

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
COBERTURAS METÁLICAS UTILIZADAS EM
EDIFICAÇÕES ESTRUTURADAS EM AÇO**

Ouro Preto, novembro de 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
COBERTURAS METÁLICAS UTILIZADAS EM
EDIFICAÇÕES ESTRUTURADAS EM AÇO**

AUTORA: ALEXANDRA DA SILVA DIAS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Henor Artur de Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, novembro de 2011

D541a Dias, Alexandra da Silva.

Avaliação do desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em edificações estruturadas em aço [manuscrito] / Alexandra da Silva Dias - 2013.

xvi, 92f.: il. color.; graf.; tab.

Orientadora: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Metálica.

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS
METÁLICAS UTILIZADAS EM EDIFICAÇÕES ESTRUTURADAS
EM AÇO**

AUTORA: ALEXANDRA DA SILVA DIAS

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 09 de dezembro de 2011, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Henor Artur de Souza (Orientador / UFOP)



Prof. Dr. Marcílio Sousa da Rocha Freitas (UFOP)



Prof. Dra. Lucila Chebel Labaki (UNICAMP)

Com o mais profundo amor, aos meus pais, Jorge e Onilda, e aos meus avós, Arnaldo e Thereza, pelo incentivo constante às minhas realizações.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e pela força para vencer mais esta etapa.

À Universidade Federal de Ouro Preto, funcionários e professores do mestrado em engenharia civil, pelo apoio e ensinamentos adquiridos.

À CAPES e à FAPEMIG pelo fomento a pesquisa.

Ao meu Orientador, Henor Arthur de Souza, por sua amizade, dedicação e incentivo durante toda a pesquisa.

Aos meus companheiros de pós-graduação, mestrado e doutorado, pelo carinho e em especial a doutoranda Ana Amélia Mazon, pela ajuda na dissertação.

Ao Prof. Marcelo Cid de Amorim, meu noivo, pelo apoio e ajuda na interpretação dos dados.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Uma cobertura eficiente deve apresentar características tais como estanqueidade, resistência ao impacto, leveza e durabilidade, além de propriedades termofísicas adequadas às condições climáticas externas. No Brasil, muitos estudos vêm sendo desenvolvido com o intuito de avaliar a comportamento térmico de vários tipos de telhas. Todavia, poucos avaliam a contribuição das telhas compostas por materiais metálicos e a geometria do telhado para o ganho térmico interno de uma edificação. Desta forma, este estudo procurou avaliar o desempenho térmico de diferentes tipologias de coberturas metálicas utilizadas em galpões estruturados em aço, para as oito zonas bioclimáticas, estabelecidas pela norma NBR 15220. São avaliadas a cor e a forma do telhado e também o material da telha. O desenvolvimento do trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira, investigativa, sobre galpões e coberturas metálicas mais utilizadas no país e a segunda etapa consistiu na realização de simulações numéricas, utilizando *software Energy Plus*. Para avaliação do desempenho térmico, utilizou-se como parâmetro de avaliação a evolução temporal da temperatura interna do galpão e a temperatura superficial da cobertura. Os resultados obtidos mostraram que as tipologias de coberturas que permitem ventilação natural apresentam melhor desempenho, independente da condição climática, destacando-se a cobertura tipo *shed* transversal para condições climática de verão. Para regiões de clima quente e ameno com baixa amplitude térmica diária, as telhas metálicas simples e sem material isolante apresentam desempenho térmico satisfatório. Já para regiões climáticas com elevada amplitude térmica diária as telhas metálicas, tipo sanduíche, que possui material isolante entre as camadas, são mais adequadas.

ABSTRACT

Effective roofing must provide features such as tightness, impact strength, lightness and durability in addition to presenting appropriate thermal properties to external weather conditions. In Brazil, many studies have been developed in order to evaluate the thermal behavior of various types of tiles. However, few evaluate the contribution of tiles with metallic material and the geometry of the roof to the internal heat gain of a building. In this way, this study has been carried out to evaluate the thermal performance of different types of metal roofing used in structured steel sheds for the eight bioclimatic zones established by the standard NBR 15220. It was evaluated the color and shape of the roof and also the material tile. The development work was divided into two stages: the first was an investigation into metal roofs on sheds that was more used in Brazil. The second was numerical simulations, using *Energy Plus* software. To evaluate the thermal performance it was used as a parameter the temporal evolution of shed temperature inside and the roof surface temperature. The results showed that the types of roof with natural ventilation have better performance, regardless of weather conditions, especially the transverse shed roof in summer climatic conditions. For warm and mild climate cities with low daily temperature range, the metal plain roofs without insulating material have satisfactory thermal performance. As for cities climates with high daily temperature range the metal tiles that has insulating material between the layers are more appropriate.

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivo geral.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Estrutura do trabalho.....	3
2. COBERTURAS EM GALPÕES	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Galpões estruturados em aço.....	5
2.2.1 Pórticos planos: vigas e pilares.....	6
2.2.2 Contraventamentos.....	8
2.2.3 Fechamentos.....	8
2.2.4 Terças e vigas de fechamento.....	9
2.3 Coberturas metálicas.....	9
2.3.1 Fabricação e transporte de telhas metálicas.....	11
2.4 Classificação de telhas metálicas.....	12
2.4.1 Telhas trapezoidais, onduladas e zipadas.....	12
2.4.2 Telhas em aço galvanizado, galvalume e pintadas.....	13
2.4.3 Telhas em alumínio.....	15
2.4.4 Telhas termo-acústicas.....	15
2.4.5 Telhas Topsteel e sistemas construtivos para coberturas metálicas.....	16
3. DESEMPENHO TÉRMICO DE GALPÕES COM COBERTURAS METÁLICAS	21
3.1 Estudos bioclimáticos: Olgyay e Givoni.....	21
3.2 Avaliação de desempenho térmico em edifícios.....	24
3.3 A plataforma de simulação: <i>Energy Plus</i>	25
3.1.1 Dados climáticos para avaliação do desempenho térmico.....	27

3.1.2	Propriedades termofísicas dos materiais.....	29
3.4	Normalização brasileira sobre desempenho.....	31
3.5	Métodos adotados para análise do desempenho térmico de coberturas.....	35
4.	METODOLOGIA	37
4.1	Procedimentos para simulação no <i>Energy Plus</i>	38
4.1.1	Parâmetros de simulação.....	38
4.1.2	Localização e clima.....	38
4.1.3	Elementos construtivos das superfícies.....	40
4.1.4	Planejamento de ocupação.....	43
4.1.5	Zonas térmicas e superfícies.....	43
4.1.6	Ventilação natural: <i>Airflow Network</i>	45
4.1.7	Dados de saída.....	45
4.2	Comparação do desempenho térmico com o estrutural.....	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Desempenho térmico de telhas em aço galvanizado para diferentes cores.....	48
5.2	Desempenho térmico de telhas quanto ao tipo de material metálico.....	58
5.3	Desempenho térmico da cobertura quanto à geometria.....	70
5.4	Desempenho térmico versus desempenho estrutural – zona 7.....	84
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	ANEXO I	90

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Galpão estruturado em aço	5
FIGURA 2.2	Pórtico de alma cheia	6
FIGURA 2.3	Pórtico treliçado	6
FIGURA 2.4	Cobertura curva da Escola Municipal Jardim de Ipanema – São Paulo, SP	10
FIGURA 2.5	Cobertura plana do Centro de Distribuição do Pão de Açúcar – São Paulo, SP	10
FIGURA 2.6	Cobertura em shed em arco da Fábrica Ipel – Cajamar, SP	11
FIGURA 2.7	Perfilação de telha metálica	12
FIGURA 2.8	Telhas metálicas armazenadas para o transporte	12
FIGURA 2.9	Telha ondulada	13
FIGURA 2.10	Telha trapezoidal	13
FIGURA 2.11	Telhas zipadas	13
FIGURA 2.12	Proporções de diferentes tipos de metais componentes da telha Galvalume	14
FIGURA 2.13	Composição da chapa de aço pré-pintada	15
FIGURA 2.14	Telha termo-acústica com poliestireno	16
FIGURA 2.15	Telha termo-acústica com poliuretano	16
FIGURA 2.16	Telha termo-acústica com lã de rocha	16
FIGURA 2.17	Telha termo-acústica com lã de vidro	16
FIGURA 2.18	Telha Top steel	17
FIGURA 2.19	Sistema construtivo <i>Roll On</i>	17
FIGURA 2.20	Composição do sistema estrutural <i>Roll on</i>	18
FIGURA 2.21	Solução lumínica do sistema de coberturas <i>Roll on</i>	18
FIGURA 2.22	Lanternins para o sistema de coberturas <i>Roll on</i>	18
FIGURA 2.23	Material isolante térmico Double Band fornecido pelo sistema <i>Roll on</i>	19
FIGURA 2.24	Material isolante térmico Isoband fornecido pelo Sistema <i>Roll on</i>	19
FIGURA 2.25	Relação da condutividade térmica de variados materiais existentes no mercado com diferentes espessuras	19
FIGURA 3.1	Carta Bioclimática de Olgyay	22
FIGURA 3.2	Fluxograma do funcionamento do programa <i>Energy Plus</i> : gerenciador de simulação, gerenciador de soluções integrador e módulos de simulação	26
FIGURA 3.3	Janela inicial do programa Energy Plus	26
FIGURA 3.4	Zoneamento Bioclimático Brasileiro	31

FIGURA 4.1	Tela do <i>IDF Editor</i> para o preenchimento dos dados de entrada	37
FIGURA 4.2	Dados de controle do Energy Plus referentes ao edifício analisado	38
FIGURA 4.3	Dados de entrada do Energy Plus referentes à localização da edificação	38
FIGURA 4.4	Campo de entrada de dados “design day” – referentes ao local onde o edifício analisado está inserido	40
FIGURA 4.5	Telhado em duas águas	44
FIGURA 4.6	Telhado em arco	44
FIGURA 4.7	Telhado com lanternim duplo	44
FIGURA 4.8	Telhado com lanternim simples	44
FIGURA 4.9	Telhado em <i>shed</i> longitudinal	44
FIGURA 4.10	Telhado em <i>shed</i> transversal	44
FIGURA 4.11	Telhado plano	45
FIGURA 5.1	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Curitiba (PR)	49
FIGURA 5.2	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Curitiba (PR)	49
FIGURA 5.3	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Santa Maria (RS)	50
FIGURA 5.4	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Santa Maria (RS)	50
FIGURA 5.5	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Belo Horizonte (MG)	51
FIGURA 5.6	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Belo Horizonte (MG)	51
FIGURA 5.7	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Brasília (DF)	52
FIGURA 5.8	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Brasília (DF)	52
FIGURA 5.9	Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Niterói (RJ)	53

FIGURA 5.10	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Niterói (RJ)	53
FIGURA 5.11	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Campo Grande (MS)	54
FIGURA 5.12	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Campo Grande (MS)	54
FIGURA 5.13	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Porto Nacional (TO)	55
FIGURA 5.14	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Porto Nacional (TO)	55
FIGURA 5.15	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Manaus (AM)	56
FIGURA 5.16	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Manaus (AM)	56
FIGURA 5.17	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Curitiba (PR)	59
FIGURA 5.18	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Curitiba (PR)	59
FIGURA 5.19	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Santa Maria (RS)	60
FIGURA 5.20	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Santa Maria (RS)	60
FIGURA 5.21	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Belo Horizonte (MG)	61
FIGURA 5.22	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Belo Horizonte (MG)	61
FIGURA 5.23	Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Brasília (DF)	62

FIGURA 5.24	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Brasília (DF)	62
FIGURA 5.25	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Niterói (RJ)	63
FIGURA 5.26	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Niterói (RJ)	63
FIGURA 5.27	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Campo Grande (MS)	64
FIGURA 5.28	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Campo Grande (MS)	64
FIGURA 5.29	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Porto Nacional (TO)	65
FIGURA 5.30	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Porto Nacional (TO)	65
FIGURA 5.31	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Manaus (AM)	66
FIGURA 5.32	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Manaus (AM)	66
FIGURA 5.33	Correlação da temperatura superficial das coberturas – telha termo-acústica com lã de rocha – com orientação leste oeste	68
FIGURA 5.34	Correlação da temperatura superficial das coberturas – telha termo-acústica com poliuretano e PVC – com orientação leste oeste	68
FIGURA 5.35	Correlação da temperatura superficial das coberturas – telha em aço galvanizado – com orientação leste oeste	69
FIGURA 5.36	Correlação da temperatura superficial das coberturas – telha <i>Top steel</i> – com orientação leste oeste	69
FIGURA 5.37	Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha em alumínio	69
FIGURA 5.38	Correlação da temperatura superficial das coberturas – telha aço galvanizado com pintura branca – com orientação leste oeste	69
FIGURA 5.39	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Curitiba (PR)	71

FIGURA 5.40	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Curitiba (PR)	71
FIGURA 5.41	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Santa Maria (RS)	72
FIGURA 5.42	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Santa Maria (RS)	72
FIGURA 5.43	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Belo Horizonte (MG)	73
FIGURA 5.44	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Belo Horizonte (MG)	74
FIGURA 5.45	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Brasília (DF)	74
FIGURA 5.46	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Brasília (DF)	75
FIGURA 5.47	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Niterói (RJ)	76
FIGURA 5.48	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Niterói (RJ)	76
FIGURA 5.49	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Campo Grande (MS)	77
FIGURA 5.50	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Campo Grande (MS)	77
FIGURA 5.51	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Porto Nacional (TO)	78
FIGURA 5.52	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Porto Nacional (TO)	79
FIGURA 5.53	Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Manaus (AM)	79

- FIGURA 5.54 Evolução temporal da temperatura interna e externa (0C) do 80
modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no
dia típico de inverno em Manaus (AM)
- FIGURA 5.55 Relação graus-hora de resfriamento e peso estrutural das 84
diferentes tipologias de cobertura para a cidade de Porto
Nacional, analisada para o dia típico de verão

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Indicação de espaçamentos entre pórticos para diferentes vãos	7
TABELA 2.2	Valores de fluxo de calor de telhas com diferentes materiais existentes no mercado	20
TABELA 3.1	Estratégias de condicionamento passivo nos períodos de verão e inverno	33
TABELA 3.2	Classificação dos tipos de fechamento recomendada pela NBR 15.220 para as diferentes zonas bioclimáticas	34
TABELA 4.1	Localização geográfica das cidades analisadas	39
TABELA 4.2	Temperatura máxima e mínima nos dias típicos de verão e inverno das cidades analisadas	39
TABELA 4.3	Valores da taxa de temperatura diária, temperatura máxima de bulbo seco, pressão, velocidade e direção do vento das cidades analisadas, para o dia típico de verão	41
TABELA 4.4	Valores da taxa de temperatura diária, temperatura máxima de bulbo seco, pressão, velocidade e direção do vento das cidades analisadas, para o dia típico de inverno	41
TABELA 4.5	Propriedades termofísicas das telhas analisadas	42
TABELA 5.1	Valores das médias das temperaturas externas e das temperaturas mínima e máxima de conforto, calculadas para cada cidade analisada no dia típico de verão	47
TABELA 5.2	Valores das médias das temperaturas externas e das temperaturas mínima e máxima de conforto, calculadas para cada cidade analisada no dia típico de inverno	48
TABELA 5.3	Temperaturas máximas do galpão com telha em aço galvanizado em diferentes cores, nas zonas bioclimáticas, no dia típico de verão	57
TABELA 5.4	Temperaturas máximas do galpão com telha em aço galvanizado em diferentes cores, nas zonas bioclimáticas, no dia típico de inverno	57
TABELA 5.5	Temperaturas máximas do galpão com telhas em diferentes materiais metálicos, nas diferentes zonas bioclimáticas, no dia típico de verão	67
TABELA 5.6	Temperaturas máximas do galpão com telhas em diferentes materiais metálicos, nas diferentes zonas bioclimáticas, no dia típico de inverno	67
TABELA 5.7	Matriz de coeficiente de determinação (r^2) das telhas analisadas para a cidade de Belo Horizonte (Zona Bioclimática 03)	69

TABELA 5.8	Temperaturas máximas do galpão com diferentes geometrias de cobertura, nas zonas bioclimáticas, no dia típico de verão	81
TABELA 5.9	Temperaturas máximas do galpão com diferentes geometrias de cobertura, nas zonas bioclimáticas, no dia típico de inverno	81
TABELA 5.10	Coberturas com melhor desempenho nos horários de maior temperatura para as zonas bioclimáticas brasileiras nas duas situações climáticas	82
TABELA 5.11	Cálculo de Graus-hora de resfriamento para as diferentes tipologias de cobertura nas oito cidades analisadas para o dia típico de verão	83
TABELA 5.12	Cálculo de Graus-hora de resfriamento para as diferentes tipologias de cobertura nas oito cidades analisadas no dia típico de inverno	83

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Diante do quadro atual de desenvolvimento da construção civil, em especial o setor das construções metálicas, as indústrias investem em tecnologias e buscam estratégias, como o emprego de novos materiais, que atendam às exigências do mercado, objetivando a conquista de novos consumidores e a satisfação de seus usuários, tornando a construção em estrutura metálica mais competitiva.

Seu setor produtivo oferece diversas possibilidades de produtos e variedades de instalação, visando à rapidez na fabricação e montagem dos componentes da edificação (estrutura e fechamento). Porém, alguns dos seus componentes não são conhecidos quanto ao seu desempenho térmico ou não atendem à exigência de conforto de seus usuários. Sendo assim, nestes casos, após a ocupação do edifício são necessárias adoções de medidas que minimizam o ganho térmico do edifício, como a arrefecimento interior, aumentando significativamente o seu consumo de energia.

Quanto ao conforto térmico, que é conseguido pelo controle da influência de elementos climáticos, as normas NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2008) colocam que a edificação deve reunir características que atendam às exigências de conforto térmico dos usuários, em relação às condições climáticas da região de implantação da obra. O desempenho térmico da edificação vai depender da interação térmica e de massa adequada entre fachada, cobertura e piso e o meio externo. Assim estas normas sugerem valores máximos e mínimos diários de temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada, para os dias típicos de verão e de inverno, respectivamente.

Atualmente, um grande avanço do mercado é a utilização de materiais que reduzem o consumo de material e energia antes e após a sua instalação. Segundo Lamberts; Pereira e Dutra (1997), os materiais de construção têm uma forte influência sobre as condições de conforto do ambiente interno de uma edificação. Quando especificados corretamente podem evitar ganhos térmicos excessivos, obtendo-se melhorias nas condições ambientais internas.

Dentre os componentes de uma edificação, a cobertura é o elemento mais importante em relação ao ganho de calor interno. Para o bom desempenho de uma

cobertura são necessários estudos detalhados que englobem todos os aspectos que relacionem propriedades termofísicas do material e a capacidade térmica do sistema de cobertura em relação às condições climáticas locais.

Rivero (1986) afirma que a cobertura metálica pode contribuir para o aumento da temperatura interna de uma edificação, quando não especificada adequadamente. As coberturas com telhas em chapa metálica apresentam grande problema do ponto de vista térmico, principalmente no verão, transformando-se em grandes painéis radiantes e podem alcançar temperaturas superficiais superiores a 60°C.

Outro fator que influencia no ganho térmico de uma edificação é a sua volumetria, quando se tem grandes coberturas expostas à radiação solar. Seu efeito sobre uma construção é quantificado pela intensidade de energia, determinada pelo ângulo de incidência solar. Sendo assim, um mesmo volume de espaço interior com geometrias diversas apresenta comportamentos térmicos globais diferentes, dependendo do local onde a construção está inserida.

Desta forma, torna-se necessário conhecer as telhas metálicas mais utilizadas no mercado da construção civil e avaliar o seu desempenho térmico quando compostas por diferentes materiais e quando utilizadas em diferentes soluções construtivas, considerando que os materiais componentes das coberturas e sua geometria contribuem significativamente para o ganho térmico do interior de uma edificação e o conhecimento do seu comportamento térmico pode contribuir para a melhoria da qualidade do ambiente interno de edificação estruturada em aço.

1.2 Objetivo geral

Avaliar o desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em galpões estruturados em aço, quanto ao material componente da telha e à sua geometria, nas oito regiões bioclimáticas brasileiras definidas pela NBR 15.220.

1.3 Objetivos específicos

- Investigar as possibilidades do *Software Energy Plus*, principalmente quanto aos cálculos de ventilação pela cobertura, por meio do efeito chaminé.

- Avaliar comparativamente o desempenho térmico de galpões compostos por telhas metálicas, utilizando como parâmetro a temperatura interna da edificação nas oito zonas bioclimáticas brasileiras e a temperatura superficial interna da cobertura na zona bioclimática três.
- Identificar qual tipologia de cobertura (material e geometria) pode ser mais recomendada para as zonas bioclimáticas para duas situações climáticas, dia típico de verão e inverno.
- Comparar o desempenho térmico com o estrutural das diferentes soluções construtivas para a zona bioclimática três.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos que compreendem a um capítulo introdutório, dois capítulos de revisão bibliográfica, um de metodologia, um de análise resultados e um de conclusões.

No capítulo dois faz-se uma revisão bibliográfica sobre galpões estruturados em aço e as principais telhas presentes no mercado brasileiro e que são mais utilizadas neste tipo de edificação.

No capítulo três abordam-se questões sobre desempenho térmico de edificações, as principais etapas da análise de desempenho térmico, o programa de simulação numérica *Energy Plus* as normais brasileiras e os trabalhos mais recentes realizados por outros autores sobre este assunto.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia da pesquisa e o no quinto são apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos pela simulação numérica para avaliação do desempenho térmico de galpões estruturados em aço quando compostos por coberturas com diferentes materiais e geometrias. Além de uma análise comparativa do desempenho térmico com o desempenho estrutural de diferentes soluções construtivas de telhas constituídas de telhas metálicas.

No sexto capítulo são apresentadas as principais conclusões e considerações finais sobre os resultados obtidos durante a pesquisa.

