $RedCgTT_{mín}$ são apresentados na Tabela 3-20, para o nível superior os valores são apresentados na Tabela 3-21.

Quadro 3-5: Critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior.

Nível de desempenho	Critérios
Intermediário (I)	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}^{\text{a}}$ $\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq \text{Tomáx}_{\text{UH,ref}} + \Delta\text{Tomáx}$ $\text{Tomín}_{\text{UH,real}} \geq \text{Tomín}_{\text{UH,ref}} - \Delta\text{Tomín}$ $\text{RedCgTT} \geq \text{RedCgTT}_{\text{mín}}^{\text{b}}$
Superior (S)	$\Delta\text{PHFT} \geq \Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ $\text{Tomáx}_{\text{UH,real}} \leq \text{Tomáx}_{\text{UH,ref}} + \Delta\text{Tomáx}$ $\text{Tomín}_{\text{UH,real}} \geq \text{Tomín}_{\text{UH,ref}} - \Delta\text{Tomín}$ $\text{RedCgTT} \geq \text{RedCgTT}_{\text{mín}}^{\text{b}}$

a) a $\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ é obtido pela Tabela 3-20, para o nível intermediário, e pela Tabela 3-21, para o nível superior.

b) $\text{RedCgTT}_{\text{mín}}$ é obtido pela Tabela 3-20, para o nível intermediário, e pela Tabela 3-21, para o nível superior.

Deve-se adotar $\Delta\text{Tomáx}$ igual a 2 °C para as UH unifamiliares e UH em edificações multifamiliares localizadas no pavimento de cobertura. Deve-se adotar $\Delta\text{Tomín}$ igual a 1 °C para todas as UH avaliadas.

Fonte: ABNT (2021b).

Para o nível intermediário, o incremento do PHFT_{UH} do modelo real (ΔPHFT) deve atender ao incremento mínimo ($\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$), determinado na Tabela 3-20.

A obtenção do nível intermediário também está condicionada a um critério de carga térmica, delimitado por um percentual mínimo de redução da carga térmica total ($\text{RedCgTT}_{\text{mín}}$). Para um modelo de referência com $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ inferior a 70%, a $\text{RedCgTT}_{\text{mín}}$ é igual a zero, ou seja, a $\text{CgTT}_{\text{UH,real}}$ do modelo real deve ser menor ou igual à $\text{CgTT}_{\text{UH,ref}}$ do modelo de referência. Se o modelo de referência possuir $\text{PHFT}_{\text{UH,ref}}$ igual ou superior a 70%, o modelo real deve obter redução da $\text{CgTT}_{\text{UH,real}}$ (RedCgTT), de modo a atender à $\text{RedCgTT}_{\text{mín}}$, estabelecida na Tabela 3-20 (ABNT, 2021b, p. 39).

Tabela 3-20: Incremento mínimo do PHFT_{UH,real} e redução mínima da CgTT_{UH,real} para o atendimento ao nível de desempenho térmico intermediário.

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
			Pav.* Térreo	Pav.* Tipo	Pav.* Cobertura
PHFT_{UH,ref} %	$\frac{\text{CgTT}_{\text{UH,ref}}}{\text{Ap, UH}}$ KWh / (ano.m²)	$\Delta\text{PHFT}_{\text{mín}}$ %			
PHFT _{UH,ref} < 70%	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco da norma 15575 ou da equação abaixo			
PHFT _{UH,ref} ≥ 70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT_{UH,ref} %	$\frac{\text{CgTT}_{\text{UH,ref}}}{\text{Ap, UH}}$ KWh / (ano.m²)	$\text{RedCgTT}_{\text{mín}}$ %			
PHFT _{UH,ref} < 70%	Todos os valores	0	0	0	0
PHFT _{UH,ref} ≥ 70%	$\frac{\text{CgTT}_{\text{UH,ref}}}{\text{Ap, UH}} < 100$ KWh / (ano.m²)	17	15	22	15
	$\frac{\text{CgTT}_{\text{UH,ref}}}{\text{Ap, UH}} \geq 100$ KWh / (ano.m²)	27	20	25	20

Pav.*: Pavimento; A CgTT_{UH} deve ser analisada em relação à (Ap, UH) que representa a soma das áreas de piso dos APP da unidade habitacional à (Ap, APP) é dada em metros quadrados.

Fonte: ABNT (2021b).

A avaliação do nível superior é baseada “[...] no incremento do $PHFT_{UH,real}$ ($\Delta PHFT$) e na redução da carga térmica total ($RedCgTT$), que devem atender aos limites estabelecidos pela Tabela 3-21” (ABNT, 2021b, p. 40).

Tabela 3-21: Incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ e redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ para o atendimento ao nível de desempenho térmico superior.

Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pav.* Térreo	Pav.* Tipo	Pav.* Cobertura
$PHFT_{UH,ref} \%$	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{Ap, UH}$ KWh / (ano. m ²)	$\Delta PHFT_{min}$ %			
$PHFT_{UH,ref} < 70\%$	Todos os valores	Obtido a partir do ábaco da norma 15575 ou da equação abaixo			
$PHFT_{UH,ref} \geq 70\%$	Todos os valores	0	0	0	0
Critério		Tipologia			
		Unifamiliar	Multifamiliar		
		-	Pav.* Térreo	Pav.* Tipo	Pav.* Cobertura
$PHFT_{UH,ref} \%$	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{Ap, UH}$ KWh / (ano. m ²)	$RedCgTT_{min}$ %			
Todos os valores	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{Ap, UH} < 100$ KWh / (ano. m ²)	35	30	45	30
	$\frac{CgTT_{UH,ref}}{Ap, UH} \geq 100$ KWh / (ano. m ²)	55	40	50	40

Pav.*: Pavimento; O nível superior também pode ser obtido se o $PHFT_{UH,real}$ do modelo real for maior ou igual a 95%, juntamente com o atendimento ao critério de temperaturas anuais máxima e mínima da $Tomá_{UH}$ e $Tomín_{UH}$; A $CgTT_{UH}$ deve ser analisada em relação à (Ap, UH) que representa a soma das áreas de piso dos APP da unidade habitacional à (Ap, APP) é dada em metros quadrados.

Fonte: ABNT (2021b).

Como apresentado nas Tabelas 3-20 e 3-21, quando o $PHFT_{UH,ref}$ for inferior que 70%, para a obtenção do $\Delta PHFT_{min}$ deverá utilizar o ábaco da norma 15575 (ver ábaco página 41 da norma (ABNT, 2021b)), ou a seguinte equação:

$$\Delta PHFT_{min} = 45 - 0,58 \cdot PHFT_{UH,ref}$$

3.2.6 Arquivo climático utilizado

Para as simulações foi utilizado o arquivo “BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.838270_TMYx”, disponibilizado pela base de dados climáticos *Climate One building* (2018), sendo este, o arquivo mais recente dentre as opções disponíveis para o contexto climático avaliado neste trabalho, com recorte temporal de dados de 2004 à 2018.

3.3 ETAPA 3: CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO PARA OS NÍVEIS MÍNIMO, INTERMEDIÁRIO E SUPERIOR DE ACORDO COM A NORMA DE DESEMPENHO ABNT NBR 15575-1

Essa parte da pesquisa foi dividida em quatro etapas, as quais foram ilustradas na Figura 3-22 e detalhadas nos itens subsequentes.

Figura 3-22: Esquema simplificado das 4 principais etapas de avaliação para os níveis mínimo, intermediário e superior.

	1	2	3	4
ETAPA	Requisito – Desempenho térmico da envoltória	Critério – Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT _{UH})	Critério – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH (Tomáx-UH e Tomín-UH)	Critério – Carga térmica total da UH (CgTT _{UH})
OBJETIVO	Identificar em qual Intervalo de temperatura anual média externa de bulbo seco (TBSm) a cidade se enquadra	Avaliar individualmente cada APP durante o período de ocupação de acordo com as faixas de temperaturas operativas	Avaliar individualmente cada APP durante o período de ocupação quanto tempo o ambiente se mantém dentro das faixas de temperaturas mínimas e máximas	Avaliar cada APP sem a ventilação natural, com condicionamento artificial, durante o período de ocupação
RESULTADO	Foz do Iguaçu se enquadra no Intervalo: 1 TBSm < 25,0 °C	Faixa de temperatura operativa a ser considerada: 18,0°C < TOAPP < 26,0°C	Tomáx é critério para todos os níveis de desempenho (mínimo, intermediário ou superior); Tomín também é critério devido a ZB3.	Sendo a CgTT _{UH} o resultado da avaliação individual das cargas térmicas de refrigeração e aquecimento de cada APP da UH (CgTR _{APP} e CgTA _{APP})

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

3.3.1 Requisito – Desempenho térmico da envoltória

O modelo real deve apresentar um desempenho térmico que atenda aos critérios de percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa da unidade habitacional ($PHFT_{UH}$), bem como atender as temperaturas operativas anuais máxima e mínima ($Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$), quando comparado com o desempenho térmico ($PHFT$; $Tomín$ e $Tomáx$) da envoltória do modelo referência. Para realizar as avaliações dos critérios descritos acima, é necessário identificar em qual temperatura anual média externa de bulbo seco (TBSm) a cidade se enquadra, no caso, Foz do Iguaçu se enquadra no Intervalo 1, conforme apresenta a Tabela 3-22.

Tabela 3-22: Intervalos de temperaturas externas de bulbo seco.

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) °C
Intervalo 1*	$TBSm < 25,0 \text{ °C}$
Intervalo 2	$25,0 \text{ °C} \leq TBSm < 27,0 \text{ °C}$
Intervalo 3	$TBSm \geq 27,0 \text{ °C}$

Intervalo 1* Destaque para o Intervalo da cidade de Foz do Iguaçu.

Fonte: ABNT (2021b).

A carga térmica de aquecimento ($CgTA$) é necessária quando as edificações estão localizadas em climas que se enquadrem no Intervalo 1, ou seja, com média anual da temperatura externa de bulbo seco inferior a 25 °C , sendo o caso da cidade de Foz do Iguaçu ($TBSm 20,65 \text{ °C}$) (ver Tabela 3-1 e Quadro 3-1).

3.3.2 Critério – Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$)

Este critério avalia o percentual de horas em que a unidade habitacional se encontra dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$). Segundo a NBR 15220 “O $PHFT_{UH}$ é resultado da avaliação individual de cada APP ($PHFT_{APP}$) desta UH, durante o seu respectivo período de ocupação, de acordo com as faixas de temperaturas operativas da Tabela 3-23” (ABNT, 2021b, p. 22).

Tabela 3-23: Faixas de temperaturas operativas para a determinação do $PHFT_{APP}$.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	$18,0 \text{ °C} < TOAPP < 26,0 \text{ °C}$

TOAPP é a temperatura operativa do APP, que atende aos limites estabelecidos nesta Tabela.

Fonte: ABNT (2021b).

Para o atendimento ao critério de $PHFT_{UH}$ no nível mínimo (M), o modelo real deve apresentar durante os períodos de ocupação dos APP, ao longo de um ano o $PHFT_{UH,real}$ superior a 90% do alcançado para o modelo de referência ($PHFT_{UH,ref}$).

Nos níveis intermediário (I) e superior (S), o atendimento ao critério de $PHFT_{UH}$, “[...] é realizado por meio de um incremento do $PHFT_{UH,real}$ ($\Delta PHFT$) em relação ao $PHFT_{UH,ref}$ [...]” (Tabela 3-24). O valor referente ao $\Delta PHFT_{min}$, que representa o incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$, é fornecido nas Tabelas 3-20 e 3-21 para o atendimento aos níveis de desempenho intermediário e superior (ABNT, 2021b, p. 22).

Tabela 3-24: 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)	$\Delta PHFT^a \geq \Delta PHFT_{min}^b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$

$\Delta PHFT^a$ é o incremento do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$.
 $\Delta PHFT_{min}^b$ é o incremento mínimo do $PHFT_{UH,real}$ em relação ao $PHFT_{UH,ref}$ com valor obtido pela Tabela 3-20, para o nível intermediário, e pela Tabela 3-21, para o nível superior.

Fonte: ABNT (2021b).

3.3.3 Critério – Temperaturas operativas anuais máxima e mínima da UH ($Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$)

Para todos os níveis de desempenho (mínimo, intermediário ou superior), em todas as zonas bioclimáticas, os critérios que avaliam as temperaturas operativas anuais máxima ($Tomáx_{UH}$) “[...] do modelo real deve ser menor ou igual à obtida para o modelo de referência, após somado um valor de tolerância ($\Delta Tomáx$), conforme equação” (ABNT, 2021b, p. 22):

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

Onde:

$Tomáx_{UH,real}$	é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo real, expressa em graus Celsius (°C)
$Tomáx_{UH,ref}$	é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência, expressa em graus Celsius (°C)
$\Delta Tomáx$	é o valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima, expresso em graus Celsius (°C)

O critério de avaliação para a temperatura operativa anual mínima é necessário apenas para as zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4. Foz do Iguaçu se

enquadra dentro do Intervalo 1. Segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2021b, p. 23), “a $Tomín_{UH}$ do modelo real deve ser igual ou superior à $Tomín_{UH}$ do modelo de referência, após reduzido um valor de tolerância ($\Delta Tomín$). Deve-se dotar $\Delta Tomín$ igual a 1°C para todas as UH avaliadas. O critério de temperatura operativa anual mínima é descrito pela equação”:

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

Onde:

$Tomín_{UH,real}$	é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo real, expressa em graus Celsius (°C);
$Tomín_{UH,ref}$	é a temperatura operativa anual mínima da UH no modelo de referência, expressa em graus Celsius (°C);
$\Delta Tomín$	é o valor de tolerância da temperatura operativa anual mínima, expresso em graus Celsius (°C).

3.3.4 Critério – Carga térmica total da UH ($CgTT_{UH}$)

O critério da carga térmica total da unidade habitacional ($CgTT_{UH}$) avalia o modelo real sem a ventilação natural, nos períodos em que os ambientes de permanência prolongada (APP) estão ocupados considerando as temperaturas operativas dentro dos limites determinados na Tabela 3-25. “[...] A $CgTT_{UH}$ é resultado da avaliação individual das cargas térmicas de refrigeração e aquecimento de cada APP da UH ($CgTR_{APP}$ e $CgTA_{APP}$) [...]” (ABNT, 2021b, p. 23).

Tabela 3-25: Valores de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$.

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTR_{APP}$	Faixa de temperatura operativa para o cálculo da $CgTA_{APP}$
Intervalo 1*	$TO_{APP}^a \geq 26,0 \text{ °C}$	$TO_{APP}^a \leq 18,0 \text{ °C}$
Intervalo 2	$TO_{APP}^a \geq 28,0 \text{ °C}$	Não considera
Intervalo 3	$TO_{APP}^a \geq 30,0 \text{ °C}$	Não considera

Intervalo 1* Destaque para o Intervalo da cidade de Foz do Iguaçu.

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

Fonte: ABNT (2021).

O critério da $CgTT_{UH}$ é obrigatório apenas na análise dos níveis de desempenho intermediário e superior (Tabela 3-26). O valor da $RedCgTT_{mín}$, fornecido na Tabela 3-20 para o desempenho intermediário, e na Tabela 3-21 para o desempenho superior, representa o percentual mínimo de redução da $CgTT_{UH,real}$ em relação à $CgTT_{UH,ref}$.

Tabela 3-26: Critério da $CgTT_{UH}$ nos níveis de desempenho intermediário e superior.

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

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

^b $RedCgTT_{mín}$ é a redução mínima da $CgTT_{UH,real}$ em relação à referência ($CgTT_{UH,ref}$).

Fonte: ABNT (2021).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Essa parte da pesquisa foi dividida em 3 Etapas (Figura 4-1), das quais buscaram analisar os resultados de desempenho termoenergético das telhas, por meio de comparativos entre o percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), temperatura operativa máxima e mínima (Tomáx e Tomín) e carga térmica (CgTR; CgTA e CgTT), de acordo a norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021b), sendo:

Etapa 1, análise dos resultados individuais de acordo cada tipo de telha (ver item 4.1);

Etapa 2, análise dos resultados gerais, comparativa entre os 4 tipos de telhas, com as considerações sobre os resultados obtidos nas simulações (ver item 4.2);

Etapa 3, apresentação dos tipos de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético (ver item 4.3).

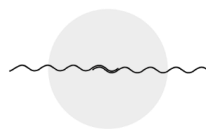
Figura 4-1: Esquema simplificado das 3 etapas da avaliação dos resultados.

	1	2	3
ETAPA	Análise dos resultados individuais de cada telha	Análise dos resultados gerais comparativos entre as telhas	Apresentação dos tipos de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético
OBJETIVO	Analisar o desempenho termoenergético de cada telha separadamente, comparando apenas entre as combinações	Analisar o desempenho termoenergético entre as telhas e as composições	Elencar os tipos de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético, para uma residência, na cidade de Foz do Iguaçu, ZB3, de acordo a NBR 15575
RESULTADO	Avaliação do: PHFT _{UH} Tomáx _{UH} Tomín _{UH} CgTR _{UH} CgTA _{UH} CgTT _{UH} De cada telha	Avaliação do: PHFT _{UH} Tomáx _{UH} Tomín _{UH} CgTR _{UH} CgTA _{UH} CgTT _{UH} Entre as telhas, e comparativo entre o PHFT _{UH} e CgTT _{UH} ;	Finalização da análise dos resultados com a apresentação dos melhores tipos de sistemas de coberturas para o clima da cidade de Foz do Iguaçu, ZB3

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Foram realizadas um total de 66 simulações (sendo 64 variações no modelo real e 2 no modelo de referência). A seguir, serão apresentados os resultados individuais das simulações para a avaliação da habitação do modelo real, de acordo os quatro tipos de telhas: Fibrocimento; Cerâmica; Aço trapezoidal e Termoacústica.

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS INDIVIDUAIS DE CADA TELHA

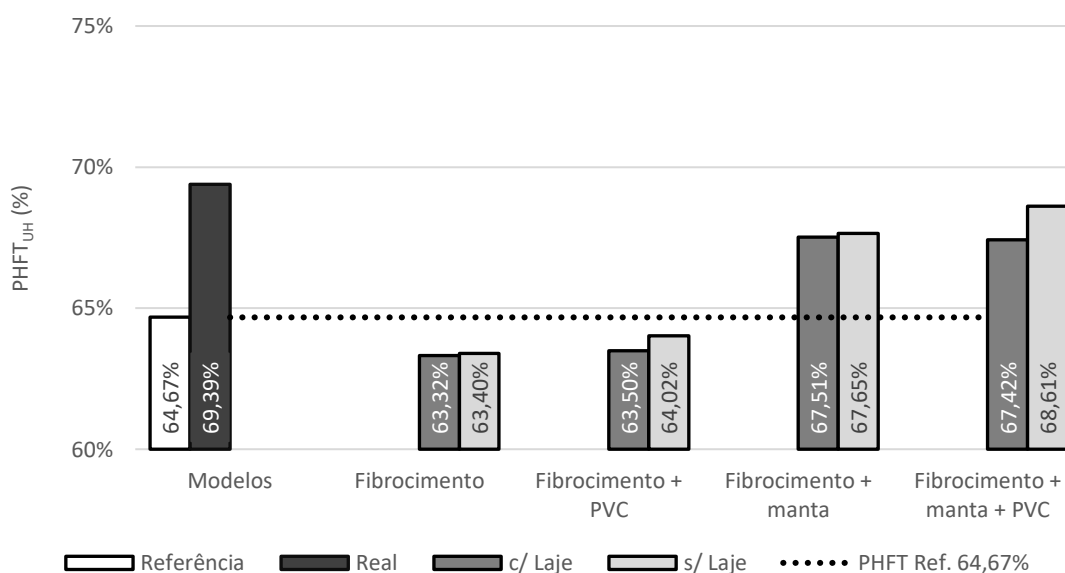


4.1.1 Modelo real com a telha de fibrocimento

A análise para o modelo real considerou os ambientes da sala/cozinha, dormitório de casal e o dormitório, sendo estes os três ambientes de permanência prolongada (APP). Para os estudos foram considerados os valores médios da edificação, com base nos ambientes mencionados acima.

A Figura 4-2 apresenta os valores de percentual de horas de ocupação da unidade habitacional dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT_{UH}), considerando o modelo real (materiais e composições conforme o projeto) e o modelo de referência (materiais determinados pela norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021b)). Cada composição foi analisada com e sem laje (c/ Laje- s/ Laje). Os resultados mostram que apenas as composições que contém a manta aluminizada apresentaram um percentual desempenho térmico mais alto para as condições de atendimento à faixa de temperatura (PHFT) em relação ao modelo de referência (linha tracejada). Em todas as composições com a laje, os resultados do PHFT foram mais baixos em relação aos resultados sem a laje.

Figura 4-2: PHFT_{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento. (PHFT_{UH}: Percentual de horas de ocupação da UH dentro de uma faixa de temperatura operativa)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Conforme a análise de desempenho de acordo os níveis da norma NBR 15575, Foz do Iguaçu está no intervalo 1, de acordo a média de temperatura externa de bulbo seco (TBSm), a faixa de temperatura do PHFT precisa estar entre 18 a 26°C. Para obter o PHFT no nível mínimo é necessário que o modelo real ($PHFT_{UH,real}$) seja superior a 90% do obtido para o modelo de referência ($PHFT_{UH,ref}$), sendo: $PHFT_{real} \geq 0,9 \cdot PHFT_{ref} = 58,20\%$, acima desse valor a unidade habitacional se enquadra no $PHFT_{min}$. Conforme a Figura 4-2, todas as composições com fibrocimento atenderam ao critério de $PHFT_{min}$.

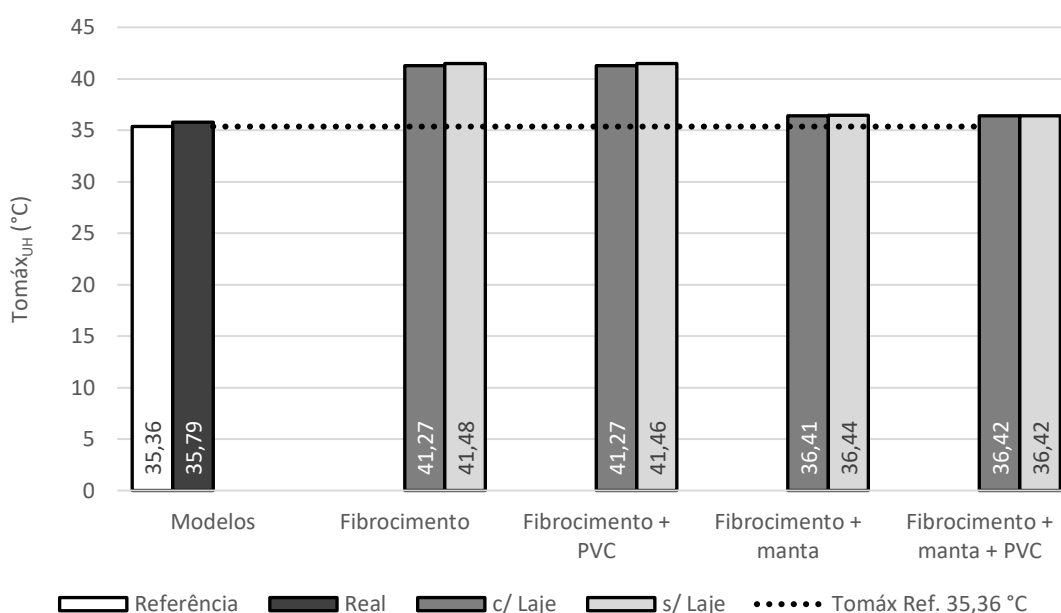
Das oito composições analisadas, as que tiveram os valores mais baixos de PHFT foram as quatro sem a manta aluminizada, (Fibrocimento; Fibrocimento + Laje; Fibrocimento + PVC + sem Laje e Fibrocimento + Laje + PVC). Possivelmente gerou acúmulo de calor na edificação devido à ausência da manta, que atua como material isolante por baixa emissividade. Como exemplo desta situação, a composição com o desempenho térmico mais baixo, Fibrocimento + Laje ($PHFT = 63,32\%$), com uma transmitância térmica de ($U = 0,87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), capacidade térmica (CT) $220,7 \text{ KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e absorvância (α) 0,6.

O desempenho térmico mais alto é da composição de Fibrocimento + Manta + PVC + sem Laje ($PHFT = 68,61\%$), o valor de transmitância desse sistema ($U = 1,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), e a capacidade térmica (CT) $351 \text{ KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Os valores das propriedades físicas dos materiais da composição que obteve o desempenho mais baixo (Fibrocimento + Laje) basicamente se invertem comparados aos da melhor composição (Fibrocimento + Manta + PVC + sem Laje). São indícios que para atingir maior conforto térmico, neste modelo de edificação, com a telha de fibrocimento, para o clima em questão, a melhor solução é a cobertura leve e isolada conforme recomendações da norma NBR 15220.

O gráfico da Figura 4-3, apresenta os resultados das temperaturas operativas anuais máximas internas (Tomáx), durante os períodos de ocupação dos APP. As 4 composições sem a manta (Fibrocimento; Fibrocimento + Laje; Fibrocimento + PVC e Fibrocimento + Laje + PVC), apresentam um acréscimo de temperatura média de 6,01°C em relação ao resultado do modelo referência (35,36°C). Com a utilização da manta, a temperatura caiu 5,07°C em relação a composição com a temperatura média maior (Fibrocimento + sem Laje (41,48°C)), considerando a temperatura média menor (Fibrocimento + manta + Laje (36,41°C)). Observa-se, portanto, que o emprego da laje nas composições não implica em condições menos extremas no período do verão

para as temperaturas internas, a diferença está em poucos décimos entre as composições sem laje, de modo a não justificar a necessidade do uso da laje para a obtenção de temperaturas amenas na edificação. De acordo os níveis da norma NBR 15575 (ABNT, 2021b), as quatro composições com a manta atenderam ao nível mínimo necessário das temperaturas máximas internas, este valor foi encontrado através da equação, $Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx$, sendo: $Tomáx_{UH,real} \leq 37,36^{\circ}C$.

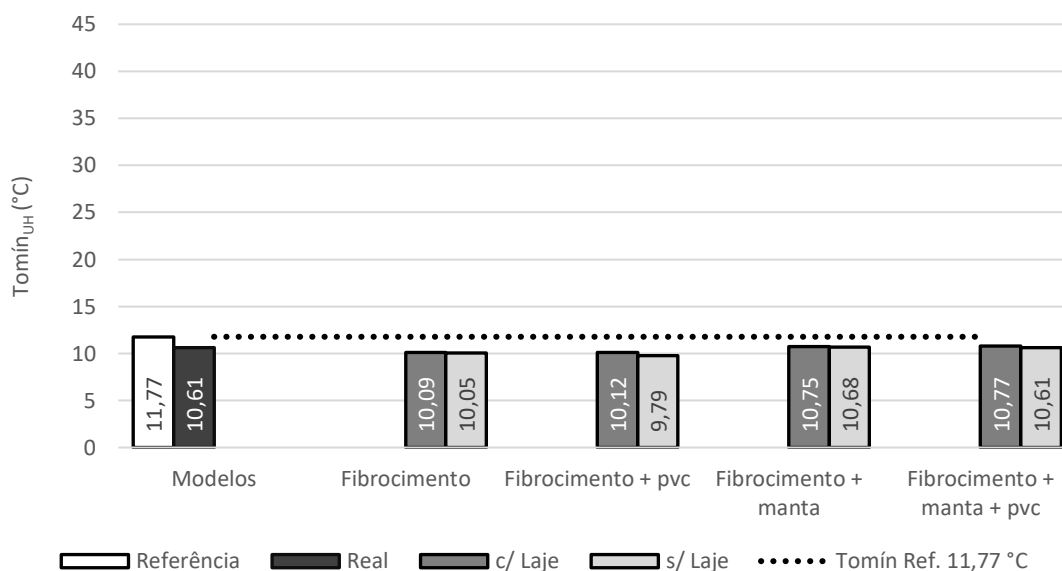
Figura 4-3: $Tomáx_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.
($Tomáx_{UH}$: Temperatura operativa anual máxima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-4 apresenta os valores das temperaturas operativas mínima internas ($Tomín$). Para essa análise o que se observou são valores abaixo da faixa de $18^{\circ}C$, do intervalo 1, da NBR 15575. Toda as composições analisadas apresentaram temperaturas baixas nos períodos de ocupação em determinadas situações do ano, caracterizando a situação dos períodos frios, relatada na análise climática para Foz do Iguaçu. As composições com laje se comportaram melhor no inverno, essa comparação mostra a relação da eficiência da laje quando se trata de manter o ambiente aquecido, através da massa térmica, com o armazenamento do calor durante o dia e a liberação durante a noite. Uma composição atendeu a norma NBR 15575 em relação ao nível mínimo, Fibrocimento + Manta + PVC + Laje ($10,77^{\circ}C$) este valor foi encontrado através da equação, $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$, sendo: $Tomín_{UH,real} \geq 10,77$.