2. COBERTURAS EM GALPÕES

2.1 Introdução

As construções em aço vêm apresentando grande crescimento nos últimos anos, devido, principalmente, a algumas características estruturais que conferem ao edifício uma maior economia em todas as fases de seu processo construtivo (projeto, fabricação, transporte e montagem). Nas etapas de fabricação e de projeto, devido à padronização das peças estruturais, as repetições dos perfis racionalizam o trabalho na oficina e os detalhes construtivos de desenho dos projetistas, implicando em redução dos custos totais da obra (SANTOS, 1977).

Também, durante a fase de projeto, o emprego de estruturas metálicas permite soluções mais racionais, com vãos maiores e perfis mais esbeltos, ou seja, com menos material. Como a avaliação do custo de uma estrutura metálica é invariavelmente feita em função do peso do aço estrutural por unidade de área construída, é possível obter soluções construtivas mais econômicas em aço quando comparados com outros sistemas construtivos (CHAVES, 2007).

Como estratégia de padronização de uma edificação em aço utiliza-se a modulação de seus perfis metálicos. O módulo é uma dimensão básica que se repete através da estrutura e pode ser aplicado ao espaçamento das colunas e a detalhes menores. Para um projeto de estrutura metálica o módulo fundamental utilizado está geralmente relacionado à dimensão da chapa padrão (12 metros) e se repete integral ou parcialmente em toda a estrutura (PINHO, 2005).

A elaboração de um projeto de um galpão estruturado em aço apresenta três etapas: projeto conceitual (partido arquitetônico e estrutural), preliminar (pré-dimensionamento) e executivo (detalhes construtivos). Todos devem ser sempre baseados em especificações e normas reconhecidas, observando alguns fatores relativos à sua ocupação, como: locação e dimensionamento dos equipamentos, bem como dos postos de trabalho, circulação, movimentação de carga, iluminação, ventilação, condições e tipo de terreno, entre outros (PINHO, 2005).

Ao se projetar um galpão, a primeira medida a ser tomada é a observação das variáveis climáticas da região onde a construção será inserida. Desta forma, é possível adequar a edificação às condições térmicas natural da região climática escolhida, adotando medidas que influenciem diretamente no desempenho térmico interno da

edificação, por meios puramente naturais.

Entre as medidas que podem ser adotadas, destaca-se: a forma e a orientação solar mais adequada ao edifício, à utilização de dispositivos de controle de radiação solar, a seleção de materiais e procedimentos construtivos mais apropriados e a previsão de uma ventilação perfeitamente controlada são alguns elementos que muitas vezes definem a composição e também a arquitetura de uma região (MAZON, 2005).

2.2 Galpões estruturados em aço

Os Galpões, geralmente, são construções de um pavimento, destinados a fechar e cobrir áreas extensas. Podem ser constituídos de vários materiais (aço, madeira, concreto, alumínio), sendo empregados em conjunto ou separadamente. Entre os materiais componentes do sistema estruturais, o aço é o mais utilizado, em perfis laminados, soldados ou conformados a frio (Figura 2.1). Possui inúmeras vantagens, entre elas, a facilidade de montagem, que pode ser no local da obra ou em parte na oficina e, posteriormente, levado para o local onde será montado (BELLEI, 2006).

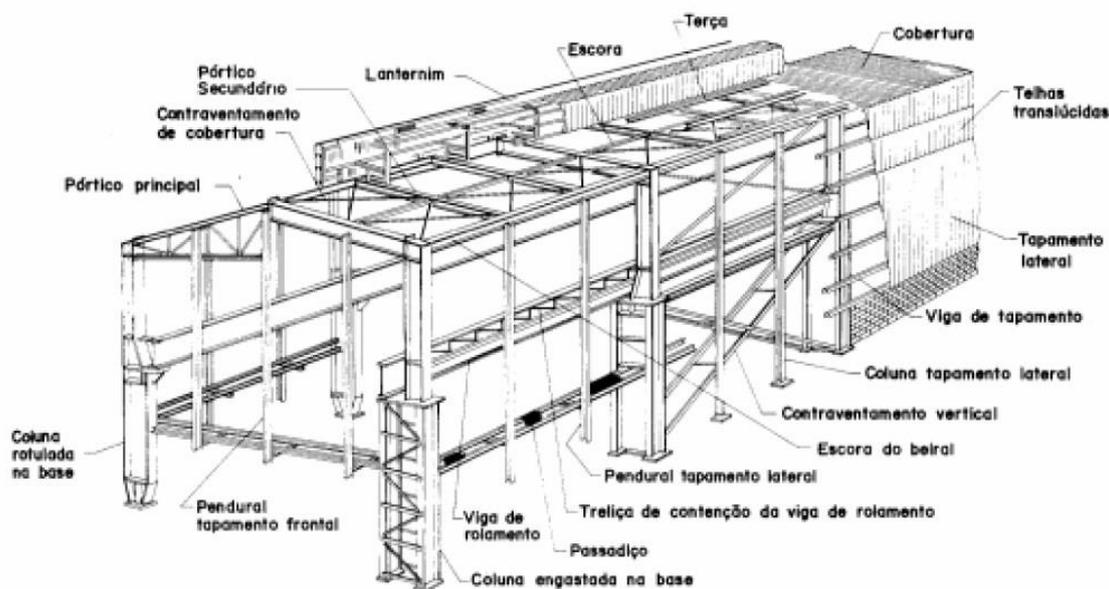


Figura 2.1 – Galpão estruturado em aço
Fonte: BELLEI, 2006

O sistema construtivo de um galpão em aço é composto por pórticos planos (vigas e pilares) regularmente espaçados, elementos de estabilização, como os sistemas de contraventamentos, cobertura e fechamento lateral. Ainda, existem alguns elementos complementares que influenciam na organização da estrutura cujas características estão

estritamente relacionadas com a finalidade da edificação, tais como: pontes rolantes, lanternins e esquadrias (SANTOS, 1977).

2.2.1 Pórticos Planos: vigas e pilares

Os pórticos planos são as estruturas principais de sustentação de um galpão. Existem basicamente dois tipos: os formados por perfis de alma cheia, laminados ou soldados, e os treliçados, que empregam perfis leves (laminados e/ou formados a frio) (Figuras 2.2 e 2.3). A escolha da tipologia de pórtico está relacionada com a segurança e economia da estrutura. O pórtico de alma cheia apresenta-se mais econômico para vãos livres da ordem de 20 m e o treliçado para vãos maiores que 25 m, oferecendo uma resistência equivalente ao primeiro com um menor consumo de aço (BELLEI, 2006).

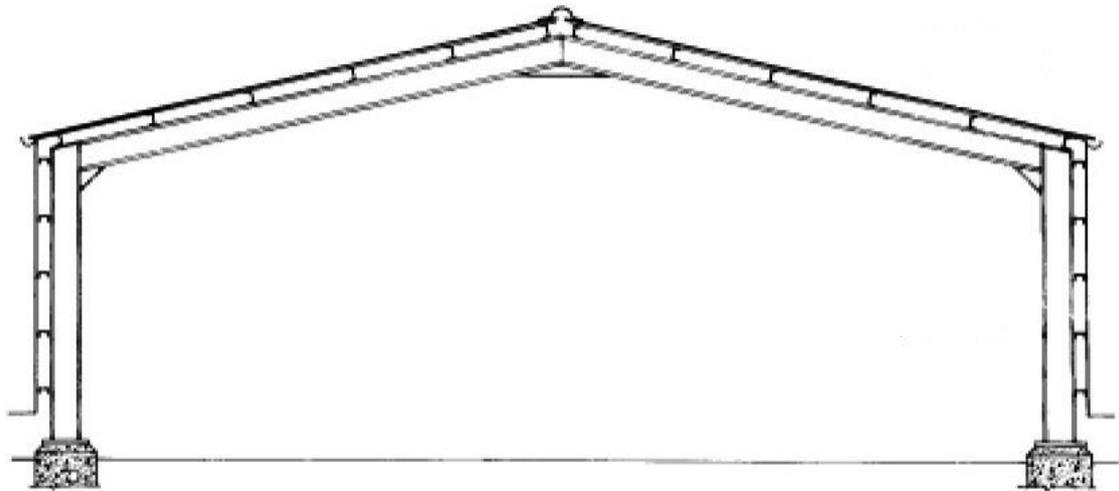


Figura 2.2 – Pórtico de alma cheia
Fonte: BELLEI, 2006

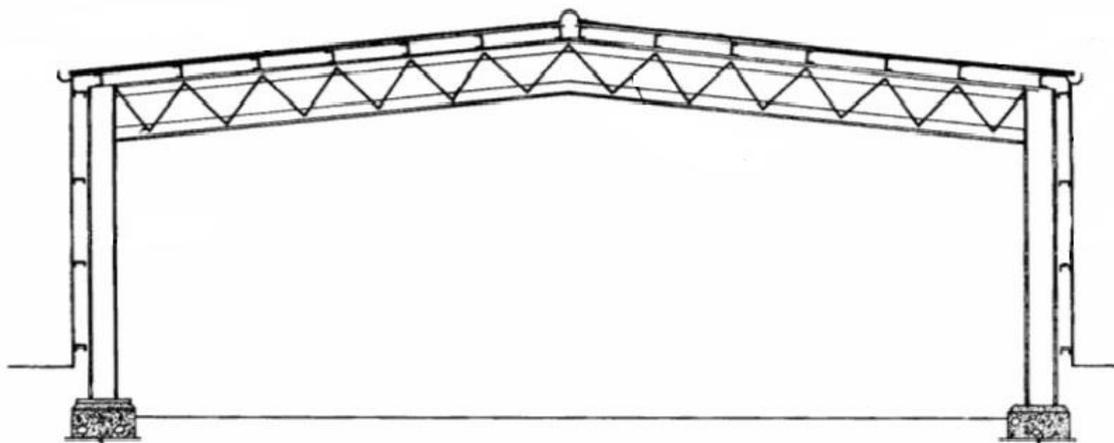


Figura 2.3 – Pórtico treliçado
Fonte: BELLEI, 2006

Segundo Pinho (2005), as estruturas em alma cheia são mais limpas, requer menor número de elementos, possui rápida montagem e manutenção simples. São recomendados para galpões pequenos e médios e apesar de consumirem mais aço são mais vantajosos, visto que demanda muito menos serviços para a sua execução.

O conjunto portante de um galpão (pórticos) e os espaçamentos entre eles no sentido longitudinal deve ser ajustado para melhor atender as condições específicas do processo de operação de um edifício, sem perder de vista a importância de uma solução segura e econômica. Espaçamentos menores reduzem a quantidade de terças para a cobertura e os painéis de vedação, mas aumentam o número de pórticos e fundações. Espaçamentos maiores, apesar da necessidade de um número maior de terças, podem ser mais econômicos se estas forem utilizadas de forma racional (CHAVES, 2007).

Bellei (2006) classifica os galpões estruturados em aço em: pequeno, médio, longo e de inércia variada. Na tabela 1.1 apresenta-se a indicação, para cada tipo de galpão, de espaçamentos mais convenientes entre os pórticos para diferentes vãos.

Tabela 2.1 – Indicação de espaçamentos entre pórticos para diferentes vãos

	Vão	Espaçamento entre pórticos
Pequeno	até 15 m	3 a 5 m
Médio	de 16 m a 35 m	4 a 8 m
Longo	de 36 m a 45 m	8 a 10 m
Inércia Variada	de 46 m a 60 m	9 a 12 m

Fonte: BELLEI, 2006.

Os pórticos planos são formados por colunas e vigas de cobertura, também denominada tesoura. As vigas têm como função dar estabilidade às estruturas e receber as cargas de cobertura, transmitindo-as para as colunas. São formadas por perfis laminados, soldados ou vazados, originados de ambos. Podem ser com altura constante, para vãos até 30m, ou variáveis, muito usado em grandes vãos, acima de 30m, para galpões sem ponte Rolante (CHAVES, 2007).

As colunas suportam as ações transversais que atuam na construção, transmitindo-as até as fundações. Podem ser de alma cheia ou treliçada, com seção constante ou variável. Basicamente, cada coluna é composta de três partes principais:

fuste, que é o elemento portante básico da coluna; ponto de ligação, que serve de apoio para as outras partes da estrutura e a base, que tem por finalidade distribuir as cargas nas fundações, além de fixá-las (BELLEI, 2006).

As bases dos pilares podem ser rotuladas ou engastadas. As bases rotuladas são mais econômicas para as fundações e podem ser usadas em qualquer tipo de terreno, especialmente em locais de solo ruim. As bases engastadas propiciam estruturas mais econômicas, mas têm as fundações mais caras (PINHO, 2005).

Usualmente, a base rotulada mais simples é formada por uma placa soldada na coluna com dois chumbadores no centro, o mais próximo do seu eixo e a engastada é aquela em que a coluna é soldada a placa de base, com os chumbadores afastados da linha de centro, formando um braço de alavanca (BELLEI, 2006).

Quando as bases são engastadas, as ligações viga/coluna podem ser flexíveis, se rotuladas, é necessário que as ligações sejam rígidas. Caso contrário, a estrutura torna-se hipostática, necessitando de estabilização longitudinal, como os contraventamento entre pilares e vigas de cobertura (SANTOS, 1977).

2.2.2 Contraventamentos

Os contraventamentos são elementos estruturais que garantem ao galpão estabilidade e rigidez espacial durante sua vida útil e durante a fase de montagem. Podem ser horizontais, localizados nos planos das terças e cordas das tesouras; e verticais, entre pilares, estando sujeitos, basicamente, aos esforços de tração e compressão (BELLEI, 2006).

Geralmente, quando localizados na cobertura formam treliças, dispostas no plano das terças, que juntamente com os contraventamentos laterais, absorvem as ações longitudinais que atuam na estrutura, transmitindo-as para as fundações, garantindo assim a estabilidade longitudinal da construção (CHAVES, 2007).

2.2.3 Fechamentos

Os Fechamentos são elementos que envolvem uma edificação, com função estrutural ou somente de vedação, que protege seu exterior e interior de intempéries. Devido à grande compatibilidade do sistema construtivo em aço com diversos tipos de materiais, para os fechamentos podem ser utilizados materiais convencionais (tijolos e blocos, lajes moldadas in loco) ou componentes pré-fabricados (lajes e painéis de concreto, painéis “*Dry-wall*”), sendo, em muitos casos, escolhidos de acordo com a

agilidade e economia de sua instalação.

2.2.4 Terças e vigas de fechamento

As terças são vigas de cobertura que têm como finalidade suportar as telhas. Estão normalmente sujeitas as solicitações de flexão dupla e excepcionalmente a flexão simples (caso do telhado plano), provocadas pelas cargas atuantes sobre as telhas, como: cargas acidentais (chuva, poeira, pessoas na cobertura) e pelas cargas provocadas pelo vento, que podem ser de pressão ou sucção (BELLEI, 2006).

As vigas de fechamento são terças dispostas na horizontal, com inclinação nula. São locadas entre colunas e servem de apoio às placas de tapamento. Estão sujeitas a solicitações de flexão dupla: no sentido da maior inércia, provocada pela pressão ou sucção do vento, e no sentido de menor inércia, provocada pelo peso próprio das vigas e chapas de tapamento (BELLEI, 2006).

2.3 Coberturas metálicas

As coberturas têm a função de separar o ambiente interno do externo, protegendo a edificação da chuva e do vento e mantendo a temperatura em níveis adequados. Sua composição pode conter um ou mais planos com diferentes geometrias, inclinadas ou em arco, e constitui-se basicamente de dois elementos: as telhas, e a armação, que corresponde ao conjunto de elementos estruturais para a sustentação da cobertura (ripas, caibros, terças, tesouras e contraventamentos) (MOLITERNO, 2007).

A geometria de uma cobertura também pode ser determinada pela presença de elementos que auxiliam na ventilação e a iluminação natural interna da edificação, como: lanternim, ventiladores axiais, caixilhos ou venezianas industriais (para estrutura em *shed*), peças e arremates especiais que devem ser previstos juntos com o fornecimento das telhas (CBA, 2006).

Para que uma cobertura apresente bom desempenho seu material deve possuir características como leveza, impermeabilidade, resistência as intempéries, baixa condutividade térmica, elevada resistência mecânica, facilidade do manuseio na montagem, bom aspecto estético e baixo custo (PINHO, 2005).

Existem, no mercado brasileiro, diversos fabricantes de telhas, com diferentes materiais e técnicas construtivas. A escolha do tipo de telha é feita de acordo com a finalidade e a forma da edificação, determinante para a definição da inclinação do seu

telhado (Figura 2.4). Para edifícios industriais de grandes dimensões, como no caso de galpões estruturados em aço, as coberturas metálicas apresentam-se mais vantajosas, devido, principalmente, as características físicas e mecânicas do material (Figura 2.5 e 2.6).



Figura 2.4 – Cobertura em arco da Escola Municipal Jardim de Ipanema , São Paulo, SP
Fonte: ARCOWEB, 2011



Figura 2.5 – Cobertura plana do Centro de Distribuição do Pão de Açúcar, São Paulo, SP
Fonte: MARKO, 2008



Figura 2.6 – Cobertura em *Shed* em arco da Fábrica Ipel, Cajamar, SP
Fonte: ARCOWEB, 2011

Entre as características físicas e mecânicas destacam-se a impermeabilidade do material, que confere ao produto leveza e menor sobrecarga à estrutura; a facilidade de transporte, montagem e execução da cobertura; e o comprimento sob medida das telhas, projetada com uma única peça e pequenas inclinações, diminuindo a quantidade final de telhas, além de seus elementos fixadores e de vedação, reduzindo o tempo de execução da cobertura (CBA, 2006).

2.3.1 Fabricação e transporte de telhas metálicas

A fabricação das telhas metálicas é feita pelo processo de perfilação, em perfiladeiras estacionárias ou transportáveis, sendo, a última, executadas no local da obra (Figura 2.7). Para a conformação das peças, as chapas de aço cortadas a partir de bobina passam por uma sequência de roletes até chegar a sua forma ondulada ou trapezoidal (TELAPORT, 2010).

Quando produzida na fábrica, o transporte deve obedecer às normas de descarregamento e armazenamento, recomendadas pelo fabricante, como:

- Evitar atrito ou choque durante o descarregamento das telhas;
- Evitar descarregar as peças sob chuva;
- Armazená-las secas e sob lona impermeável (Figura 2.8);
- Recomendam-se para manusear as telhas de até 6m quatro homens e acima deste comprimento seis homens.



Figura 2.7 – Perfilação de telha metálica
Fonte: ANANDA, 2010



Figura 2.8 – Telhas metálicas armazenadas para o transporte
Fonte: ANANDA, 2010

2.4 Classificação de telhas metálicas

As telhas metálicas podem ser classificadas, quanto ao seu material, como, as telhas galvanizadas, de alumínio, as pintadas e as termo-acústicas, e quanto à geometria da chapa, como, as planas, as onduladas, as trapezoidais e as zipadas. As duas últimas apresentam diferentes dobras de acordo com o padrão de seu fabricante.

2.4.1 Telhas trapezoidais, onduladas e zipadas

As diversas conformações geométricas das telhas conferem às peças diferentes desempenhos em relação à resistência mecânica. As chapas com corrugação trapezoidal e zipadas são mais vantajosas quando comparadas às telhas onduladas, apesar destas apresentarem menor custo e maior flexibilidade, sendo mais eficiente quando empregadas em telhados em arco, Figuras 2.9 a 2.11 (EUCATEX, 2006).

A maior vantagem das telhas trapezoidais em relação às telhas onduladas é o seu elevado momento de inércia obtido de acordo com as diferentes dobras da chapa. Sua elevada resistência permite a utilização das telhas em grandes vãos e um maior

espaçamento entre vigas de apoio. Em alguns casos, podem-se suprimir as terças e apoiar as telhas diretamente sobre a estrutura suporte, principalmente em telhados com baixa declividade, como os plano ou os com inclinação de aproximadamente 5% e sobreposição de 200 mm (BELLEI, 2006).

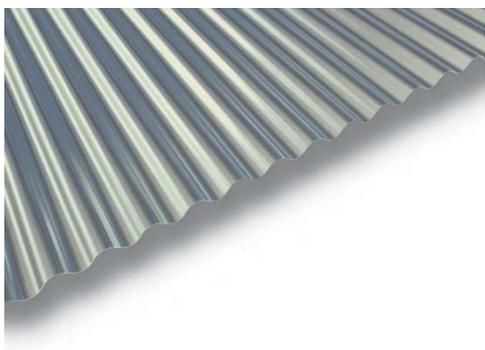


Figura 2.9 – Telha ondulada
Fonte: CIA. BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2006

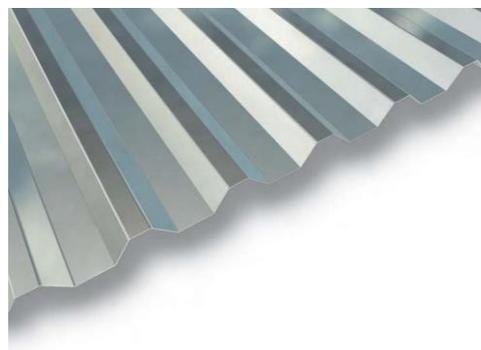


Figura 2.10 – Telha trapezoidal
Fonte: CIA. BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2006



Figura 2.11 – Telhas zipadas
Fonte: CIA. BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2010

2.4.2 Telhas em aço galvanizado, galvalume e pintadas

Normalmente, para adquirir uma maior durabilidade, as telhas em aço recebem tratamentos de proteção contra a corrosão atmosférica, dependendo do tipo de uso e da construção para a qual foi especificada. Como exemplo pode-se destacar as telhas galvanizadas. Estas são constituídas por chapas de aço revestidas por uma camada de zinco, obtida a partir de um processo de imersão a quente (galvanização). A proteção funciona por meio de dois mecanismos: a barreira mecânica da camada de zinco, segundo o fabricante, a uma taxa de corrosão de 10 a 50 vezes mais lenta que o aço, e proteção galvânica ou sacrificial, que ocorre na exposição simultânea do par aço-zinco (TELAPORT, 2010).