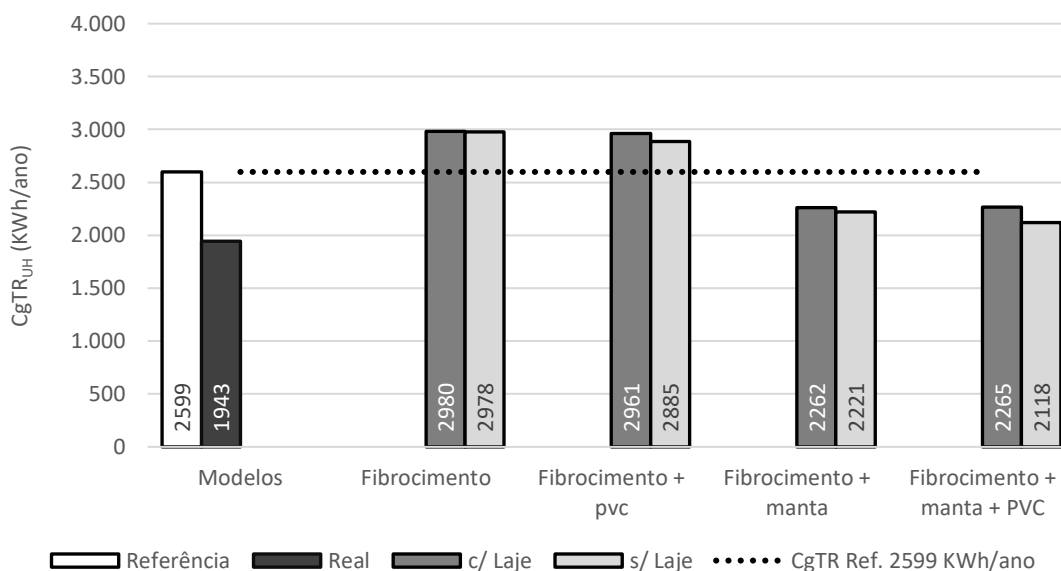
Figura 4-4: Tomín_{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.
(Tomín_{UH}: Temperatura operativa anual mínima da UH)



(Tomín UH: Temperatura operativa anual mínima da UH)
Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-5, apresenta a carga térmica de refrigeração da edificação da unidade habitacional (CgTR). Nota-se que em todas as composições com laje demandaram mais energia para manter os ambientes resfriados do que as opções sem laje, isso ocorre porque no verão a edificação recebe um sobreaquecimento. As quatro composições que ultrapassaram o limite da CgTR_{ref} são as que não possuem a manta aluminizada na composição, sendo o maior consumo das quatro para a composição com Fibrocimento + Laje (2980 kWh/ano) e o menor consumo Fibrocimento + PVC (2885 kWh/ano). As outras quatro opções que se mantiveram em um consumo energético para resfriamento mais baixo que o modelo referência, o maior consumo foi da composição de Fibrocimento + Manta + PVC + Laje (2265 kWh/ano) e o menor consumo Fibrocimento + Manta + PVC (2118 kWh/ano). Em relação ao forro de PVC, observou-se que, a composição (Fibrocimento + Manta + Laje (2262 kWh/ano)) gerou resultados melhores do que quando empregado o forro de PVC (Fibrocimento + Manta + PVC + Laje (2265 kWh/ano)).

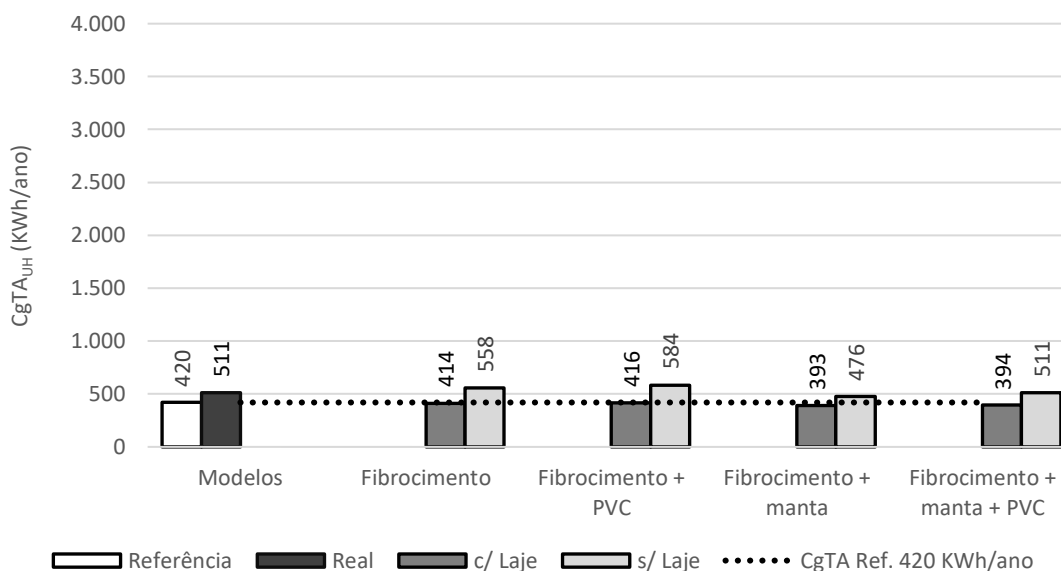
Figura 4-5: CgTR_{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.
(CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-6, apresenta a carga térmica total de aquecimento (CgTA) dos diferentes sistemas de coberturas. Nesse caso, a demanda energética de condicionamento por aquecimento inverteu em relação ao de resfriamento, isso porque as composições com laje se comportaram melhor para ao inverno, diferente da situação no verão, gastando menos energia para o aquecimento dos ambientes devido ao acúmulo de calor retido no interior da edificação através da laje. Tal dado se comprova pela relação da laje ter se comportado melhor para o inverno, analisado a temperatura operativa mínima (Tomín), comparada a carga térmica de aquecimento. O valor mais alto no consumo para aquecimento está na composição Fibrocimento + PVC + sem laje (584 kWh/ano) e o menor valor está na composição de Fibrocimento + manta + laje (393 kWh/ano).

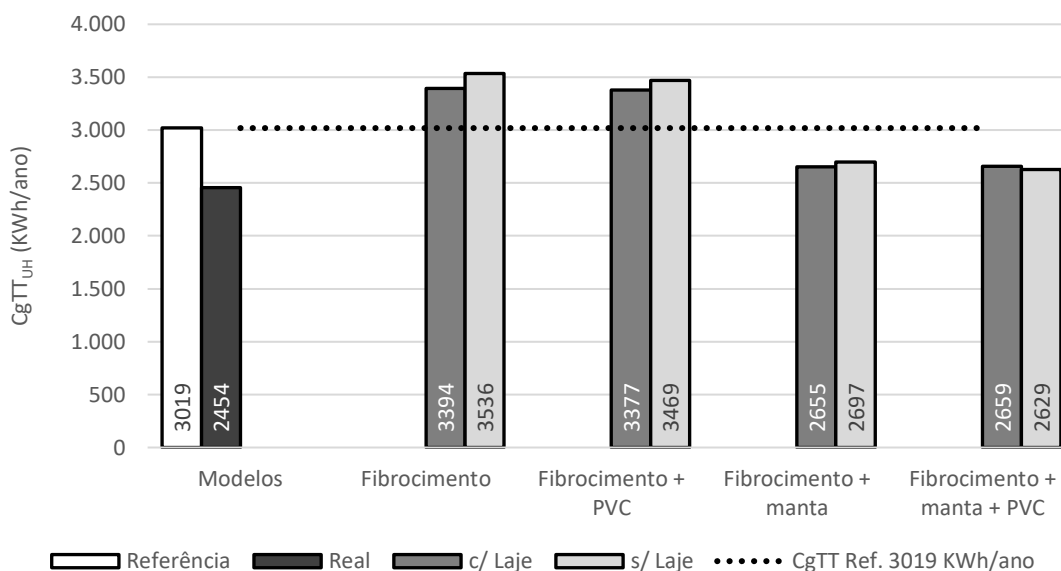
Figura 4-6: CgTA_{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.
(CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-7, apresenta a carga térmica total da unidade habitacional (CgTT_{UH}), a partir do somatório anual dos valores horários da CgTR_{APP} e CgTA_{APP}. Das oito composições com a telha de fibrocimento, as quatro composições com manta aluminizada são as que possuem redução considerável no consumo energético total da edificação, com os valores abaixo do valor do modelo referência (CgTT_{ref} 3019 kWh/ano), sendo a composição de Fibrocimento + manta + PVC + sem laje (2629 kWh/ano) a que obteve o menor consumo energético, quanto menor os valores, menor o consumo energético da edificação. As outras 4 composições que não possuem manta aluminizada, passaram o limite do modelo referência, sendo a composição com Fibrocimento + sem laje a que teve o maior consumo energético total (3536 kWh/ano). Através dos resultados analisados na Figura 4-7, pode-se relacionar a questão da eficiência das variadas composições de fibrocimento com a manta. Para os sistemas de coberturas que não possuem a manta, percebeu-se que afetou diretamente o aumento da carga térmica total da unidade habitacional com uma diferença de 907 kWh/ano entre as composições com o maior e menor consumo de carga térmica total da unidade habitacional.

Figura 4-7: CgTT_{UH} dos resultados das simulações com a telha de fibrocimento.
(CgTT_{UH}: Carga térmica total da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

4.1.1.1 Considerações dos resultados das composições com a telha de fibrocimento

Das oito combinações analisadas com a telha de fibrocimento, uma atingiu o nível mínimo da norma de desempenho NBR 15575, Fibrocimento + Manta + PVC Laje (critério mínimo, atender PHFT_{UH}; Tomín_{UH} e Tomáx_{UH}). Quatro das oito composições atingiram apenas o critério mínimo para o PHFT, sendo elas: Fibrocimento + Laje; Fibrocimento + sem Laje; Fibrocimento + Laje + PVC e Fibrocimento + PVC + sem Laje. As outras três composições atingiram o critério mínimo para o PHFT; Tomáx e CgTT, sendo elas: Fibrocimento + Manta + Laje; Fibrocimento + Manta + sem Laje; Fibrocimento + Manta + PVC + sem Laje.

O Δ PHFT, que indica a diferença entre os modelos real e referência, foi de 3,94% para a composição com o melhor resultado (Fibrocimento + manta + PVC + sem laje) e -1,35% para a composição com o desempenho mais baixo (Fibrocimento + laje). Para o atendimento aos níveis intermediário da norma NBR 15575, o Δ PHFT é considerado incremento do PHFT_{UH,real} em relação ao PHFT_{UH,ref}. É empregado quando o PHFT_{UH,ref} for inferior a 70%, através da seguinte equação: Δ PHFT_{mín} = 45 - (0,58 x PHFT_{UH,ref}), sendo o incremento do PHFT, para o a classificação do nível intermediário o Δ PHFT_{mín} de 7,49%. Como apresentado na Tabela 4-1, as composições não alcançaram o Δ PHFT_{mín} de 7,49% para o atendimento ao nível intermediário.

Avaliando as condições de demanda energética (CgTT) das composições, o valor mais alto tem uma diferença de 390 kWh/ano com o modelo referência (Fibrocimento + manta + PVC + sem laje), ou seja, uma redução de 13% no consumo total de energia elétrica (RedCgTT). O valor mais baixo é para a composição de Fibrocimento + laje, possui um aumento no consumo total de 17% (517 kWh/ano) em relação ao modelo referência, totalizando um consumo energético de 3536 kWh/ano (Tabela 4-1). Observa-se com a Tabela 4-1, na qual constam os resultados principais das simulações com a telha de fibrocimento, que não existe uma regra, que o PHFT mais alto necessariamente é o melhor resultado na CgTT, neste caso coincidiu. Porém, pode-se observar que a composição com o valor mais baixo de PHFT em relação ao modelo referência, não foi a composição que obteve a maior carga térmica total.

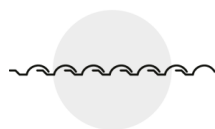
Segundo a norma NBR 15575 (ABNT, 2021b), para a obtenção do nível intermediário também é necessário atender ao critério de carga térmica, delimitado por um percentual mínimo de redução da carga térmica total (RedCgTT_{mín}). Como o modelo de referência do trabalho possui o PHFT_{UH,ref} inferior a 70%, para avaliação da RedCgTT_{mín} basta a CgTT_{UH,real}, ser menor ou igual à CgTT_{UH,ref}, sendo: $CgTT_{UH,real} \leq CgTT_{UH,ref}$. Entre as oito combinações com a telha de fibrocimento, quatro atingiram o nível intermediário da norma de desempenho NBR 15575 para a CgTT_{UH} (critério, $CgTT_{UH,real} \leq CgTT_{UH,ref}$), sendo as possuem a manta aluminizada em suas composições (Tabela 4-1).

Tabela 4-1: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha de fibrocimento.

Modelo Ref.		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{ín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimen. + laje con.		64,67%	-	35,36	11,77	2599,15	419,88	3019	-
Modelo Real		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{ín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Cerâm. + manta + PVC		69,39%	4,71%	35,79	10,61	1942,89	511,40	2454	19%
Composições		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{ín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimento	c/ L.	63,32%	-1,35%	41,27	10,09	2979,82	413,71	3394	-12%
	s/ L.	63,40%	-1,28%	41,48	10,05	2978,03	557,85	3536	-17%
Fibrocimento + PVC	c/ L.	63,50%	-1,18%	41,27	10,12	2961,11	415,76	3377	-12%
	s/ L.	64,02%	-0,65%	41,46	9,79	2884,55	584,09	3469	-15%
Fibrocimento + manta	c/ L.	67,51%	2,84%	36,41	10,75	2261,79	392,92	2655	12%
	s/ L.	67,65%	2,98%	36,44	10,68	2221,41	476,06	2697	11%
Fibrocimento + manta + PVC	c/ L.	67,42%	2,74%	36,42	10,77	2265,24	393,86	2659	12%
	s/ L.	68,61%	3,94%	36,42	10,61	2118,36	510,99	2629	13%

c/L.: Com Laje; s/ L.: Sem Laje; PHFT: Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa; Δ PHFT: Incremento do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{real} - PHFT_{ref}$); Tom_{máx}_{UH}: Temperatura operativa anual máxima; Tom_{ín}_{UH}: Temperatura operativa anual mínima; CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração; CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento; CgTT_{UH}: Carga térmica total; RedCgTT_{UH}: Redução da carga térmica total ($CgTT_{real} - CgTT_{ref}$).

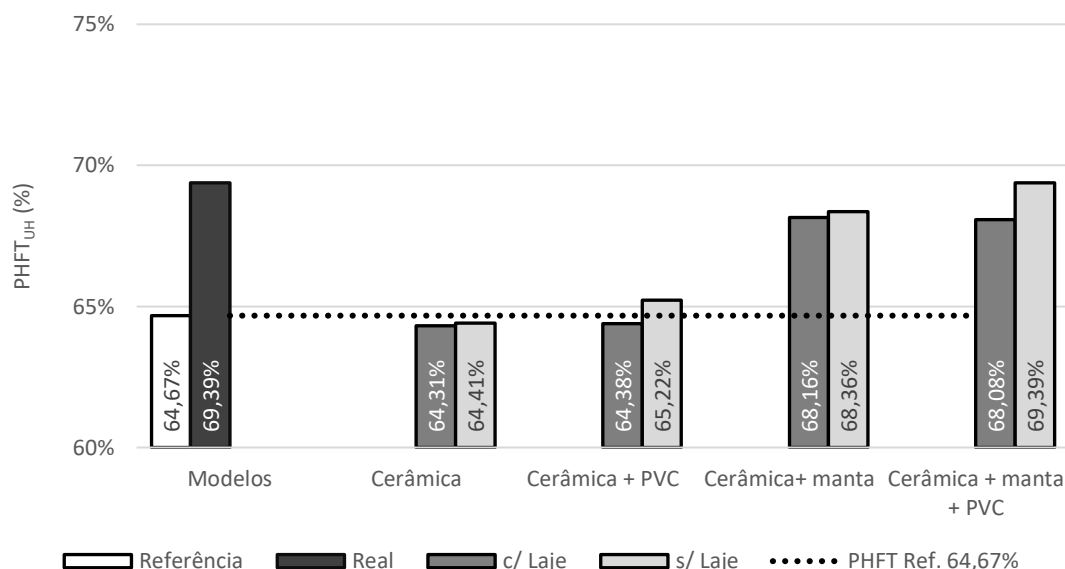
Menor Valor Legenda Maior Valor
 Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).



4.1.2 Modelo real com a telha cerâmica

A Figura 4-8, apresenta o PHFT das composições para a telha cerâmica, a composição com o desempenho térmico mais alto obteve o PHFT 69,39% (Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje) (Δ PHFT 4,71%) e 64,31% foi a composição com o menor desempenho (Cerâmica + Laje). Todas as composições atenderam ao PHFT mínimo ($PHFT_{UH,real} \text{ mínimo} \geq 58,20\%$). Os valores das propriedades da composição com o desempenho mais alto possuem a capacidade térmica (CT) 355 KJ/(m².K) e uma transmitância (U) de 1,18 W/(m².K), menor que o valor limite da norma ($(U) \leq 2,00$), sendo a composição com o desempenho mais alto o modelo real. Os valores das propriedades da composição com o desempenho mais baixo de PHFT são: (U= 0,87 W/(m².K)); e (CT= 221,1 KJ/(m².K)), para análise dos valores das propriedades de todas as composições consultar o Apêndice F.

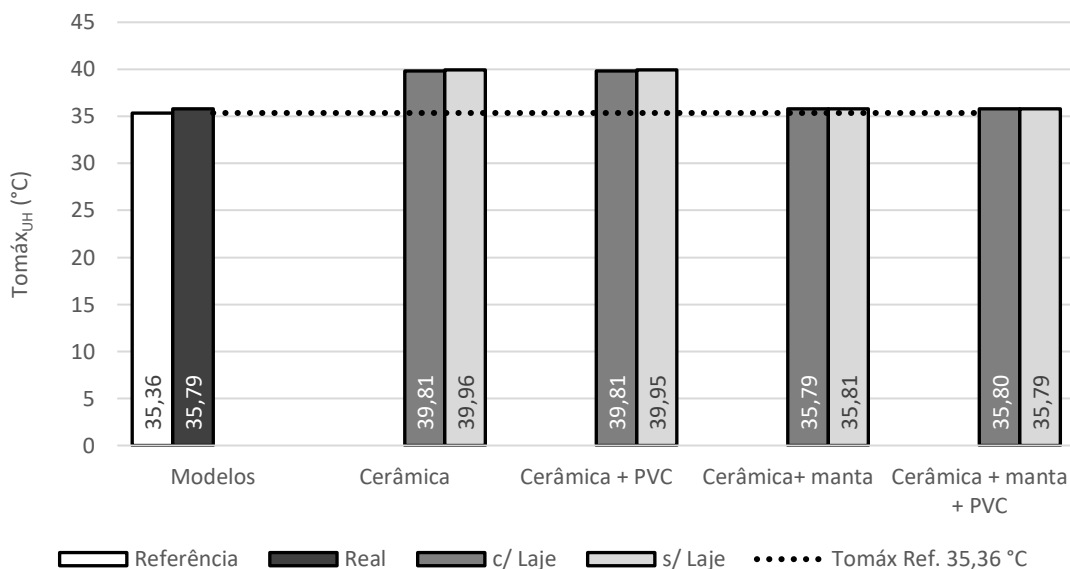
Figura 4-8: PHFT_{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.
(PHFT_{UH}: Percentual de horas de ocupação da UH dentro de uma faixa de temperatura operativa)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-9 apresenta as temperaturas operativas anuais máximas internas (Tomáx) da telha cerâmica. As quatro composições sem a manta aluminizada possuem um acréscimo de temperatura média de 4,5°C, em relação ao modelo referência (35,36°C). As outras quatro composições, que contém a manta tiveram um acréscimo médio de 0,44°C, com baixa variação percentual em relação a referência. De acordo os níveis da norma NBR 15575 (ABNT, 2021b), as quatro composições com a manta aluminizada atenderam ao nível mínimo, (Tomáx_{UH,real} ≤ 37,36°C). A melhor composição para as temperaturas operativas máximas internas é a Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje (35,79°C), a composição com o desempenho mais baixo, foi a que apresentou o valor mais alto, sendo, Cerâmica + sem Laje (39,96°C), com uma diferença de 4,17°C para a melhor.

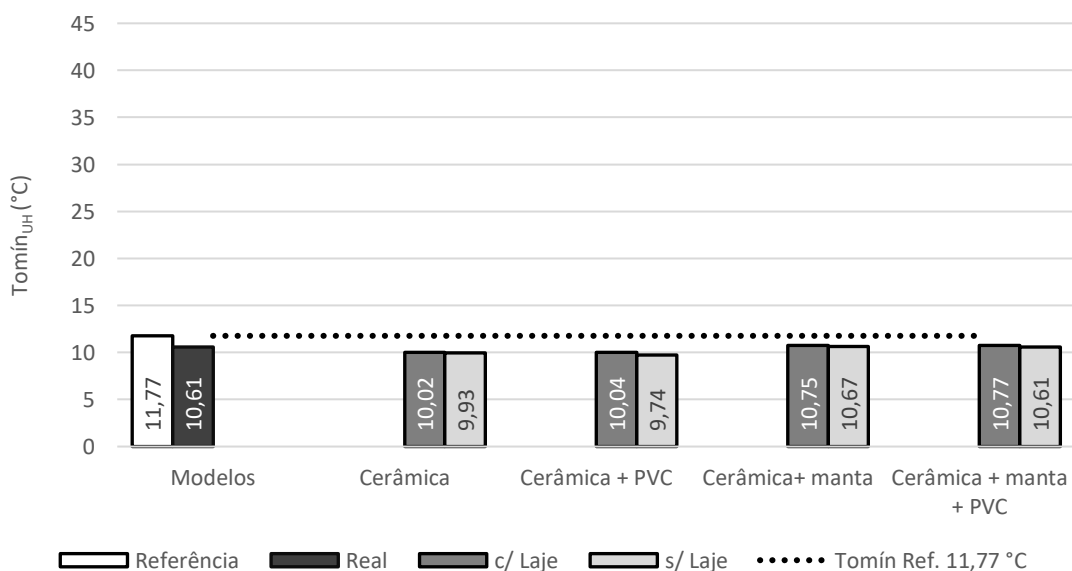
Figura 4-9: Tom_{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.
(Tom_{UH}: Temperatura operativa anual máxima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-10 apresenta as temperaturas operativas anuais mínimas (Tom_{UH}) das composições com a telha cerâmica. Assim como para a telha de fibrocimento, as composições com a telha cerâmica possuem os valores abaixo da faixa de 18°C do intervalo 1. Observou-se que as composições com laje se comportaram melhor no inverno do que no verão. Uma das oito composições atingiu ao critério de temperaturas operativas mínima, Cerâmica + Manta + PVC + Laje (10,77° C).

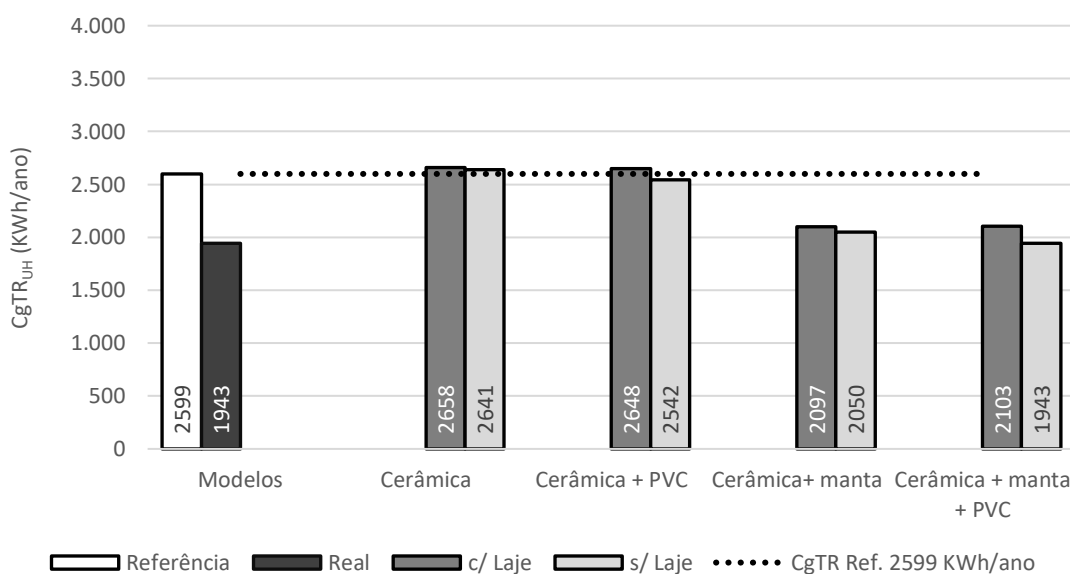
Figura 4-10: Tom_{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.
(Tom_{UH}: Temperatura operativa anual mínima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Quanto aos resultados da carga térmica de refrigeração ($CgTR$), apresentados na Figura 4-11, cinco das oito composições ficaram abaixo do limite do modelo referência, sendo quatro composições com o uso da manta e uma sem o uso da manta. As composições com a manta tiveram uma redução média de consumo de 550,75 kWh/ano em relação ao modelo referência, sendo, o melhor valor para a composição Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje (1943 kWh/ano) e o desempenho mais baixo, é da composição Cerâmica + Laje (2658 kWh/ano). As três composições das oito que não ficaram abaixo do limite do modelo referência (2599 kWh/ano) possuem uma diferença média de 50 kWh/ano para a referência.