Também podem receber em sua composição alumínio, denominadas pelos fabricantes por galvalume ou zincalume. Trata-se de uma liga de 55% alumínio, 43,5% de zinco e 1,5% de silício (Figura 2.12). Estas são indicadas para ambientes mais agressivos como os ambientes industriais, por possui uma maior resistência a corrosão (ANANDA, 2010).

De acordo com o fabricante, as telhas galvalume possuem uma proteção contra corrosão quatro vezes maior que o aço galvanizado sobre as mesmas condições. A combinação do zinco com o alumínio reúne o desempenho do zinco em proteger bordas e pequenas discontinuidades contra a corrosão atmosférica e a resistência por barreira mecânica oferecida pelo alumínio (ETERNITY, 2008).

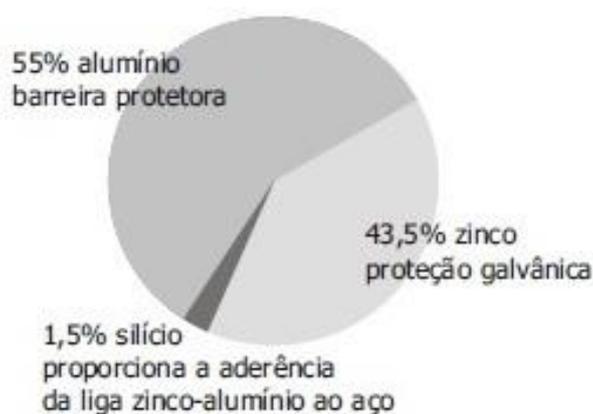


Figura 2.12 – Proporções de diferentes tipos de metais componentes da telha Galvalume
Fonte: ISOESTE, 2010

Entre todos os métodos aplicados no combate a corrosão um dos mais difundidos é a pintura devido a sua facilidade de aplicação. Este processo pode ser empregado antes ou após a conformação da chapa metálica. Quando pré-pintada sofre pintura antes da sua perfilação, possui acabamento *topcoat* e *primes* à base de poliéster, poluretano (PU) ou epóxi, Figura 2.13 (TELAPORT, 2010).

As telhas pintadas após sua moldagem recebem uma pintura eletrostática que consiste na aplicação de tinta à base de resina poliéster. Durante o processo de fabricação as telhas são colocadas em transportadores horizontais, passam pela cabine de pintura e recebem uma demão de tinta. Posteriormente, são encaminhadas para uma estufa, onde permaneceram até a completa cura da tinta (ANANDA, 2010).

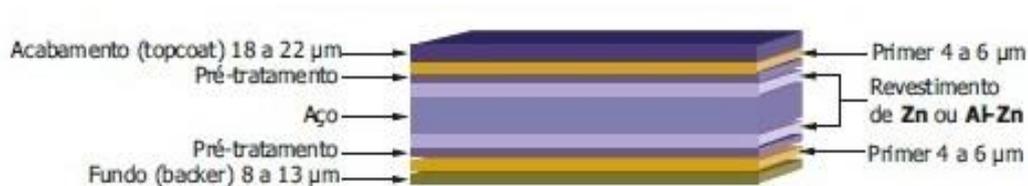


Figura 2.13 – Composição da chapa de aço pré-pintada
Fonte: ISOESTE, 2010

2.4.3 Telha em alumínio

As chapas de alumínio, assim como as de aço, podem ser obtidas em vários perfis. Embora as chapas de alumínio sejam mais caras que as de aço, elas pesam menos, e, em grandes coberturas, pode apresentar uma menor carga de peso próprio sobre a estrutura. Contudo, existe uma restrição a esse respeito: dependendo das dimensões do telhado e do ângulo de inclinação, o efeito da carga do vento é o inverso do peso próprio. Portanto, uma estrutura mais leve requereria maior ancoragem que uma estrutura normal (BELLEI, 2006).

2.4.4 Telha termo-acústica

As telhas termo-acústicas são basicamente formadas por duas chapas, cujo interior é composto por uma camada de material isolante. Tem como principal finalidade o isolamento térmico e acústico, melhorando a qualidade do ambiente interno da edificação. Sua composição, com diferentes materiais e grande espessura, confere a peça grande resistência mecânica, possibilitando grandes espaçamentos entre terças, e resistência a fortes ventos, assim como cargas concentradas no meio do vão (BELLEI, 2006).

Apresenta em seu interior, entre duas telhas metálicas ou uma metálica e outra em PVC, um isolante resistivo, como o poliestireno, o poliuretano, a lã de vidro e a lã de rocha (Figuras 2.14 a 2.17). Estes são constituídos por materiais que reduzem a transferência de calor por condução. A resistência térmica destes materiais é devida principalmente à grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares. Algumas espumas podem conter ainda nos seus poros outros gases, com condutividade menor que a do ar (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003).



Figura 2.14 – Telha termo-acústica com poliestireno
Fonte: ANANDA, 2010

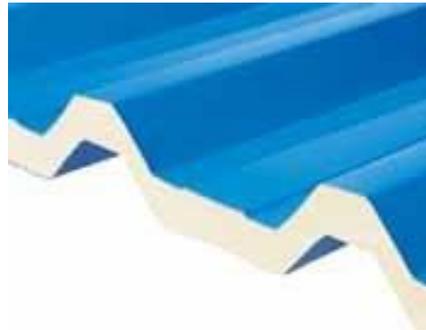


Figura 2.15 – Telha termo-acústica com poliuretano
Fonte: ANANDA, 2010



Figura 2.16 – Telha termo-acústica com lã de rocha
Fonte: ANANDA, 2010



Figura 2.17 – Telha termo-acústica com lã de vidro
Fonte: EUCATEX, 2006

Existem muitos tipos de isolantes térmicos resistentes para coberturas disponíveis no mercado brasileiro. Os materiais usualmente encontrados são de três tipos: materiais inorgânicos, orgânicos e metálicos ou membranas refletivas. No primeiro grupo existem os materiais fibrosos ou celulares, formados pelos materiais fibrosos e celulares, formados pelos materiais: fibra de vidro e lã rocha, silicato de cálcio e vermiculite. O segundo grupo também se divide em dois, materiais fibrosos e celulares, formados por celulose, algodão, madeira, fibras sintéticas e poliestireno, poliuretano e outros polímeros. No último grupo se encontram as mantas formadas por um material de baixa emissividade (MICHELS, 2007).

2.4.5 Telhas *Topsteel* e sistemas construtivos para coberturas metálicas

Atualmente, o mercado brasileiro vem oferecendo novos produtos e tecnologias de construção para coberturas de edifícios. Entre os mais utilizados podem ser citadas as telhas *Top steel* do fabricante Brasilit e os sistemas construtivos de cobertura metálica *fast roof* da empresa Eucatex e *Rool on* da Marko.

As telhas *Top steel* são chapas trapezoidais compostas por quatro diferentes

materiais (tinta, alumínio, asfalto oxidado e aço) distribuídas em sete camadas, totalizando uma espessura de aproximadamente 2 mm (Figura 2.18). Apresenta uma gama de cores e comprimentos que variam de 2 a 12 m (BRASILIT, 2010).

O sistema construtivo *fast roof* apresenta armação em vigas treliçadas dispostas paralelamente, interligadas por terças e travamentos fixados por meio de parafusos, que são cobertos por telhas metálicas do tipo trapezoidais, zipadas e termoacústicas, definida de acordo com o tipo de construção (EUCATEX, 2006).

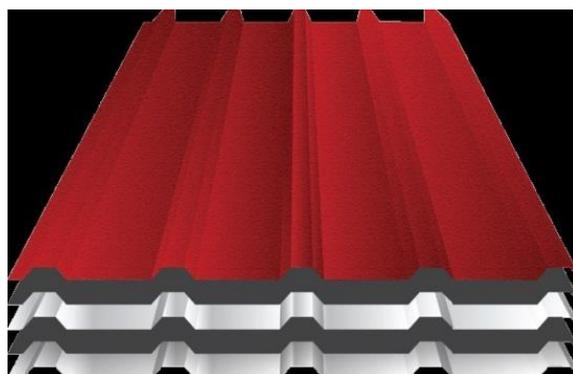


Figura 2.18 – Telha Top steel
Fonte: BRASILIT, 2010

O sistema construtivo *Roll on* é um sistema integrado de estrutura e cobertura metálica. O método é composto por treliças formando vigas paralelas dispostas de forma modular. Entre duas treliças são desenroladas bobinas contínuas de aço revestido (Galvanizado, Galvalume ou pré-pintado), criando canais, com caimento de até 1%, ao longo do comprimento da cobertura (Figura 2.19). Além das treliças e chapas em aço, compõem o conjunto estrutural: travessas, cintas e cobrejuntas (MARKO, 2008).



Figura 2.19 – Sistema construtivo *Roll On*
Fonte: MARKO, 2008

O sistema de cobertura modular *Roll on* oferece algumas alternativas com diferentes equipamentos e materiais que integrados ao sistema podem auxiliar no conforto (térmico, acústico e lumínico) da edificação (Figura 2.20). Para melhorar as condições lumínicas do ambiente interno o sistema apresenta possibilidade de substituição de chapas de aço por chapas translúcidas de fibra de vidro ou policarbonato (Figura 2.21).

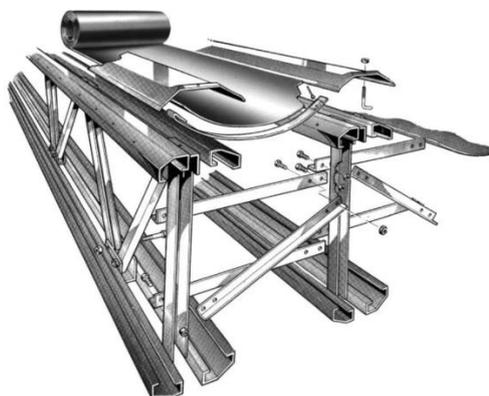


Figura 2.20 – Composição do sistema estrutural *Roll on*
Fonte: MARKO, 2008

Também, buscando condições térmicas mais satisfatórias, o fabricante desenvolveu lanternins especialmente adaptados ao módulo da cobertura ou telhas com a combinação de chapas de aço e materiais isolantes, como nos sistemas *Double Band* e *Isoband* (Figura 2.22). O primeiro consiste na aplicação de uma manta de lã de rocha ou vidro entre duas chapas metálicas e o segundo na composição de um filtro leve flexível do mesmo isolante térmico do sistema anterior ou de um colchão de ar formado por alvéolos revestido por lâminas de alumínio (Figura 2.23 e 2.24).



Figura 2.21 – Solução lumínica do sistema de coberturas *Roll on*
Fonte: MARKO, 2008



Figura 2.22 –Lanternins para o sistema de coberturas *Roll on*
Fonte: MARKO, 2008

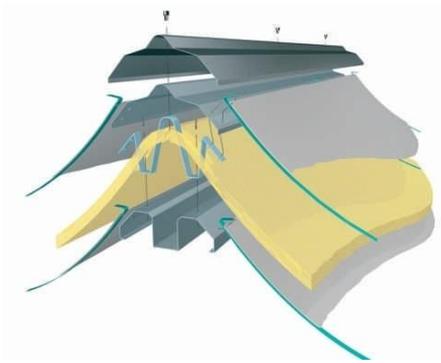


Figura 2.23 – Material isolante térmico *Double Band* fornecido pelo Sistema *Roll on*
 Fonte: MARKO, 2008



Figura 2.24 – Material isolante térmico *Isoband* fornecido pelo Sistema *Roll on*
 Fonte: MARKO, 2008

Alguns fabricantes brasileiros (MARKO, 2008; EUCATEX, 2006) apresentam em seus catálogos estudos comparativos do desempenho térmico de seus produtos com outros presentes no mercado. Segundo estudos divulgados pelo fabricante Eucatex (2006) as telhas metálicas com isolantes térmicos apresentam transmitância térmica menor, ou seja, melhor desempenho térmico que as de outros materiais, como as telhas cerâmicas e as de fibrocimento (Figura 2.25).

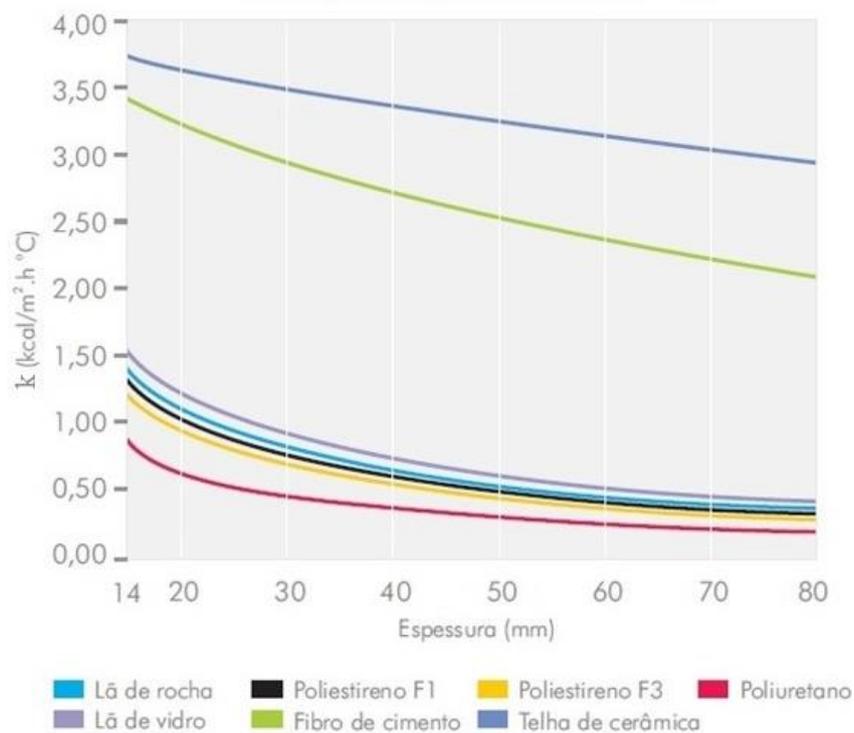


Figura 2.25 – Relação da transmitância térmica de variados materiais existentes no mercado com diferentes espessuras
 Fonte: EUCATEX, 2006

Outro estudo presente no catálogo do fabricante Marko (2008), realizado pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) compara o desempenho térmico do sistema de cobertura *Roll on*, com e sem isolante térmico, com outras telhas convencionais, por meio da análise do fluxo de calor de cada material. A análise foi realizada submetendo os diferentes materiais, com a mesma espessura, a radiação solar direta e temperatura ambiente de 24^oC (Tabela 2.2). Os dados apontam para um melhor desempenho do sistema de cobertura fornecido pelo fabricante em relação aos demais produtos analisados.

Os estudos sobre o comportamento térmico de materiais presentes no mercado caracterizam uma maior preocupação dos profissionais da construção civil e seus consumidores quanto às condições de conforto das edificações, sem que estas comprometam a sua economia e a segurança.

Tabela 2.2 – Valores de fluxo de calor de telhas com diferentes materiais existentes no mercado

Cobertura		Fluxo de calor (W/m²)
1	Cimento amianto	197
2	Concreto pré-moldado	173
3	Alumínio	108
4	Aço zincado com 0,5 mm espessura	108
5	Aço pré-pintado branco	81
6	<i>Roll on</i> com 0,65 mm espessura	71,2
7	Alumínio + poliuretano	25
8	Aço zincado + poliuretano	25
9	Aço zincado + lã de rocha	24
10	Aço zincado + lã de vidro	21
11	<i>Roll on</i> com lã de vidro	20,6

Fonte: MARKO, 2008

3. DESEMPENHO TÉRMICO DE GALPÕES COM COBERTURA METÁLICA

3.1 Estudos bioclimáticos: Olgay e Givoni

As condições de conforto são em função de uma série de variáveis, sendo estas classificadas como humanas, quando determinadas pelo metabolismo gerado pela atividade física do indivíduo e por sua vestimenta, e ambientais quando determinada pelas variáveis climáticas (temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a pressão parcial do vapor d'água no ar ambiente).

A partir destas variáveis foi desenvolvida uma série de estudos que procuram determinar as condições de conforto e os vários graus de conforto e desconforto por frio ou calor, por meio de índices de conforto térmico. De forma geral, estes índices são desenvolvidos fixando um tipo de atividade e a vestimenta do indivíduo para relacionar as variáveis do ambiente e reunir, sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos.

Os índices de conforto podem ser divididos em dois grandes grupos: os que estão baseados no balanço de calor e os que possuem uma abordagem adaptativa. O princípio da teoria adaptativa estabelece que ao ocorrer uma mudança de temperatura que produz desconforto, as pessoas reagem de maneira a tentar restaurar seu conforto, por meio de ajustes comportamentais, fisiológicos e psicológicos (ASHRAE, 2004).

Enquanto o modelo de balanço de calor é capaz de explicar alguns graus de comportamento adaptativo, como mudar algumas roupas ou ajustar a velocidade do ar no local, este ignora a dimensão psicológica de adaptação, que pode ser particularmente importante em contextos, onde as interações entre as pessoas com o ambiente ou as diversas experiências térmicas vividas pelos indivíduos podem alterar suas expectativas e também, a sua sensação térmica de satisfação. Um contexto particular em que esses fatores desempenham papel importante é para os edifícios ventilados naturalmente (DE DEAR; BRAGER, 2002).

O primeiro diagrama climático, chamado Carta Bioclimática, foi desenvolvido por Olgay (OLGYAY, 1968). Este método relaciona as variáveis de temperatura de bulbo seco e umidade relativa e sugere diretrizes para ventilação e uso da radiação para inverno (Figura 3.1). É aplicável somente para condições externas e em condições moderadas de ar, a 40° de latitude, para indivíduos usando vestimenta comum em

exercício de trabalho sedentário ou ligeiramente físico (MACIEL, 2002).

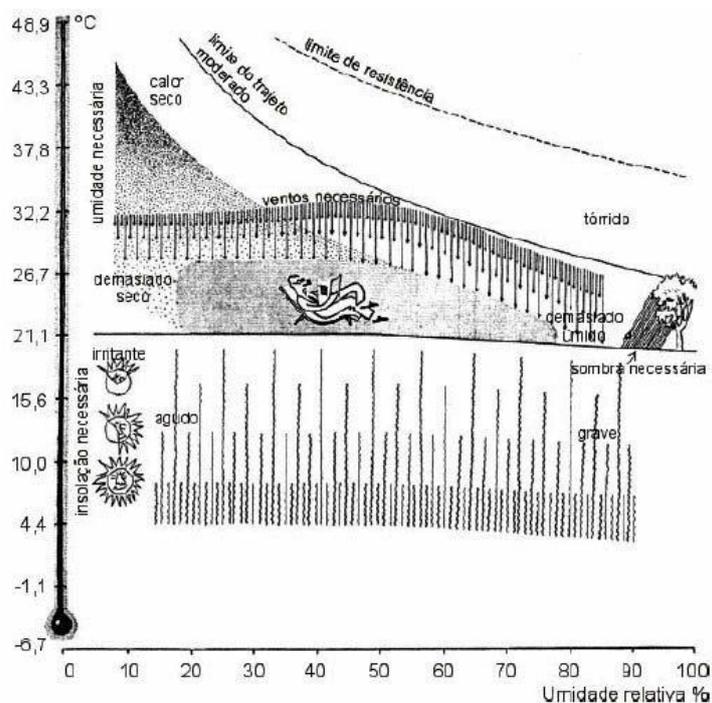


Figura 3.1– Carta Bioclimática de Olgay

Fonte: OLGAY, 1968

Posteriormente, a carta foi aprimorada pelo mesmo autor, em 1973, sendo adaptado para regiões mais quentes com a inclusão de dados obtidos pelo desenvolvimento de seu trabalho para a Universidade del Valle em Cali na Colômbia (OLGAY, 1973). Esta nova carta incluiu mais variáveis climáticas, como nebulosidade, precipitações, ventos e energia solar, no qual podem ser registradas as necessidades de proteção contra os elementos climáticos não desejados. Com a inserção destes elementos, foi possível incorporar recomendações climáticas quanto à seleção do tecido urbano e do paisagismo, num nível geral, e quanto aos tipos de habitação e de planta (sua forma, volume, orientação e cor das superfícies externas) num nível específico (ROMERO, 2007).

Apesar da carta de Olgay representar um grande avanço, ao incluir os dados referentes às regiões quentes, para Goulart et al. (1994), sua carta bioclimática não representa o melhor modelo de conforto para o clima tropical. Somente mais tarde, Givoni (1976), com base nos estudos de Olgay, desenvolveu a carta bioclimática de edificações, sendo esta mais adaptável ao clima tropical por considerar a influência da aclimação de pessoas de regiões mais quentes. Um dos aspectos particular deste estudo é a alteração do limite superior da sensação desconforto de 27°C para 29,7°C

quando a velocidade aumenta de 0,1 para 1,5 m/s. Também, sugere limites de condições climáticas dentro dos quais algumas estratégias de projeto e sistemas de resfriamento natural poderiam garantir conforto interno (ventilação, inércia térmica com ou sem ventilação noturna e resfriamento evaporativo) (MACIEL, 2002).

Recentemente, a ASHRAE financiou pesquisas de campo em 160 edifícios de escritórios, em quatro diferentes continentes, para quantificar a diferença entre as respostas térmicas de pessoas em ambientes com ar-condicionado e edifícios naturalmente ventilados. Os dados coletados foram reunidos em um vasto banco de dados chamado de RP - 884. Com os resultados encontrados foi possível desenvolver uma proposta de conforto adaptativo (ACS) para edifícios naturalmente ventilado (DE DEAR; BRAGER, 2002).