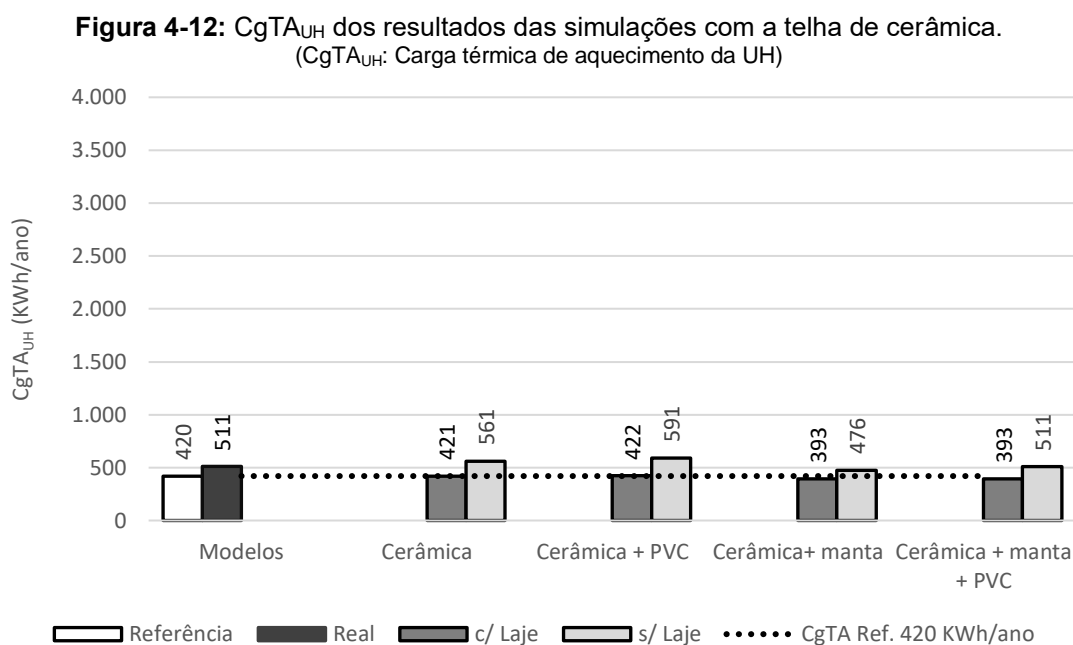
Figura 4-11: $CgTR_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.
($CgTR_{UH}$: Carga térmica de refrigeração da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

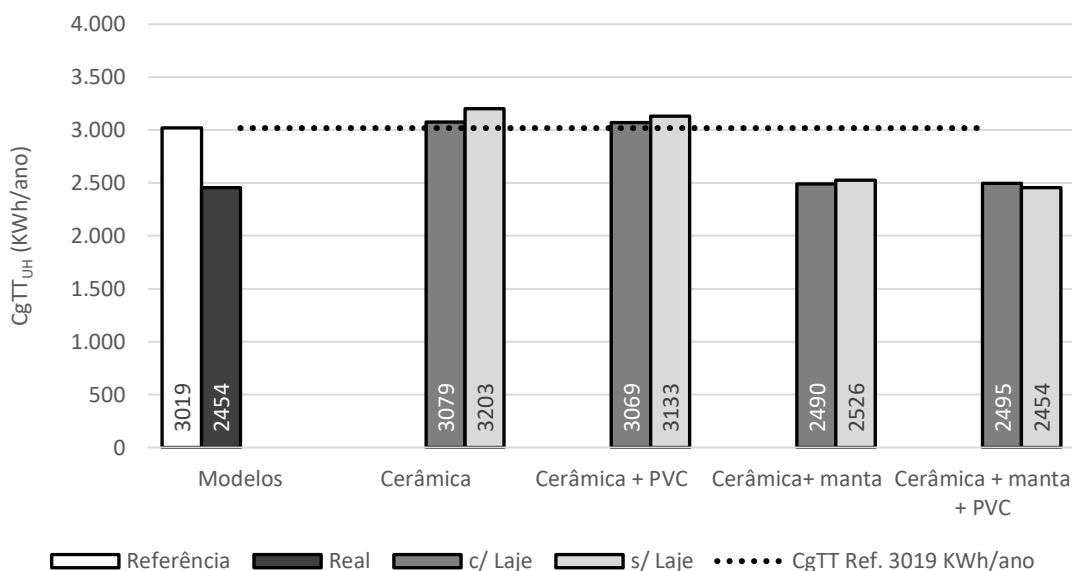
A Figura 4-12 apresenta a análise dos resultados da carga térmica de aquecimento ($CgTA$) com a telha cerâmica. Pode-se observar que as composições com laje se comportaram melhor para o inverno, diferente da situação no verão, ou seja, houve maior demanda energética para manter a edificação aquecida no inverno por parte das composições sem laje, as composições com laje tiveram uma demanda menor de energia possivelmente por ter acumulado mais calor durante o dia através da laje. A composição que mais consumiu energia para se manter aquecida no inverno foi a Cerâmica + PVC + sem Laje (591 kWh/ano), possivelmente, isso se deve a questão de a telha cerâmica ter maior capacidade térmica, mantendo a edificação mais resfriada no inverno, e as que menos consumiram foram as composições

Cerâmica + Manta + Laje e Cerâmica + Manta + PVC + Laje (393 kWh/ano) (Figura 4-12).



A Figura 4-13 apresenta os resultados da carga térmica total da edificação (CgTT_{UH}). As quatro composições com a manta aluminizada são as que possuem os melhores resultados na redução da carga térmica total de consumo energético da edificação, com os valores abaixo do valor do modelo referência (3019 kWh/ano). Vale ressaltar que as outras quatro composições estão com valores próximos ao limite da norma, sendo a composição Cerâmica + sem laje a que possui a maior carga térmica no consumo total energético (3203 kWh/ano) com uma diferença ínfima de 184 kWh/ano para a referência. A composição de Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje (2454 kWh/ano) foi a que obteve o menor consumo energético (2454 kWh/ano).

Figura 4-13: CgTT_{UH} dos resultados das simulações com a telha de cerâmica.
(CgTT_{UH}: Carga térmica total da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

4.1.2.1 Considerações dos resultados das composições com a telha cerâmica

As diferenças percebidas ficaram por conta do PHFT um pouco maior para o modelo real com a telha cerâmica, alcançado 69,39%, com um Δ PHFT de 4,71%, além de uma RedCgTT de 19%. A composição de Cerâmica + Manta + PVC + Laje atingiu o nível mínimo da norma de desempenho NBR 15575 (critério mínimo, atender PHFT_{UH}; Tomín_{UH} e Tomáx_{UH}). Quatro das oito composições atingiram apenas o critério mínimo para o PHFT, sendo elas: Cerâmica + Laje; Cerâmica + sem Laje; Cerâmica + Laje + PVC e Cerâmica + sem Laje + PVC. As outras três composições atingiram o critério mínimo para o PHFT, Tomáx e CgTT sendo elas: Cerâmica + Manta + Laje; Cerâmica + Manta + sem Laje e Cerâmica + Manta + Laje + PVC.

Quanto às avaliações da carga térmica total da edificação, a composição Cerâmica + sem Laje foi a que teve o maior consumo energético (3202 kWh/ano) com um aumento no consumo total de 6% em relação ao modelo referência. A composição com Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje foi a que obteve o menor consumo energético total (2454 kWh/ano) com uma RedCgTT de 19%. Contudo, em função da NBR 15575 que estabelece o Δ PHFT_{mín} (7,49%) maior que o Δ PHFT obtido, os níveis intermediário e superior não foram atendidos (Tabela 4-2).

Tabela 4-2: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha de cerâmica.

Modelo Ref.		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{mín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimen. + laje con.		64,67%	-	35,36	11,77	2599,15	419,88	3019	-
Modelo Real		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{mín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Cerâm. + manta + PVC		69,39%	4,71%	35,79	10,61	1942,89	511,40	2454	19%
Composições		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{mín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Cerâmica	c/ L.	64,31%	-0,37%	39,81	10,02	2657,92	420,60	3079	-2%
	s/ L.	64,41%	-0,27%	39,96	9,93	2641,28	561,23	3203	-6%
Cerâmica + PVC	c/ L.	64,38%	-0,29%	39,81	10,04	2647,53	421,83	3069	-2%
	s/ L.	65,22%	0,55%	39,95	9,74	2542,12	591,00	3133	-4%
Cerâmica + manta	c/ L.	68,16%	3,49%	35,79	10,75	2097,20	392,74	2490	18%
	s/ L.	68,36%	3,69%	35,81	10,67	2049,96	476,27	2526	16%
Cerâmica + manta + PVC	c/ L.	68,08%	3,40%	35,80	10,77	2102,63	392,63	2495	17%
	s/ L.	69,39%	4,71%	35,79	10,61	1942,89	511,40	2454	19%

c/L.: Com Laje; s/ L.: Sem Laje; PHFT: Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa; Δ PHFT: Incremento do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{real} - PHFT_{ref}$); Tom_{máx}_{UH}: Temperatura operativa anual máxima; Tom_{mín}_{UH}: Temperatura operativa anual mínima; CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração; CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento; CgTT_{UH}: Carga térmica total; RedCgTT_{UH}: Redução da carga térmica total ($CgTT_{real} - CgTT_{ref}$).

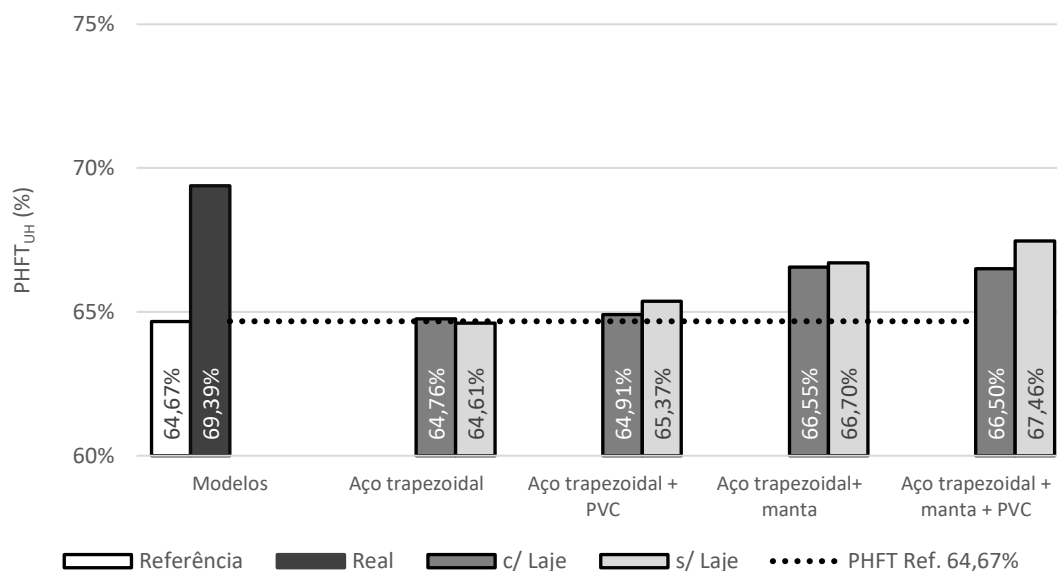
Menor Valor Legenda Maior Valor
 Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).



4.1.3 Modelo real com a telha de aço trapezoidal

A Figura 4-14 apresenta os resultados das simulações do PHFT para a avaliação do modelo com a telha de aço trapezoidal. De acordo estabelece a NBR 15575, todas as composições atenderam ao PHFT mínimo conforme a norma ($PHFT_{UH,real} \text{ mínimo} \geq 58,20\%$). Assim como visto para os modelos com as telhas de fibrocimento e cerâmica (Figuras 4-1 e 4-7), as condições de PHFT mantiveram os padrões detalhados na discussão, exceto pela situação das quatro composições sem a manta aluminizada, que apresentaram desempenho mais alto no PHFT das composições. Das oito composições, apenas uma não ultrapassou o PHFT referência (64,67%), sendo: Aço trapezoidal + sem Laje (PHFT 64,61%), os valores das propriedades dessa composição com o menor resultado de PHFT são: ($U = 4,76 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$); e ($CT = 8,0960 \text{ KJ}/(\text{m}^2.\text{K})$). A composição com o desempenho mais alto em relação ao modelo referência é a de Aço trapezoidal + Manta + PVC + sem Laje (PHFT 67,46%), as propriedades dos materiais dessa composição são: ($U = 1,20 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) menor que o valor limite da norma ($U \leq 2,00$); e ($CT = 357 \text{ KJ}/(\text{m}^2.\text{K})$), para consulta dos valores das demais composições consultar Apêndice F.

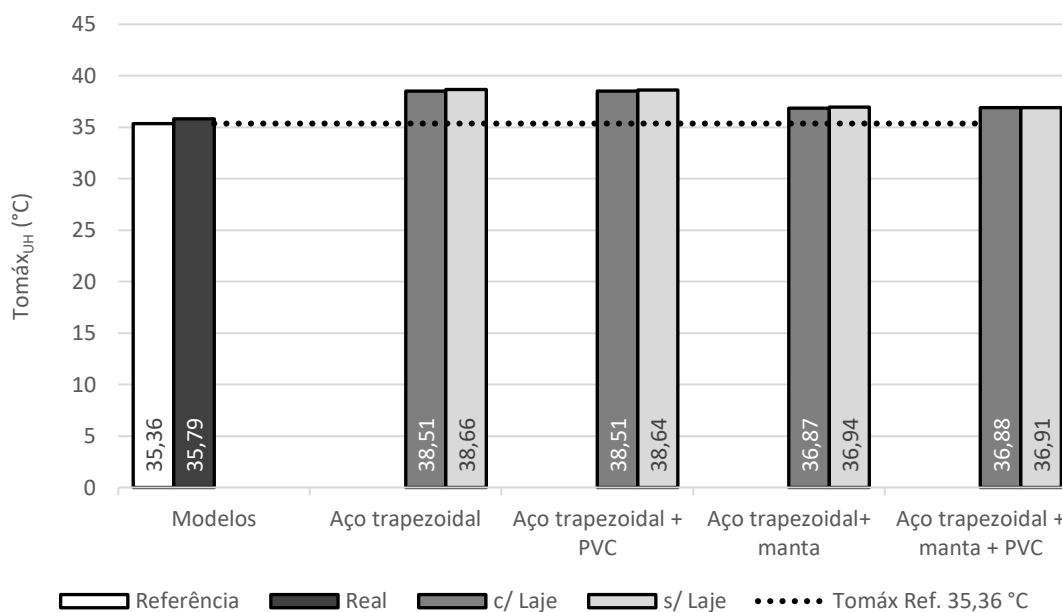
Figura 4-14: PHFT_{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal. (PHFT_{UH}: Percentual de horas de ocupação da UH dentro de uma faixa de temperatura operativa)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-15, apresenta os resultados da temperatura operativa máxima interna da edificação com a telha de aço trapezoidal. Existe uma pequena diferença de temperatura entre as opções com e sem a manta. A composição que mais teve aumento de temperatura média foi a Aço trapezoidal + sem Laje (38,66°C) e com o menor aumento de temperatura Aço trapezoidal + Manta + PVC + Laje (36,88°C), com uma diferença de 1,78°C entre as composições. A diferença das temperaturas máximas do modelo referência (35,36°C) para a composição com o maior desempenho (36,88°C) ficou em média 1,52°C. Assim como para as telhas cerâmicas, as quatro composições que atenderam ao limite das temperaturas operacionais máximas internas ($T_{máx,UH,real} \leq 37,36^\circ\text{C}$) são as que possuem a manta aluminizada, as demais obtiveram valores próximos, porém, ultrapassaram o limite da norma.

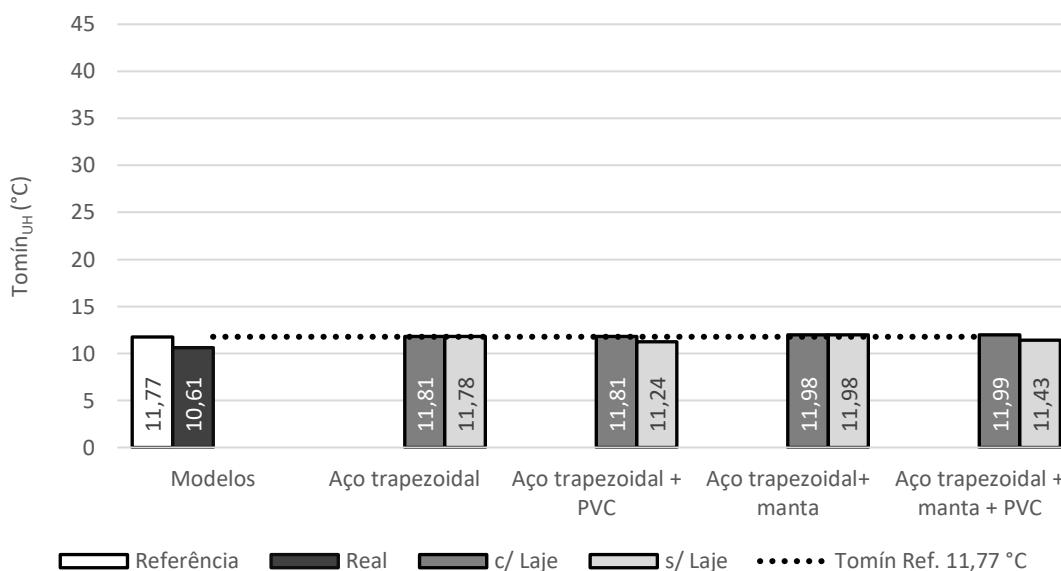
Figura 4-15: Tom_{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal. (Tom_{UH}: Temperatura operativa anual máxima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-16, apresenta as temperaturas operacionais mínimas das composições (Tom_{ín}), diferente das telhas de fibrocimento e cerâmica, todas as composições atenderam ao critério da norma NBR 15575 em relação ao nível mínimo, sendo: $Tom_{UH,real} \geq 10,77$. Percebeu-se até então, que esse é um dos critérios mais difícil de atender, enquanto os outros materiais analisados mantém temperaturas médias nos ambientes abaixo do recomendado no inverno, a telha de aço trapezoidal manteve os ambientes com temperaturas internas superiores do mínimo, inclusive para as situações sem laje, que constou um diferencial considerável em relação as outras telhas. A composição que teve o desempenho mais alto foi a de Aço trapezoidal + Manta + PVC + Laje (11,99°C), porém, ao comparar as composições sem o uso da laje, a diferença é ínfima, um exemplo a composição de Aço trapezoidal + Manta + sem Laje (11,98°C). A composição que teve o Tom_{ín} mais baixo foi a com Aço trapezoidal + PVC + sem Laje (11,24°C).

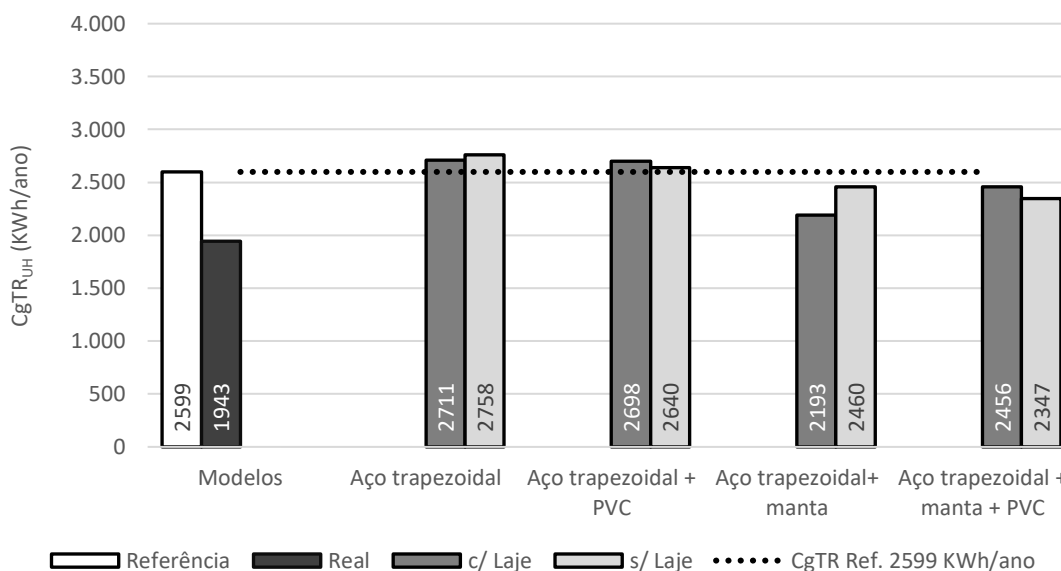
Figura 4-16: Tomín_{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal.
(Tomín_{UH}: Temperatura operativa anual mínima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-17 apresenta os resultados da CgTR para a telha de aço trapezoidal. Diferente das composições com fibrocimento e cerâmica, houve duas composições com a telha de aço trapezoidal que demandaram menos energia de refrigeração com o uso da laje, sendo as composições de Aço trapezoidal + Manta + Laje (2193 kWh/ano) com uma diferença de 267 kWh/ano em relação a composição sem laje, e a composição de Aço trapezoidal + Laje (2711 kWh/ano) com uma diferença de 47 kWh/ano com a composição sem a laje. As composições com isolamento se mantiveram com um consumo mais baixo do que as composições sem isolamento. A que teve o menor consumo por resfriamento foi a telha de Aço + Manta + PVC + sem Laje (2347 kWh/ano) (Figura 4-16).

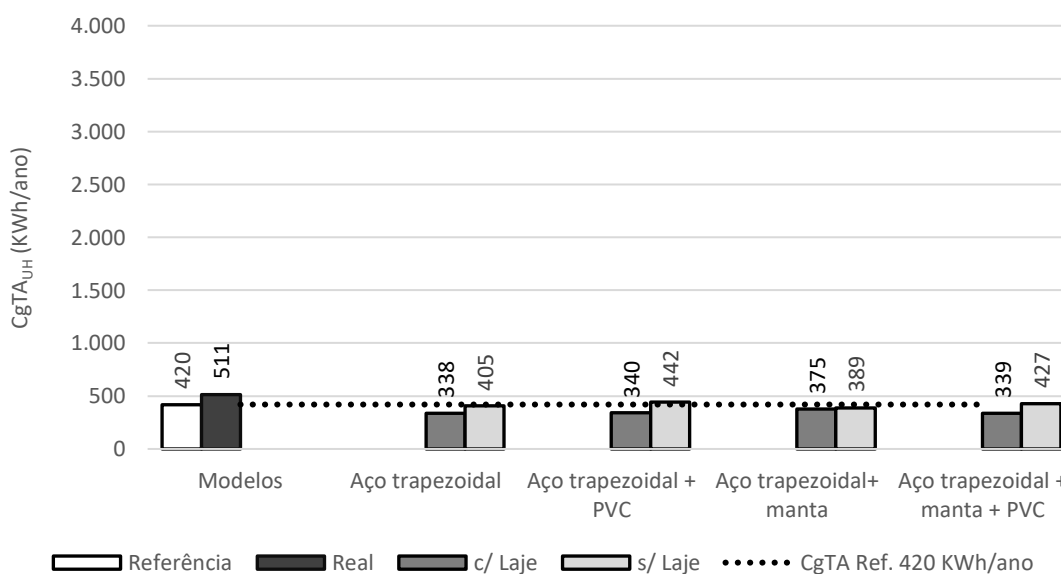
Figura 4-17: CgTR_{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal.
(CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Os resultados da carga térmica de aquecimento (CgTA), apresentados na Figura 4-18, mostram que as composições com laje se comportaram melhor para o inverno, duas composições extrapolaram o CgTA_{ref} (420 kWh/ano), sendo, Aço trapezoidal + PVC + sem Laje (442 kWh/ano) e Aço trapezoidal + Manta + PVC + sem Laje (427 kWh/ano). A composição com o menor consumo energético para aquecimento foi a Aço trapezoidal + Laje (338 kWh/ano).

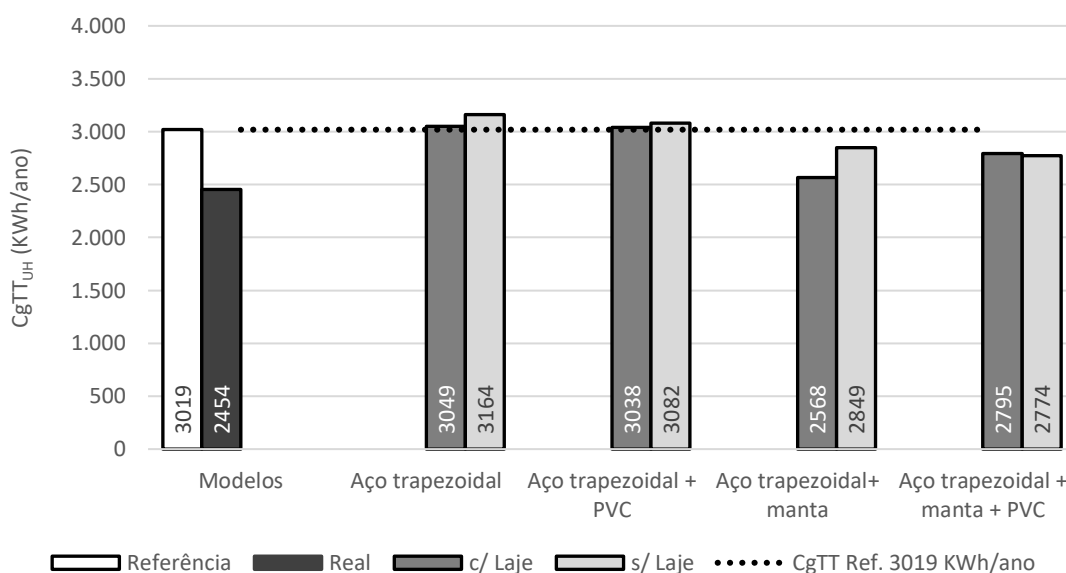
Figura 4-18: CgTA_{UH} dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal.
(CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-19, apresenta a redução da carga térmica total ($CgTT$), com a telha de aço trapezoidal, por sua vez, manteve resultados bem próximos umas das outras, os resultados com desempenho mais alto, se mantiveram nas opções com a manta, as demais composições, sem a manta, mesmo que com valores muito próximos ultrapassaram a linha referência. A composição com carga térmica total que mais consumiu energia foi a Aço trapezoidal + sem Laje (3164 kWh/ano) e a com o menor consumo foi a composição de Aço trapezoidal + Manta + Laje (2568 kWh/ano).

Figura 4-19: $CgTT_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal. ($CgTT_{UH}$: Carga térmica total da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

4.1.3.1 Considerações dos resultados das composições com a telha de aço trapezoidal

As quatro composições com a manta aluminizada garantiram o atendimento ao nível mínimo de desempenho, sendo: Aço trapezoidal + Manta; Aço trapezoidal + Manta + Laje; Aço trapezoidal + Manta + PVC e Aço trapezoidal + Manta + PVC + Laje (critério mínimo, $PHFT_{UH}$, $Tomáx_{UH}$ e $Tomín_{UH}$). Ainda sobre as composições com manta, também atingiram o critério de $RedCgTT$ para o nível intermediário. As outras quatro composições, sem a manta, atingiram apenas o $PHFT$ e $Tomín$. Contudo, em função da NBR 15575 que estabelece o $\Delta PHFT_{\min}$ (7,49%) maior que o $\Delta PHFT$ obtido, as composições com a telha de aço trapezoidal não atenderam os níveis intermediário e superior (critério, $PHFT_{UH}$ e $CgTT_{UH}$) (Tabela 4-3).

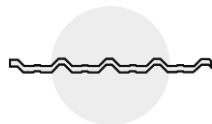
Tabela 4-3: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha de aço trapezoidal.

Modelo Ref.		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{mín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimen. + laje con.		64,67%	-	35,36	11,77	2599,15	419,88	3019	-
Modelo Real		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{mín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Cerâm. + manta + PVC		69,39%	4,71%	35,79	10,61	1942,89	511,40	2454	19%
Composições		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tom _{máx} [°C]	Tom _{mín} [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Aço trapezoidal	c/ L.	64,76%	0,09%	38,51	11,81	2710,69	338,37	3049	-1%
	s/ L.	64,61%	-0,06%	38,66	11,78	2758,42	405,43	3164	-5%
Aço trapezoidal + PVC	c/ L.	64,91%	0,24%	38,51	11,81	2698,15	339,93	3038	-1%
	s/ L.	65,37%	0,69%	38,64	11,24	2640,14	442,21	3082	-2%
Aço trapezoidal + manta	c/ L.	66,55%	1,88%	36,87	11,98	2193,09	374,91	2568	15%
	s/ L.	66,70%	2,03%	36,94	11,98	2460,21	389,01	2849	6%
Aço trapezoidal + manta + PVC	c/ L.	66,50%	1,83%	36,88	11,99	2455,96	338,57	2795	7%
	s/ L.	67,46%	2,79%	36,91	11,43	2347,32	426,75	2774	8%

c/L.: Com Laje; s/ L.: Sem Laje; PHFT: Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa; Δ PHFT: Incremento do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{real} - PHFT_{ref}$); Tom_{máx,UH}: Temperatura operativa anual máxima; Tom_{mín,UH}: Temperatura operativa anual mínima; CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração; CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento; CgTT_{UH}: Carga térmica total; RedCgTT_{UH}: Redução da carga térmica total ($CgTT_{real} - CgTT_{ref}$).

Menor Valor Legenda Maior Valor

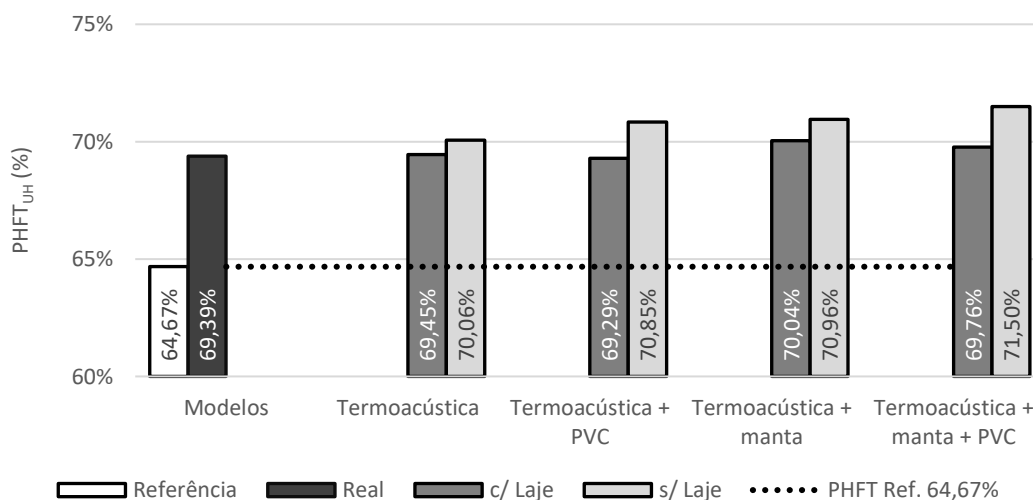
Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).



4.1.4 Modelo real com a telha termoacústica

Por fim, a Figura 4-20 mostra o PHFT das avaliações das composições do modelo com a adição da telha termoacústica. Os resultados mostram o desempenho mais alto dentre as quatro telhas testadas. Todas as composições atenderam ao critério de PHFT ($PHFT_{UH,real}$ mínimo $\geq 58,20\%$), com um PHFT para a composição com o desempenho mais alto de 71,50% (Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje). A composição com o valor de PHFT mais baixo é de 69,45% (Termoacústica + Laje). As propriedades dos materiais da composição com o desempenho mais alto, apresenta ($U = 0,54 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); e ($CT = 350 \text{ KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). A composição com o valor mais baixo de PHFT possui, ($U = 0,47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); e ($CT = 1,5030 \text{ KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Devido ao material isolante contido na telha termoacústica, avaliando o percentual de horas de ocupação da unidade habitacional dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$), os valores médios de PHFT estão semelhantes, com baixa variação percentual entre as composições (para consulta dos valores da RT, U, e CT ver Apêndice F).

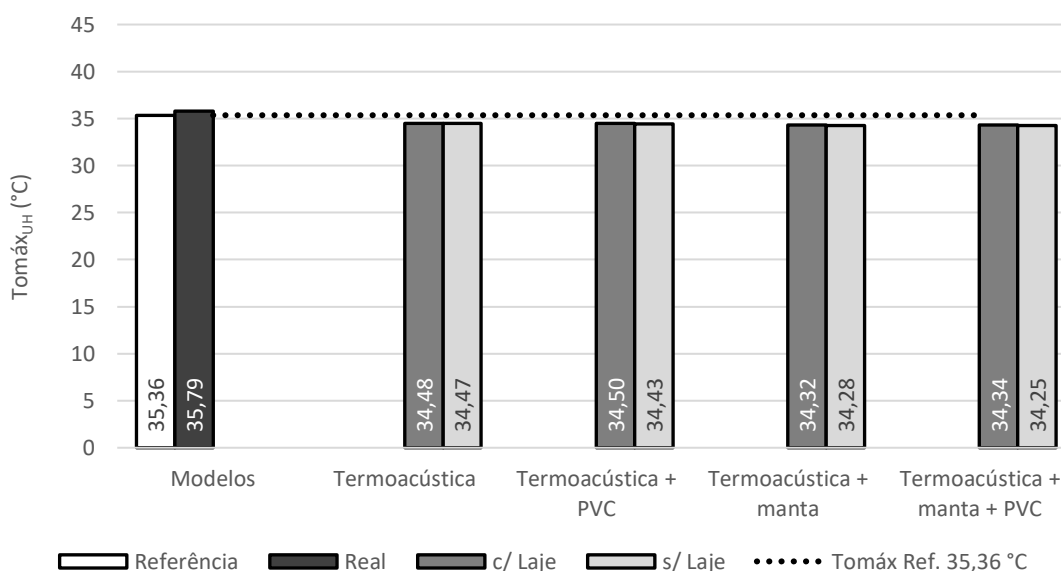
Figura 4-20: PHFT_{UH} dos resultados das simulações com a telha de termoacústica.
(PHFT_{UH}: Percentual de horas de ocupação da UH dentro de uma faixa de temperatura operativa)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Os resultados das temperaturas operativas anuais máximas internas (Tomáx_{UH}) (Figura 4-21), possuem o desempenho mais alto dentre as quatro telhas. Todas as composições atenderam ao nível mínimo necessário (Tomáx_{UH,real} ≤ 37,36°C). A diferença de temperatura entre as composições é mínima, apenas nas casas decimais. A composição com o desempenho mais alto é a Termoacústica + Manta + PVC + sem laje (34,25°C), inclusive a mesma composição das outras telhas.

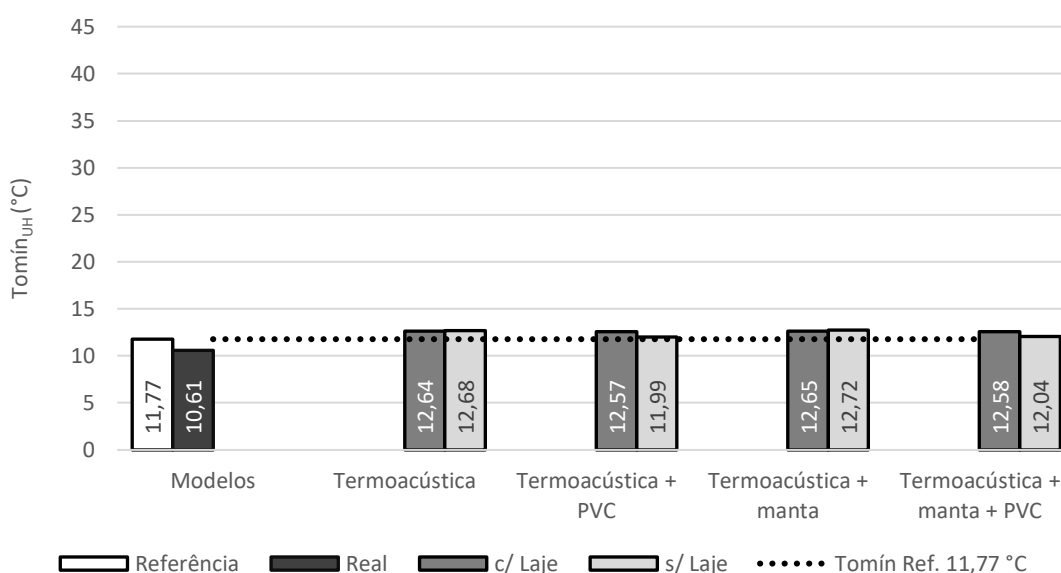
Figura 4-21: Tomáx_{UH} dos resultados das simulações com a telha de termoacústica.
(Tomáx_{UH}: Temperatura operativa anual máxima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Assim como a análise da Tomáx, os resultados para as temperaturas operativas anuais mínimas internas ($Tomín$) (Figura 4-22), mostraram o desempenho mais alto para a telha termoacústica dentre as demais telhas avaliadas. Todas as composições atenderam ao nível necessário ($Tomín_{UH,real} \geq 10,77$). As composições com laje, continuam gerando resultados melhores no inverno, com diferenças de temperaturas mínimas entre as composições sem laje.

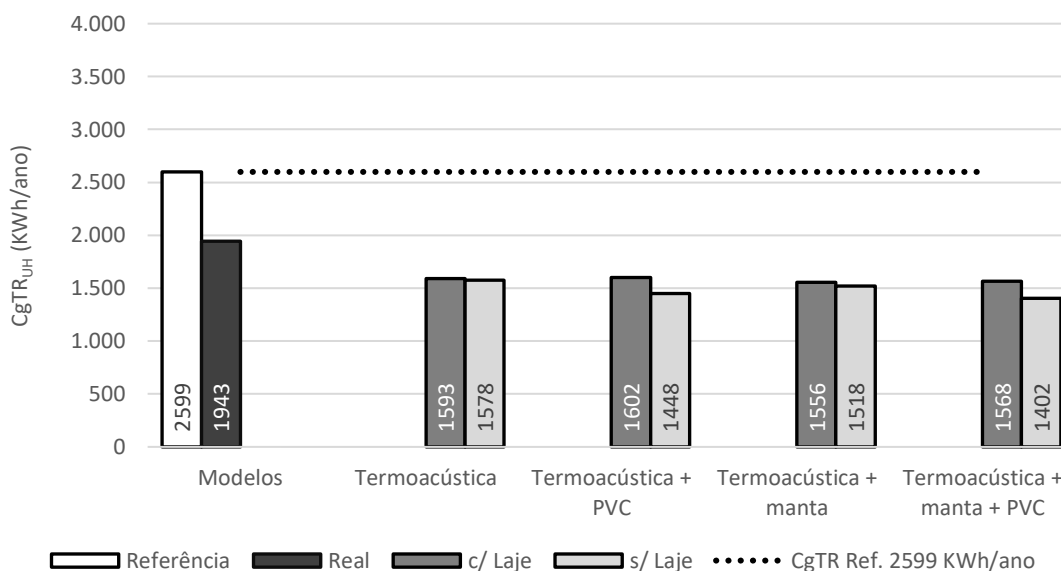
Figura 4-22: $Tomín_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica. ($Tomín_{UH}$: Temperatura operativa anual mínima da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

A Figura 4-23, apresenta os resultados da carga térmica de refrigeração ($CgTR$), todas as composições com o uso da laje demandaram mais energia para manter os ambientes resfriados do que as opções sem a laje. As diferenças dos valores com e sem a laje, são mínimas. Notou-se que as composições com a manta aluminizada não apresentaram valores significativos no desempenho, como para as demais telhas analisadas. A composição com menor consumo energético de resfriamento foi a Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje (1402 kWh/ano), sendo a que mais demandou foi a composição Termoacústica + Laje (1593 kWh/ano), a diferença de consumo energético entre as duas ficou em 191 kWh/ano. As oito composições se mantiveram abaixo do limite do consumo da carga térmica de resfriamento, atendendo ao critério de desempenho da $CgTR$ da norma 15575.

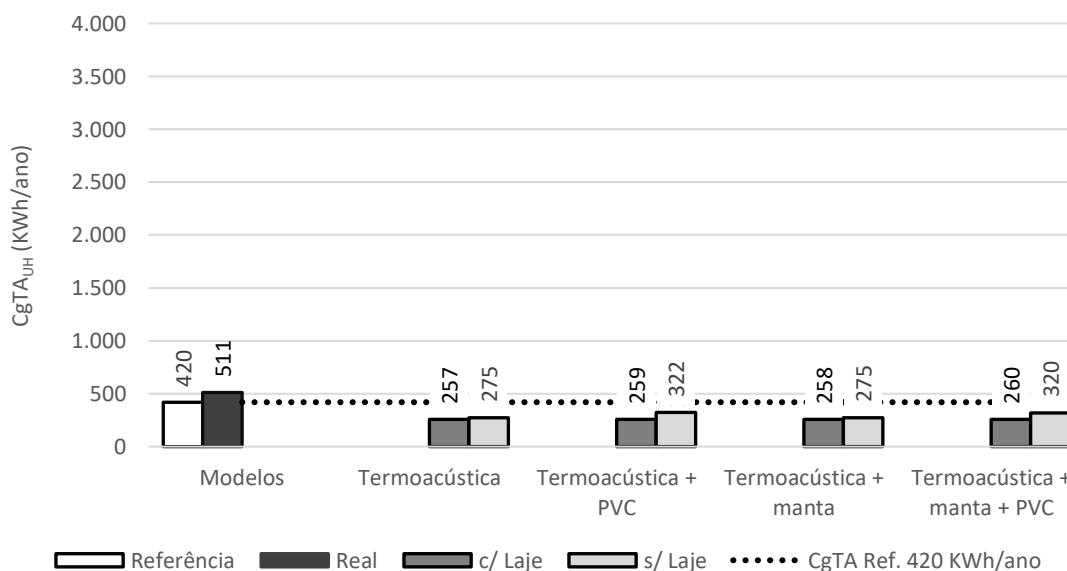
Figura 4-23: CgTR_{UH} dos resultados das simulações com a telha de termoacústica.
(CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

O gráfico da Figura 4-24 mostra a carga térmica de aquecimento (CgTA), as composições sem laje demandaram mais consumo energético para manter a edificação aquecida no inverno. A composição com a Termoacústica + Laje, foi a que obteve o menor consumo para aquecimento (257 kWh/ano), e a que obteve o maior consumo foi a Termoacústica + PVC + sem Laje (322 kWh/ano). As oito composições atenderam ao critério de desempenho da CgTA da norma de desempenho 15575.

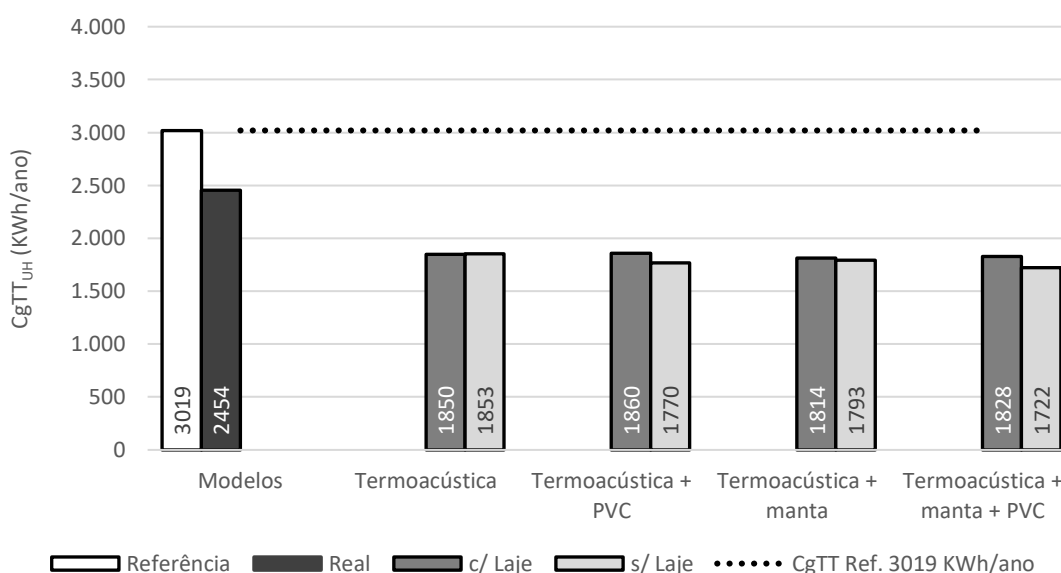
Figura 4-24: CgTA_{UH} dos resultados das simulações com a telha de termoacústica.
(CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Os valores da carga térmica total para a telha termoacústica é apresenta na Figura 4-25, todas as composições atingiram valores no consumo energético total da edificação, abaixo do valor do modelo referência ($CgTT_{ref}$ 3019 kWh/ano), ou seja, todas atenderam ao critério da norma de desempenho para a $CgTT$. Através do gráfico dos resultados, ficou perceptível a eficiência dos sistemas de coberturas com a telha termoacústica, se comparados as simulações com as outras telhas.

Figura 4-25: $CgTT_{UH}$ dos resultados das simulações com a telha de termoacústica. ($CgTT_{UH}$: Carga térmica total da UH)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

4.1.4.1 Considerações dos resultados das composições com a telha termoacústica

Mais uma vez, em função da NBR 15575 que estabelece o $\Delta PHFT_{min}$ (7,49%) maior que o $\Delta PHFT$ obtido, os níveis intermediário e superior não foram atendidos, ainda que a melhor composição apresentou o valor de $\Delta PHFT$ muito próximo ao exigido, (6,83%) Termoacústica + manta + PVC + sem laje (Tabela 4-4).

Todas as composições atingiram o nível intermediário da norma de desempenho NBR 15575 para a $CgTT_{UH}$ (critério, $CgTT_{UH,real} \leq CgTT_{UH,ref}$), com uma diferença de 1297 kWh/ano entre o melhor resultado e o modelo referência, resultando em uma $RedCgTT$ de 43%, ou seja, uma redução de carga térmica próxima a metade da demanda energética do modelo de referência. Embora tenha sido identificado que todos os modelos atingiram o nível estabelecido pela norma de $CgTT$, não há possibilidade de atendimento aos níveis intermediário e superior em função do baixo

valor do Δ PHFT (Tabela 4-4).

Tabela 4-4: Resumo dos principais resultados das simulações com a telha Termoacústica.

Modelo Ref.		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimen. + laje con.		64,67%	-	35,36	11,77	2599,15	419,88	3019	-
Modelo Real		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Cerâm. + manta + PVC		69,39%	4,71%	35,79	10,61	1942,89	511,40	2454	19%
Composições		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Termoacústica	c/ L.	69,45%	4,78%	34,48	12,64	1592,92	256,63	1850	39%
	s/ L.	70,06%	5,38%	34,47	12,68	1577,79	274,86	1853	39%
Termoacústica + PVC	c/ L.	69,29%	4,61%	34,50	12,57	1601,61	258,53	1860	38%
	s/ L.	70,85%	6,17%	34,43	11,99	1448,41	321,62	1770	41%
Termoacústica + manta	c/ L.	70,04%	5,37%	34,32	12,65	1555,76	258,33	1814	40%
	s/ L.	70,96%	6,29%	34,28	12,72	1517,84	275,02	1793	41%
Termoacústica + manta + PVC	c/ L.	69,76%	5,09%	34,34	12,58	1567,88	259,79	1828	39%
	s/ L.	71,50%	6,83%	34,25	12,04	1402,42	319,84	1722	43%

c/L.: Com Laje; s/ L.: Sem Laje; PHFT: Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa;

Δ PHFT: Incremento do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{real} - PHFT_{ref}$); Tomáx_{UH}: Temperatura operativa anual máxima; Tomín_{UH}: Temperatura operativa anual mínima;

CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração; CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento; CgTT_{UH}: Carga térmica total;

RedCgTT_{UH}: Redução da carga térmica total ($CgTT_{real} - CgTT_{ref}$).

Menor Valor Legenda Maior Valor

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

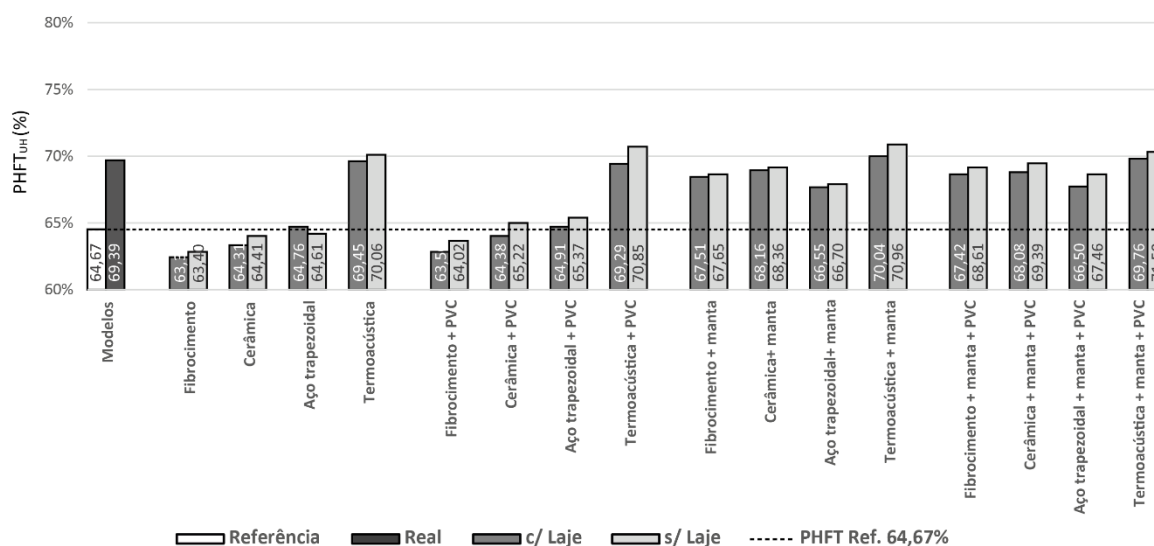
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS GERAIS COMPARATIVOS ENTRE AS TELHAS

A seguir, serão apresentados os resultados das avaliações de desempenho termoenergético entre as telhas, por meio de comparativos do percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), temperaturas operativas máxima e mínima (Tomáx e Tomín) e cargas térmicas (CgTR; CgTA e CgTT). As análises foram feitas de acordo os valores dos modelos (real e referência) juntamente com as 8 composições, sendo:

- 1° Tipo de Telha + Laje;
- 2° Tipo de Telha + sem Laje;
- 3° Tipo de Telha + PVC + Laje;
- 4° Tipo de Telha + PVC + sem Laje;
- 5° Tipo de Telha + Manta + Laje;
- 6° Tipo de Telha + Manta + sem Laje;
- 7° Tipo de Telha + Manta + PVC + Laje;
- 8° Tipo de Telha + Manta + PVC + sem Laje.

A Figura 4-26 apresenta os resultados do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa de todas as composições (PHFT), como pode-se observar, todas as composições sem laje apresentaram os melhores resultados de PHFT comparadas as composições com laje, excetuando a composição de Aço trapezoidal + Laje (64,76%) que obteve o PHFT mais alto em relação a composição; Aço trapezoidal + sem Laje (64,61%). Para todas as composições, a telha termoacústica foi a que obteve os melhores resultados de desempenho térmico, no entanto, vale ressaltar que a telha cerâmica obteve resultados muito próximos ao da termoacústica, quando acrescentado na composição a manta aluminizada, sendo que o melhor PHFT (71,50%) para a composição da telha Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje teve uma diferença mínima de 2,11% para a composição com a telha Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje (69,39%). Os resultados de desempenho mais baixos são para as composições que usaram apenas a telha, com ou sem laje, sendo estes: Fibrocimento + Laje (63,32%); Cerâmica + Laje (64,31%) e Aço trapezoidal + sem Laje (64,61%).

Figura 4-26: PHFT_{UH} dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.
(PHFT_{UH}: Percentual de horas de ocupação da UH dentro de uma faixa de temperatura operativa)



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

As Figura 4-27 e 4-28, apresentam os valores da temperatura operativa anual máxima e mínima (Tomax e Tomín), assim como para a análise do PHFT, todas as composições com a telha termoacústica apresentaram os melhores resultados. As telhas comuns (fibrocimento, cerâmica e aço trapezoidal) quando empregado a manta

aluminizada em sua composição tiveram reduções significativas nas temperaturas internas máximas no verão, já para o inverno a manta proporcionou aumento nas temperaturas internas, porém não tão significativas quanto a redução no verão. Se tratando do comportamento das composições com e sem a laje, percebe-se que existe uma diferença ínfima, tanto para Tomáx (Figura 4-27) quanto para Tomín (Figura 4-28).

Figura 4-27: Tomáx_{UH} dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.
(Tomáx_{UH}: Temperatura operativa anual máxima da UH)

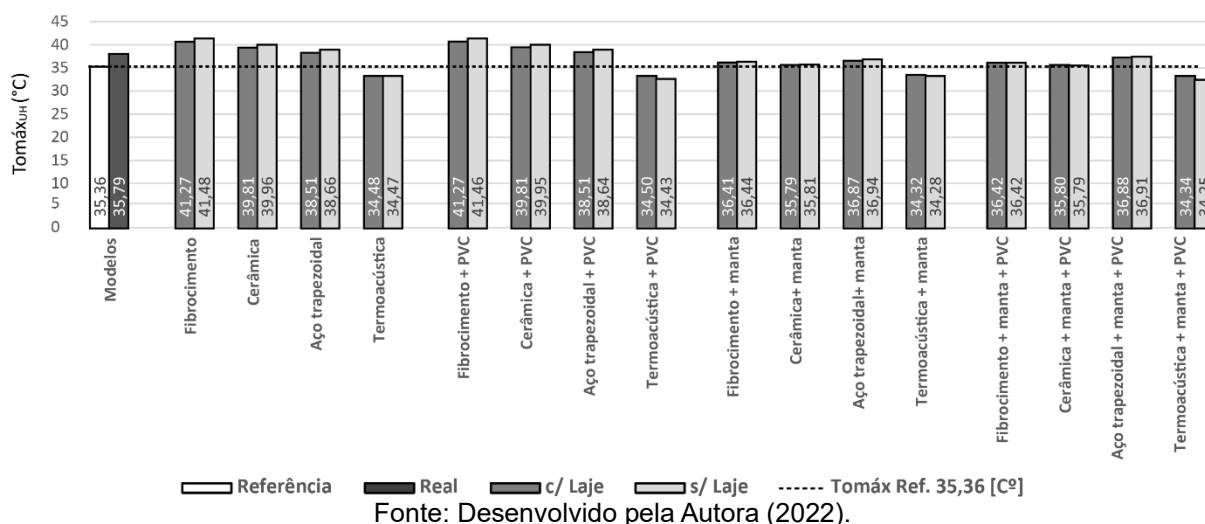
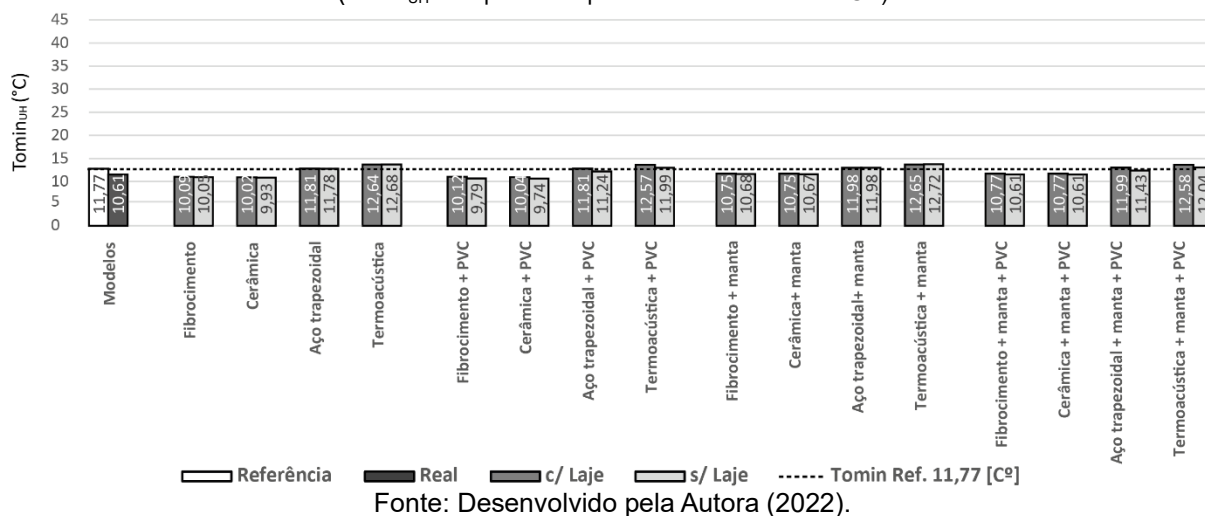


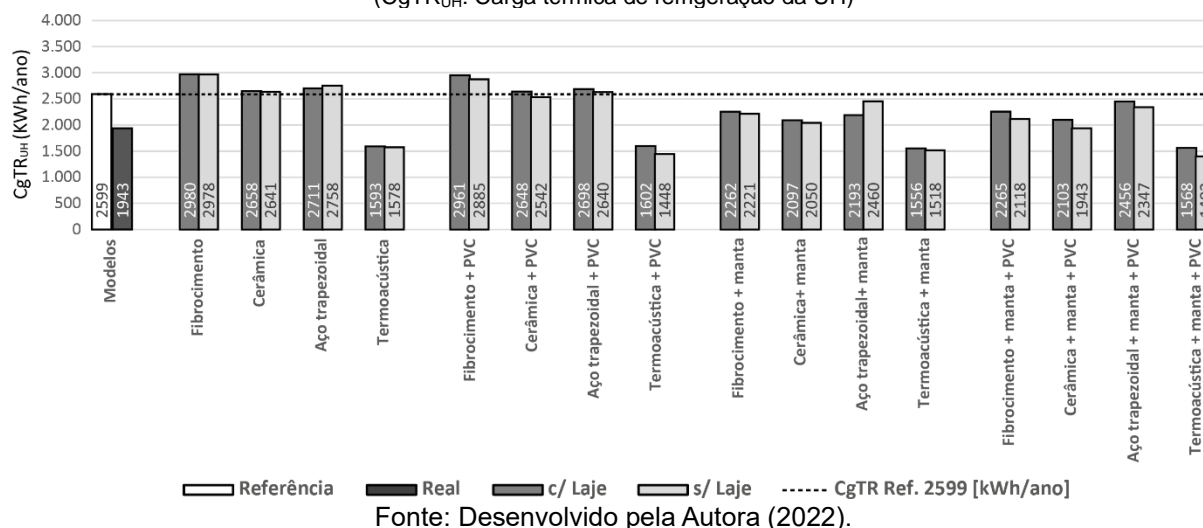
Figura 4-28: Tomín_{UH} dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.
(Tomín_{UH}: Temperatura operativa anual mínima da UH)



Em relação aos valores da carga térmica de refrigeração (CgTR) apresentados na Figura 4-29, de um modo geral os melhores resultados para cada tipo de composição são as que possuem a telha termoacústica. Entretanto, vale ressaltar que, as composições que possuem a manta aluminizada renderam

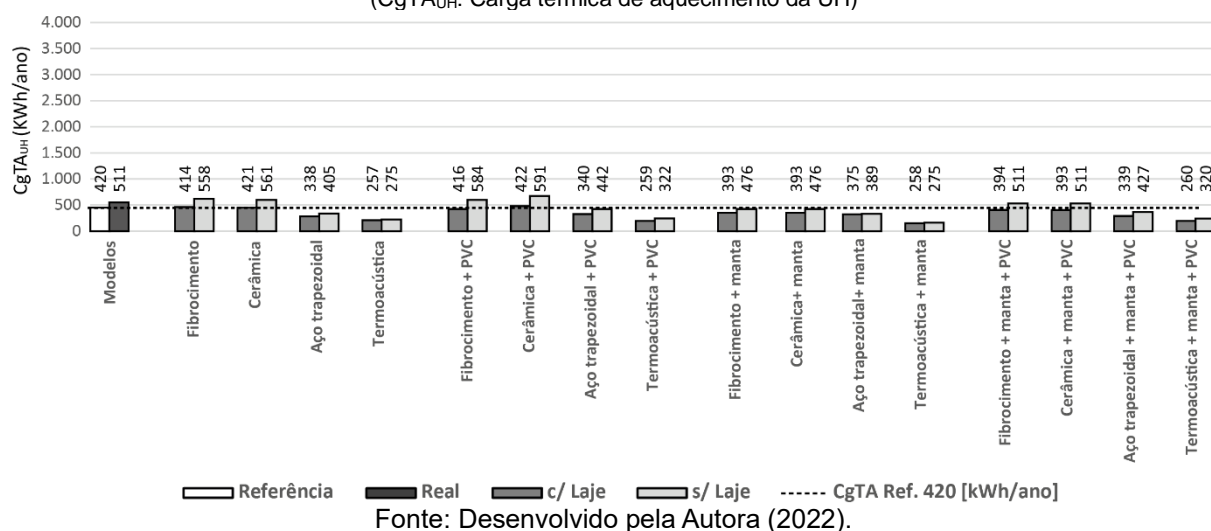
resultados satisfatórios quando combinados com as telhas de fibrocimento, cerâmica e aço trapezoidal. Os melhores valores de $CgTR_{UH}$, para cada tipo de telha são: 1402 kWh/ano (Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje); 1943 kWh/ano (Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje); 2118 kWh/ano (Fibrocimento + Manta + sem Laje) e 2193 kWh/ano (Aço trapezoidal + Manta + Laje).