Uma diferença significativa dos modelos de conforto baseados no modelo PMV/PPD de Fanger (1970) para o novo modelo adaptativo é que os dados climáticos destes modelos anteriores são todos extraídos do ambiente interno imediatamente ao redor dos ocupantes do edifício e requerem que os usuários tenham conhecimento do isolamento das roupas dos ocupantes do edifício e das taxas metabólicas, que são muitas vezes difíceis de estimar no campo. Ao contrário dos modelos adaptativos, que estão em função apenas da temperatura média externa de bulbo seco (T_{ext}). Desta forma, a temperatura de conforto ideal (T_{conf}) foi recalculada com base na temperatura média externa:

$$T_{conf} = 0,31 T_{a,ext} + 17,8 \quad (3.1)$$

onde $T_{a,ext}$ é a média mensal da temperatura externa

Neste mesmo estudo, De Dear e Brager (2001) investigaram por meio de questionário o grau de satisfação térmica dos ocupantes nos edifícios naturalmente ventilados, adotando os mesmos parâmetros utilizados por Fanger (ISO, 1994) para avaliação do PMV (Escala Sétima da ASHRAE). De acordo com a aceitabilidade dos ocupantes dos edifícios analisados, verificaram que particularmente em ambientes com ventilação natural, as temperaturas internas consideradas neutras pelos usuários eram significativamente mais quentes em locais de clima quente que em locais de clima frio.

Também, por meio da análise do RP-884 encontrou-se uma temperatura interna que provocou um número mínimo de desconforto por parte dos usuários (preferência de

mais quente ou mais frio) em função da temperatura externa do edifício no momento da pesquisa. Com isso, verificou-se que dentro de um edifício naturalmente ventilado a temperatura de conforto aumenta cerca de 1°C para cada aumento de 3°C na média mensal da temperatura externa.

Apesar destas constatações, os questionários utilizados no estudo de campo que originaram o banco de dados RP-884 não foram suficientes para testar empiricamente esta relação entre a sensação térmica e a porcentagem de insatisfeito, visto que os itens do questionário referentes à insatisfação térmica foram utilizados em um número pequeno de estudos de campo.

Mesmo assim, os autores De Dear e Brager (2001) adaptaram as equações lineares de PMV/PPD aceitas e divulgadas pelas normas de conforto térmico, como a ISO 7730 (ISO, 1994), para o modelo de conforto adaptativo, correlacionando a temperatura externa do edifício ao grau de aceitabilidade térmica dos seus ocupantes para edifício naturalmente ventilados, são elas:

- $T_{\text{conf}} (\text{°C}) = 0,31 (T_{\text{ar. ext}}) + 21,3$ (para limite superior a 80% de aceitabilidade) (3.2)

- $T_{\text{conf}} (\text{°C}) = 0,31 (T_{\text{ar. ext}}) + 20,3$ (para limite superior a 90% de aceitabilidade) (3.3)

- $T_{\text{conf}} (\text{°C}) = 0,31 (T_{\text{ar. ext}}) + 14,3$ (para limite inferior a 80% de aceitabilidade) (3.4)

- $T_{\text{conf}} (\text{°C}) = 0,31 (T_{\text{ar. ext}}) + 15,3$ (para limite inferior a 90% aceitabilidade) (3.5)

3.2 Avaliação do desempenho térmico em edifícios

A avaliação do desempenho térmico consiste na verificação da resposta global da edificação às interações associadas aos processos de transferência de calor e massa com o meio externo, dependendo da modalidade da edificação, podendo ser: naturalmente ventilados ou condicionados artificialmente. (AKUTSU, 1998; ABNT, 2008).

Os edifícios climatizados artificialmente, que possuem regime térmico estacionário são caracterizados por manter as temperaturas dos corpos e/ou das superfícies sempre constantes, tanto para verão quanto para inverno, onde os equipamentos devem ser mantidos funcionando e consumindo energia para manterem esta situação. Já os edifícios naturalmente ventilados encontram-se em regime periódico onde as superfícies, como os materiais construtivos, apresentam comportamentos diferentes ao amortecer os fluxos interno e externo de calor e deste modo, gerar uma

carga térmica interna variável.

A avaliação do desempenho térmico de uma edificação abrange uma série de condicionantes que permite que o processo seja flexível e que seja indicado para diversos objetivos. É possível restringir uma avaliação a uma edificação real, investigando o desempenho frente aos componentes, sistemas ou ao uso da edificação, assim como é possível utilizar modelos teóricos a fim de investigar situações que possam ser consideradas comuns para um grupo de edificações. Em todos os casos, a simulação numérica é uma ferramenta que auxilia a avaliação energética da edificação, podendo ser utilizada para verificação dos impactos no consumo de energia, nas temperaturas dos ambientes internos, nas cargas térmicas ou nas trocas térmicas com o ambiente externo, dentre outros usos (CLARKE, 1985).

3.3 A plataforma de simulação: *Energy Plus*

O *Energy Plus* é um programa computacional desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. Foi desenvolvido a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Sua principal vantagem em relação aos programas de origem é a simulação integrada e simultânea que utiliza um modelo relativamente simples de organização e controle de dados necessários para simular as muitas combinações de sistema de energia, horários e ambientes (CRAWLEY et al, 2000).

Este *software* possui um conjunto de diversos módulos de programas que trabalham juntos para calcular a energia responsável pelo aquecimento ou arrefecimento de um edifício, utilizando uma variedade de sistemas e fontes de energia. Todos os sistemas são controlados por um gerenciador de simulação (Figura 3.2). Este gerenciador, denominado gerenciador de soluções integradas, controla a interação entre as zonas térmicas e o ambiente externo a partir de intervalos de tempo determinados, no mínimo um quarto de hora, e período de simulação (dia típico, mês, ano etc) selecionado pelo usuário (CRAWLEY et al, 2001).

O núcleo de simulação é um modelo de edifício baseado nos princípios fundamentais do balanço térmico. Este módulo de balanço de calor e massa além de simula o equilíbrio térmico do ambiente interior e exterior, considera as interconexões entre este balanço e as condições de contorno do modelo, incluindo os cálculos de

condução, convecção, radiação e efeitos de transferência de massa (vapor de água).

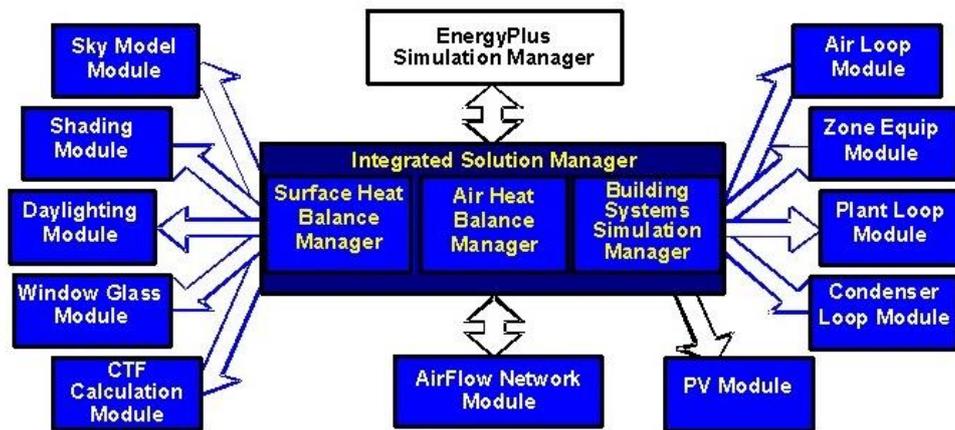


Figura 3.2 – fluxograma do funcionamento do programa *Energy Plus*: gerenciador de simulação, gerenciador de soluções integradas e módulos de simulação
Fonte: DOE, 2011

Para começar uma simulação no *Energy Plus* abre-se uma janela inicial dividida em três funções principais: a primeira permite: criar, seleccionar ou editar um arquivo de dados de entrada, denominado pelo programa de *IDF Editor (Input data file)*. A segunda permite seleccionar um arquivo com dados climáticos de uma região, criada pelo usuário ou adquirida através do software. A terceira mostra os resultados através de texto, planilha de dados de saída ou visualizador de imagem (Figura 3.3).

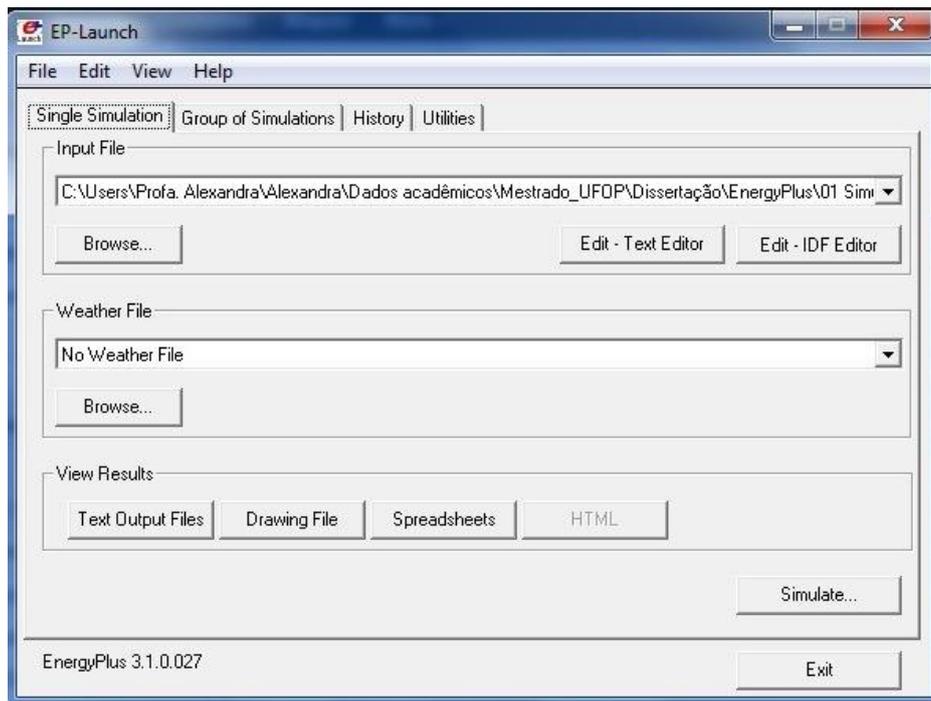


Figura 3.3 – Janela inicial do programa *Energy Plus*
Fonte: DOE, 2011

Para inserir e editar os dados de simulação abre-se a janela “*edit - IDF Editor*”, esta encontra-se organizada em uma lista de itens (*class list*), cada qual representando um grupo de informações a serem fornecidas para o programa, como: parâmetros de simulação, planejamento do uso da edificação, período de análise, materiais construtivos, zonas e superfícies térmicas, clima e local onde a edificação está inserida.

O programa também disponibiliza campos referentes ao tipo de ventilação do interior da edificação, divididas em natural e artificialmente ventiladas. Este foi desenvolvido a princípio para cálculo de carga térmica para ar condicionado, por isso disponibiliza diversos itens destinados ao dimensionamento de sistemas completos de climatização artificial, No entanto, para edifícios naturalmente ventilados basta deixar este campos em aberto que o programa simula o balanço térmico e energético do ambiente interno não climatizado, considerando somente os parâmetros fornecidos de abertura para o fluxo de ar natural (BUTTNER, 2009).

No final da lista de itens na janela *IDF editor*, esta disponibiliza opções de relatório de saída do programa, com uma lista de possibilidade de dados de saída para análise, como resultado da simulação.

Após a simulação com sucessivas interações, caso algum dado de entrada esteja inserido incorretamente, o programa gera um relatório de erros para auxiliar o usuário a retomar ou realizar uma nova análise. Caso, todos os dados estejam inseridos corretamente, o programa gera um relatório de saída, emitido em formato de arquivo de texto, conforme as variáveis que deseja obter e o intervalo configurado pelo usuário.

3.3.1 Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico

Dentre as variáveis que caracterizam uma região, podem-se distinguir as que mais interferem no desempenho térmico dos espaços construídos: a oscilação diária e anual da temperatura e umidade relativa, a quantidade de radiação solar incidente, o grau de nebulosidade no céu, a predominância de época e o sentido e velocidade dos ventos e índices pluviométricos.

Para a avaliação do desempenho térmico estas variáveis são calculadas para um determinado período climático de onde a edificação está inserida. As informações climáticas podem ser inseridas na simulação numérica por meio de diferentes tipos de arquivos climáticos, sendo os mais utilizados no Brasil: o ano climático de referência –

TRY (Test Reference Year) e os dias típicos de projeto para verão e inverno. O arquivo TRY é obtido pela eliminação de anos que contenham temperaturas médias mensais extremas. É o ano real que mais se aproxima da normal climatológica (OLIVEIRA, 2006). Os dias típicos são caracterizados por sua frequência de ocorrência para um período de 10 anos e representam as condições mais significativas ao longo deste período no verão e no inverno. Adota-se a frequência de ocorrência de 10% tanto para o dia típico de verão como para o dia típico de inverno (AKUTSU, 1998).

Com relação à temperatura do ar é possível afirmar que dificilmente se encontra sobre o planeta dois lugares com condições climáticas iguais. Esta variável climática depende da latitude, da quantidade diária da radiação solar disponível, da proximidade com o mar ou de zonas úmidas e da altitude, além do deslocamento de grandes massas de ar que às vezes a altera bruscamente. Apesar da influência da radiação solar sobre a temperatura do ar de um determinado local, esta não é consequência direta da ação dos raios solar e sim de um complexo balanço energético.

A radiação solar é uma energia eletromagnética, de onda curta, que atinge a terra após ser parcialmente absorvido pela atmosfera. Sua intensidade varia em função da época do ano, latitude e altitude. Olgay (1973) após seu estudo sobre o efeito do clima em edifícios realizado em quatro regiões representativas das principais zonas bioclimáticas dos Estados Unidos comprovou que a latitude interfere na quantidade de radiação incidente nas superfícies de uma edificação, relacionando a incidência nas superfícies horizontais (telhado) às superfícies verticais (paredes) e entre as diferentes fachadas, quanto à sua orientação.

A incidência da radiação sobre superfícies horizontais e verticais é igualmente máxima na linha do equador (latitude 0°) e diminui gradativamente até o polo (latitude 90°), chegando a uma incidência mínima. Em todas as latitudes, o lado norte recebe somente uma pequena quantidade de radiação, principalmente no verão. Contudo, nas latitudes baixas durante o verão, o lado norte recebe quase duas vezes mais o impacto que recebe o lado sul (ROMERO, 2007).

Outro fator que também influi na intensidade de radiação é a altitude. A intensidade da radiação recebida na superfície da terra aumenta com a altura, pois a atmosfera, de menor espessura, absorve menos energia.

3.3.2 Propriedades termofísicas dos materiais

A envoltória de uma edificação é constituída por componentes (paredes, telhados e esquadrias) que separam o meio interno do externo e estes devem ser adequados às condições térmicas externas de maneira a auxiliar nas trocas de energia térmica, proporcionando, da melhor forma possível, um ambiente apropriado às exigências de conforto de seus usuários. Desta forma, para a obtenção de conforto térmico em ambientes internos é necessário uma interação adequada entre o projeto arquitetônico e as variáveis climáticas da região onde será implantada a edificação.

O efeito da radiação solar sobre uma construção, ou quaisquer superfícies no planeta, é quantificado pela intensidade de energia e o ângulo de incidência que variam, basicamente, segundo três fatores: localização geográfica, orientação e época do ano. Para um ambiente interno confortável é necessário a observação de todos os elementos que compõem a edificação (seu volume, posicionamento e proporção de fechamentos opacos e transparentes, além das propriedades termofísicas dos materiais) e adaptá-los as condições climáticas do local onde será implantada. Rivero (1986) observou em seus estudos que um mesmo volume de espaço interior com geometrias diversas apresenta comportamentos térmicos globais diferentes, dependendo da localização da construção.

As principais propriedades termofísicas que determinam o comportamento térmico de um material podem ser: as que determinam sua capacidade térmica (calor específico, condutividade térmica e massa específica) e aquelas associadas à radiação (absortância e a emissividade).

A absortância (α) é a capacidade do material em absorver a radiação incidente em sua superfície (a porção não absorvida é refletida e, no caso de materiais translúcidos ou transparentes uma proporção de radiação incidente é transmitida através do material). A absorção ocorre dentro do material, não somente na superfície, e depende da forma da radiação e das características dos materiais (AMORIM, 1998).

Outra propriedade determinante para o comportamento térmico de um material é a emissividade. A emissividade térmica (ϵ) é a razão do fluxo radiante total emitido por um corpo em relação ao fluxo emitido por um corpo negro ideal à mesma temperatura. Podem-se encontrar, em um mesmo material, diferentes emissividades para os diversos comprimentos de ondas eletromagnéticas. Sua intensidade depende da natureza da superfície do material, podendo ser influenciada por seu método de fabricação, seu ciclo

térmico e suas reações químicas com o meio ambiente. Superfícies metálicas e de bons condutores geralmente possuem emissividade mais baixa que não condutores (AMORIM, 1998).

Quando o ganho de calor é determinado por radiação solar, o comportamento dos materiais é seletivo, segundo a radiação incidente, de modo que a quantidade de energia absorvida, refletida e transmitida varia conforme o comprimento de onda. A emissão de radiação térmica é resultado de oscilações dos elétrons que constituem um material e se dá através da propagação de ondas eletromagnéticas no ar ou no vácuo. Em sólidos ou líquidos, as oscilações dos elétrons que se encontram no interior de um material são absorvidas pelas moléculas adjacentes e a radiação emitida por esse corpo sólido depende somente das moléculas que se encontram numa finíssima camada de sua superfície exposta, deste modo a temperatura da superfície é determinante. (INCROPERA; DEWITT, 1998).

Granja (2002) investigou a influência da cor por meio da absorptância à radiação solar da face externa de um fechamento e a diminuição desta influência à medida que se aumenta a sua espessura. Desta forma, por meio de exemplos numéricos, calculou-se o fluxo de calor em uma placa de concreto (emissividade de 0,9), considerando duas situações: variando a espessura da placa de 5 cm para 20 cm e a cor de cinza ($\alpha = 0,7$) para branca ($\alpha = 0,2$). Para os cálculos foram consideradas as condições climáticas de um dia típico de verão na cidade de Campinas (SP) e temperatura interna constante do edifício de 26⁰C.

Nos resultados obtidos constatou-se, em números absolutos, que a influência cromática na transmissão de calor em fechamentos opacos de edificações adquire maior importância em estruturas com menor espessura. Neste caso, Granja (2002) levanta a hipótese que no caso estudado o aumento da espessura passa a suplantando o efeito da cor na densidade do fluxo de calor.

Além do aumento da espessura, para minimizar os efeitos dos mecanismos de transferência de calor frente às condições climáticas externas, recomenda-se a utilização de técnicas de resfriamento passivo, como a utilização de isolante resistivo tradicional nas superfícies internas, ou o emprego de materiais de alta refletância e baixa emissividade nas superfícies externas (VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003).

3.4 Normalização brasileira sobre desempenho

No Brasil, existem algumas normas recomendadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que tratam sobre desempenho térmico de edificações. A norma NBR 15220 (ABNT, 2005) estabelece um zoneamento bioclimático e parâmetros e procedimentos para a avaliação do desempenho térmico de edificações, como definições, símbolos e unidades, relacionadas ao assunto, valores de propriedades termofísicas dos materiais, emissividade e absorvância, de superfícies de diferentes cores e materiais.

O zoneamento bioclimático brasileiro (ABNT, 2005) trata-se de um estudo, onde foram reunidas 330 cidades brasileiras, dividindo o território nacional em 6.500 células, cada uma das quais caracterizadas por sua posição geográfica e por suas variáveis climáticas (médias mensais de temperatura máxima e mínima e de umidade relativa do ar). Desta forma, estabeleceram-se oito diferentes zonas bioclimáticas relativamente homogêneas quanto ao clima e formulou-se um conjunto de recomendações técnico-construtivas, como estratégias de condicionamento passivo, que otimizam o desempenho térmico das edificações, por meio de sua maior adequação climática (Figura 3.4).

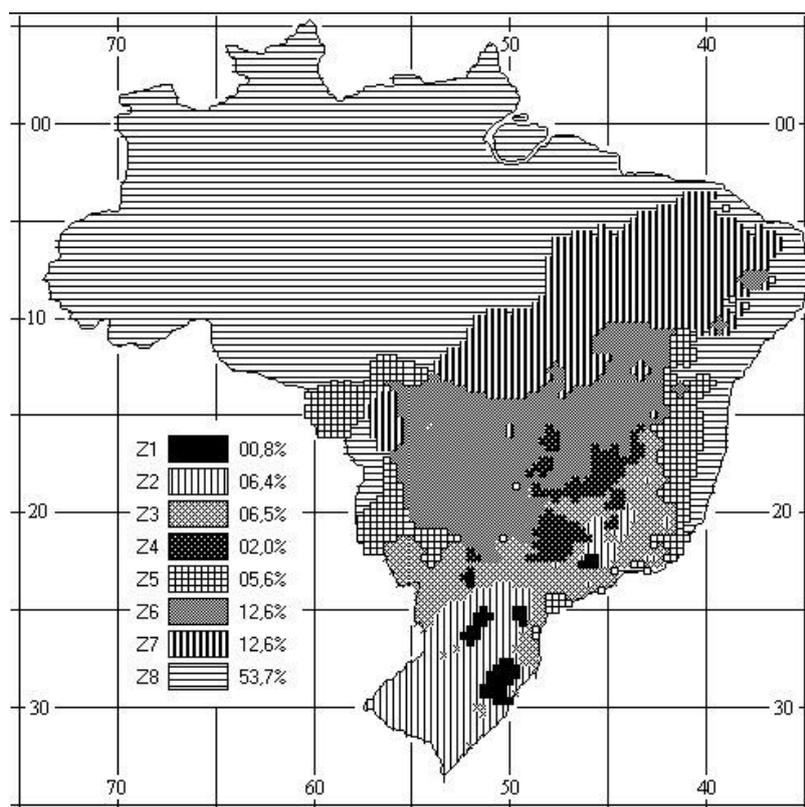


Figura 3.4 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro

Fonte: ABNT, 2005

Na tabela 3.1 apresentam-se as zonas bioclimáticas brasileiras (Figura 3.4) e as suas respectivas estratégias de condicionamento térmico passivo, para os dias de verão e inverno, recomendadas pela NBR 15.220 (ABNT, 2005), voltadas para habitação unifamiliar de interesse social.