Figura 4-29: $CgTR_{UH}$ dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas. ($CgTR_{UH}$: Carga térmica de refrigeração da UH)



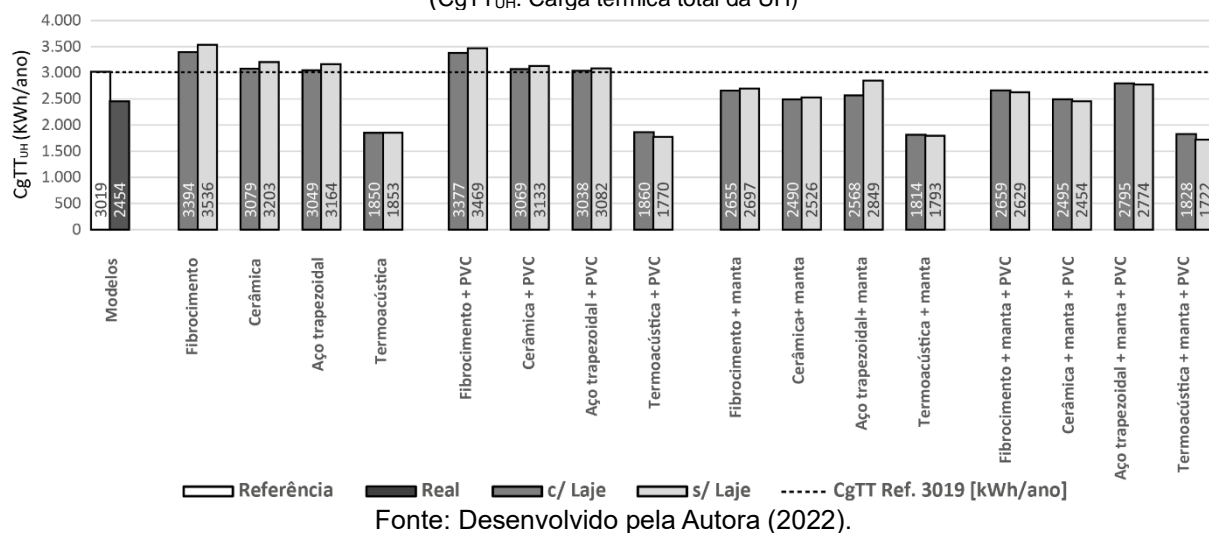
A Figura 4-30, representa o consumo da carga térmica de aquecimento ($CgTA$) das composições, diferente da $CgTR$, todas as composições sem a laje tiveram um aumento significativo na $CgTA$, quando comparadas com as que possuem a laje na composição. Assim como para a $CgTR$, as composições que possuem a manta aluminizada renderam resultados satisfatórios na redução da $CgTA$, quando combinados com as telhas de fibrocimento, cerâmica e aço trapezoidal. A telha termoacústica continua representando os melhores resultados até então para todas as composições. Os melhores valores no consumo de carga térmica para aquecimento, para cada tipo de telha são: 257 kWh/ano (Termoacústica + sem Laje); 339 kWh/ano (Aço trapezoidal + Manta + PVC + Laje); 393 kWh/ano (Cerâmica + Manta + PVC + Laje e Cerâmica + Manta + Laje) e 393 kWh/ano (Fibrocimento + Manta + sem Laje).

Figura 4-30: CgTA_{UH} dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.
(CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento da UH)



A Figura 4-31 apresenta o gráfico com a carga térmica total (CgTT) das composições, como já esperado, os melhores resultados estão em todas as composições que possuem a telha termoacústica. Os melhores valores para cada tipo de telha são: 1722 kWh/ano (Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje), com uma redução de 43% em relação a CgTT_{ref} (3019 kWh/ano); 2454 kWh/ano (Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje) redução de 18% em relação a CgTT_{ref}; 2629 kWh/ ano (Fibrocimento + Manta + PVC + sem Laje) redução de 12% em relação a CgTT_{ref} e 2774 kWh/ano (Aço trapezoidal + Manta + PVC + sem Laje) redução de 8% em relação a CgTT_{ref}. O resultado mais baixo, é para a composição com a telha Fibrocimento + sem Laje (3536 KWh/ano), no qual ultrapassou 17% em relação a CgTT_{ref}.

Figura 4-31: CgTT_{UH} dos resultados das simulações, avaliações entre as telhas.
(CgTT_{UH}: Carga térmica total da UH)



A Tabela 4-5 apresenta para análise comparativa entre as composições, todos os valores dos resultados que foram apresentados separadamente.

Tabela 4-5: Resultados geral das simulações com os 4 modelos de telhas.

Modelo Ref.		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimen. + laje con.		64,67%	-	35,36	11,77	2599,15	419,88	3019	-
Composições Fibrocimento		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Fibrocimento	c/ L.	63,32%	-1,35%	41,27	10,09	2979,82	413,71	3394	-12%
	s/ L.	63,40%	-1,28%	41,48	10,05	2978,03	557,85	3536	-17%
Fibrocimento + PVC	c/ L.	63,50%	-1,18%	41,27	10,12	2961,11	415,76	3377	-12%
	s/ L.	64,02%	-0,65%	41,46	9,79	2884,55	584,09	3469	-15%
Fibrocimento + manta	c/ L.	67,51%	2,84%	36,41	10,75	2261,79	392,92	2655	12%
	s/ L.	67,65%	2,98%	36,44	10,68	2221,41	476,06	2697	11%
Fibrocimento + manta + PVC	c/ L.	67,42%	2,74%	36,42	10,77	2265,24	393,86	2659	12%
	s/ L.	68,61%	3,94%	36,42	10,61	2118,36	510,99	2629	13%
Composições Cerâmica		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Cerâmica	c/ L.	64,31%	-0,37%	39,81	10,02	2657,92	420,60	3079	-2%
	s/ L.	64,41%	-0,27%	39,96	9,93	2641,28	561,23	3203	-6%
Cerâmica + PVC	c/ L.	64,38%	-0,29%	39,81	10,04	2647,53	421,83	3069	-2%
	s/ L.	65,22%	0,55%	39,95	9,74	2542,12	591,00	3133	-4%
Cerâmica + manta	c/ L.	68,16%	3,49%	35,79	10,75	2097,20	392,74	2490	18%
	s/ L.	68,36%	3,69%	35,81	10,67	2049,96	476,27	2526	16%
* Cerâmica + manta + PVC	c/ L.	68,08%	3,40%	35,80	10,77	2102,63	392,63	2495	17%
	s/ L.	69,39%	4,71%	35,79	10,61	1942,89	511,40	2454	19%
Composições Aço trapezoidal		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Aço trapezoidal	c/ L.	64,76%	0,09%	38,51	11,81	2710,69	338,37	3049	-1%
	s/ L.	64,61%	-0,06%	38,66	11,78	2758,42	405,43	3164	-5%
Aço trapezoidal + PVC	c/ L.	64,91%	0,24%	38,51	11,81	2698,15	339,93	3038	-1%
	s/ L.	65,37%	0,69%	38,64	11,24	2640,14	442,21	3082	-2%
Aço trapezoidal + manta	c/ L.	66,55%	1,88%	36,87	11,98	2193,09	374,91	2568	15%
	s/ L.	66,70%	2,03%	36,94	11,98	2460,21	389,01	2849	6%
Aço trapezoidal + manta + PVC	c/ L.	66,50%	1,83%	36,88	11,99	2455,96	338,57	2795	7%
	s/ L.	67,46%	2,79%	36,91	11,43	2347,32	426,75	2774	8%
Composições Termoacústica		Ventilado Naturalmente (VN)				Condicionado Artificialmente (CA)			
		PHFT [%]	Δ PHFT [%]	Tomáx [°C]	Tomín [°C]	CgTR [kWh]	CgTA [kWh]	CgTT [kWh]	RedCgTT [%]
Termoacústica	c/ L.	69,45%	4,78%	34,48	12,64	1592,92	256,63	1850	39%
	s/ L.	70,06%	5,38%	34,47	12,68	1577,79	274,86	1853	39%
Termoacústica + PVC	c/ L.	69,29%	4,61%	34,50	12,57	1601,61	258,53	1860	38%
	s/ L.	70,85%	6,17%	34,43	11,99	1448,41	321,62	1770	41%
Termoacústica + manta	c/ L.	70,04%	5,37%	34,32	12,65	1555,76	258,33	1814	40%
	s/ L.	70,96%	6,29%	34,28	12,72	1517,84	275,02	1793	41%
Termoacústica + manta + PVC	c/ L.	69,76%	5,09%	34,34	12,58	1567,88	259,79	1828	39%
	s/ L.	71,50%	6,83%	34,25	12,04	1402,42	319,84	1722	43%

* Cerâmica + manta + PVC: Modelo Real

c/L.: Com Laje; s/ L.: Sem Laje; PHFT: Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa;

Δ PHFT: Incremento do percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{real} - PHFT_{ref}$); Tomáx_{UH}: Temperatura operativa anual máxima; Tomín_{UH}: Temperatura operativa anual mínima;

CgTR_{UH}: Carga térmica de refrigeração; CgTA_{UH}: Carga térmica de aquecimento; CgTT_{UH}: Carga térmica total;

RedCgTT_{UH}: Redução da carga térmica total ($CgTT_{real} - CgTT_{ref}$).

Menor Valor Legenda Maior Valor

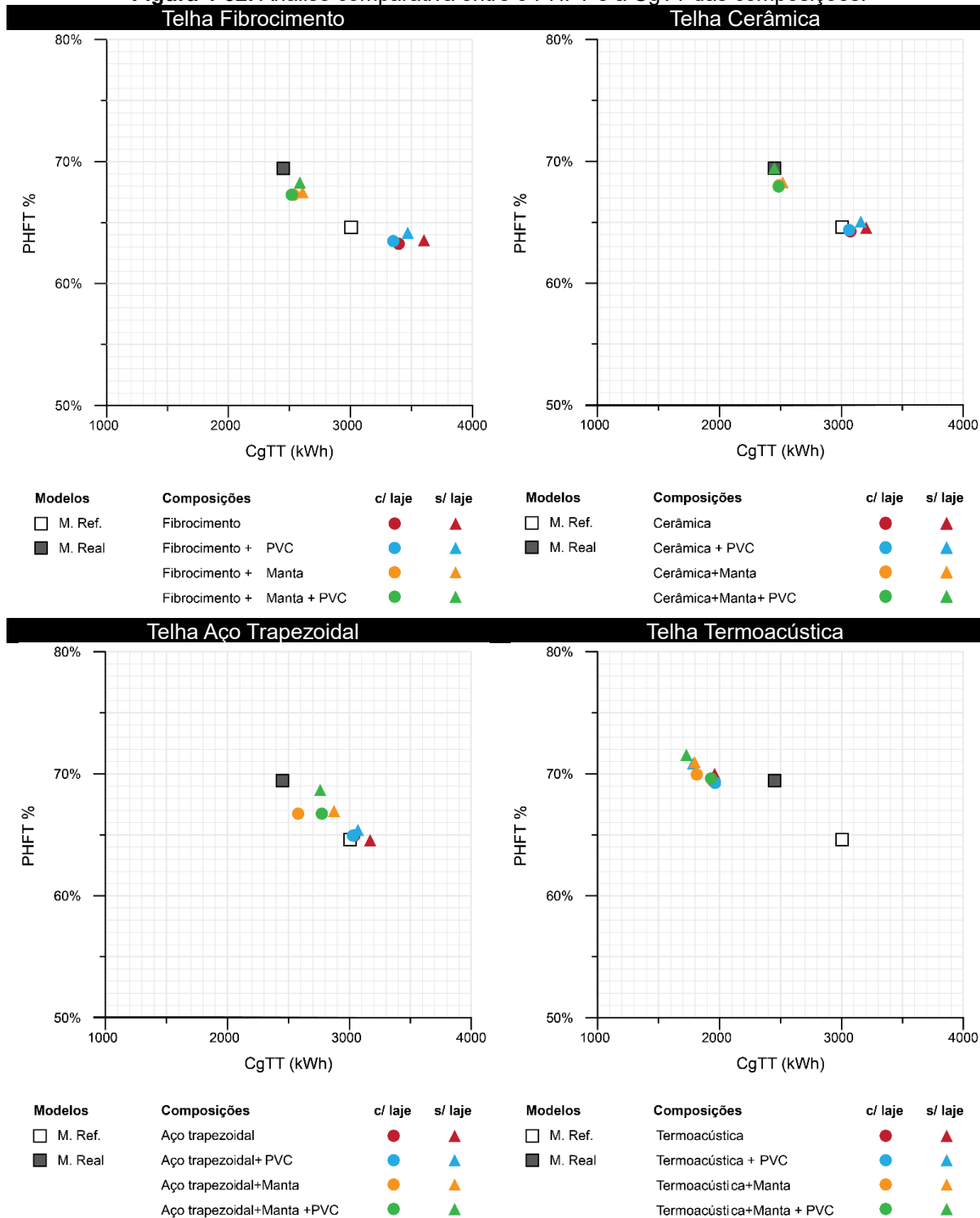
Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Outro ponto para se observar, é a relação direta da baixa transmitância térmica (ver Apêndice F), e o valor do PHFT. Não é uma regra, a menor transmitância ser a composição com o melhor PHFT, vice e versa, um exemplo a composição com o melhor PHFT 71,50% (Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje) ($U= 0,54 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$); ($CT= 350 \text{ KJ}/(\text{m}^2.\text{K})$) comparada com a composição de menor transmitância $U= 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ (Termoacústica + Manta + Laje) (PHFT 70,04%); ($CT= 255,3 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$), por mais que essa seja a transmitância de menor valor o PHFT dessa composição não foi a que obteve o desempenho mais alto, essa relação se repete para as outras telhas. Isso se dá pela seguinte questão, o desempenho de um material interfere diretamente no desempenho do outro, por isso deve observar os valores dos resultados e analisar em conjunto com as propriedades dos materiais de cada composição, para a análise das propriedades térmicas dos materiais foram utilizadas as tabelas resumos do modelo real apresentadas na seção 3.1.4.1 (Tabelas 3-4 e 3-5), e completas no Apêndice C. A tabela referente ao resumo das propriedades das composições dos sistemas de coberturas, está na seção 3.1.4.1 (Tabela 3-10), e completas Apêndice F.

4.3 RELAÇÃO DOS SISTEMAS DE COBERTURAS MAIS EFICIENTES

A Figura 4-32 apresenta os gráficos para cada tipo de telha simulada, constam os valores de $PHFT_{UH}$ e $CgTT_{UH}$ de todas as combinações.

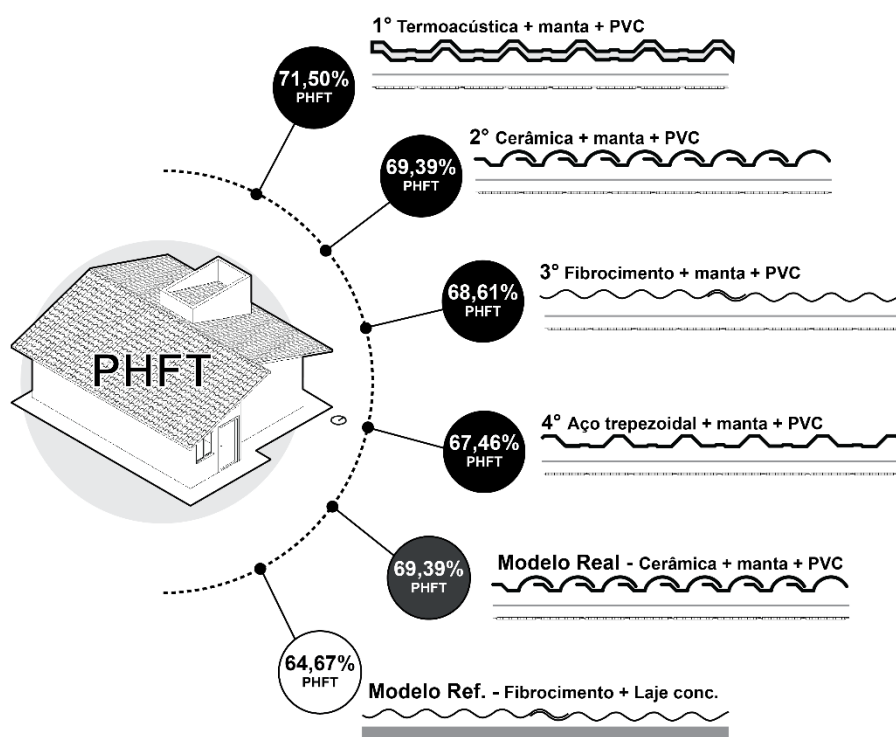
Figura 4-32: Análise comparativa entre o PHFT e a $CgTT$ das composições.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

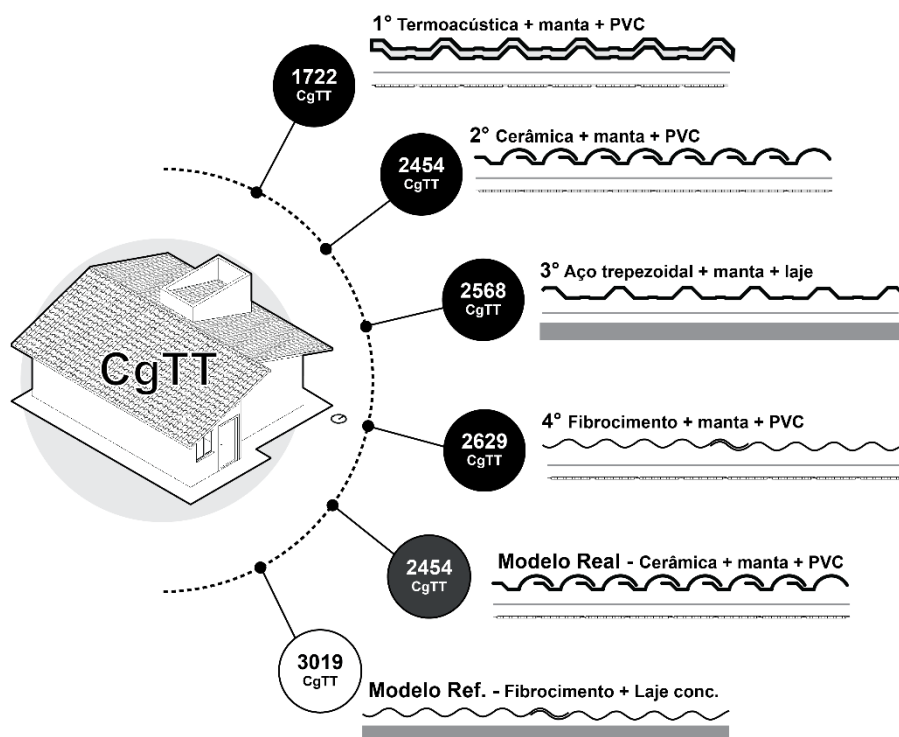
Na Figura 4-32, os valores que se apresentam mais para a esquerda obtiveram o menor consumo energético, carga térmica total (CgTT), e quanto mais para cima o melhor o percentual de horas dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT). Sem dúvidas, as composições com a telha termoacústica obtiveram os melhores resultados do ponto de vista termoenergético, para todas as composições analisadas. Na sequência, a telha cerâmica apresentou os melhores valores, comparada as demais (fibrocimento e aço trapezoidal). Quanto ao desempenho térmico das composições com e sem laje, todas as composições sem laje obtiveram resultados com desempenho mais elevado, exceto pela CgTT da composição com Aço trapezoidal + Manta + Laje (2568 KWh/ano) (Tabela 4-5), por último, para finalizar a discussão, os resultados obtidos das composições com a manta aluminizada para as telhas de fibrocimento, cerâmica e aço trapezoidal, foram muito superiores as composições que não possuem a manta, isso porque a manta teve um papel importante no isolamento da cobertura, atuando como isolante por baixa emissividade. Já para a telha termoacústica a manta aluminizada pouco diferiu nos resultados. A seguir, será apresentado os tipos de sistemas de coberturas mais eficientes do ponto de vista termoenergético para a cidade de Foz do Iguaçu (Figuras 4-33 e 4-34).

Figura 4-33: Melhores sistemas de coberturas, de acordo o desempenho térmico da edificação (PHFT) para cada tipo de telha.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Figura 4-34: Melhores sistemas de coberturas, de acordo o desempenho energético da edificação (CgTT) para cada tipo de telha.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

Conforme apresentado nas subseções 4.1.1.1, 4.1.2.1, 4.1.3.1 e 4.1.4.1, o atendimento ao nível mínimo da norma de desempenho NBR 15575, foi obtido por todas as telhas, incluindo o modelo real (Cerâmica + Manta + PVC), porém, não foram todas as composições que atingiram. Nenhuma composição atingiu o nível intermediário da norma, em função do $PHFT_{\min}$ de 7,49%. Foram observadas diferenças com relação ao $\Delta PHFT$, que determina o quão melhor um modelo real é em relação ao modelo de referência no que diz respeito às horas ocupadas dentro da faixa de temperatura operativa, e a $RedCgTT$ que determina a diferença em percentual da demanda energética para aquecimento. As composições com o desempenho mais baixo em relação à referência, são, Fibrocimento + Laje (-1,35% de $\Delta PHFT$), Cerâmica + Laje (-0,37% de $\Delta PHFT$) e Aço trapezoidal + sem Laje (-0,06% de $\Delta PHFT$) apresentaram os valores mais baixos na análise, implicando para estas composições valores maiores no consumo de carga térmica para climatização. Por outro lado, as composições com a telha Cerâmica + Manta + PVC + sem Laje (4,71% de $\Delta PHFT$), Fibrocimento + Manta + PVC + sem Laje, Aço trapezoidal + Manta + PVC + sem Laje (2,79% de $\Delta PHFT$) e as composições com a telha Termoacústica, sendo a melhor Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje (6,83% de $\Delta PHFT$), apresentaram maiores

diferenças percentuais em relação ao modelo de referência, bem como maiores reduções de carga térmica para climatização.

As composições avaliadas reforçaram a problemática desta pesquisa, principalmente no que tange o impacto da cobertura no desempenho termoenergético das habitações, muito em função da observação de que a variação do elemento externo de revestimento, bem como as composições dos sistemas de coberturas implicaram em diferenças percentuais, sendo superiores a 5% de $\Delta PHFT$ e 50% de RedCgTT entre o desempenho mais alto e o mais baixo (mais alto: Termoacústica + Manta + PVC + sem Laje (6,83% $\Delta PHFT$)) e, (mais baixo: Fibrocimento + Laje (-1,35% $\Delta PHFT$)).

CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi desenvolvido com base no objetivo de avaliar o desempenho termoenergético dos variados sistemas de coberturas usualmente empregados nas edificações residenciais, em Foz do Iguaçu, Paraná, adequado ao clima subtropical úmido, Zona Bioclimática 3 (ZB3). Atendendo as exigências da norma de Desempenho ABNT NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), com a avaliação das múltiplas combinações de sistemas de coberturas, buscou-se identificar as diferenças de desempenho térmico e energético a partir das variações destas composições.

Para a avaliação dos sistemas de coberturas, foi elaborado um projeto com os parâmetros do novo programa habitacional brasileiro, Casa Verde e Amarela (CVA). Realizou-se um total de 66 simulações computacionais para análise termoenergética, sendo, 64 variações no modelo real e 2 no modelo de referência, com a utilização do programa *EnergyPlus*.

5.1 DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DOS SISTEMAS DE COBERTURAS AVALIADOS PARA FOZ DO IGUAÇU, ZB3

A seguir, serão apresentados nos próximos parágrafos as discussões das principais conclusões acerca das avaliações termoenergéticas dos sistemas de coberturas para Foz do Iguaçu, ZB3.

Os resultados demonstraram que as coberturas têm uma contribuição significativa para a melhoria do desempenho térmico e energético de uma habitação, especificamente para a região climática da cidade analisada, ZB3, clima subtropical úmido “Cfa”. Houve uma diminuição considerável no consumo energético total e melhora no conforto térmico do modelo real comparada com o modelo referência, demonstrando, portanto, a relevância do sistema de cobertura para a edificação do ponto de vista termoenergético.

De um modo geral, os resultados de percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), reforçaram as recomendações da norma 15220 para a ZB3, sendo, cobertura leve e isolada com transmitância (U) $\leq 2,00$ (ABNT, 2005e). Em todas as composições analisadas, sem a laje, os resultados do PHFT foram melhores quando comparados com as composições com a utilização da laje, excetuando, uma composição com a telha de aço trapezoidal (Aço trapezoidal

+ Laje, PHFT 64,76% (U= 0,88)) comparada a composição sem laje houve uma diferença mínima de 0,15% (Aço trapezoidal + sem Laje, PHFT 64,61% (U= 4,76)).

Os melhores resultados de desempenho termoenergético foram alcançados para as composições que possuem isolamento térmico, sendo estes, as composições com a telha termoacústica e com a manta aluminizada, que atua como isolante por baixa emissividade. Para a telha termoacústica, independente do uso de forro, laje, manta e combinações de tais elementos, a telha é o componente influência diretamente em termos de desempenho termoenergético.

Percebeu-se com os resultados, que as composições com as telhas comuns (fibrocimento, cerâmica e aço trapezoidal), sofreram as maiores variações de valores no desempenho termoenergético, quando acrescida a manta aluminizada nas composições. Conclui-se, assim, que, para a ZB3, nos sistemas de coberturas analisados, a maior diferença no desempenho termoenergético está nas composições que possuem isolante térmico, sendo primordial para as edificações de Foz do Iguaçu, acrescentar material isolante na cobertura. E que para a obtenção de desempenho termoenergético, das composições analisadas, é indiferente o uso da laje, isso, considerando a análise de acordo com os padrões de uso e ocupação conforme a NBR 15575 (2021b).

Em todas as soluções que resultaram em melhor desempenho energético, houve uma redução considerável da carga térmica total da edificação (RedCgTT), chegando a 43% de RedCgTT para a melhor composição em relação ao modelo referência. As composições que demandaram menos carga térmica total (CgTT) para condicionamento artificial (CA) conseqüentemente, foram também as que possuíam isolante térmico ou da telha termoacústica ou pelo uso da manta aluminizada.

Através dos dados obtidos nas simulações, pode-se compreender a relevância da pesquisa com os resultados obtidos. Ao final da pesquisa, o resultado principal esperado foi atingido, avaliar a eficiência termoenergética de diferentes sistemas de coberturas, com o objetivo de verificar qual dos sistemas de coberturas analisados proporcionaram temperaturas internas mais adequadas em termos de conforto térmico e ainda, aumentou a eficiência energética de uma habitação, para a cidade de Foz do Iguaçu – ZB3, clima subtropical úmido.

Quanto a Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2021b), percebeu-se que os valores das temperaturas máximas (Tomáx) e as temperaturas mínimas (Tomín) para atendimento do nível mínimo, estão muito distantes do que seria

considerado o ideal para a cidade de Foz do Iguaçu, levando em conta todas as características climáticas, inclusive as condições de umidade relativa elevada. O limite das Temperaturas máximas (Tomáx), de até 37,36°C, é considerada de extremo desconforto térmico para o usuário no verão, bem como as temperaturas mínimas, 10,77°C, no inverno, muito abaixo de um percentual dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT) ideal para o clima da cidade.

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

No decorrer do desenvolvimento da pesquisa, foi possível identificar as seguintes limitações do trabalho:

- Trabalhar com a edição anterior da norma NBR 15220-2 (edição de 2005), as simulações foram iniciadas antes da atualização NBR 15220-2 (edição de 2022), inviabilizando trabalhar com a norma em vigor;
- A desconsideração da porosidade das telhas devido as limitações do programa de simulação computacional. A porosidade permite a absorção de água da chuva ou da condensação e influi significativamente na redução do fluxo de calor no interior da edificação.
- O trabalho foi limitado ao uso e ocupação de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2021b). Seria interessante fazer uma análise comparativa com outros usos e ocupações dos ambientes.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Essa pesquisa possibilitou identificar a necessidade de uma série de novos estudos. A seguir serão apresentadas as sugestões para trabalhos futuros:

- Analisando o modelo real e o ganho de calor pela cobertura, percebeu-se a importância em avaliar o sistema construtivo da construção como um todo. A edificação do modelo real, foi projetada considerando as necessidades mínimas estipuladas por normativas, dentre elas as dimensões e disposições das aberturas necessárias para iluminação e ventilação natural. Foi necessário trabalhar com janelas para proporcionar ventilação cruzada na sala e cozinha, grande parcela de radiação que é absorvida pelas fachadas são provenientes

das aberturas desses ambientes, localizadas nas fachadas leste, norte e oeste, sendo a fachada oeste, nesse caso, um indício da situação mais crítica no ganho de carga térmica, pois a abertura é consideravelmente grande, recebendo uma parcela considerável de radiação direta, desencadeando um superaquecimento na edificação, através do calor proveniente da fachada oeste. Do ponto de vista de análise geral, é necessário a ampliação da pesquisa, para análise da edificação como um todo, considerando o estudo dos ambientes isolados. O edifício é um sistema que interage entre si, o desempenho de um componente afeta diretamente o desempenho de outro. Para as próximas pesquisas, seria interessante aprofundar as análises, de modo a identificar os fenômenos físicos da edificação;

- Aprofundar a discussão, buscando analisar e interpretar os fenômenos da edificação, analisando sem os padrões de ocupação estipulados pela norma (número de horas em que um determinado ambiente é ocupado, considerando a dinâmica dos ambientes da edificação). Considerar variar o uso e ocupação, objetivando analisar as temperaturas operativas mínimas e temperaturas operativas máximas em outros horários dos padrões de ocupação estipulados pela norma, e principalmente analisar se existe diferença no PHFT com e sem o uso da laje nos demais horários;
- Testar o desempenho termoenergético da habitação com outros materiais isolantes, outros tipos de telhas e outros tipos de forros;
- Realizar a pesquisa da eficiência termoenergética dos sistemas de coberturas para as demais Zonas Bioclimáticas (ZB1, ZB2, ZB4, ZB5, ZB6, ZB7 e ZB8);
- Avaliar o custo das composições construtivas. O tempo de retorno de um investimento e a análise de *payback* estão atrelados com a necessidade de identificar se um determinado investimento é viável dentro de um espaço temporal, de modo a apontar se o retorno do recurso investido é possível ou não, a partir das condicionantes econômicas estabelecidas. Pode-se comparar o custo benefício dos sistemas de coberturas, com os resultados de desempenho térmico. Como exemplo, a composição com a telha Cerâmica + Manta + PVC, obteve um PHFT de 69,39%, se comparada a composição com o melhor resultado, telha Termoacústica + Manta + PVC, PHFT 71,50%, pouca diferença, seria interessante avaliar os custos e correlacionar com os valores de cada sistema, obtendo uma análise final de custo benefício.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO METÁLICA (ABCEM). **Telhas metálicas revolucionam a construção civil**. [São Paulo]: ABCEM, 68. ed., 2005.

ABCEM. **Manual técnico telhas de aço**. 1. ed. [São Paulo]: ABCEM, p. 9. 2009.

ABCEM. **Cenário dos Fabricantes de Telhas de Aço e Steel Deck**. v. 119, p. 28–29, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo setorial 2009 ano base 2008**: Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Curitiba, ABIMCI, Departamento técnico da ABIMCI, p. 48, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5643**: Telhas onduladas de fibrocimento sem amianto: verificação da resistência a cargas uniformemente distribuídas. Rio de Janeiro, ABNT, p. 6, 2022a.

ABNT. **NBR 7196**: Telhas de fibrocimento sem amianto: execução de coberturas e fechamentos laterais: Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.

ABNT. **NBR 7581-1**: Emenda 1: Telha ondulada de fibrocimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

ABNT. **NBR 8039**: Projeto e execução de telhados com telhas cerâmicas tipo francesa: procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 1983.

ABNT. **NBR 14514**: telhas de aço revestido de seção trapezoidal: requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.

ABNT. **NBR 15210-1**: Telhas onduladas e peças complementares de fibrocimento sem amianto. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

ABNT. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações: parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, ABNT, p. 7, 2005a.

ABNT. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações: Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações: resistência e transmitância térmica: métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro, ABNT, 2022b.

ABNT. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações: Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, ABNT, 2005d.

ABNT. **NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações: parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, ABNT, 2005b.

ABNT. **NBR 15220-5**: Desempenho térmico de edificações: Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. Rio de Janeiro, ABNT, 2005c.

ABNT. **NBR 15310**: Componentes Cerâmicos: telhas: Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

ABNT. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais: Desempenho: Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, ABNT, 2013.

ABNT. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais: desempenho: Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, ABNT, 2021b.

ABNT. **NBR 15575-5**: Edificações habitacionais: desempenho: parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, ABNT, p. 63, 2021a.

ABNT. **NBR 16373**: Telhas e painéis termoacústico: Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro, ABNT, p. 92, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. **Telhas**. Rio de Janeiro, ANICER, 2022. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/produtos/telhas/>. Acesso em: 17 out. 2022.

AGUIAR, Clarissa Martins de Lucena Santafe. **Terraço-jardim**: uma ideia para (re)inventar. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ALLEN, D. P. E. **History of Cold Formed Steel**. *Structure Magazine*, v. 11, nov, p. 28–32, 2006.

ALVARES, C. A.; *et al.* *Köppen's climate classification map for Brazil*. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDREASI, W. A. **Método para avaliação de conforto térmico em região de clima quente e úmido do Brasil**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina p. 204, Florianópolis, 2009.

ASPHALT ROOFING MANUFACTURERS ASSOCIATION. **History of Asphalt Roofing**. ARMA. 2022 Disponível em: <https://www.asphaltroofing.org/about-arma/about-us/>. Acesso em: 17 out. 2022.

AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 332p.

BALTHAZAR, R. S. **A permanência da autoconstrução**: um estudo de sua prática no Município de Vargem Grande Paulista. Dissertação (Mestrado em Habitat) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BAYER. I.G. **Farbenindustrie AG (1925–1945)**. Disponível em: <https://www.bayer.com/en/history/1925-1945>. Acesso em: 17 out. 2022.

BECK, H. E.; *et al.* **Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution**. *Scientific Data*, 2020. v. 5, n. 180214, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata2018214>. Acesso em: 17 out. 2022.

BEHLING, Sophia.; BEHLING, Stephan. **Sol power: la evolucion de la arquitectura sostenible**. Dialnet, Barcelona: Gustavo Gili, 2002. ISBN: 968-887-396-9.

BEZERRA, P.; *et al.* **Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households**. *Energy and Buildings*, 2020. v. 234, n. 110696, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110696> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820334824?via%3Dihub> Acesso em: 17 out. 2022.

BLOT, G. **History of the Louvre**. Disponível em:

<https://www.louvre.fr/en/histoirelouvre/history-louvre/periode-3>. Acesso em: 17 out. 2022.

BONDUKI, Nabil. **Política habitacional e inclusão social no Brasil**: revisão histórica e novas perspectivas no governo Lula. *arq.urb*, [S. l.], n. 1, p. 70–104, 2008. Disponível em: <https://revistaarqurb.com.br/arqurb/article/view/81>. Acesso em: 17 out. 2022.

BORGE-DIEZ, D.; *et al.* **Passive climatisation using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti**. *Building and Environment*, v. 59, p. 116–126, 2012. DOI:10.1016/j.buildenv.2012.08.013

BORGES, Alberto de Campos. **Prática das Pequenas Construções**. v. 2, 6. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

BRAGA, C.; FERREIRA, V. C. **Os impactos ambientais no setor de energia elétrica brasileiro e a sua relação com o resultado líquido do exercício**. Congresso Anpcont 9, 2015, Curitiba, v. 53, n. 9, p. 1689–1699. Disponível em: <https://anpcont.org.br/pdf/2015/CUE201.pdf> Acesso em: 17 out. 2022.

BRASIL. **Decreto N° 3.330, de 6 de janeiro de 2000**. Dispõe sobre a redução do consumo de energia elétrica em prédios públicos da Administração Pública Federal, e dá outras providências. Brasília, DF, 2000.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2021**. Empresa de Pesquisa Energética, p. 268, 2021.

BRASIL. **Lei n° 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre política nacional de conservação e uso racional de energia. Brasília, DF, Casa Civil, 2001.

BRASIL. **Medida Provisória n° 1.055, de 28 de junho de 2021**. Institui a Câmara de Regras Excepcionais para Gestão Hidroenergética com o objetivo de estabelecer medidas emergenciais para a otimização do uso dos recursos hidroenergéticos e para o enfrentamento da atual situação de escassez hídrica, a fim de garantir a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético no País. Brasília, DF, 2021.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M. **Contribuição da Cor da Cobertura na Melhoria do Desempenho Térmico de Habitação no Período de Verão**. *In*: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído 8; Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente

Construído 9, 2015. Disponível em: <https://silo.tips/download/contribuicao-da-corda-cobertura-na-melhoria-do-desempenho-termico-de-habitacao-no>. Acesso em: 17 out. 2022.

BRUAND, Yves. **Arquitetura contemporânea no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Perspectiva, 2010.

BRUNO, P.; FARIA, P. **Cabanas de materiais vegetais na Herdade da Comporta**: Tradição construtiva e novas abordagens. Terra em Seminário 2010. Lisboa: Argumentum, p. 240–243, 2010.

BUTTI, K.; PERLIN, J. **A Golden Thread**. Madrid: Hermann Blume, 1985. ISBN: 8472143112

Calil, J. C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira**: exemplos de cálculo. 1. ed. São Paulo: Pini Ltda., 2010.

CÂMARA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Decreto no 57.776, de 7 de julho de 2017**: Regulamenta a Lei nº 16.642, de 9 de maio de 2017, que aprovou o Código de Obras e Edificações do Município de São Paulo; define os membros da Comissão de Edificações e Uso do Solo - CEUSO. São Paulo: Secretaria do Governo Municipal, p. 156, 2017.

CARDOSO, F. F. **Coberturas em Telhados**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, PCC 436 – Tecnologia da Construção de Edifícios II São Paulo, 2000. Notas de Aula.

CARMO, K. M.; SILVA, M. C.; MORELLI, C. L. **Reaproveitamento de resíduo de espuma rígida de poliuretano em uma matriz termoplástica de poliuretano**. Research, Society and Development, v. 9, n. 3, p. e127932695, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/2695/1996>. Acesso em: 17 out. 2022.

CARRIER. **Meet the Inventor of Modern Air Conditioning: Weather makers to the world: The story of a company**. Disponível em: <https://www.williscarrier.com/1876-1902.php>. Acesso em: 17 out. 2022.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa**: uma abordagem prática. 4. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2012. ISBN 0073398128.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia Científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 9788576050476.

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A. **New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power**. *Journal of Applied Physics* v. 25, n.5, p. 676, 1954; <https://doi.org/10.1063/1.1721711>. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721711>. Acesso em: 17 out. 2022.

CHUA, G. **Structural Insulated Panels: tracking the evolution of the 21st century building system**. *Architecture & Design*, 2016. Disponível em: <https://www.architectureanddesign.com.au/features/product-in-focus/structural-insulated-panels-the-evolution-of-the-2>. Acesso em: 17 out. 2022.

CLIMATE ONE BUILDING. **Climate One Building**. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/WMO_Regio_3_South_America/BRA_Brazil/index.html#IDPR_Parana-. Acesso em: 17 out. 2022.

CLIMATE ONE BUILDING. **Climate/Weather Data Sources**. Disponível em: <https://climate.onebuilding.org/sources/default.html>. Acesso em: 17 out. 2022.

COELHO, T. C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. **Desempenho térmico e absorvância solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural**. Porto Alegre: Ambiente Construído, v. 17, n. 1, p. 147–161, 2017. DOI:10.1590/s1678-86212017000100129

COLE, E. **La gramática de la arquitectura**. [s.l.] Ediciones Akal, S.A, 2013. ISBN: 9788495677341

CORBUSIER, L. E. **Vers une architecture**. [s.l.] Architecture, v. 11, p. 255, 1924.

CUNHA, E. G. DA. **Elementos de Arquitetura de Climatização Natural**: método projetual buscando a eficiência nas edificações. 2. ed. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2010.

DONOVAN, C.; HANNEY, S. **The 'payback framework' explained**. *Research Evaluation*, v. 20, n. 3, Pages 181–183, 2011. Disponível em: <https://academic.oup.com/rev/article->

abstract/20/3/181/1560281. Acesso em: 17 out. 2022.

DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absorvância de telhas**: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Paulo: IAU USP, 2021. ISBN 978-65-86810-10-3.

ELETROBRAS. **Manual para aplicação do RTQ-R: Residencial**. [s. l.]: Procel Edifica, 2013.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**: ano-base 2005: Classe Residencial. Rio de Janeiro: Eletrobras, Procel, 2007.

ETERNIT. **Catálogo Técnico Fibrocimento**. Disponível em: <https://www. eternit.com.br/catalogos-tecnicos/>. Acesso em: 17 out. 2022.

FERNANDES *et al.* **Desempenho termoenergético de coberturas vegetadas em clima subtropical**. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 9, n. 4, p. 262-275, dez. 2018. ISSN 1980-6809. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8650882>

FOZ DO IGUAÇU. Lei Complementar nº3, de 16 de julho de 1991. **Dispõe sobre o código de obras e edificações do município de Foz do Iguaçu**. Câmara Municipal de Foz do Iguaçu, 1991.

FRAMPTON, K. **História crítica da arquitetura moderna**. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2015. ISBN 9788580632101.

FREIRE, H. S. A. *et al.* **Potencial de uso de cânhamo industrial (Cannabis sativa L.), para a produção de celulose fibra longa**. Boletim Técnico SIF, v. 01, n. 05, p. 1–9, 2021. ISSN 2763-6860.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2006. v. 148

GLANCEY, J. **A história da arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Edições Loyola, 2007. ISBN 8515022834.

GUTIERREZ, G. C. L.; LABAKI, L. C. **Considerações sobre o brise-soleil na arquitetura moderna brasileira**. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído 9, 2005. Disponível em:

<https://docplayer.com.br/4727373-Consideracoes-sobre-o-brise-soleil-na-arquitetura-moderna-brasileira.html>. Acesso em: 17 out. 2022.

GOMES, L. D.; GOMES, J. D.; HACKENBERG, A. M. **Avaliação Do Desempenho Termoenergético Da Madeira Laminada Colada (MLC) Como Alternativa Bioclimática Em Cobertura Residencial**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 9, n. esp , p. 345-362, fev. 2020.

GRUBER *et al.* **Análise do desempenho térmico das paredes e coberturas de uma edificação utilizando concretos e argamassas leves com vermiculita**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental. Florianópolis, v. 9, n. esp, p. 182-196, mai. 2020 182. 2020
DOI: 10.19177/rgsa.v9e0l2020182-196

HUMPHREYS, M. A.; RIJAL, H. B.; NICOL, J. F. **Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors: new insights and an extended database**. *Building and Environment*, v. 63, p. 40–55, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**: Características gerais dos domicílios e dos moradores: 2019. Rio de Janeiro: IBGE, p. 8, 2020. ISBN 9788524045301.

International Energy Agency (IEA). **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning**. Paris: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 17 out. 2022.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Cobertura com estrutura de madeira e telhados com telhas cerâmicas**: manual de execução. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1988.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, SVMA, 2009.

IONESCU, C. *et al.* **The historical evolution of the energy efficient buildings.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 243–253, 2015.
DOI:10.1016/j.rser.2015.04.062

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Manual de Conservação de Telhados.** 1999. Disponível em:
http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/Man_ConservacaoDeTelhados_1edicao_m.pdf. Acesso em: 17 out. 2022

IRONCLAD ROOFING. **The Complete History of Metal Roofing.** 2021. Disponível em: <https://www.ironcladroofs.com/the-complete-history-of-metal-roofing/#>. Acesso em: 17 out. 2022.

JAGUARIBE, H. **Um estudo crítico da história.** 2. ed. São Paulo: Paz & Terra, 2007.

KOLOKOTRONI, M. *et al.* **Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries.** *Energy and Buildings*, v. 176, p. 58–70, 2018.

KRAMEL, C. *et al.* **Amplitudes térmicas diárias no Estado do Paraná e Níveis de Inércia Térmica para habitações com baixo consumo energético.** *Boletim de Geografia*, v. 39, n. 3, p. 1–10, 2022.
DOI:10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e62075.

KRÜGER *et al.* **Desempenho térmico de cobertura vegetada sobre guarita de fibra de vidro.** *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 10, p. e019026, 28 jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8654277>

KUMAR, A.; SUMAN, B. M. **Experimental evaluation of insulation materials for walls and roofs and their impact on indoor thermal comfort under composite climate.** *Building and Environment*, v. 59, p. 635–643, 2013.

LABESEE. **Desempenho térmico em edificações.** Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2010.

LABESEE. **Desempenho térmico em edificações.** Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, v. 7o, p. 239, 2016.

LABESEE. **Transferência de calor na envolvente da edificação.** Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, p. 40, 2008.

LANNA, A. **Ocupação Rino Levi:** Notas sobre evento organizado pela FAU USP e Itaú Cultural. *Vitruvius*, p. 20–22, 2020.

LECHNER, N. **Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects.** 4. ed. *New Jersey:* Wiley, v. 148, 2014. ISBN 978-1-118-58242-8.

MACIEL, C. A. **Villa Savoye:** arquitetura e manifesto. [s.l.]: *Vitruvius*, n. 4, p. 1–5, 2002.

MARTÍNEZ, A. **Habitar la cubierta = Dwelling on the roof.** Barcelona: Gustavo Gili, 2005.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras:** dicas para orçamentistas, estudos de caso, exemplos. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2009.

MICHELS, C. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Relatório de Avaliação:** Programa Minha Casa Minha Vida. Secretaria Especial de Fazenda: Secretaria de Avaliação Planejamento Energia e Loteria, 2020. Disponível em:
<https://www.gov.br/cgu/pt-br/assuntos/noticias/2021/04/cgu-divulga-prestacao-de-contas-do-presidente-da-republica-de-2020/relatorio-de-avaliacao-pmcmv.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Nota Técnica EPE 030/2018:** Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021:** Ano Base 2020. Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012: **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de**

Edificações Residenciais. [s. l.]: INMETRO, 2012.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **O Programa Casa Verde e Amarela.** Secretaria Nacional de Habitação, [s. l., s. d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/habitacao/casa-verde-e-amarela>. Acesso em: 17 out. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Guia prático de eficiência energética:** reunindo a experiência prática do projeto de etiquetagem: Ministério do Meio Ambiente e Ministério da Cultura. 1. ed. Brasília: Secretária de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, MA, 2014.

MOLITERNO, A. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MONTENEGRO, G. **Ventilação e cobertas:** estudo teórico, histórico e descontraído. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

MUNIZ-GÄAL *et al.* **Eficiência térmica de materiais de cobertura.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v.18, n.1, p. 503-518, jan./mar.2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SkgYRpz7bJxVbgCZSQtkcXy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 out. 2022.

CULLEN, W. C.; SNOKE, H.R. **Wind resistance of free-tab asphalt shingles.** U.S.A: Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1959.

OLGYAY, V. **Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism.** [s.l.]: Princeton University Press, 2015.

OLIVEIRA, L. S. **Avaliação dos Limites das Propriedades Térmicas dos Fechamentos Opacos da NBR 15220-3, para Habitações de Interesse Social, da Zona Bioclimática 2.** 2012. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

OSMUNDSON, T. **Roof Gardens: History, Design and Construction.** New York: W. W. Norton & Company, 1999.

OWENS, T. **Creep Performance of Structural Insulated Panels (SIPs).** Forest Products Laboratory, p. 1–9, 2015.

PENNELL, K. **The state of solar shingles.** Disponível em: <https://cabaus.org/2018/02/06/the-state-of-solar-shingles/#:~:text=The solar shingle concept was, with a typical asphalt roof>. Acesso em: 17 out. 2022.

PEREIRA, J. R. A. **Introdução à história da arquitetura:** das origens ao século XXI. Porto Alegre: Bookman, 2010.

PEREIRA, M. **Estruturas tensionadas:** Racionalidade e leveza. ArchDaily. 01 jan. 2018. ISSN 0719-8906. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/886270/estruturas-tensionadas-razionalidade-e-leveza#:~:text=Este%20tipo%20estrutural%20permite%20menor,esfor%C3%A7os%20de%20flex%C3%A3o%20e%20compress%C3%A3>. Acesso em: 17 out. 2022.

PIANCA, J. B. **Manual do construtor:** materiais de construção e técnica construtiva com gravuras ilustrativas. 17. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

PIMENTA *et al.* **Estudo comparativo do desempenho térmico das coberturas de fibra de celulose e betume, fibrocimento e cerâmica.** Colloquium Exactarum, v. 8, n.3, Jul-Set. 2016, p.21–35. DOI: 10.5747/ce.2016.v08.n3.e163

PORTLAND, A. B. C. **Mãos à obra pro:** o guia do profissional da construção. 1. ed. São Paulo: Alaúde, 2013.

RAFFERTY, J. P. **The Living Earth: Climate and Climate Change.** New York: Britannica Educational Publishing, 2011.

REIS, F. S. B.; SOUZA, U. E. L. **Coberturas com telhado:** definições, características gerais e visão analítica. São Paulo: EPUSP, 2007. ISSN: 0103-9830.

RIBERICH, B. L. **Retractable stadium roofs and flooring.** Interface, p. 12–21, 2009.

ROAF, S. *et al.* **Twentieth century standards for thermal comfort: Promoting high energy buildings.** Architectural Science Review, v. 53, n. 1, p. 65–77, 2010.

ROBERTO & MAURO ADVOGADOS. **Banimento do amianto representa um marco importante na qualidade de vida do trabalhador no Brasil.** 16 jan. 2018. ABREA. Disponível em: <https://www.abrea.org.br/noticias/publicacoes/193-banimento-do-amianto-representa-um-marco-importante-na-qualidade-de-vida-do>

trabalhador-no-brasil.html#:~:text=No julgamento realizado em 29,brasileira%2C agora%2C é definitivo. Acesso em: 17 out. 2022.

ROCKWOOL. **A tale of stone**. Disponível em: <https://www.rockwool.com/group/about-us/history/>. Acesso em: 17 out. 2022.

RORIZ, M. **EPview - Beta Version**: Plota algumas das informações contidas nos arquivos climáticos EnergyPlus (EPW). 2012. Disponível em: <https://www.roriz.eng.br/downloads>. Acesso em: 17 out. 2022.

ROSENFELD, K. **12 Things You Didn't Know About Pritzker Laureate Frei Otto**. *ArchDaily*. 11 Mar 2015. ISSN 0719-8884. Disponível em: <https://www.archdaily.com/608506/12-things-you-didn-t-know-about-pritzker-laureate-frei-otto>. Acesso em: 17 out. 2022.

ROSSIGNOLO, J. A.; FABRÍCIO, M. M. **Coberturas**: Notas de aula da disciplina SAP653 - Tecnologia das Construções II. São Carlos: USP, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, v. 126, n. 16, 2007. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5804539/mod_resource/content/1/Apost%20Cobertura%20Lima_Rossignolo.pdf. Acesso em: 17 out. 2022.

SALGADO, J. C. P. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2018.

SAMPAIO, C. A. P.; CARDOSO, C. O.; GEOVANI, P. S. **Temperaturas Superficiais de Telhas e sua relação com o ambiente térmico**. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 2, p. 230–236, 2011.

SANTOS, A. P. **O aço na obra de Rino Levi e as obras da Tecelagem Parahyba em São José dos Campos**. *Construção Metálica*, v. 119, p. 28–29, 2015.

SANTOS, D. C. *et al.* **Transferência de calor em telhados de diferentes materiais**: carga térmica e custo quiloWATT/hora para climatização. *Revista Espaço Forma*, p. 65–77, 2020.

SANTOS, R. E.; OLIVEIRA, B. J. **A Armação Do Concreto No Brasil**: História da Tecnologia do Concreto Armado. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, v. 15, n. 16, p. 49–59, 2008.

SCHIERMEIER, Q. **Clear Signs of Global Warming Will Hit Poorer Countries First**. *Nature*, p. 415–416, 2018.

SEBRAE. **Estudo do Mercado Imobiliário**: Cidade em análise Foz do Iguaçu - PR. Eixo Indústria - Construção Civil, 2016.

SILVA, A. A. M. A. **Reflexões sobre o conceito de clima e alterações climáticas**: uma relação de equívoco?. *Revista Geonorte*, n. 5, p. 1048–1061, 2012. Disponível em: https://redib.org/Record/oai_articulo1649322-reflex%C3%B5es-sobre-o-conceito-de-clima-e-altera%C3%A7%C3%B5es-clim%C3%A1ticas-uma-rela%C3%A7%C3%A3o-de-equ%C3%Advoco. Acesso em: 17 out. 2022.

SILVA, M. P.; DEIVIS, D.; GUTHS, S. **Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de fibrocimento de alta refletância solar em uma residência unifamiliar**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

SIMMONDS, P. **Using ASHRAE Standard 55 Adaptive Comfort Method for Practical Applications**. In: REHVA 14th HVAC World Congress, 2022, Rotterdam. Netherlands: Building Systems and Analytics, p. 1–8, 2022.

STRUCTURAL INSULATED PANEL ASSOCIATION (SIPA). **BEST Building Education with SIPs Training: Introduction to SIPs**. Disponível em: <https://www.sips.org/documents/SIPA-BEST-1-Introduction-to-SIPs.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

SOUSA, M. **Primeira telha solar do Brasil começa a ser produzida**. *ArchDaily*, 2020. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/948620/primeira-telha-solar-do-brasil-comeca-a-ser-produzida>. Acesso em: 17 out. 2022.

STRICKLAND, C. **Arte comentada da pré-história ao pós-moderno**. 15. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2014.

TEGULA SOLAR. **A energia em sua melhor forma**. p. 10–13, 2021. Disponível em: https://www.tegulasolar.com.br/portal/tegula/arquivos/TEG02221_Catalogo-tecnico-tegula-solar-manual-de-instalacao.pdf?q=1. Acesso em: 17 out. 2022.