Desta forma, na norma NBR 15.220 recomenda-se, no período de inverno, a utilização de fechamento interno pesado em quase todas as zonas climáticas, exceto as zonas que apresenta temperaturas quentes o ano todo, para manter a temperatura interna confortável. Também se ressalta que, para as zonas que apresentam temperaturas muito baixas no inverno, ZB – 01 e ZB – 02, as estratégias sugeridas não serão suficientes para manter a temperatura interna da edificação dentro da zona de conforto.

Ainda para os períodos frios, para o aquecimento da edificação, em algumas zonas (ZB – 01 a ZB – 04), a norma recomenda o melhor aproveitamento da radiação solar, por meio da correta orientação e geometria da edificação, observando as variáveis climáticas da região onde será implantada a edificação.

Em períodos quentes, recomenda-se a ventilação cruzada como estratégia de condicionamento passivo para quase todas as zonas bioclimáticas, exceto a ZB – 01, que apresenta temperaturas baixas durante grande parte do ano. A ventilação cruzada é caracterizada pela localização das aberturas de entrada e de saída do ar que estão situadas em planos (paredes) opostos ou adjacentes, facilitando a circulação do ar, com as aberturas de entrada situadas em zonas de altas pressões e as de saída, em zonas de baixas pressões (MAZON, 2005).

A norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) também faz recomendações quanto aos materiais que devem ser usados para fechamento externo (paredes e coberturas) das edificações em cada zona bioclimática. Estas são classificadas como: leves, leves isoladas, leves refletoras e pesadas (Tabela 3.2). Além disso, para a ZB – 08 são feitas observações adicionais quanto às coberturas, permitindo transmitância térmica acima dos valores tabelados, desde que estas contenham aberturas para ventilação no mínimo em dois beirais opostos, estas aberturas ocupem toda a extensão das duas fachadas e que sua altura seja determinada pela equação:

$$FT = 1,17 - 1,07 \times h^{-1,04} \quad (3.6)$$

onde FT é o fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da

zona bioclimática 8 e h é a altura da abertura em dois beiras opostos, em centímetros.

Outra norma que estabelece parâmetros para o desempenho térmico de edificações é a norma NBR 15.575 (ABNT, 2008), que trata do desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos.

Esta norma possui seis capítulos e define que uma edificação habitacional de até 5 pavimentos deve reunir características que atendam às exigências humanas quanto ao conforto térmico, levando em consideração a região de implantação da obra, as características bioclimáticas determinadas pela NBR 15.220 (ABNT, 2005) e a interatividade do desempenho térmico dos materiais que compõem a fachada, a cobertura e o piso do edifício.

Tabela 3.1 – Estratégias de condicionamento passivo nos períodos de verão e inverno

Zona Bioclimática (ZB)	Estação do ano	Estratégia de condicionamento térmico passivo
ZB – 01	Inverno	Aquecimento solar da edificação Vedação interna pesada (inércia térmica)
ZB – 02	Verão	Ventilação cruzada
	Inverno	Aquecimento solar da edificação Vedação interna pesada (inércia térmica)
ZB – 03	Verão	Ventilação cruzada
	Inverno	Aquecimento solar da edificação Vedação interna pesada (inércia térmica)
ZB – 04	Verão	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
	Inverno	Aquecimento solar da edificação Vedação interna pesada (inércia térmica)
ZB – 05	Verão	Ventilação cruzada
	Inverno	Vedação interna pesada (inércia térmica)
ZB – 06	Verão	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
	Inverno	Vedação interna pesada (inércia térmica)
ZB – 07	Verão	Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
ZB – 08	Verão	Ventilação cruzada permanente

Fonte: ABNT, 2005

A norma NBR 15.575 (ABNT, 2008) também estabelece três procedimentos para a verificação do desempenho térmico: um normativo, presente nos capítulos 4 e 5 para o sistema de fechamento e cobertura respectivamente, e outros dois informativos, baseados em simulação numérica de desempenho térmico de edificação e medição *in loco*.

Tabela 3.2 – Classificação dos tipos de fechamento recomendada pela NBR 15.220 para as diferentes zonas bioclimáticas

Zona bioclimática	Vedação externa	Tipos de vedação	Transmitância térmica U (W/m ² K)
ZB – 01	Parede	Leve	$U \leq 3,00$
	Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$
ZB – 02	Parede	Leve	$U \leq 3,00$
	Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$
ZB – 03	Parede	Leve refletora	$U \leq 3,60$
	Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$
ZB – 04	Parede	Pesada	$U \leq 2,20$
	Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$
ZB – 05	Parede	Leve refletora	$U \leq 3,60$
	Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$
ZB – 06	Parede	Pesada	$U \leq 2,20$
	Cobertura	Leve isolada	$U \leq 2,00$
ZB – 07	Parede	Pesada	$U \leq 2,20$
	Cobertura	Pesada	$U \leq 2,00$
ZB – 08	Parede	Leve refletora	$U \leq 3,60$
	Cobertura	Leve refletora	$U \leq 2,30$ FT

Fonte: ABNT, 2005

Sendo assim, nesta norma, para os procedimentos de verificação global do desempenho térmico por meio de simulações computacionais são definidos requisitos, critérios e métodos de avaliação detalhados, com a recomendação da utilização do *software Energy Plus*. Os requisitos são diferenciados para edificações existentes ou em fase de projeto e definidos para duas situações climáticas distintas: dia típico de verão e de inverno.

Do mesmo modo, consta nesta mesma norma os requisitos e critérios para a verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de coberturas. Como requisito para isolamento térmica uma cobertura, esta deve apresentar transmitância térmica (U) com valores máximos admissíveis e absorvância a radiação solar que proporcionem um desempenho térmico apropriado para cada zona bioclimática.

3.5 Métodos adotados para análise do desempenho térmico de coberturas

Nos últimos anos, algumas pesquisas foram realizadas no Brasil, com o intuito de avaliar o desempenho térmico de coberturas em edificações. Estas contribuíram para o melhor entendimento do comportamento térmico das edificações compostas por diferentes materiais nas diversas regiões bioclimáticas brasileiras. Neste sentido, destacam-se as análises de desempenho térmico de coberturas quanto ao material utilizado na composição de telha e quando compostas por diferentes estratégias de isolamento térmico, como a barreira radiante (material de baixa emissividade, posicionado na face interna de um elemento construtivo da edificação, que geralmente é em alumínio polido, em lâmina ou folhas muito finas, com espessura na ordem de 6 a 8 μm e emissividade menor que 0,1). As análises geralmente são feitas por meio de simulação numérica ou medições *in loco* em protótipos.

Vittorino, Sato e Akutsu (2003) por meio de análise numérica e observação *in loco* quantificaram os efeitos da barreira radiante no desempenho térmico de coberturas na cidade de São Paulo e o comportamento deste material quando expostos as condições externas. Os resultados apontaram que a inserção de barreira radiante em um telhado pode reduzir pela metade o fluxo de calor para o interior da edificação. Porém, quando este material sofre deterioração do tempo (acúmulo de poeira, corrosão devido à umidade) pode reduzir sua eficiência, elevando sua emissividade em até três vezes o valor inicial (de 0,12 para 0,4).

Outra pesquisa sobre barreira radiante desenvolvida por Camargo, Sato e Prado (2006) avaliou comparativamente o desempenho térmico de dois protótipos de uma casa térrea de 39 m² na cidade de São Paulo, uma com barreira radiante e outra somente com telha de fibrocimento. Os resultados foram obtidos por meio de medições *in loco* e analisados segundo o cálculo de PPD desenvolvido por Fanger. Estes apontaram uma diferença de conforto nos dois protótipos, com 86% de pessoas insatisfeitas para o protótipo com telhas e 9,3% para o protótipo com barreira radiante.

Algumas pesquisas foram desenvolvidas com a intenção de avaliar comparativamente o desempenho térmico de coberturas com diferentes tipologias de telhas. Peralta (2006) comparou o desempenho térmico de células testes com quatro diferentes tipologias de telhas: de aço, fibrocimento, cerâmico e material reciclado (de embalagem longa vida) na cidade de São Carlos. Posteriormente, as duas primeiras

tipologias de telhas foram pintadas de branco. Para a pesquisa foram coletados dados de temperatura interna e temperatura superficial das telhas. Os resultados apontaram um melhor desempenho para telhas que receberam a pintura externa.

Mais tarde, nesta mesma linha de pesquisa, Buttner (2009) comparou o desempenho térmico de coberturas em edificações comerciais horizontais, na cidade de Cuiabá - MT, compostas por diferentes topologias de telhas: termo-acústica, asfáltica, composta por fibras orgânicas vegetais e telha metálica simples com forro de PVC. Em uma segunda etapa, as coberturas receberam pinturas clara e escura e uma subcobertura composta de barreira radiante. Os dados foram obtidos por meio de simulação numérica e os resultados demonstraram que as telhas com pintura clara apresentam melhor desempenho que as telhas escuras e que o efeito de redução da carga térmica interna por meio de barreira radiante é maior que pela pintura branca.

4. METODOLOGIA

Para a presente pesquisa foram adotados procedimentos de avaliação do desempenho térmico de edificações naturalmente ventilados por meio de simulações numéricas. Antes de se iniciar a etapa das simulações foi necessária uma revisão bibliográfica sobre os procedimentos de avaliação do desempenho térmico de uma edificação, incluindo as normas brasileiras que tratam de desempenho. Também foi realizada uma revisão bibliográfica sobre galpões de múltiplo uso e as telhas metálicas mais usuais, utilizadas no mercado da construção civil no Brasil que serviram como embasamento para definir o modelo e os materiais empregados na simulação.

As simulações foram realizadas pelo *Software Energy Plus*, na versão 3.1 (Figura 4.1). Estas foram divididas em duas etapas: a primeira consistiu na comparação do desempenho térmico de um galpão estruturado em aço quando composto por diferentes telhas metálicas mais usuais, utilizadas no mercado da construção civil e a segunda na avaliação comparativa do desempenho térmico de diferentes soluções construtivas em coberturas estruturadas em aço.

A seguir serão descritas as etapas do processo de simulação ordenadas de acordo com as etapas das simulações e com a inserção dos dados no programa.

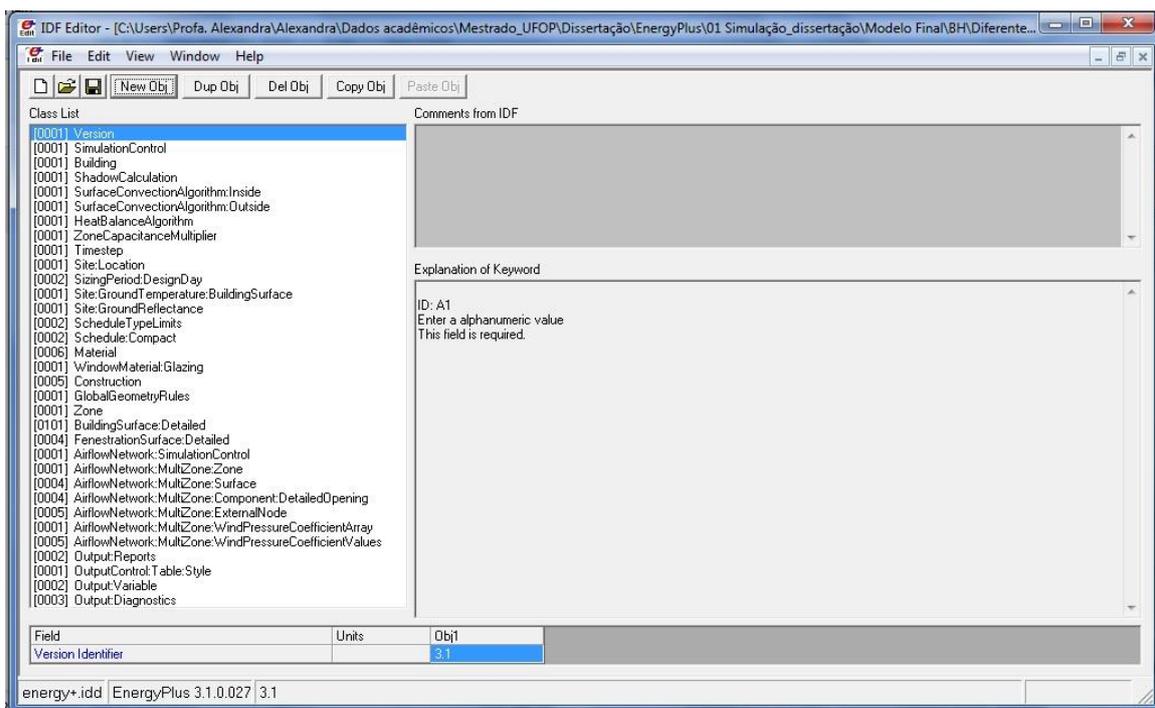


Figura 4.1 – Tela do *IDF Editor* para preenchimento dos dados de entrada

4.1 Procedimentos para simulação no *Energy Plus*

4.1.1 Parâmetros de simulação

O campo denominado parâmetros de simulação no *Energy Plus* são uma compilação de dados referentes ao modelo matemático escolhido para o cálculo matemático para o balanço térmico utilizado pelo programa (algoritmos de convecção de superfície) e informações referentes à orientação, o tipo de entorno, os valores de tolerância de carga e temperatura da edificação e a distribuição da incidência do sol na superfície externa (Figura 4.2).

Field	Units	Obj1
Name		galpão
North Axis	deg	0
Terrain		Suburbs
Loads Convergence Tolerance Value		0,04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,4
Solar Distribution		FullExteriorWithRefl
Maximum Number of Warmup Days		25

Figura 4.2 – Dados de controle do *Energy Plus* referentes ao edifício analisado.

4.1.2 Localização e clima

As simulações para a avaliação do desempenho térmico foram realizadas em oito cidades brasileiras, representando as zonas bioclimáticas (ZB) definidas pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005). As cidades selecionadas para o estudo foram: Curitiba, Santa Maria, Belo Horizonte, Brasília, Niterói, Campo Grande, Porto Nacional e Manaus.

Para cada cidade analisada, foram inseridas no programa as informações referentes à latitude, à longitude, o fuso horário contabilizado a partir do meridiano de Greenwich e à altitude em relação ao nível do mar (Figura 4.3). Na tabela 4.1 apresentam-se as características climáticas das cidades analisadas.

Field	Units	Obj1
Name		Belo Horizonte
Latitude	deg	-19,85
Longitude	deg	-43,45
Time Zone	hr	-3
Elevation	m	785

Figura 4.3 – Dados de entrada do *Energy Plus* referentes à localização da edificação.

Tabela 4.1 – Localização geográfica das cidades analisadas

Cidades	ZB	Latitude	Longitude	Fuso horário	Altitude
Curitiba (PR)	1	S 25° 31'	W 49° 10'	-3.0h	908 m
Santa Maria (RS)	2	S 29° 42'	W 53° 42'	-3.0h	114 m
Belo Horizonte (MG)	3	S 19° 51'	W 43° 57'	-3.0h	785 m
Brasília (DF)	4	S 15° 52'	W 47° 55'	-3.0h	1061m
Niterói (RJ)	5	S 22° 53'	W 43° 10'	-3.0h	3 m
Campo Grande (MS)	6	S 20° 28'	W 54° 40'	-3.0h	556 m
Porto Nacional (TO)	7	S 10° 41'	W 42° 24'	-3.0h	290 m
Manaus (AM)	8	S 3° 7'	W 60° 1'	-4.0h	72 m

Fonte: CPTEC, 2009; DOE, 2001.

As simulações foram estabelecidas para dois dias típicos de projeto, ou seja, os dias mais quente e mais frio do ano. Na Tabela 4.2 reúnem-se características climáticas dos dias típicos de verão e inverno (temperaturas máximas e mínimas) para as oito cidades e suas respectivas zonas bioclimáticas no Brasil.

Após a simulação com as pastas climáticas, percebeu-se em algumas regiões bioclimáticas uma distorção dos valores de temperatura interna do galpão em alguns horários do dia, com períodos noturnos com temperaturas muito elevadas em relação ao período diurno, onde há exposição direta do sol, não correspondendo à realidade. Por isso, foi preciso reunir os dados climáticos das cidades analisadas para inserir no módulo do programa *design day* substituindo os dados da pasta climática, disponibilizada pelo programa.

Tabela 4.2 – Temperatura máxima e mínima nos dias típicos de verão e inverno das cidades analisadas

Cidades	Dia típico de verão			Dia típico de inverno		
	Data	Tmáx. (°C)	Tmín. (°C)	Data	Tmáx. (°C)	Tmín. (°C)
Curitiba (PR)	7/12	33	18	16/07	16	0
Santa Maria (RS)	7/06	26	12	27/06	13	-1
Belo Horizonte (MG)	14/01	34	23	20/05	25	9
Brasília (DF)	12/10	34	19	14/06	24	4
Niterói (RJ)	10/01	36	25	23/08	21	13
Campo Grande (MS)	17/09	36	24	17/05	12	4
Porto Nacional (TO)	4/03	43	22	9/02	35	3
Manaus (AM)	9/09	35	28	2/11	31	20

Fonte: CPTEC, 2009; DOE, 2011.

O campo *design day* disponível no *Energy Plus*, permite ao usuário inserir dados

meteorológicos do local onde o edifício está inserido, criando sua própria pasta climática (Figura 4.4). No campo referente aos dados *design day* foram inseridas informações, para cada dia típico (verão e inverno). Entre as mais relevantes (que não são padrão do programa) pode-se destacar: as temperaturas de bulbo seco máximas, pressão, velocidade e direção do vento. Também foi incluído um cálculo da taxa de temperatura diária que consiste na diferença entre a temperatura máxima e mínima do dia.

Nas tabelas 4.3 e 4.4 são apresentadas as temperaturas máximas de bulbo seco, pressão, velocidade e direção do vento. Além da taxa de temperatura diária calculada para cada cidade analisada, nas duas situações climáticas: dias típicos de verão e inverno.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		BH verão	BH inverno
Maximum Dry-Bulb Temperature	C	27,7	24,7
Daily Temperature Range	deltaC	6,6	11,2
Humidity Indicating Conditions at Maximum Dry-Bulb		27,7	24,7
Barometric Pressure	Pa	92243	92243
Wind Speed	m/s	10,3	16,4
Wind Direction	deg	0	0
Sky Clearness		1	1
Rain Indicator			
Snow Indicator			
Day of Month		1	1
Month		1	1
Day Type		SummerDesignDay	WinterDesignDay
Daylight Saving Time Indicator			
Humidity Indicating Type		WetBulb	WetBulb
Relative Humidity Day Schedule Name			
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Type		DefaultMultipliers	DefaultMultipliers
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Schedule Name			
Solar Model Indicator		ASHRAEClearSky	ASHRAEClearSky
Beam Solar Day Schedule Name			
Diffuse Solar Day Schedule Name			

Figura 4.4 – Campo de entrada de dados “*design Day*”- referente ao local onde o edifício analisado está inserido

4.1.3 Elementos construtivos das superfícies

Para a construção do modelo de análise foram selecionados os materiais componentes de cada elemento construtivo. Desta forma, os materiais de construção utilizados foram: piso em concreto, fechamentos em bloco celular e argamassa, portas em aço galvanizado, janelas em vidro simples. Para a cobertura foram empregadas, na primeira etapa de simulação, seis diferentes tipos de telhas metálicas (Alumínio, termoacústica, aço galvanizado, aço galvanizado pintado, termoacústica com PVC e

Topsteel) e na segunda etapa telha termoacústica. As telhas pintadas são com pintura eletrostática presentes no mercado, nas cores: branca, amarela, vermelha verde e cinza. Na Tabela 4.5, apresenta-se todas as telhas utilizadas na análise e suas características termofísicas utilizadas como dados de entrada para simulação numérica.