TEIXEIRA, A. C. *et al.* **Levantamento das características de edifícios residenciais brasileiros.** *Energy and Buildings*, v. 112, p. 87, 2015.

TESLA. **Solar for Existing Roofs.** Disponível em: <https://www.tesla.com/solarpanels>. Acesso em: 17 out. 2022.

TOKUSUMI, A. T. G.; FOIATO, M. **Análise de Desempenho Termoacústico de Telhas.** *Conhecimento em Construção*, v. 6, n. 6, p. 35–48, 2018.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia.** Ubá: Ed. Geographica, 2008.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Recife: [s. n.], v. 2, p. 449, 2006. Disponível em: https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: 17 out. 2022.

VEIGA, R. K. *et al.* **Manual de Simulação Computacional de Edifícios Naturalmente Ventilados no Programa *Energyplus*:** versão 9.0.1. Florianópolis: Labeee, 2020a. Disponível em:

<https://labeee.ufsc.br/node/806>. Acesso em: 17 out. 2022.

VEIGA, R. K. S. *et al.* **Proposta para as escalas dos níveis de desempenho térmico de residências:** NBR 15575. XVIII Encontro De Tecnologia Do Ambiente Construído, n. 1, p. 2–9, 2020b.

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira.** Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PROPAR), p. 371, 2019.



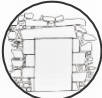










WILKES, K. E. **Thermal Model of Attic Systems with Radiant Barriers.** U.S.A. DOE and DOE, 1991. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5242020>. Acesso em: 17 out. 2022.

YANG, J. *et al.* **Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate.** *Solar Energy*: Elsevier. 2018

YAZIGI, W. **A técnica de edificar.** 18. ed. São Paulo: Siduscon, 2021.

APÊNDICE A - SÍNTESE DA CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS DE COBERTURAS NO MUNDO

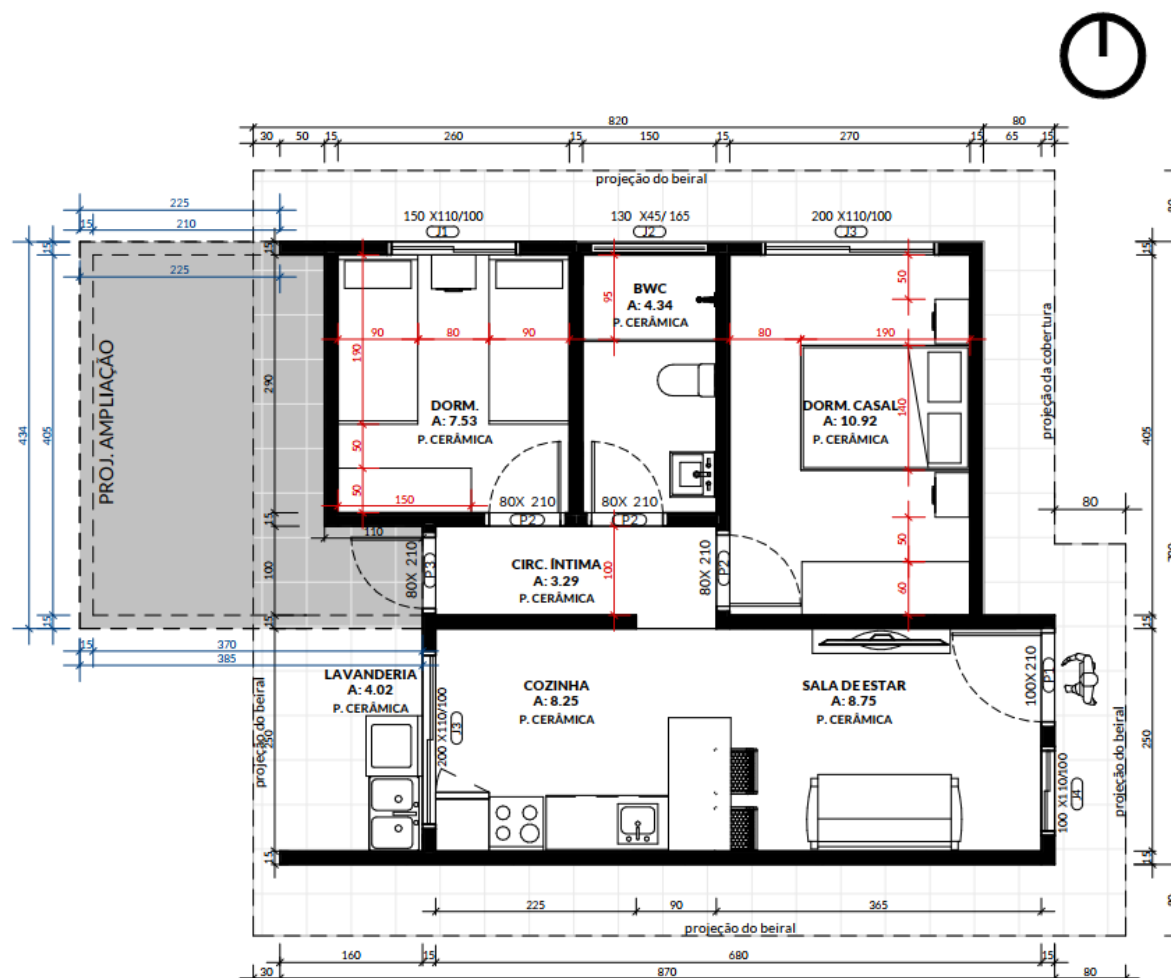
Quadro A-1: Síntese dos sistemas de coberturas no mundo:

Data	Ilustração	Tipo de cobertura	Exemplo de edificação	Região
400.000 a.C.		Galhos, folhas e pele	Cabana Terra Amata, abrigo do Homo erectus	Nice, França quente e úmida (até 3 mil anos a.C.)
c. 15 mil a.C.		Formações geológicas	Caverna artificial neolítica, Micenas	Micenas
8000 a.C.		Pedra, dintel e em arco	Residências no Mediterrâneo	Mediterrâneo desértico
2500 a.C.		Cobertura verde; Tijolo de barro	Templos Zigurates	Mesopotâmia desértica
c. 700 a.C.		Terraço Jardim; Tijolo de barro	Jardim Suspenso da Babilônia	Mesopotâmia Babilônia desértica
Primeiro século a.C.		Abóboda cilíndrica e abóboda de aresta de concreto	Templos e Banhos Romanos	Roma
Primeiro século a.C.		Heliocaminus E abertura zenital	Banhos Romanos	Roma
115 d.C.		Construção plástica cúpula de concreto	Panteão	Roma
1140		Arquitetura Gótica	<i>Sainte-Chapelle</i>	França
1776		Cobertura em ferro forjado	Louvre	França
1850		Cobertura em ferro fundido com múltiplos painéis de vidro	Palácio de Cristal	Paris
1890		Aquecedor Solar na cobertura	Exemplo de edificação habitacional	Estados Unidos
1939		A primeira célula solar que converteu energia do Sol para energia elétrica	MIT <i>Solar House</i>	Estados Unidos

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

APÊNDICE B – PLANTA BAIXA COMPLETA

Figura B-1: Dimensões dos ambientes considerando as dimensões mínimas dos mobiliários, prevendo a ampliação, conforme solicitação do CVA, Ministério do Desenvolvimento Regional (2021).



PLANTA BAIXA: ÁREA TOTAL SEM AMPLIAÇÃO: 54,00m²

PREVISÃO DE AMPLIAÇÃO: 13,21m²



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

APÊNDICE C – TABELA DE PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

Tabela C-1: Propriedades dos materiais da edificação modelo real.


Cobertura						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Telha cerâmica	0,01	0,70	0,92	0,52	0,90	1.600
Forro						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Forro de PVC	0,006	0,40	0,84	0,40	0,90	1.400
Paredes e Pisos						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Paredes Internas	0,21	0,90	0,92	0,20	0,90	821
Paredes Externas	0,21	0,90	0,92	0,20	0,90	821
Pisos	0,19	1,75	1	0,20	0,9	2200
Aberturas						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Calor Específico C (KJ/(kg.K))	Absortância à radiação solar α	Emissividade de onda longa ϵ	Densidade ρ (kg/m ³)
Portas de Madeira	0,03	0,23	1,34	0,70	0,9	600
Isolante da Cobertura						
Elementos construtivos	e (m)	Condutividade Térmica λ (W/(m.K))	Absortância à radiação solar α		Emissividade de onda longa ϵ	
Manta aluminizada	0,002	200	0,10		0,06	

e= espessura dos materiais.

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022), com base nos dados da NBR 15575-1 (ABNT, 2021b), NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), (DORNELLES, 2021), (OLIVEIRA, 2012), NBR 5640 (ABNT, 1995), NBR 15310 (ABNT, 2009), NBR 14514 (ABNT, 2008), NBR 13858-2 (ABNT, 1997) e (DIAS, 2011).

APÊNDICE D – ENTREVISTA COM O DIRETOR DE ANÁLISE E APROVAÇÃO DE PROJETOS DA PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU (PMFI)

Figura D-1: Entrevista.



ENTREVISTA APLICADA AO DIRETOR DE APROVAÇÃO DE PROJETOS DA PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU

Data: 07 Dez/2021 Entrevistado: Mário Junior Petrucci Cargo: Diretor de análise e aprovação de projetos

1. TIPOLOGIA DOS PROJETOS

1.1 As edificações residenciais geralmente são unifamiliar ou multifamiliar?
R: Na grande maioria as residências são unifamiliar.

1.2 Qual é a principal tipologia arquitetônica das edificações residenciais projetadas atualmente em Foz do Iguaçu, considerando edificação térrea, sobrado e geminado?
R: A principal tipologia para os programas habitacionais são as edificações térreas.

1.3 Quais são os principais padrões de projetos que a prefeitura recebe?
R: Em um contexto geral o principal padrão de residências é baixo, seguido do padrão médio.

2. CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE COBERTURAS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

A. SISTEMAS DE COBERTURA UTILIZADOS

2.1. Em ordem de maior utilização, qual é o tipo de acabamento de cobertura mais empregado, platibanda, telhado aparente ou laje impermeabilizada?
(1) Telhado aparente (mais utilizadas nas habitações de interesse social)
(2) Platibanda (mais utilizadas na maioria das habitações)
() Laje impermeabilizada
(Observação: é incomum a utilização de laje impermeabilizada)

B. COBERTURA COM LAJE IMPERMEABILIZADA

2.2 Quais os tipos de laje impermeabilizada são mais utilizadas? (tipo de laje e impermeabilização)
R. No período de atuação do Diretor Mário Petrucci, ele viu apenas um projeto que constava a cobertura apenas com a laje sem a telha.

2.3 Para os casos de projetos que usam laje impermeabilizada, costumam empregar beirais?
R. Sim.

Se sim, qual a dimensão comumente utilizada?
R. 80cm padrão.

2.4 Quando é empregado laje impermeabilizada, normalmente é empregado forro?
R. Sim.

Se sim, quais tipos e qual é o mais empregado? (numerar de acordo ordem de maior utilização, sendo (1) a mais utilizado e (4) a menos utilizado)

Tipo de Forro	Características mais usuais
(1) PVC	Para habitações de interesse social
(2) Gesso	É utilizado desde o padrão baixo ao alto padrão
() Madeira	Incomum
() Outro	

2.5 Quando é empregado laje impermeabilizada, costuma-se utilizar algum material para isolamento térmico?
R. Geralmente empregam a laje pré-moldada com isopor, acredita que já é para ajudar nessa questão, quando agrega um material é a manta aluminizada.

Se sim, quais? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
(1) Manta aluminizada	É o sistema mais empregado
() EPS (Isopor)	Nunca viu empregar a placa de isopor isolada, somente com a laje de pré-moldada de isopor
() Lã de rocha	Incomum
() Lã de vidro	Incomum
() Outro	

C. COBERTURA COM PLATIBANDA

2.6 Quais os tipos de telhas são normalmente utilizadas para edificações com platibandas? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Telha	Características mais usuais
(1) Fibrocimento	Para as habitações de interesse social
(4) Zinco	É mais difícil ver nas habitações de interesse social por conta do custo elevado
(3) Cerâmica	Empregando a platibanda é raro usar cerâmica
() Concreto	Incomum
(2) Termoacústica	Para as habitações de médio e alto padrão
() Outro	

2.7 Para os casos de projetos que usam platibanda, costumam empregar beirais?
R. Sim.

Se sim, qual a dimensão comumente mais utilizada?
R. Dimensões entre 80 à 70 cm.

2. CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE COBERTURAS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

C.1 COBERTURA COM PLATIBANDA (Telhado + Laje)

2.8 Além do telhado com platibanda, a laje costuma ser empregada nos projetos de edificações térreas?

R. Tem sido empregado na maioria das habitações, sendo muito difícil ver uma habitação sem laje atualmente, porém nas habitações de interesse social, unifamiliar a maioria usam apenas telhado com forro.

Se sim, qual é o tipo de laje comumente mais empregada?

R. Quando empregada, é a laje pré-moldada de isopor.

2.9 Quando é empregado platibanda com cobertura e laje, normalmente é empregado forro?

R. Geralmente sim, porque sai mais barato colocar o forro ao rebocar a laje e pintar.

Se sim, quais tipos e qual é o mais empregado? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Forro	Características mais usuais
(1) PVC	
(2) Gesso	
() Madeira	Incomum
() Outro	

2.10 Quando é empregado platibanda com telhado e laje, costuma-se utilizar algum material para isolamento térmico?

R. Quando se utiliza a laje é muito incomum aplicar algum material isolante térmico, conforme citado anteriormente, geralmente só empregam a laje pré-moldada de isopor como isolamento térmico.

Se sim, quais? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
() Manta aluminizada	
() EPS (Isopor)	
() Lã de rocha	
() Lã de vidro	
Outro	

C.2 COBERTURA COM PLATIBANDA (Telhado + forro)

2.11 Em cobertura com platibanda sem laje, é utilizado forros?

R. Sim, na maioria das vezes.

Se sim, qual o tipo de forro é o mais empregado (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Forro	Características mais usuais
(1) PVC	Habitações de Interesse social
(2) Gesso	Padrão das demais habitações
() Madeira	Incomum
() Outro	

2.12 Caso não utilize forro, uma cobertura com platibanda e sem laje, costuma utilizar algum material para isolamento térmico?

R: Sim.

Se sim, quais? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
(1) Manta aluminizada	É padrão nas habitações de interesse social empregar a manta aluminizada na ausência de laje ou forro.
() EPS (Isopor)	Incomum
() Lã de rocha	Incomum
() Lã de vidro	Incomum
() Outro	

D. COBERTURA COM TELHADO APARENTE

2.13 Quais os tipos de telhas são normalmente utilizadas para edificações com telhado aparente? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Telha	Características mais usuais
(2) Fibrocimento	Para o caso de habitações de interesse social a telha de fibrocimento é muito empregada também
(3) Zinco	O zinco era pouco empregado, mas começou a ser substituído depois das últimas tempestades com chuva de granizo que houve na cidade, sendo uma opção que estão passando a considerar pela durabilidade
(1) Cerâmica	A telha cerâmica é a mais empregada em um contexto geral, quando se trata de telhado aparente
(4) Concreto	Incomum
(5) Termoacústica	Incomum no caso de casas de telhado aparente, devido ser um material de custo elevado, só residências de médio a alto padrão empregam, como a telha termo acústica não contempla um padrão estético a nível não são empregadas nas residências
() Outro	

2.14 Para os casos de projetos que usam telhado aparente, costumam empregar beirais?

R. Sim.

Se sim, qual a dimensão comumente mais utilizada?

R. Normalmente de 70 a 120cm.

D.1 COBERTURA COM TELHADO APARENTE (Telhado + Laje)

2.15 Além da cobertura com o telhado aparente, a laje costuma ser empregada nos projetos de edificações térreas?

R. Sim. Na maioria das habitações tem empregado o uso da laje, mas ainda existe uma carência do emprego da laje nas habitações de interesse social.

Se sim, qual é o tipo de laje comumente mais empregada?

R. Laje pré-moldado de isopor.

2.16 Quando é empregado laje, normalmente é empregado forro?

R. Sim, é muito raro atualmente rebocar uma laje, devido ao elevado custo da mão de obra, acaba não compensando.

2. CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE COBERTURAS DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL

Se sim, quais tipos e qual é o mais empregado? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Forro	Características mais usuais
(1) PVC	Para habitações de interesse social
(2) Gesso	Para os demais padrões de habitações
(3) Madeira	Para habitações de alto padrão
() Outro	

2.17 Quando é utilizado forro, costuma-se utilizar algum material para isolamento térmico?

R. Geralmente não, pois a laje tem atuado como isolante térmico.

Se sim, quais?

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
() Manta aluminizada	
() EPS (Isopor)	
() Lã de rocha	
() Lã de vidro	
() Outro	

2.18 Caso não utilize forro, costuma utilizar algum material para isolamento térmico?

R: Não, a laje atua como isolante térmico, principalmente a laje pré-moldada de isopor.

Se sim, qual (is)?

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
() Manta aluminizada	
() EPS (Isopor)	
() Lã de rocha	
() Lã de vidro	
() Outro	

D.2 COBERTURA COM TELHADO APARENTE (Telhado + Forro)

2.19 Quando não é empregado laje, é utilizado forros?

R. Na maioria das vezes sim.

Se sim, qual o tipo de forro é o mais empregado?

Tipo de Forro	Características mais usuais
(1) PVC	Habitações de Interesse social
(2) Gesso	Padrão das demais habitações, muito raro ver forro de gesso em habitações e interesse social
(3) Madeira	Em habitações de Interesse social, quando utilizam o forro de madeira, geralmente é pinus, e geralmente é de doação, por isso é um material pouco empregado
() Outro	

2.20 Quando é utilizado forro, costuma-se utilizar algum material para isolamento térmico?

R. Sim.

Se sim, quais? (numerar de acordo ordem de maior utilização)

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
(1) Manta aluminizada	Para as habitações de interesse social
() EPS (Isopor)	Só no caso do emprego da laje de isopor
() Lã de rocha	Incomum
() Lã de vidro	Incomum
() Outro	

2.21 Caso não utilize forro, costuma utilizar algum material para isolamento térmico?

R: Sim, quase na maioria das vezes, mesmo com a aparência estética comprometida, costumam empregar a manta aluminizada nas habitações de interesse social.

Tipo de Isolante Térmico	Características mais usuais
(1) Manta aluminizada	Para as habitações de interesse social
() EPS (Isopor)	Incomum
() Lã de rocha	Incomum
() Lã de vidro	Incomum
() Outro	

E. COMPLEMENTO

2.22 Normalmente é utilizada ventilação na cobertura?

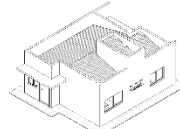
R: Raramente utilizam ventilação na cobertura, o que se tem empregado ultimamente, principalmente nos geminados, é a ventilação nos banheiros, devido a ausência de espaço para as janelas nas fachadas, utilizam ventilação na platibanda, junto a cobertura.

2.23 Onde normalmente é utilizada a manta aluminizada? (junto com a telha ou junto com o forro/laje?)

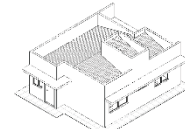
R: Quando utilizada a manta, fica junto a telha.

2.24 Das opções abaixo, qual o modelo de platibanda mais utilizado em uma situação com beiral?

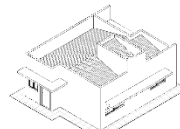
R: c, em termos de projeto, o que mais se vê é a utilização da platibanda com a marquise, criando um jogo de volumes, muito difícil ver os projetos com a platibanda de fora a fora, como o caso da letra e.



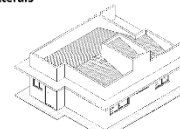
a) Sem beirais nas janelas laterais



c) Beira com marquise nas janelas laterais



b) Beiral utilizando a verga nas janelas laterais



d) Beiral com marquise em todo o perímetro da edificação



e) Beiral com platibanda, avançando todo o perímetro da edificação



3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE FECHAMENTOS

Quanto aos fechamentos verticais:

Paredes Externas:

3.1 Qual a tipologia dos materiais de fechamentos verticais mais empregados: alvenaria, concreto, madeira ou steel frame?

R: Alvenaria.

Paredes internas:

3.2 Quais os tipos de materiais que são mais empregados?

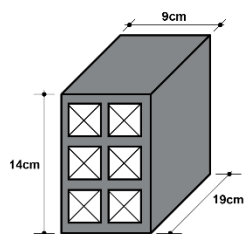
R: Geralmente seguem o mesmo padrão dos fechamentos externos, no caso alvenaria.

3.3 Quais são os tipos de tijolos mais empregados nas habitações: cerâmicos vazados, maciços ou concreto?

R: Tijolos cerâmicos vazados.

3.4 Quando é utilizado o tijolo vazado, qual modelo e dimensão geralmente é o mais empregado?

R: Tijolo de 6 furos (9x14x19cm)



APÊNDICE E – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

Tijolo Equivalente – Conforme procedimento da NBR 15220-2 de 2005

Sistema de Fechamento Vertical Externo e Interno em Alvenaria de Blocos Cerâmicos

Dados:

Dimensões bloco cerâmico:

9cm x 14cm x 19cm

Dimensões das câmaras de ar:

3cm x 3,33cm x 19cm

Espessura da argamassa de assentamento (e):

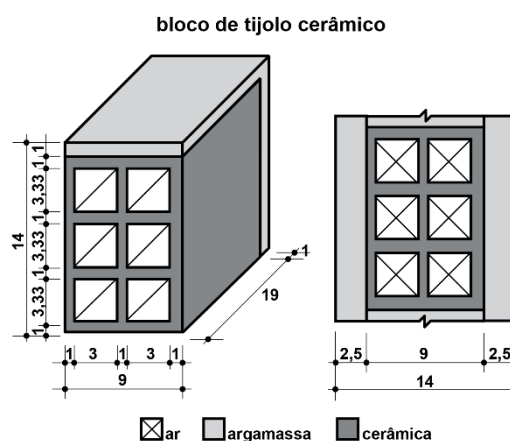
1cm

$$R_{ar} = 0,16 (m^2.K)/W$$

$$R_{si} = 0,13 (m^2.K)/W$$

$$R_{se} = 0,04 (m^2.K)/W$$

Figura E-1: Dimensões do tijolo cerâmico.



Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

$$\lambda_{cerâmica} = 0,90 W/(m^2K)$$

$$\lambda_{argamassa} = 1,15 W/(m^2K)$$

$$\rho_{cerâmica} = 1600 Kg/m^3$$

$$\rho_{argamassa} = 1800 Kg/m^3$$

$$C_{cerâmica} = 0,92 KJ/(Kg.K)$$

$$C_{argamassa} = 1 KJ/(Kg.K)$$

Legenda:

ereb = espessura do reboco

λ_{reb} = condutividade térmica do reboco

creb = calor específico do reboco

preb = densidade da massa aparente do reboco

lcer = largura da cerâmica

λ_{cer} = condutividade térmica da cerâmica

ecer = espessura da parede da cerâmica

cmcer = comprimento da cerâmica

ccer = calor específico da cerâmica

pcer = densidade da massa aparente da cerâmica

hcer = altura da cerâmica

hfc = altura do furo da cerâmica

eeq = espessura equivalente da cerâmica

peq = densidade da massa aparente equivalente da cerâmica

R1 = Resistência térmica 1

R2 = Resistência térmica 2

R3 = Resistência térmica 3

A1 = Área do material 1

A2 = Área do material 2

A3 = Área do material 3

Ct1 = Capacidade térmica 1

Ct2 = Capacidade térmica 2

Ct3 = Capacidade térmica 3

Rt = Resistência térmica ponderada

RT = Resistência térmica total

U = Transmitância térmica

Ct = Capacidade térmica total

Resistência Térmica de Superfície a Superfície (R_t)

Seção 1: (argamassa)

$$R1 = \frac{ereb}{\lambda reb} + \frac{lcer}{\lambda reb} + \frac{ereb}{\lambda reb} = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,025}{1,15} = 0,1217 (m^2.K)/W$$

$$A1 = epcer * cmcer + epcer * hcer = 0,01 * 0,19 + 0,01 * 0,14 = 0,0033 m^2$$

Seção 2: (bloco cerâmico)

$$R2 = \frac{ereb}{\lambda reb} + \frac{lcer}{\lambda cer} + \frac{ereb}{\lambda reb} = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,03}{0,9} + \frac{0,025}{1,15} = 0,1435 (m^2.K)/W$$

$$A2 = epcer * cmcer = 0,01 * 0,19 = 0,0019 m^2$$

Seção 3: (bloco cerâmico + câmara de ar + bloco cerâmico + câmara de ar + bloco cerâmico)

$$R3 = \frac{ereb}{\lambda reb} + \frac{ecer}{\lambda cer} + Rar + \frac{ecer}{\lambda cer} + Rar + \frac{ecer}{\lambda cer} + \frac{ereb}{\lambda reb}$$

$$= \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,03}{0,9} + 0,16 + \frac{0,03}{0,9} + 0,16 + \frac{0,03}{0,9} + \frac{0,025}{1,15} = 0,3968 (m^2.K)/W$$

$$A3 = cmcer * hfc = 0,19 * 0,033 = 0,0063 m^2$$

$$Rt = \frac{A1 + 4 * A2 + 3 * A3}{\frac{A1}{R1} + \frac{4 * A2}{R2} + \frac{3 * A3}{R3}} = \frac{(0,0033 + 4 * 0,0019 + 3 * 0,0063)}{\frac{0,0033}{0,1217} + \frac{4 * 0,0019}{0,1435} + \frac{3 * 0,0063}{0,3968}} = 0,2331 (m^2.K)/W$$

Resistência Térmica Total (R_T)

$$RT = 2 * Rsi + Rt = 2 * 0,13 + 0,2331 = 0,49 (m^2.K)/W$$

Transmitância Térmica Total (U_T)

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,49} = 2,03 W/(m^2.K)$$

Capacidade Térmica da Parede (C_t)

Seção 1: (argamassa)

$$Ct1 = (ereb + lcer + ereb) * creb * preb = (0,025 + 0,09 + 0,025) * 0,92 * 1600 = 252 kJ/(m^2.K)$$

Seção 2: (bloco cerâmico)

$$Ct2 = 2 * (ereb * creb * preb) + (lcer * ccer * pcer)$$

$$= 2 * (0,025 * 1 * 1800) + (0,09 * 0,92 * 1600)$$

$$= 222 kJ/(m^2.K)$$

Seção 3: (bloco cerâmico + câmara de ar + bloco cerâmico + câmara de ar + bloco cerâmico)

$$Ct3 = 2 * (ereb * creb * preb) + 3 * (lcer * ccer * pcer)$$

$$= 2 * (0,025 * 1 * 1800) + 3 * (0,09 * 0,92 * 1600)$$

$$= 134 kJ/(m^2.K)$$

Capacidade Térmica Total (CT)

$$CT = \frac{A1 + 4 * A2 + 3 * A3}{\frac{A1}{Ct1} + \frac{4 * A2}{Ct2} + \frac{3 * A3}{Ct3}} = \frac{0,0033 + 4 * 0,0019 + 3 * 0,0063}{\frac{0,0033}{252} + \frac{4 * 0,0019}{222} + \frac{3 * 0,0063}{134}} = 158 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Cálculo da Espessura para o modelo Equivalente

$$eeq = (RT - (2 * Rsi)) * \lambda_{cer} = (0,49 - (2 * 0,13)) * 0,9 = 0,21 \text{ m}$$

Cálculo da Densidade de Massa Aparente Equivalente

$$peq = \frac{Ct}{eeq * ccer} = \frac{158}{0,21 * 0,92} = 821 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

Laje Equivalente – Conforme procedimento da NBR 15220-2 de 2005

Laje de Isopor Pré-moldada com argamassa

Dados:

Dimensões preenchimento EPS:
33cm x 8cm x 125cm

Dimensões Capa preenchimento EPS:
33cm x 4cm x 125cm

Dimensões da Vigota:
12,5cm x 8cm x 125cm

Dimensões Capa da Vigota:
12,5cm x 4cm x 125cm

Dimensões Argamassa do Preenchimento EPS:
33cm x 2,5cm x 125cm

Dimensões Argamassa Vigota:
12,5cm x 2,5cm x 125cm

$$R_{si} = 0,17 (m^2 \cdot K) / W$$

$$\lambda_{EPS} = 0,04 W / (m^2 K)$$

$$\lambda_{concreto} = 1,75 W / (m^2 K)$$

$$\lambda_{argamassa} = 1,15 W / (m^2 K)$$

$$PEPS = 15 Kg / m^3$$

$$P_{concreto} = 2200 Kg / m^3$$

$$P_{argamassa} = 1800 Kg / m^3$$

$$CEPS = 1,42 KJ / (Kg \cdot K)$$

$$C_{concreto} = 1 KJ / (Kg \cdot K)$$

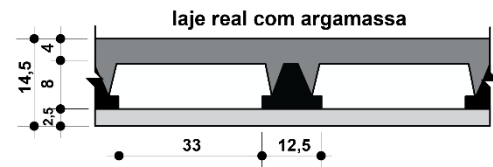
$$C_{argamassa} = 1 KJ / (Kg \cdot K)$$

Legenda:

ecpr = espessura da capa do preenchimento
 λ_{cpr} = condutividade térmica da capa do preenchimento
 epr = espessura do preenchimento
 λ_{pr} = condutividade térmica do preenchimento
 eagp = espessura da argamassa do preenchimento
 λ_{agp} = condutividade térmica da argamassa do preenchimento
 evig = espessura da vigota
 λ_{vig} = condutividade térmica da vigota
 eagv = espessura da argamassa da vigota
 λ_{agv} = condutividade térmica da argamassa da vigota
 cagv = calor específico da argamassa da vigota
 pagv = densidade m. a. da argamassa da vigota
 lpr = largura do preenchimento
 cmpr = comprimento do preenchimento
 cpr = calor específico do preenchimento
 ppr = densidade de m. a. do preenchimento

cagp = calor específico da argamassa do preenchimento
 pagp = densidade m. a. da argamassa do preenchimento
 cvig = calor específico da vigota
 pvig = densidade m. a. vigota
 cvig = espessura da capa da vigota
 ccvig = calor específico da capa da vigota
 pcvig = densidade m. a. da capa da vigota
 eq = espessura da laje equivalente
 peq = densidade m. a. da laje equivalente
 R1 = Resistência térmica 1
 R2 = Resistência térmica 2
 R3 = Resistência térmica 3
 A1 = Área do material 1
 A2 = Área do material 2
 A3 = Área do material 3
 Ct1 = Capacidade térmica 1
 Ct2 = Capacidade térmica 2
 Ct3 = Capacidade térmica 3
 Rt = Resistência térmica ponderada
 RT = Resistência térmica total

Figura E-2: Dimensões da laje.