Tabela 4.3 – Valores da temperatura diária, temperaturas máximas de bulbo seco, pressão, velocidade e direção do vento das cidades analisadas, para o dia típico de verão

Cidades	Pressão Barométrica	Velocidade do vento	Direção do vento	Taxa de temp. diária
Curitiba	90882	40	0	6,9
Santa Maria	99963	13,2	90	8,5
Belo Horizonte	92243	16,4	0	6,6
Brasília	89212	8,2	0	7,9
Niterói	101289	9,1	0	4,7
Campo Grande	94822	11,8	0	8,2
Porto Nacional	97889	9,3	0	6,2
Manaus	100463	32,4	0	4,4

Tabela 4.4 – Valores da temperatura diária, temperaturas máximas de bulbo seco, pressão, velocidade e direção do vento das cidades analisadas, para o dia típico de inverno

Cidades	Pressão Barométrica	Velocidade do vento	Direção do vento	Taxa de temp. diária
Curitiba	90882	12,8	0	9,4
Santa Maria	99963	9,9	0	7
Belo Horizonte	92243	10,3	0	11,2
Brasília	89212	8,2	0	10,6
Niterói	101289	10,3	0	4,1
Campo Grande	94822	12,9	90	8,3
Porto Nacional	97889	22,4	0	13
Manaus	120000	10,3	0	6

Tabela 4.5 – Propriedades termofísicas das telhas analisadas

Tipos de telhas	Características das telhas
TELHA DE ALUMÍNIO	<p>Composição: Alumínio Espessura: 0,4 mm Condução Térmica: 201 W/m.K Massa específica: 2700 kg/m³ Calor específico: 920 J/kg.K Absortância: 0,05</p> <p>Fonte: VONTORANTIM, 2006</p>
TELHA TERMOACÚSTICA	<p>Composição: Aço galvanizado + poliuretano + aço galvanizado Espessura: 0,51 mm Dados do poliuretano: Condução Térmica: 0,03 W/m.K Massa específica: 20 kg/m³ Calor específico: 1670 J/kg.K * Absortância: 0,4 (aço Galvanizado)</p> <p>Fonte: ANANDA, 2010</p>
TELHA EM AÇO GALVANIZADO	<p>Composição: Aço Galvanizado Espessura: 0,5 mm Condução Térmica: 55 W/m.K Massa específica: 7800 kg/m³ Calor específico: 460 J/kg.K Absortância: 0,4</p> <p>Fonte: ISOESTE, 2010</p>
TELHA EM AÇO COM PINTURA	<p>Composição: Pintura eletrostática + Aço galvanizado + Pintura eletrostática Espessura: 0,5 mm Condução Térmica: 55 W/m.K Massa específica: 7800 kg/m³ Calor específico: 460 J/kg.K Absortância: 0,3 (amarelo), 0,2 (branco), 0,4 (cinza), 0,7 (verde), 0,74 (vermelho)</p> <p>Fonte: ANANDA, 2010</p>
TELHA TERMOACÚSTICA COM PVC	<p>Composição: Aço galvanizado + poliuretano + placa em PVC Espessura: 0,67 mm Dados do poliuretano: Condução Térmica: 0,03 W/m.K Massa específica: 20 kg/m³ Calor específico: 1670 J/kg.K * Absortância: 0,4 (aço Galvanizado)</p> <p>Fonte: EUCATEX, 2006</p>
TELHA TOP STEEL	<p>Composição: Alumínio + asfalto oxidado + aço + asfalto oxidado + alumínio Espessura: 2 mm Dados do asfalto oxidado: Condução Térmica: 1,15 W/m.K Massa específica: 2300 kg/m³ Calor específico: 920 J/kg.K Absortância: 0,4 (alumínio), 0,98 (asfalto), 0,4 (aço galvanizado)</p> <p>Fonte: BRASILIT, 2010</p>

* Para as telhas termoacústicas não é necessário informar ao *Energy Plus* a absortância térmica do isolante térmico.

4.1.4 Planejamento de ocupação

A ocupação do galpão foi definida estimando-se uma única carga térmica interna correspondente ao calor dos equipamentos e da rotina de uso do edifício, para todos os modelos analisados, de forma que esta carga térmica não interferisse no resultado final da análise.

4.1.5 Zonas térmicas e Superfícies

Como modelo de análise, utilizaram-se galpões em estrutura metálica com diferentes tipologias de coberturas, devido, principalmente, à difusão do uso de estruturas metálicas no Brasil e as características construtivas dos galpões em aço, com extensas áreas cobertas de um único pavimento e diversidade de tipologias de coberturas. Sua estrutura foi definida de acordo com os critérios de modulação de edifícios estruturados em aço presente em referências bibliográficas (BELLEI, 2006; NOGUEIRA, 2009), visando o melhor desempenho de todos os componentes do sistema: estrutura, fechamentos e principalmente a cobertura.

Geralmente, os galpões são edificações de um único pavimento, constituídos por pórticos planos regularmente espaçados, com cobertura na parte superior e fechamento lateral. Desta forma, optou-se por uma edificação retangular de 20 x 48 m com um pavimento e pé direito de 6 m. Sua estrutura possui pórticos planos, com perfis de alma cheia, espaçados a cada 6 m.

Durante a simulação foi necessário reduzir o pé direito de 12 para 6 m, visto que os resultados (valores de temperatura interna) do galpão com o pé direito mais alto não variavam de um modelo para o outro. A justificativa mais provável deste resultado é o grande volume do galpão considerado como uma única zona térmica. Para os cálculos o programa seleciona um ponto central desta zona, de onde é calculada a carga térmica. Seu grande distanciamento dos elementos construtivos reduz a influência do calor vindo das superfícies (principalmente fechamentos e telhado) na temperatura interna do ambiente.

Para a simulação no *Energy Plus*, todos os componentes do modelo (paredes, portas, janelas, cobertura), devem ser executados por meio de coordenadas (x,y,z). Para cada superfície do modelo, os valores foram inseridos no sentido horário, partindo de um ponto zero (coordenadas 0,0,0), interligando as superfícies por um dos vértices. Para

a visualização do modelo utilizou-se o programa *Auto Cad* que possui interface com o *Energy Plus*.

As portas medem 4 x 6 m e estão localizadas no eixo das duas paredes com menor dimensão. Estas não influenciam na ventilação do galpão, pois foi determinado que estivessem sempre fechadas. As janelas são em fita ocupando toda a extensão das paredes com maior comprimento e possui 2 m de altura, sem peitoril, para facilitar a ventilação por convecção dos galpões que possuem elementos de ventilação no teto (*shed* ou lanternim).

Quanto à cobertura, nas etapas de simulação, utilizou-se para a primeira etapa um telhado de duas águas (Figura 4.5) e para a segunda, sete diferentes tipologias de coberturas metálicas, todas com o mesmo volume de 840 m³ (Figura 4.5 a 4.11).

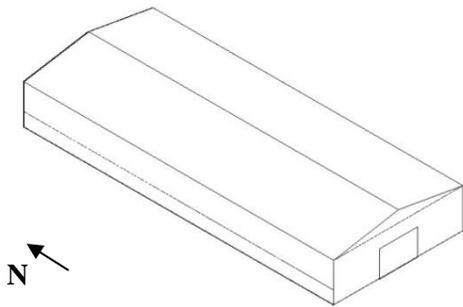


Figura 4.5 – Telhado em duas águas

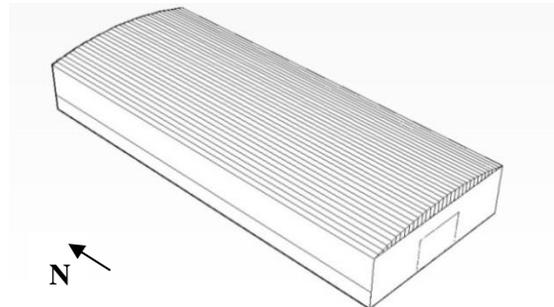


Figura 4.6 – Telhado em arco

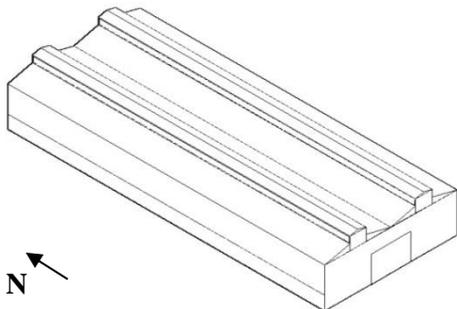


Figura 4.7 – Telhado com lanternim duplo

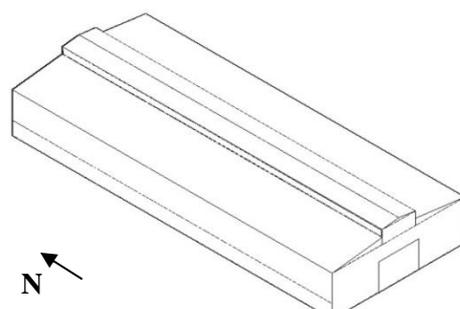


Figura 4.8 – Telhado com lanternim simples

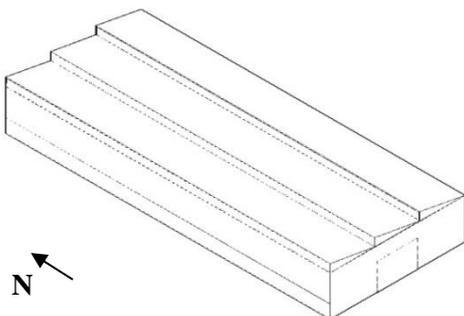


Figura 4.9 – Telhado em *shed* longitudinal

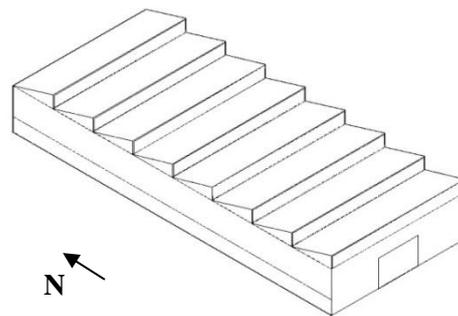


Figura 4.10 – Telhado em *shed* transversal

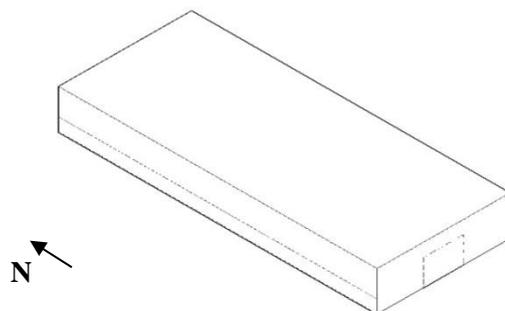


Figura 4.11: Telhado plano

4.1.6 Ventilação Natural: *Airflow Network*

O programa *Energy Plus* possui um campo de inserção de dados para simulação de edifícios naturalmente ventilados, chamado de *Natural Ventilation and Duct Leakage*. Para a simulação, a princípio tentou-se estabelecer um número padrão de renovações de ar por minuto para o galpão e abertura ininterrupta de 65% das portas e janelas. Também foram considerados os cálculos de pressão do vento do próprio programa. Esta primeira tentativa de simulação não gerou dados de saída (temperatura interna) diferenciados como o esperado para o galpão com diferentes geometrias de cobertura, principalmente aqueles com elementos para ventilação no telhado (*shed* e lanternim).

Desta forma, foi preciso especificar detalhadamente a ventilação natural do galpão, baseado em bibliografia anterior de referência (VERSAGE, 2009), calculando a pressão e a direção do vento que incide no edifício, através de um programa auxiliar chamado TNO CP Generator.

4.1.7 Dados de saída

A avaliação do desempenho térmico foi adquirida por meio dados de saída do programa após a simulação. Estes dados são parâmetros calculados pelo *Energy Plus* e foram fornecidos por meio de relatórios de saída com valores horários. Os principais parâmetros calculados e utilizados para avaliação foram: Temperatura do ar externo Temperatura interna e temperatura superficial da face interna da cobertura.

Na primeira etapa de análise, foram extraídos como parâmetros de simulação: a

temperatura interna dos galpões e temperatura superficial interna das diferentes tipologias de telhas metálicas. Na segunda análise extraiu-se a temperatura interna dos galpões com diversas soluções construtivas de coberturas em aço.

4.2 Comparação do desempenho térmico com o desempenho estrutural

Em seguida, foi feito um pré-dimensionamento das coberturas metálicas para uma análise comparativa do desempenho térmico com o desempenho estrutural das coberturas compostas por diferentes configurações geométricas.

O desempenho estrutural foi verificado por meio de simulações no *software* SAP2000 - Versão 10 (COMPUTERS AND STRUCTURES, 2005). Para a simulação foi considerado um pré-dimensionamento da estrutura suporte do galpão sem otimização de cálculo, utilizando apenas como parâmetro de análise o peso da estrutura. Para cada elemento componente da estrutura do galpão, o SAP 2000 apresentou os resultados da verificação das seções transversais dos perfis para todos os Estados Limites Últimos aplicáveis de no mínimo 60% (Anexo I).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para análise, os resultados obtidos na primeira e segunda etapa são apresentados graficamente, com a evolução temporal da temperatura interna do ambiente, da temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$) e uma faixa de temperatura de conforto adaptativo, sugerida pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004), para edifícios naturalmente ventilados, calculada para duas condições distintas, o dia mais quente e o mais frio do ano, em cada cidade analisada.

Esta faixa é determinada por meio de equações contida na norma em função da temperatura média externa e caracteriza as exigências humanas quanto ao conforto para o modelo, nas oito cidades estudadas e nas duas condições climáticas: dias típicos de verão e inverno (Tabelas 5.1 e 5.2). As extremidades da faixa são definidas pelas equações que determinam as temperaturas máxima e mínima de conforto para limites superiores e inferiores a 80% de grau de aceitabilidade dos usuários, respectivamente (equações 3.2 e 3.4).

Tabela 5.1 – Valores das médias das temperaturas externas e das temperaturas mínima e máxima de conforto, calculadas para cada cidade analisada no dia típico de verão

	Média da temp. externa ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. mín. de conforto ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. máx. de conforto ($^{\circ}\text{C}$)
Curitiba	21,0	20,8	27,8
Santa Maria	24,6	21,9	28,9
Belo Horizonte	24,0	21,7	28,7
Brasília	21,8	21,0	28,0
Niterói	26,6	22,5	29,5
Campo Grande	25,8	22,3	29,3
Porto Nacional	26,4	22,0	29,5
Manaus	26,0	22,4	29,4

Tabela 5.2 – Valores das médias das temperaturas externas e das temperaturas mínima e máxima de conforto, calculadas para cada cidade analisada no dia típico de inverno

	Média da temp. externa (°C)	Temp. mín. de conforto (°C)	Temp. máx. de conforto (°C)
Curitiba	13,4	18,5	25,5
Santa Maria	15,9	19,2	26,2
Belo Horizonte	18,4	20,0	27,0
Brasília	17,4	19,7	26,7
Niterói	21,2	20,9	27,9
Campo Grande	22,1	21,2	28,2
Porto Nacional	26,0	22,4	29,5
Manaus	26,7	22,6	29,6

Os resultados do desempenho térmico do modelo de galpão composto por diferentes telhas metálicas foram separados por duas análises comparativas: a primeira consistiu na comparação de telha em aço galvanizado com diferentes pinturas (branca, amarela, verde, vermelha e cinza) e a segunda na comparação de telhas compostas por diferentes materiais metálicos, incluindo a telha pintada de branco, também presente na primeira análise.

Posteriormente são apresentados os resultados do desempenho térmico do galpão quando composto por diferentes geometrias de cobertura, sendo elas: plana, com duas águas, em arco, em *sheds* no sentido longitudinal e transversal da edificação e em duas águas composta por lanternins simples e duplo.

Por fim, são apresentados os resultados da análise comparativa do desempenho térmico com o estrutural destas diferentes geometrias de coberturas.

5.1 Desempenho térmico de telhas em aço galvanizado para diferentes cores

Nas figuras de 5.1 a 5.16 apresentam-se os resultados para as oito zonas bioclimáticas, considerando o desempenho das telhas metálicas em aço galvanizado variando-se a cor. Nas Tabelas 5.3 e 5.4 apresenta-se um resumo das temperaturas máximas do galpão com telha em aço galvanizado com diferentes cores nas diferentes zonas bioclimáticas, nos dias típicos de verão e inverno, respectivamente.

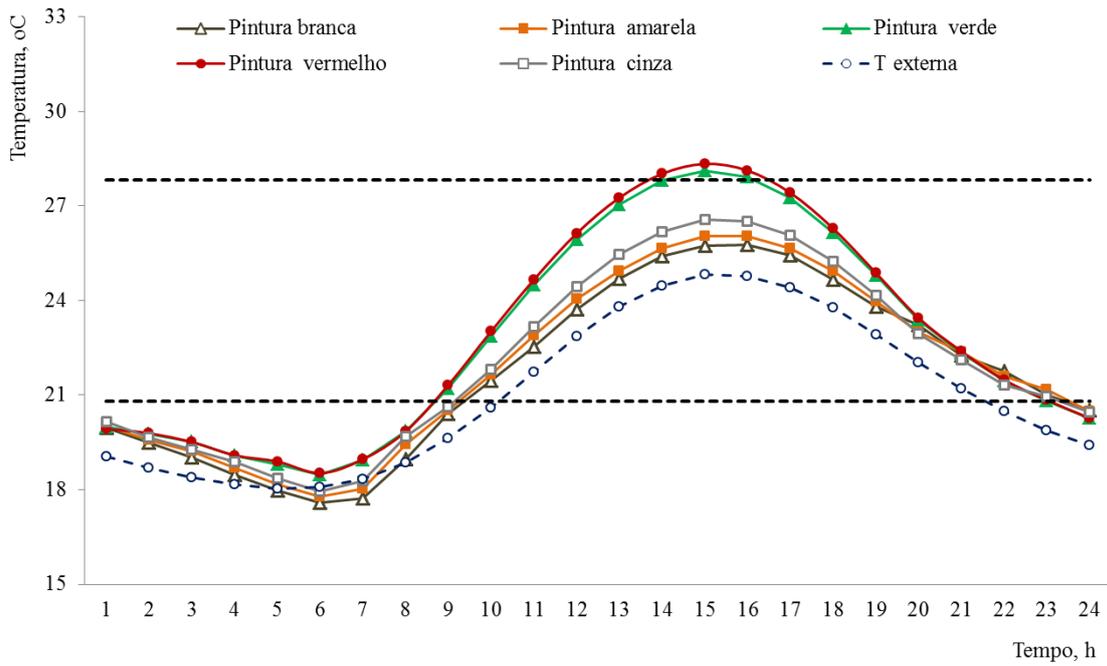


Figura 5.1 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Curitiba (PR)

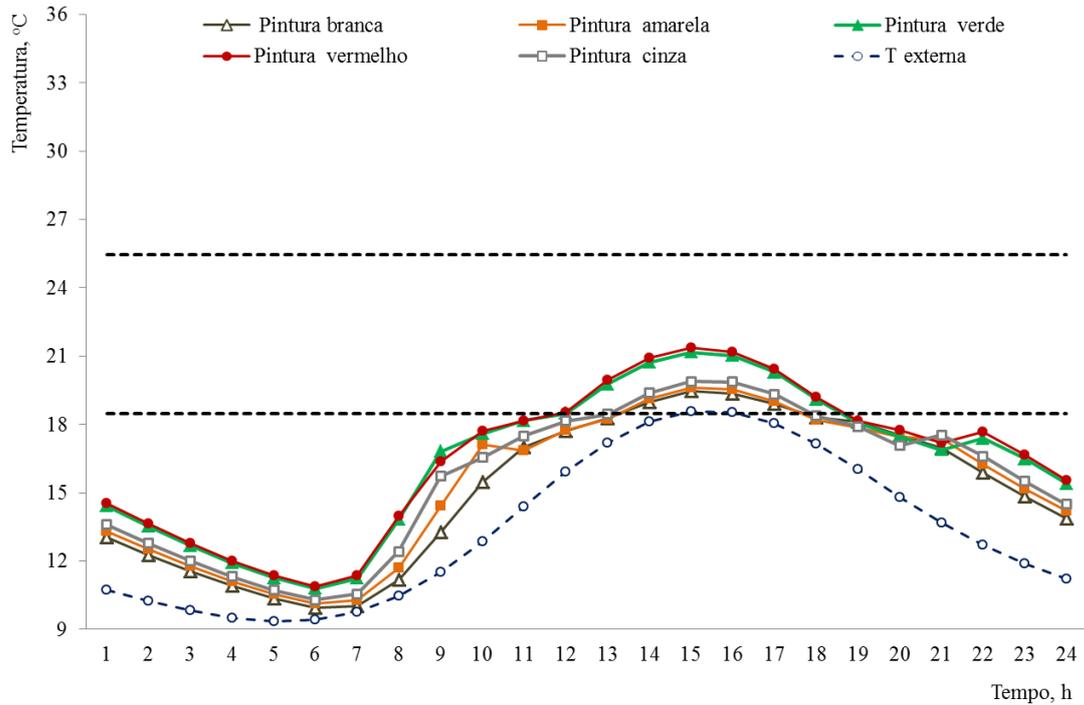


Figura 5.2 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Curitiba (PR)

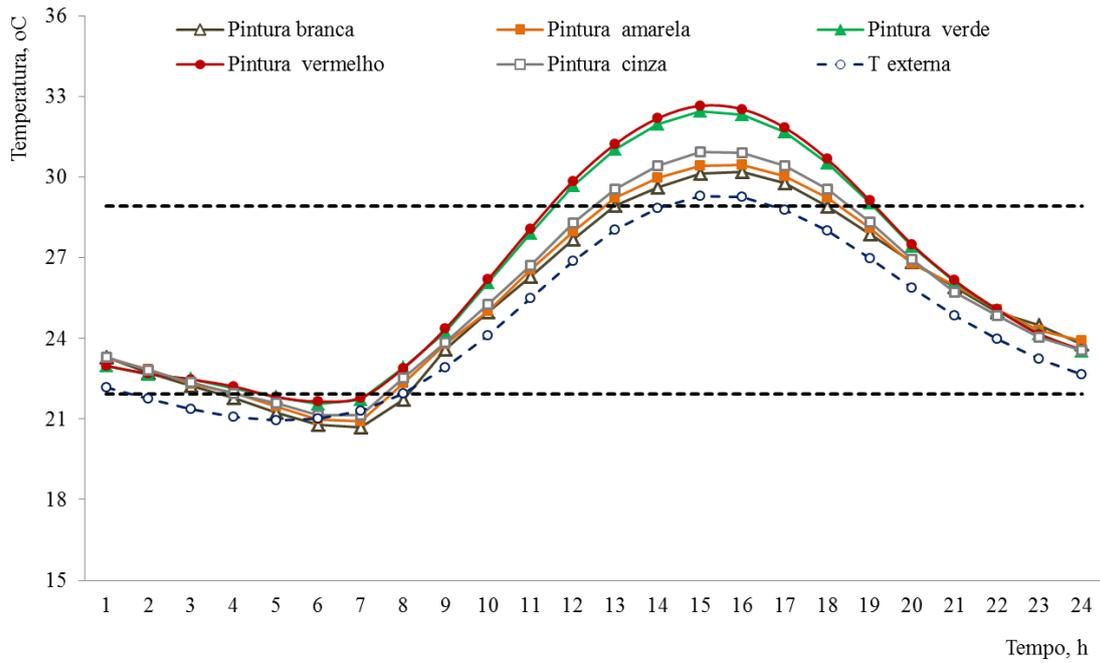


Figura 5.3 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Santa Maria(RS)

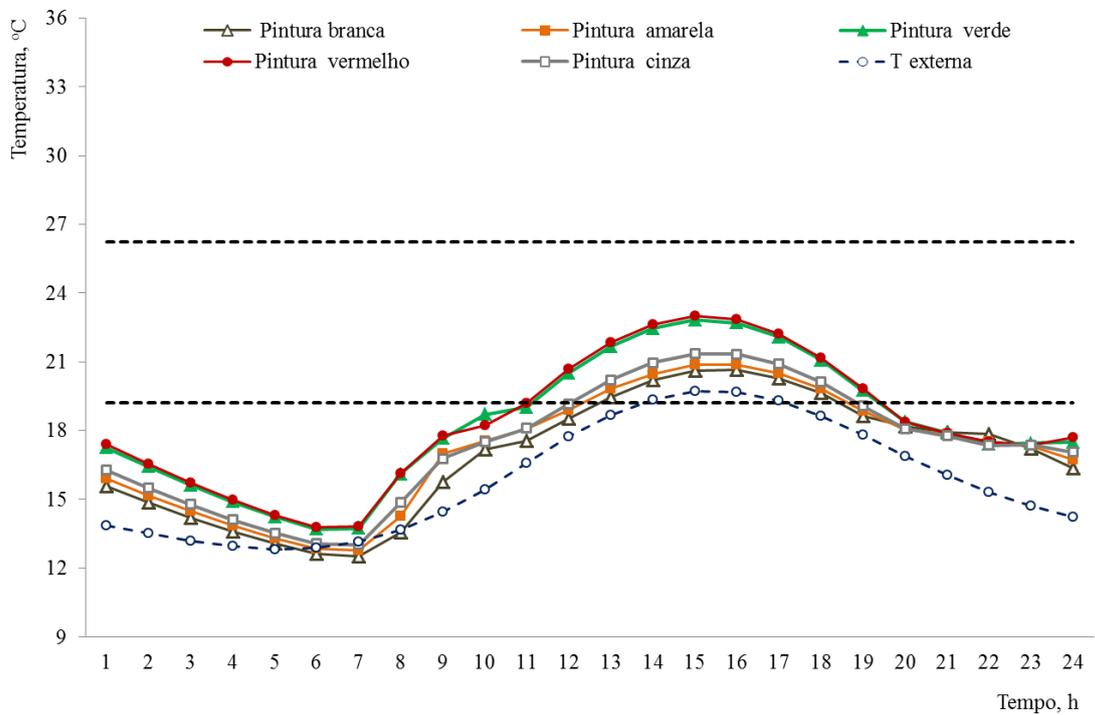


Figura 5.4 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Santa Maria(RS)

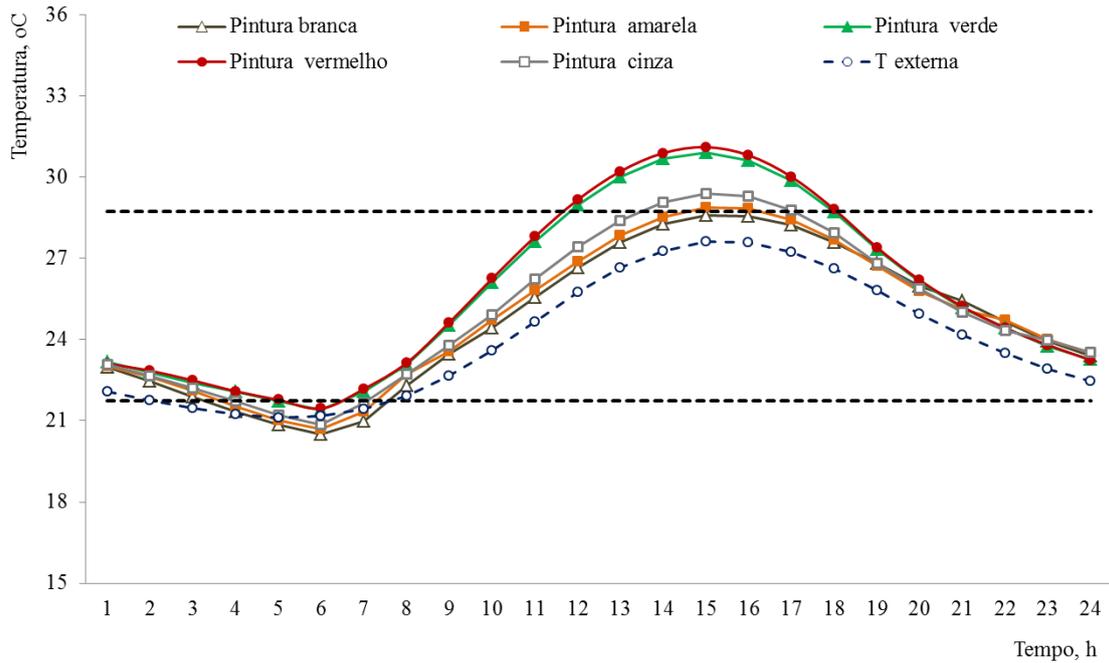


Figura 5.5 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Belo Horizonte(RS)

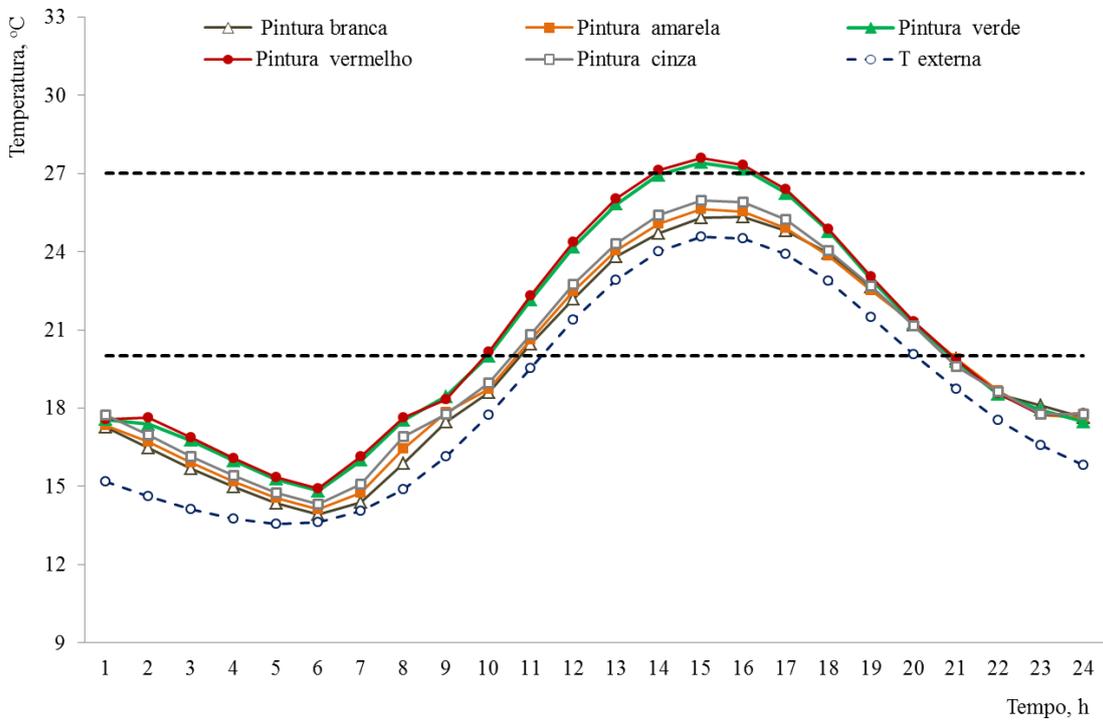


Figura 5.6 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Belo Horizonte(RS)

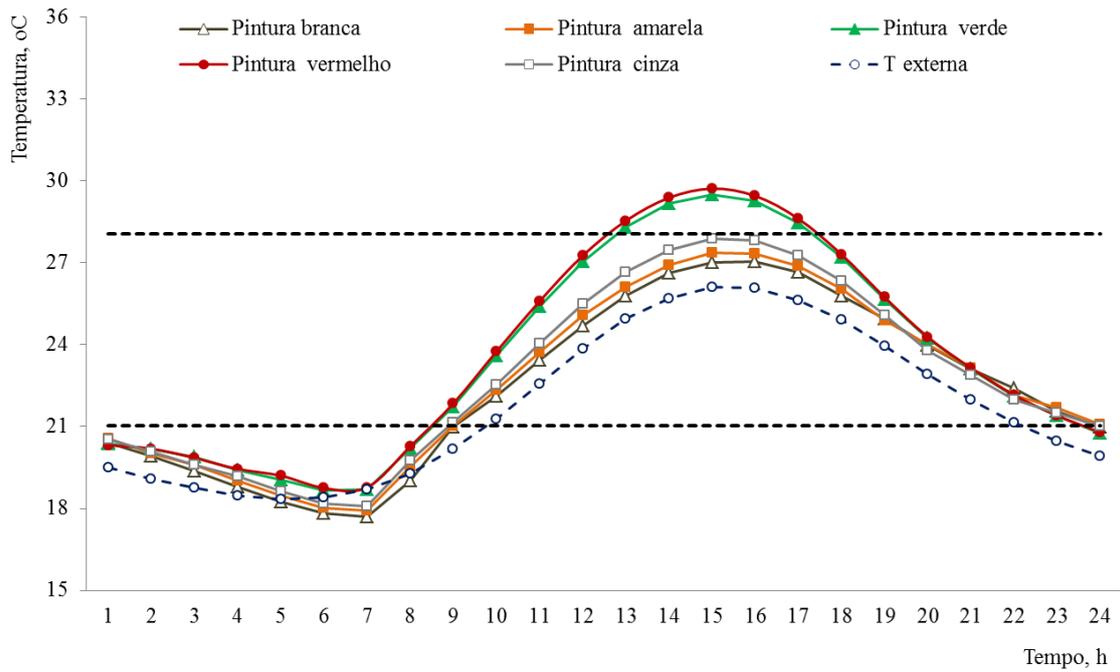


Figura 5.7 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Brasília (DF)

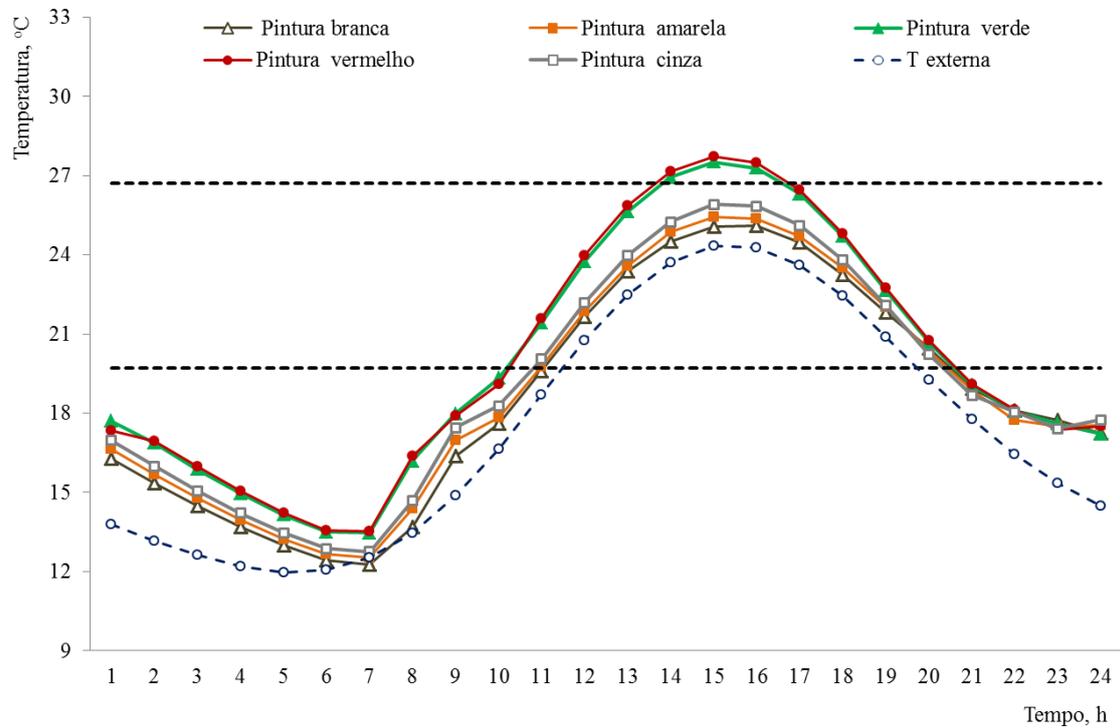


Figura 5.8 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Brasília (DF)

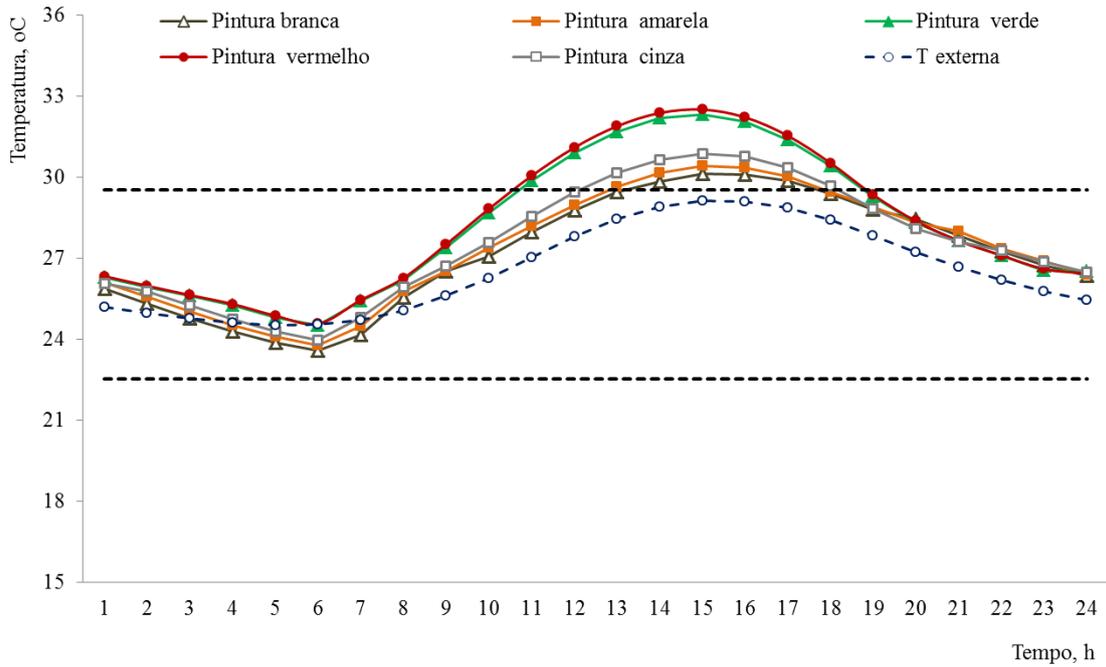


Figura 5.9 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Niterói (RJ)

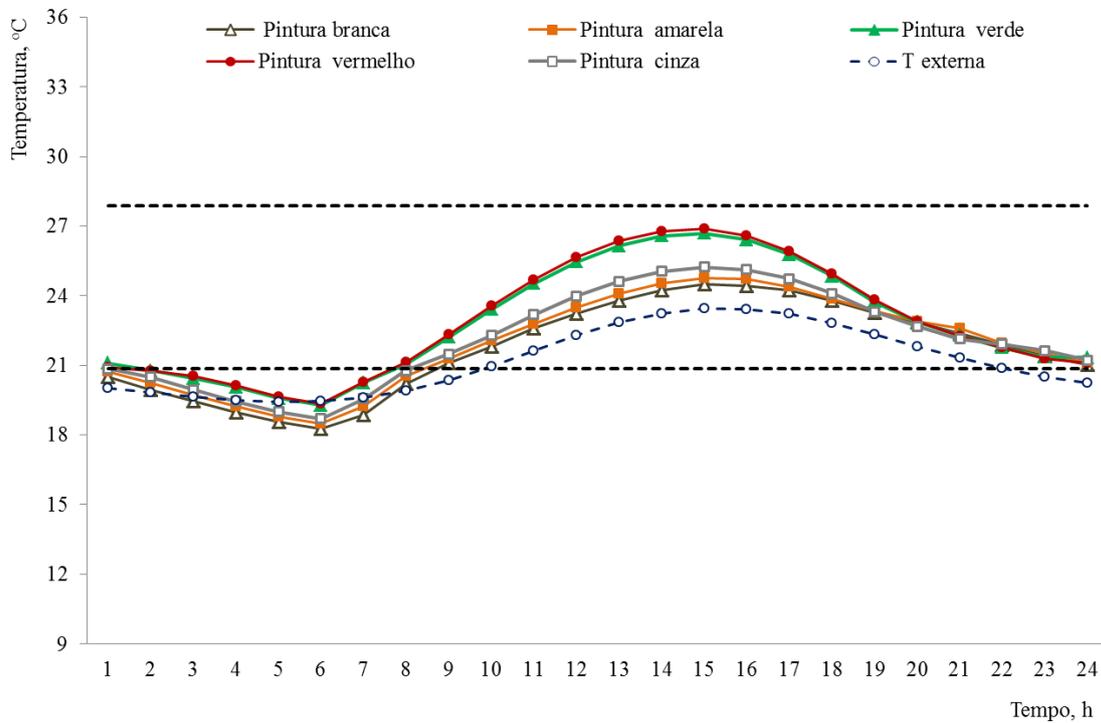


Figura 5.10 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Niterói (RJ)

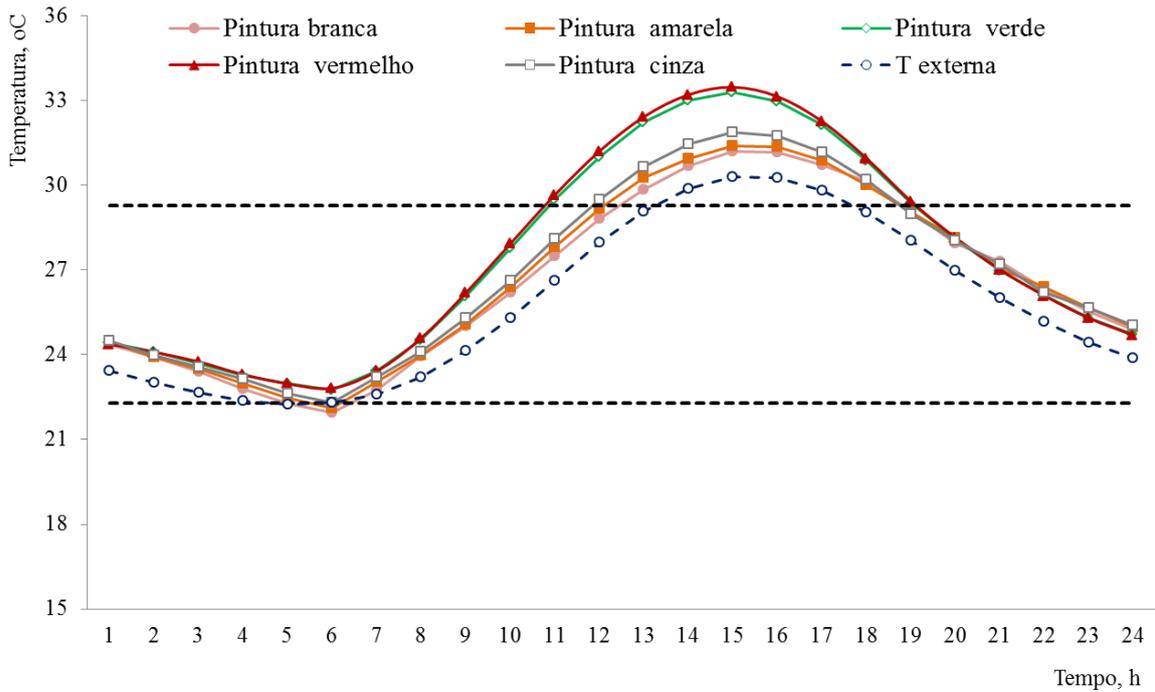


Figura 5.11 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Campo Grande (MS)

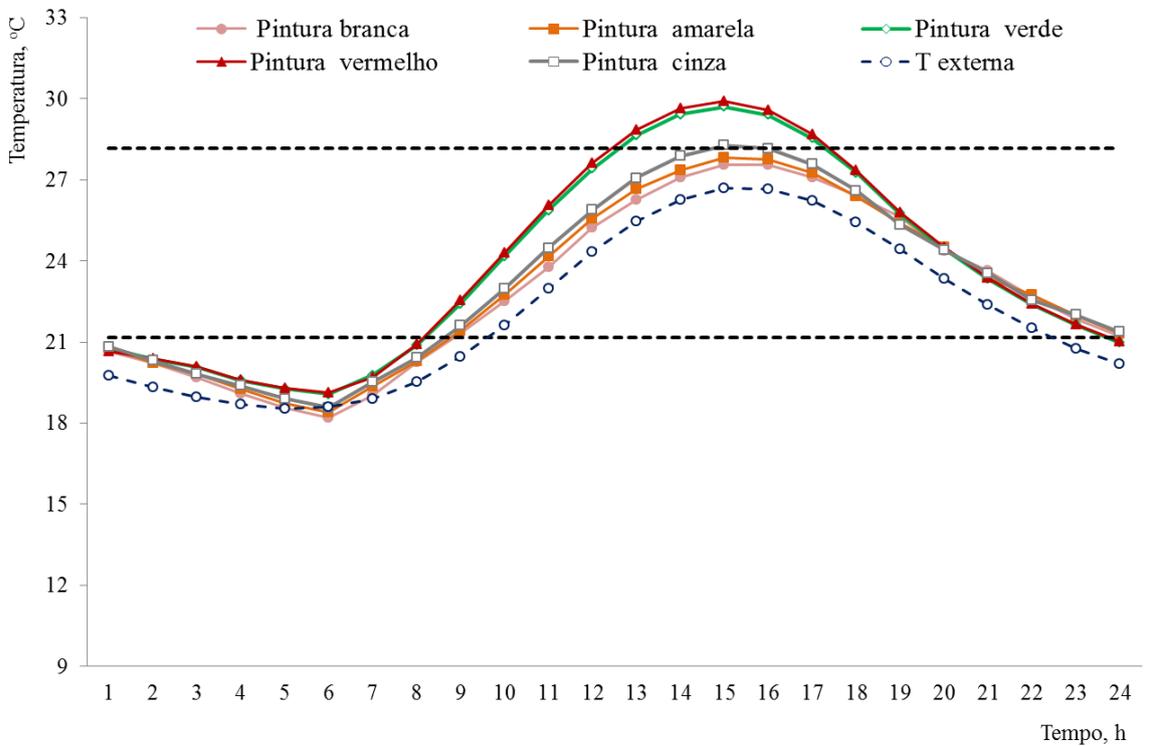


Figura 5.12 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Campo Grande (MS)