- elemento de enchimento (EPS)
- argamassa
- capa de concreto
- laje equivalente de concreto
- vigota

Medidas da Laje pré-moldada:
 EPS: 33x8x125cm
 Vigota: 12,5x8x125cm

Fonte: Desenvolvido pela Autora (2022).

ccpr = calor específico da capa do
preenchimento
pcpr = densidade m. a. da capa do
preenchimento

U = Transmitância térmica
Ct = Capacidade térmica total

Resistência Térmica de Superfície a Superfície (R_t)

Seção 1: (preenchimento)

$$R1 = \frac{ecpr}{\lambda cpr} + \frac{epr}{\lambda pr} + Rsi + \frac{eagp}{\lambda agp} = \frac{0,04}{1,75} + \frac{0,08}{0,04} + 0,17 + \frac{0,025}{1,15} = 2,2146 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$A1 = lpr * cmpr = 0,33 * 1,25 = 0,4125 \text{ m}^2$$

Seção 2: (vigota)

$$R2 = \frac{ecpr}{\lambda cpr} + \frac{evig}{\lambda vig} + Rsi + \frac{eagv}{\lambda agv} = \frac{0,04}{1,75} + \frac{0,08}{1,75} + 0,17 + \frac{0,025}{1,15} = 0,2603 \text{ Rsi} = 0,17 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$A2 = lvig * cmvig = 0,33 * 1,25 = 0,1563 \text{ m}^2$$

$$Rt = \frac{A1 + A2}{\frac{A1}{R1} + \frac{A2}{R2}} = \frac{(0,4125 + 0,1563)}{\frac{0,4125}{2,2146} + \frac{0,1563}{0,2603}} = 0,7231 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Resistência Térmica Total (R_T)

$$RT = Rt + Rsi = 0,7231 + 0,17 = 0,89 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Transmitância Térmica Total (UT)

$$U = \frac{1}{RT} = \frac{1}{0,89} = 1,12 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Capacidade Térmica da Parede (C_t)

Seção 1: (preenchimento)

$$Ct1 = (epr * cpr * ppr) + (ecpr * ccpr * pcpr) + (eagp * cagp * pagp) \\ = (0,08 * 1,42 * 15) + (0,04 * 1 * 2200) + (0,025 * 1 * 1800) = 135 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Seção 2: (vigota)

$$Ct2 = (evig * cvig * pvig) + (ecvig * ccvig * pcvig) + (eagv * cagv * pagv) \\ = (0,08 * 1 * 2200) + (0,04 * 1 * 2200) + (0,025 * 1 * 1800) \\ = 309 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Capacidade Térmica Total (CT)

$$CT = \frac{A1 + A2}{\frac{A1}{Ct1} + \frac{A2}{Ct2}} = \frac{0,4125 + 0,1563}{\frac{0,4125}{135} + \frac{0,1563}{309}} = 159,40 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

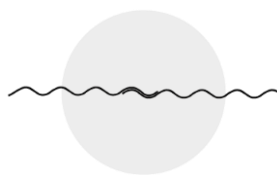
Cálculo da Espessura para o modelo Equivalente

$$eeq = (RT - Rsi) * \lambda_{pr} = (0,89 - 0,17) * 0,04 = 1,2655 \text{ m}$$

Cálculo da Densidade de Massa Aparente Equivalente

$$peq = \frac{Ct}{eeq * ccpr} = \frac{159,40}{1,2655 * 1} = 125,9646 \text{ Kg/m}^3$$

APÊNDICE F - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE RESISTÊNCIA TÉRMICA, TRANSMITÂNCIA, CAPACIDADE TÉRMICA E ABSORTÂNCIA DOS SISTEMAS DE COBERTURAS



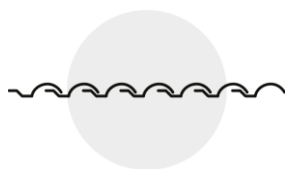
Telha de fibrocimento

Tabela F-1: Resumo das propriedades térmicas dos materiais do Modelo Real.

Composição dos Elementos Construtivos dos Sistemas de Cobertura com Fibrocimento	RT (m ² /W.°C)	U (W/(m ² .K))	CT (kJ/(m ² .K))	α* (adm.)
Combinação 1 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Sem Laje	0,21	4,63	2,18	0,60
Combinação 2 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	1,14	0,87	220,70	0,60
Combinação 3 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Forro de PVC (e= 0,006)	0,44	2,27	4,20	0,60
Combinação 4 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Forro de PVC (e= 0,006)	1,11	0,90	206,90	0,6
Combinação 5 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Manta aluminizada (e= 0,002)	0,82	1,21	349	0,60
Combinação 6 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	1,54	0,65	255,40	0,60
Combinação 7 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Manta aluminizada (e= 0,002) Forro de PVC (e= 0,006)	0,84	1,19	351	0,60
Combinação 8 Telha Fibrocimento (e= 0,004) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Ar ascendente maior 5 (0,21) Forro de PVC (e= 0,006)	1,51	0,66	241,60	0,60

e= Espessura; RT= Resistência Térmica; U= Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α*= Absortância à radiação solar: 0,6 Telha fibrocimento;

Fonte: Dados calculados com base na ABNT (2005b).



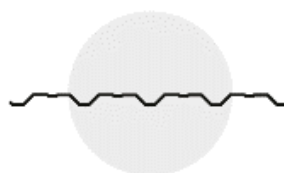
Telha cerâmica

Tabela F-2: Resumo das propriedades térmicas dos materiais do Modelo Real.

Composição dos Elementos Construtivos dos Sistemas de Cobertura	RT (m ² /W.k)	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))	α* (adm.)
Combinação 1 Telha Cerâmica (e= 0,01) Sem Laje	0,22	4,46	6,44	0,52
Combinação 2 Telha Cerâmica (e= 0,01) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	1,15	0,87	221,10	0,52
Combinação 3 Telha Cerâmica (e= 0,01) Forro de PVC (e= 0,006)	0,45	2,23	8,45	0,52
Combinação 4 Telha Cerâmica (e= 0,01) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Forro de PVC (e= 0,006)	1,12	0,89	207,30	0,52
Combinação 5 Telha Cerâmica (e= 0,01) Manta aluminizada (e= 0,002)	0,83	1,20	353	0,52
Combinação 6 Telha Cerâmica (e= 0,01) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	1,55	0,64	255,80	0,52
Combinação 7 Telha Cerâmica (e= 0,01) Manta aluminizada (e= 0,002) Forro de PVC (e= 0,006)	0,85	1,18	355	0,52
Combinação 8 Telha Cerâmica (e= 0,01) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Ar ascendente maior 5 (0,21) Forro de PVC (e= 0,006)	1,57	0,64	256	0,52

e= Espessura; RT= Resistência Térmica; U= Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α*= Absortância à radiação solar: 0,52 Telha cerâmica;

Fonte: Dados calculados com base na ABNT (2005b).



Telha de aço trapezoidal

Tabela F-3: Resumo das propriedades térmicas dos materiais do Modelo Real.

Composição dos Elementos Construtivos dos Sistemas de Cobertura		RT (m ² /W.k)	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))	α* (adm.)
Combinação 1	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Sem Laje	0,210006	4,76	8,09	0,40
Combinação 2	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	1,14	0,88	221,30	0,40
Combinação 3	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Forro de PVC (e= 0,006)	0,43	2,30	10	0,40
Combinação 4	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Forro de PVC (e= 0,006)	1,10	0,90	207,50	0,40
Combinação 5	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Manta aluminizada (e= 0,002)	0,82	1,22	355	0,40
Combinação 6	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	1,54	0,65	256	0,40
Combinação 7	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Manta aluminizada (e= 0,002) Forro de PVC (e= 0,006)	0,83	1,20	357	0,40
Combinação 8	Telha Aço Trapezoidal (e= 0,00032) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Ar ascendente maior 5 (0,21) Forro de PVC (e= 0,006)	1,50	0,66	242,20	0,40

e= Espessura; RT= Resistência Térmica; U= Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α*= Absortância à radiação solar: 0,4 Telha de aço trapezoidal;

Fonte: Dados calculados com base na ABNT (2005b).



Telha de termoacústica

Tabela F-4: Resumo das propriedades térmicas dos materiais do Modelo Real.

Composição dos Elementos Construtivos dos Sistemas de Cobertura		RT (m ² /W.k)	U (W/(m ² .K))	CT (KJ/(m ² .K))	α* (adm.)
Combinação 1	Telha Termoacústica (e= 0,030) Sem Laje	1,21	0,83	1,50	0,40
Combinação 2	Telha Termoacústica (e= 0,030) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	2,14	0,47	220,60	0,40
Combinação 3	Telha Termoacústica (e= 0,030) Forro de PVC (e= 0,006)	1,43	0,70	3,52	0,40
Combinação 4	Telha Termoacústica (e= 0,030) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Forro de PVC (e= 0,006)	2,10	0,47	206,80	0,40
Combinação 5	Telha Termoacústica (e= 0,030) Manta aluminizada (e= 0,002)	1,82	0,55	348	0,40
Combinação 6	Telha Termoacústica (e= 0,030) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16)	2,54	0,39	255,30	0,40
Combinação 7	Telha Termoacústica (e= 0,030) Manta aluminizada (e= 0,002) Forro de PVC (e= 0,006)	1,83	0,54	350	0,40
Combinação 8	Telha Termoacústica (e= 0,030) Manta aluminizada (e= 0,002) Laje pré-moldada de isopor (e= 0,16) Ar ascendente maior 5 (0,21) Forro de PVC (e= 0,006)	2,50	0,40	241,50	0,40

e= Espessura; RT= Resistência Térmica; U= Transmitância Térmica; CT= Capacidade Térmica; α*= Absortância à radiação solar: 0,4 Telha termoacústica

Fonte: Dados calculados com base na ABNT (2005b).

ANEXO A - SÍNTESE DA TABELA DO PROGRAMA CASA VERDE E AMARELA

Tabela A-1: Concepção do Projeto Unidades Habitacionais / Edificações de acordo a Portaria nº 959, de 18 de maio de 2021.

PROGRAMA DE NECESSIDADES	
I. Programa mínimo da unidade habitacional	REQUISITO
a) Área útil mínima da UH:	Obrigatório
Casas: 36,00 m ² , se a área de serviço for externa, ou 38,00 m ² , se a área de serviços for interna.	
b) Pé-direito:	Obrigatório
Em unidades localizadas em todas as zonas bioclimáticas, para todas as tipologias, mínimo de 2,50 m, admitindo-se 2,30 m no banheiro.	
c) Programa mínimo:	Obrigatório
Sala + 1 dormitório de casal + 1 dormitório para duas pessoas + cozinha + área de serviço + banheiro. Não foi estabelecida a área mínima dos cômodos, deixando aos projetistas a competência de formatar os ambientes da habitação segundo o mobiliário previsto a seguir:	
i. Dormitório de casal - Quantidade mínima de móveis = 1 cama (1,40 m x 1,90 m); 1 criado-mudo (0,50m x 0,50m); e 1 guarda-roupa (1,60m x 0,50m). Circulação mínima entre mobiliário e/ou paredes de 0,50 m.	
ii. Dormitório para duas pessoas - Quantidade mínima de móveis: 2 camas (0,90 m x 1,90 m); 1 criado-mudo (0,50 m x 0,50 m); e 1 guarda-roupa (1,50 m x 0,50 m). Circulação mínima entre as camas de 0,80 m. Demais circulações, mínimo 0,50 m.	
iii. Cozinha - Largura mínima: 1,80 m. Quantidade mínima de itens: pia (1,20 m x 0,50 m); fogão (0,55 m x 0,60 m); e geladeira (0,70 m x 0,70 m). Previsão para armário sob a pia e gabinete.	
iv. Sala de estar/refeições: Largura mínima: 2,40 m. Quantidade mínima de móveis: sofás com número de assentos igual ao número de leitos; mesa para 4 pessoas; e Estante/Armário TV.	
v. Banheiro - Largura mínima: 1,50 m. Quantidade mínima de itens: 1 lavatório sem coluna, 1 vaso sanitário com caixa de descarga acoplada, 1 box com ponto para chuveiro (0,90 m x 0,95 m) com previsão para instalação de barras de apoio e de banco articulado. Assegurar a área para transferência ao vaso sanitário e ao box.	
vi. Área de Serviço - Quantidade mínima de itens: 1 tanque (0,52 m x 0,53 m) e 1 máquina (0,60 m x 0,65 m). Prever espaço e garantia de acesso frontal para tanque e máquina de lavar.	
vii. Em Todos os Cômodos: Espaço livre de obstáculos em frente às portas de no mínimo 1,20 m. Nos banheiros, deve ser possível inscrever módulo de manobra sem deslocamento que permita rotação de 360° (D= 1,50 m). Nos demais cômodos, deve ser possível inscrever módulo de manobra sem deslocamento que permita rotação de 180° (1,20 m x 1,50 m), livre de obstáculos, conforme definido pela ABNT NBR 9050.	
d) Para casas térreas, deverá ser prevista ao menos uma opção de ampliação da unidade habitacional sem prejuízo das condições de iluminação e ventilação natural dos cômodos pré-existentes.	
II. Itens externos	REQUISITO
a) Vagas de estacionamento conforme definido na legislação municipal.	Obrigatório
b) Proteção da alvenaria externa (para casas): Calçada em concreto com largura mínima de 0,50 m. Nas áreas de serviço externas, deverá ser prevista calçada com	

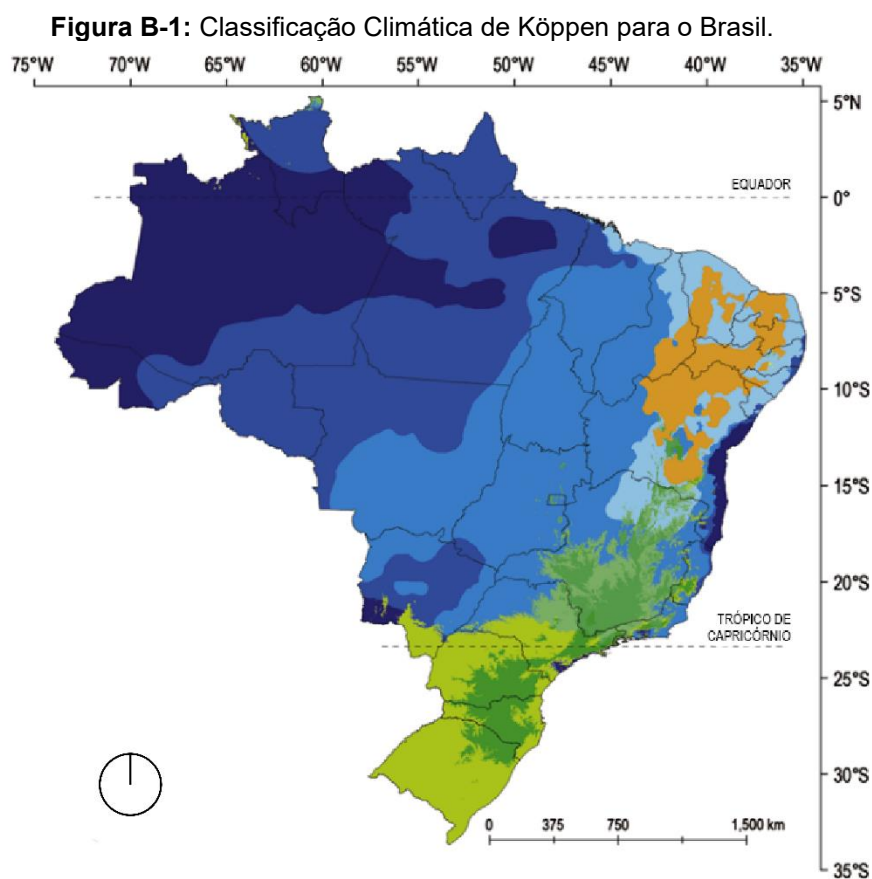
largura mínima de 1,20 m e comprimento mínimo de 2,00 m na região do tanque e máquina de lavar.	
ESTRATÉGIAS DE CONFORTO	
I. Estratégias passivas	REQUISITO
a) O projeto deve explorar ao máximo estratégias passivas para garantir o conforto das unidades habitacionais, com o aproveitamento da iluminação e ventilação natural, por meio da forma do edifício, escolha adequada de fechamentos, escolha adequada de paredes externas e coberturas, disposição e tamanho das aberturas, tipos de esquadrias, sempre de acordo com o clima local para aumentar o conforto ambiental e o desempenho termoenergético da Unidade Habitacional.	Obrigatório
II. Ventilação	REQUISITO
a) Ventilação cruzada: Para o tipo unifamiliar, em todas as zonas bioclimáticas, deve ser garantida ventilação cruzada, ou seja, o escoamento de ar entre pelo menos duas fachadas diferentes, opostas ou adjacentes. É recomendada em unidades multifamiliares.	Obrigatório
b) Ventilação noturna:	
i. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 2, 3, 4, 5 e 6, para todas as tipologias, deve ser garantida a ventilação noturna com segurança em dormitórios.	Obrigatório
III. Simulação	REQUISITO
a) Deverá ser realizada simulação computadorizada para avaliação do conforto térmico das unidades habitacionais.	Adicional
SISTEMAS E COMPONENTES	
II. Cobertura	REQUISITO
a) No caso de sistemas de cobertura convencionais, a FAD do SINAT do PBQP-H (disponível na página: http://pbqp-h.mdr.gov.br) pode ser utilizada como dado de entrada de projeto quanto ao desempenho potencial esperado, bem como para apresentar evidências dos meios definidos para o atendimento dos requisitos da ABNT NBR 15575.	Obrigatório
b) É vedado o uso de estrutura metálica quando o empreendimento estiver localizado em regiões litorâneas ou em ambientes agressivos a esse material	Obrigatório
c) No caso de área de serviço externa, a cobertura deve ser em toda a área, nas mesmas especificações da UH, facultado o uso de laje.	Obrigatório
d) Pintura dos tetos com tinta látex Econômica, Standard ou Premium, segundo a norma ABNT NBR 15079	Obrigatório
e) Em edificações multifamiliares, prever forro na cobertura quando houver beiral, na parte exposta à ação dos ventos.	Obrigatório
f) Absortância solar (α):	
i. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, para todas as tipologias, a absortância solar (α) do telhado deve ser abaixo de 0,6 (cores claras e médias).	Obrigatório
ii. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 4, 5, 6, 7 e 8, para todas as tipologias, a absortância solar (α) do telhado deve ser abaixo de 0,4 (cores claras e médio-claras).	
g. Transmitância térmica (U):	
i. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 3 e 5, para tipologias unifamiliares, a transmitância térmica (U) em W/m^2K deve ser abaixo de 0,7. Para tipologias multifamiliares, a transmitância térmica (U) em W/m^2K deve ser abaixo de 2,0.	Obrigatório
ii. Em unidades localizadas na zona bioclimática 2, para todas as tipologias, a transmitância térmica (U) em W/m^2K deve ser abaixo de 0,7.	

iii. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 4, 6, 7 e 8, para todas as tipologias, a transmitância térmica (U) em W/m ² K deve ser abaixo de 2,0.	
III. Piso	REQUISITO
a) No caso de sistemas de piso convencionais, a FAD do SINAT do PBQP-H (disponível na página: http://pbqph.mdr.gov.br) pode ser utilizada como dado de entrada de projeto quanto ao desempenho potencial esperado, bem como para apresentar evidências dos meios definidos para o atendimento dos requisitos da ABNT NBR 15575.	Obrigatório
c) O revestimento deve ser em cerâmica esmaltada PEI 4, com índice de absorção inferior a 10% e desnível máximo de 15mm. Para áreas molháveis e rota de fuga, o coeficiente de atrito dinâmico deve ser superior a 0,4.	Obrigatório
IV. Sistemas de Vedação Vertical	REQUISITO
a) No caso de sistemas de vedação vertical convencionais, a FAD do SINAT do PBQP-H (disponível na página: http://pbqp-h.mdr.gov.br) pode ser utilizada como dado de entrada de projeto quanto ao desempenho potencial esperado, bem como para apresentar evidências dos meios definidos para o atendimento dos requisitos da ABNT NBR 15575.	Obrigatório
b) Sistemas de Vedação Vertical Externas: i. Revestimento em concreto regularizado e plano, ou chapisco e massa única ou emboço e reboco, adequados para o acabamento final em pintura. ii. Pintura com tinta látex Standard ou Premium, segundo a norma ABNT NBR 15079, ou textura impermeável. iii. Nas áreas de serviço externas à edificação, o azulejo deverá cobrir no mínimo a largura correspondente ao tanque e a máquina de lavar roupas (largura mínima de 1,20m).	Obrigatório
c) Sistemas de Vedação Vertical Interna: i. Revestimentos internos e de áreas comuns: gesso ou chapisco e massa única ou emboço e reboco, ou ainda em concreto regularizado e plano, adequados para o acabamento em pintura. ii. Pintura com tinta látex Econômica, Standard ou Premium, segundo a norma ABNT NBR 15079, ou textura impermeável. iii. Em áreas molhadas, revestimento com azulejo até altura mínima de 1,50m em todas as paredes da cozinha, área de serviço interna à edificação e banheiro e em toda a altura da parede na área do box.	Obrigatório
d) Absortância solar (α): i. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2 e 3, deve ser garantida a pintura das paredes externas predominantemente em cores claras a médias (absortância solar máxima de 0,6) ou o uso de acabamentos externos predominantemente com absortância solar máxima de 0,6. Cores escuras são admitidas em detalhes.	Obrigatório
e) Transmitância Térmica (U) e Capacidade Térmica (CT): i. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 1 e 2, os limites de Transmitância Térmica (U) em W/m ² K e Capacidade Térmica (CT) em kJ/m ² K para tipologia unifamiliar, devem ser: $U \leq 2,50$ e $CT \geq 130$. Para tipologia multifamiliar, devem ser: $U \leq 1,30$ e $CT \geq 130$, ou $U \leq 0,75$ e $CT \geq 30$. ii. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 3, 4, 5, 6, 7 e 8, os limites de Transmitância Térmica (U) em W/m ² K e Capacidade Térmica (CT) em kJ/m ² K para tipologia unifamiliar, devem ser: $U \leq 1,85$ e $CT \geq 130$, ou $U \leq 0,75$ e $CT \geq 30$. Para tipologia multifamiliar, devem ser: $U \leq 2,50$ e $CT \geq 130$	Adicional
V. Esquadrias	REQUISITO
a) Portas e ferragens:	

<p>i. Portas de acesso e internas em madeira. Em regiões litorâneas ou meio agressivo, admite-se no acesso à unidade porta de aço, PVC ou de alumínio, desde que não possuam vidros em altura inferior à 1,10 m em relação ao piso acabado.</p> <p>ii. Batente em aço ou madeira desde que possibilite a inversão do sentido de abertura das portas. Vão livre entre batentes de 0,80 m x 2,10 m em todas as portas. Previsão de área de aproximação para abertura das portas de acesso (0,60 m interno e 0,30 m externo). Maçanetas de alavanca devem estar entre 0,90 m a 1,10 m do piso. Em tipologia de casa prever ao menos duas portas de acesso, sendo 01 (uma) na sala para acesso principal e outra para acesso de serviço na cozinha/área de serviço.</p> <p>iii. Em portas de aço, pintura com esmalte sobre fundo preparador. Em portas de madeira, com esmalte ou verniz.</p>	Obrigatório
<p>b) Janelas:</p> <p>i. Soluções previstas em todos os vãos externos deverão ser completas e com vidros, sem folhas fixas. É vedada a utilização de aço em regiões litorâneas.</p> <p>ii. Em regiões litorâneas ou meio agressivo, admitem-se janelas em madeira, PVC ou alumínio.</p> <p>iii. É obrigatório o uso de vergas e contravergas com transpasse mínimo de 0,30 m, além de peitoril com pingadeira e transpasse de 2cm para cada lado do vão, ou solução equivalente que evite manchas de escorrimento de água abaixo do vão das janelas.</p> <p>vi. É vedado o uso de cobogós em substituição às janelas.</p> <p>v. Em janelas de aço, pintura com esmalte sobre fundo preparador. Em janelas de madeira, com esmalte ou verniz.</p> <p>vi. Em todas as zonas bioclimáticas, as esquadrias de dormitórios devem ser dotadas de recurso (veneziana, varanda, brise, beiral, anteparo ou equivalente) que permita o sombreamento externo com garantia de ventilação natural. Se acoplado à janela, este elemento deve possibilitar a abertura total da janela para a entrada de luz natural quando desejado.</p> <p>vii. Eficiência das janelas: os limites mínimos do percentual de abertura de elementos transparentes em relação à área do cômodo (P_{tAPP}) e do fator de ventilação da esquadria (FV), e a necessidade de sombreamento devem ser:</p>	Obrigatório
<p>vii.2. Em unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 3 e 4 para tipologia unifamiliar: $P_{tAPP} \geq 17\%$, $FV \geq 0,45$ com recurso de sombreamento nos dormitórios e sala, ou $P_{tAPP} \geq 23\%$, $FV \geq 0,45$ com recurso de sombreamento nos dormitórios. Para tipologia multifamiliar: $P_{tAPP} \geq 17\%$, $FV \geq 0,45$ recurso de sombreamento nos dormitórios e sala.</p>	Adicional

Fonte: Adaptado de Ministério do Desenvolvimento Regional (2021).

ANEXO B - CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN PARA O BRASIL



ZONAS CLIMÁTICAS	CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN
Zona Tropical	● Af Clima tropical úmido ou Clima Equatorial
	● Am Clima de monção
	● Aw Clima tropical com chuvas no inverno
	● As Clima tropical com verão seco
Semi-Árido	● BSh Clima das estepes quente de baixa latitude e altitude
Zona Temperada	● Cfa Clima temperado úmido com verão quente
	● Cfb Clima temperado úmido com verão temperado
	● Cwa Clima temperado úmido com verão quente
	● Cwb Clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado
	● Cwc Clima temperado úmido com inverno seco e verão curto e fresco
	● Csa Clima temperado com verão quente e chuva no inverno
	● Csb Clima temperado com verões amenos e chuvas no inverno

Fonte: Adaptado de Alvares *et al.* (2013).