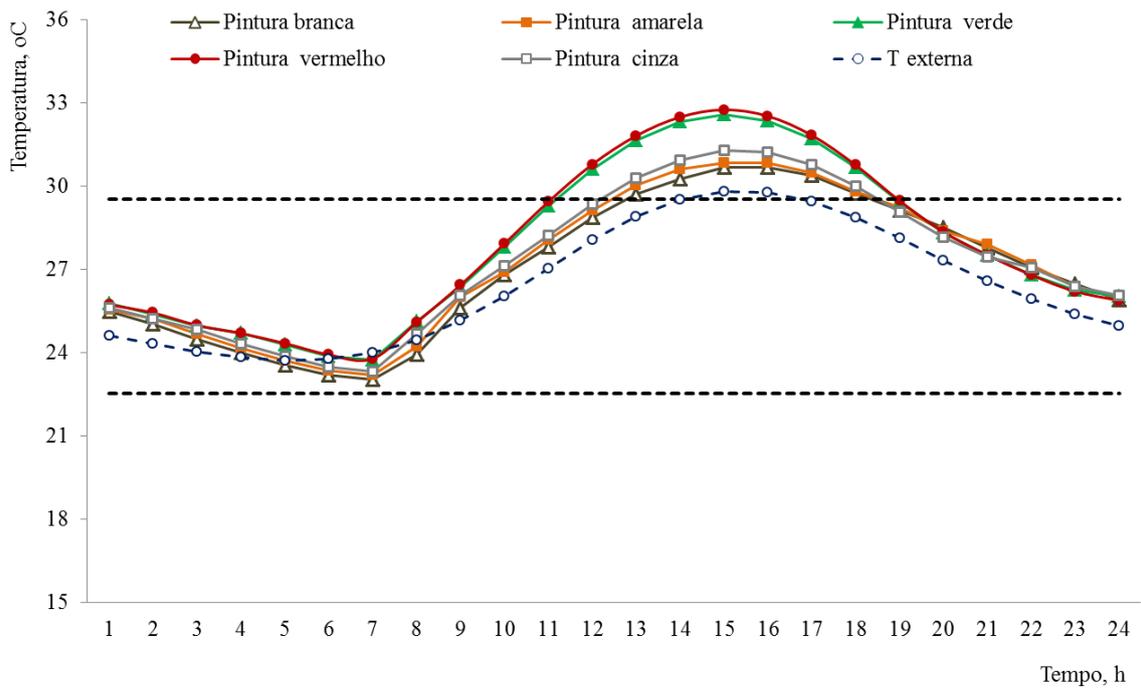


Figura 5.13 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Porto Nacional (TO)

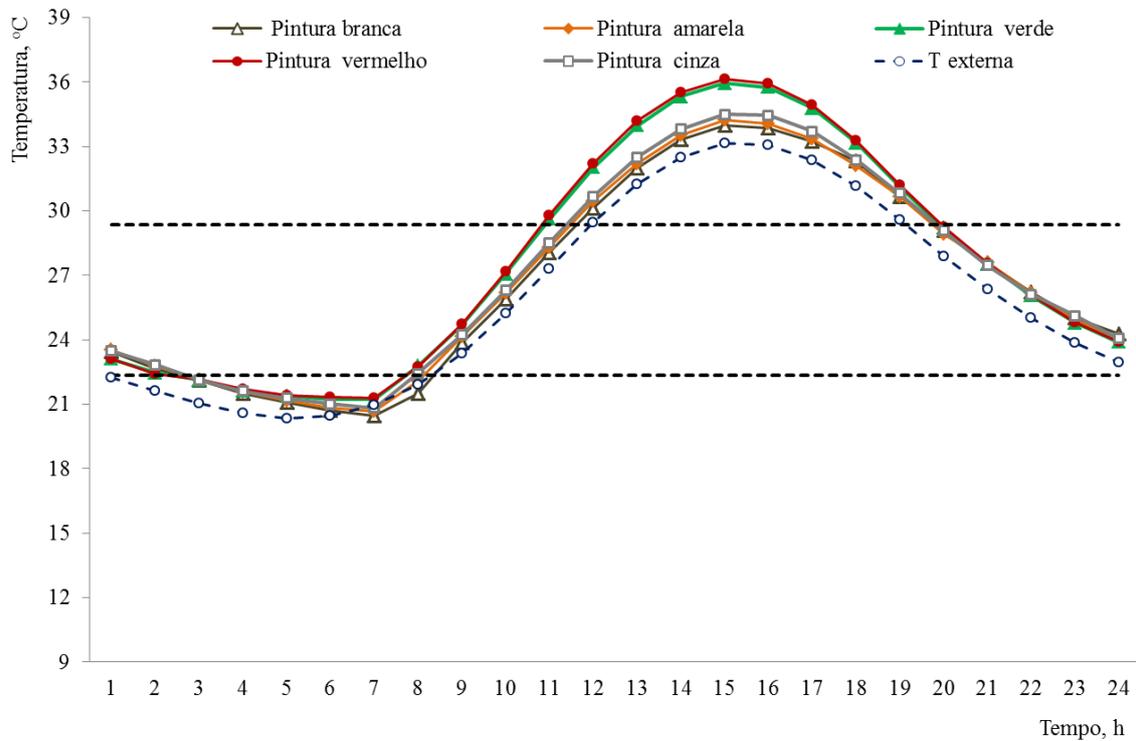


Figura 5.14 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Porto Nacional (TO)

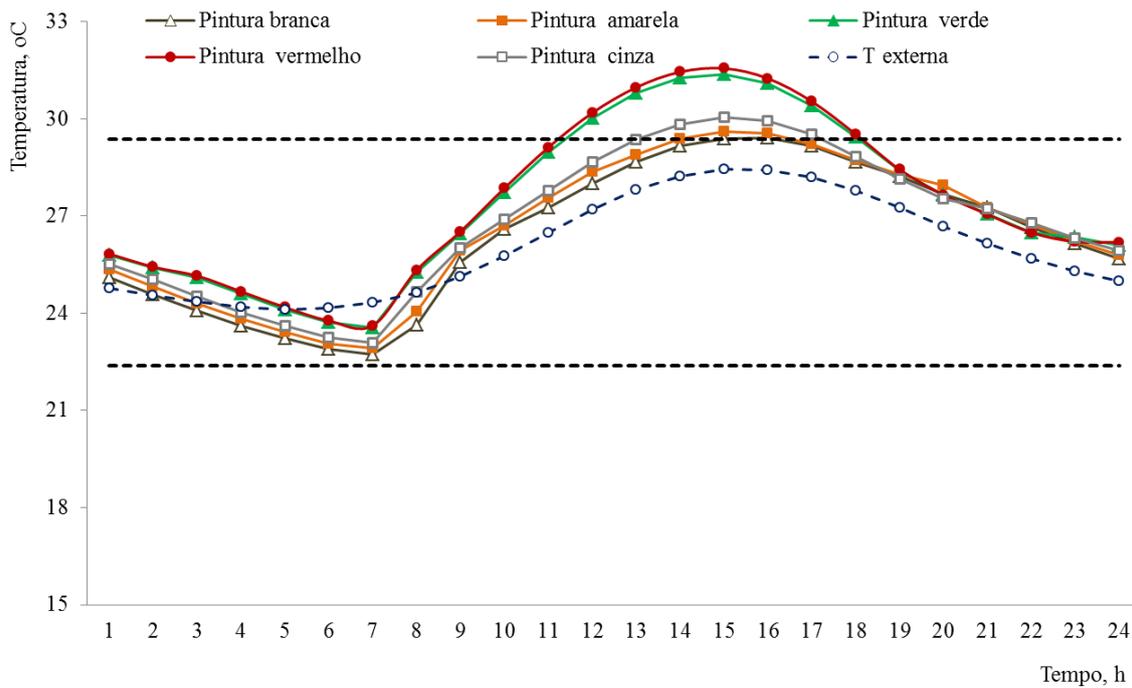


Figura 5.15 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de verão em Manaus (MA)

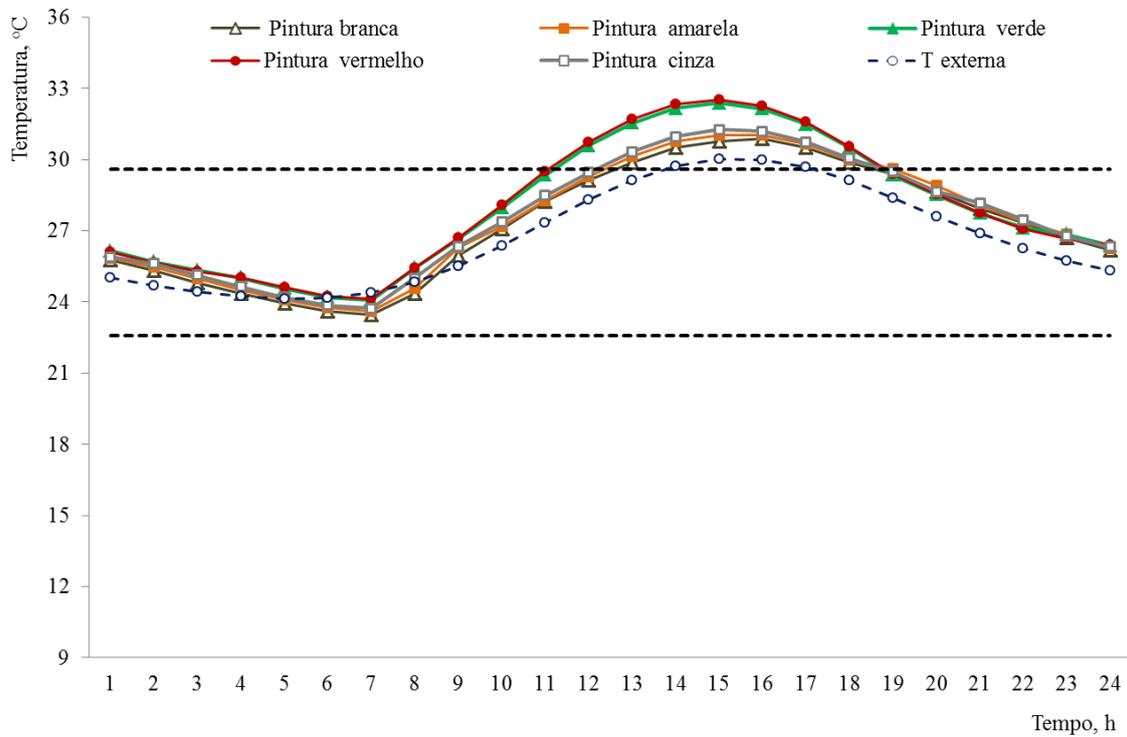


Figura 5.16 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) para telha em aço galvanizado em diferentes cores, no dia típico de inverno em Manaus (MA)

Tabela 5.3 – Temperaturas máximas do galpão com telha em aço galvanizado em diferentes cores nas diferentes zonas bioclimáticas, no dia típico de verão

Cidades/telhas	T. externa	Pintura branca	Pintura amarela	Pintura verde	Pintura vermelha	Pintura cinza
Curitiba	24,8	25,8	26,1	28,1	28,3	26,6
Santa Maria	29,3	30,2	30,5	32,5	32,7	30,9
Belo Horizonte	27,6	28,6	28,9	30,9	31,1	29,4
Brasília	26,1	27,0	27,4	29,5	29,7	27,9
Niterói	29,1	30,1	30,4	32,3	32,5	30,9
Campo Grande	30,3	31,2	31,4	33,3	33,5	31,9
Porto Nacional	29,8	30,7	30,9	32,6	32,8	31,3
Manaus	28,4	29,4	29,6	31,4	31,6	30,0

Tabela 5.4 – Temperaturas máximas do galpão com telha em aço galvanizado em diferentes cores, nas diferentes zonas bioclimáticas, no dia típico de inverno

Cidades/telhas	T. externa	Pintura branca	Pintura amarela	Pintura verde	Pintura vermelha	Pintura cinza
Curitiba	18,6	19,5	19,6	21,2	21,3	19,9
Santa Maria	19,7	15,6	15,9	17,3	17,4	16,3
Belo Horizonte	24,6	25,3	25,6	27,4	27,6	26,0
Brasília	24,3	25,1	25,4	27,5	27,7	25,9
Niterói	23,4	24,5	24,8	26,7	26,9	25,2
Campo Grande	26,7	27,6	27,8	29,7	29,9	28,3
Porto Nacional	33,1	34,0	34,2	35,9	36,1	34,5
Manaus	30,0	30,9	31,0	32,4	32,5	31,3

Observa-se pelos resultados obtidos que o desempenho térmico das telhas de aço galvanizado pintadas apresenta-se insatisfatório em relação ao conforto térmico dos usuários em todas as cidades analisadas, visto que as temperaturas internas dos galpões, nos horários mais quentes do dia, encontram-se fora da faixa de conforto sugerida pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) no dia típico de verão. Atribui-se a este resultado a baixa inercia térmica do aço galvanizado, apresentando-se ineficiente em relação à capacidade de retardar a condução do calor para o interior da edificação, sendo a pintura uma barreira ineficaz para retardar o calor proveniente da radiação solar.

Por outro lado, as telhas pintadas, de um modo geral, apresentaram bom desempenho térmico em quase todas as regiões bioclimáticas, no dia típico de inverno, exceto nas cidades de Belo Horizonte e Brasília, para as quais a telha vermelha e verde encontram-se fora da faixa de conforto nos horários mais quentes do dia e nas cidades mais quentes: Porto Nacional (ZB-07) e Manaus (ZB-08) onde todas as cores não alcançaram um bom desempenho térmico.

Os resultados mostram que para regiões climáticas com baixa amplitude térmica (clima quente ou ameno) pode-se alcançar um desempenho térmico adequado com uma cobertura que apresente baixa inercia térmica. Neste caso, como a cobertura tem baixa capacidade térmica a sua resposta às interações térmicas com o meio externo ficam fortemente influenciada pela temperatura externa.

De um modo geral, como o esperado, dentre as telhas pintadas a que melhor contribuiu para o desempenho térmico do galpão no verão foi a telha com pintura branca.

5.2 Desempenho térmico de telhas quanto ao tipo de material metálico

Os resultados referentes ao desempenho térmico do modelo quando composto por coberturas com diferentes materiais metálicos são apresentados nas figuras de 5.17 a 5.32, para duas condições típicas de projeto, verão e inverno, nas oito cidades analisadas. Nas Tabelas 5.5 e 5.6 apresenta-se um resumo das temperaturas máximas do galpão com telha em diferentes materiais metálicos, nas diferentes zonas bioclimáticas, nos dias típicos de verão e inverno, respectivamente.

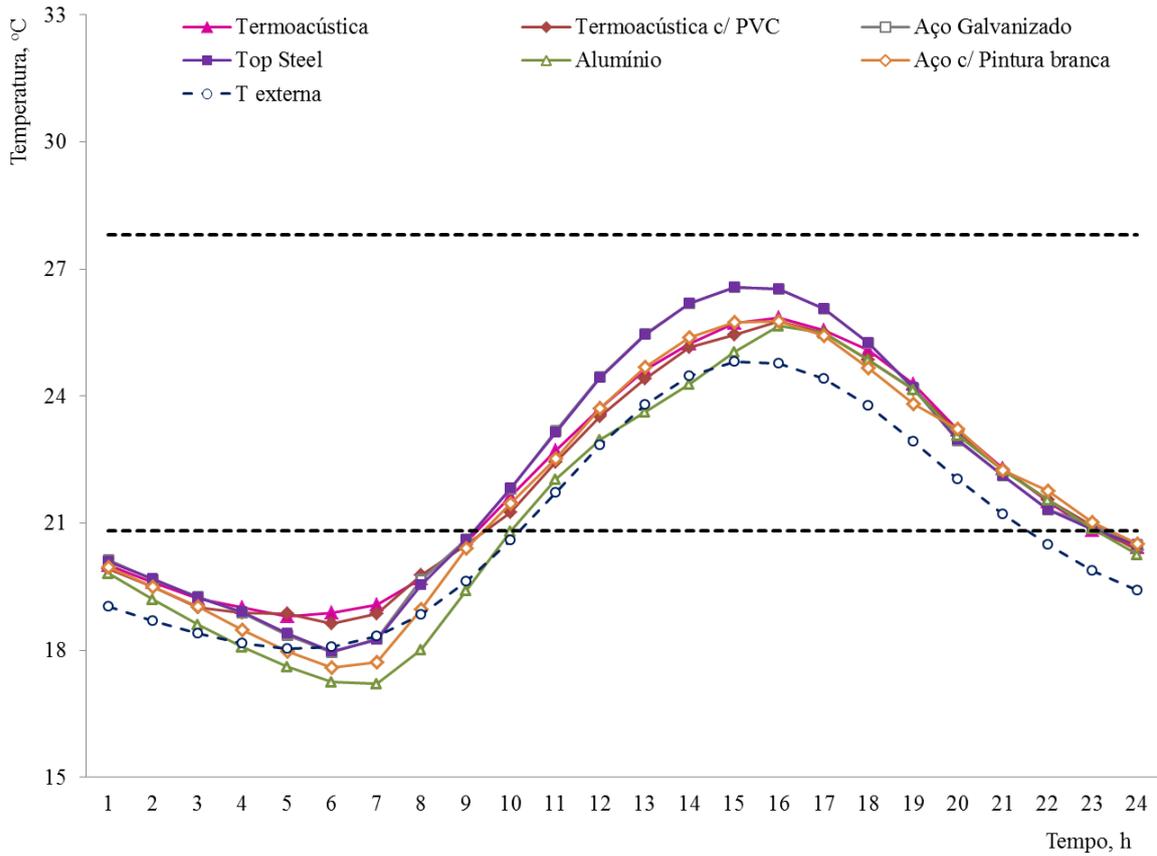


Figura 5.17 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Curitiba (PR)

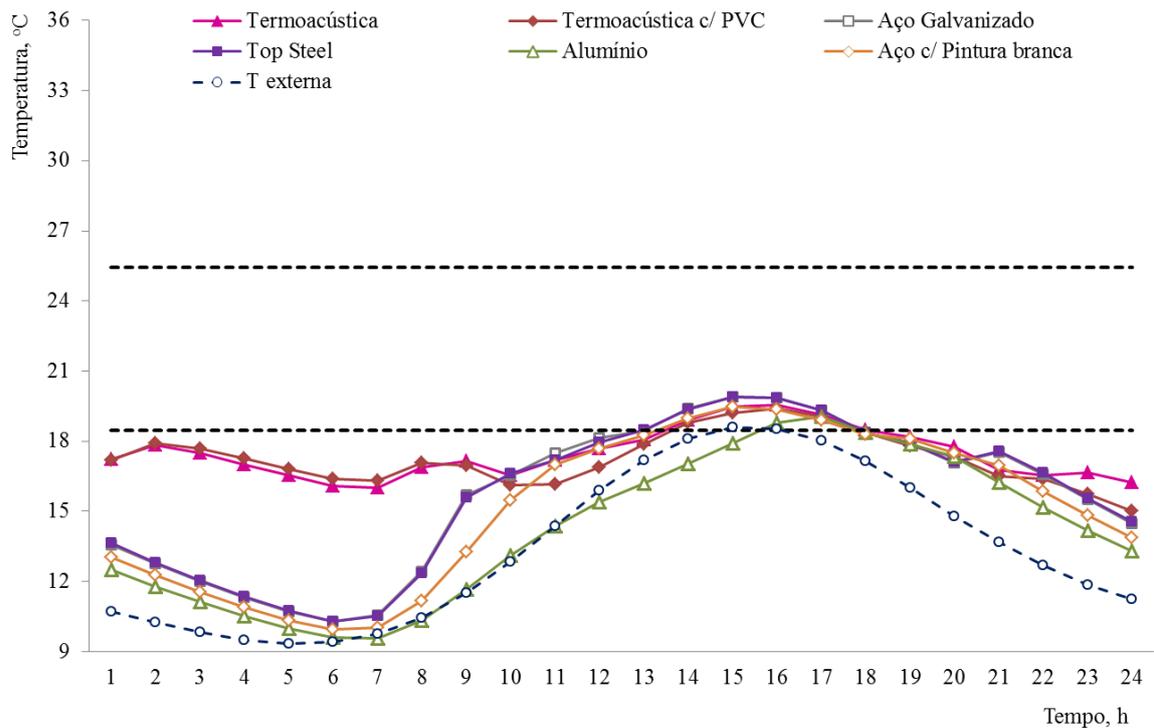


Figura 5.18 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Curitiba (PR).

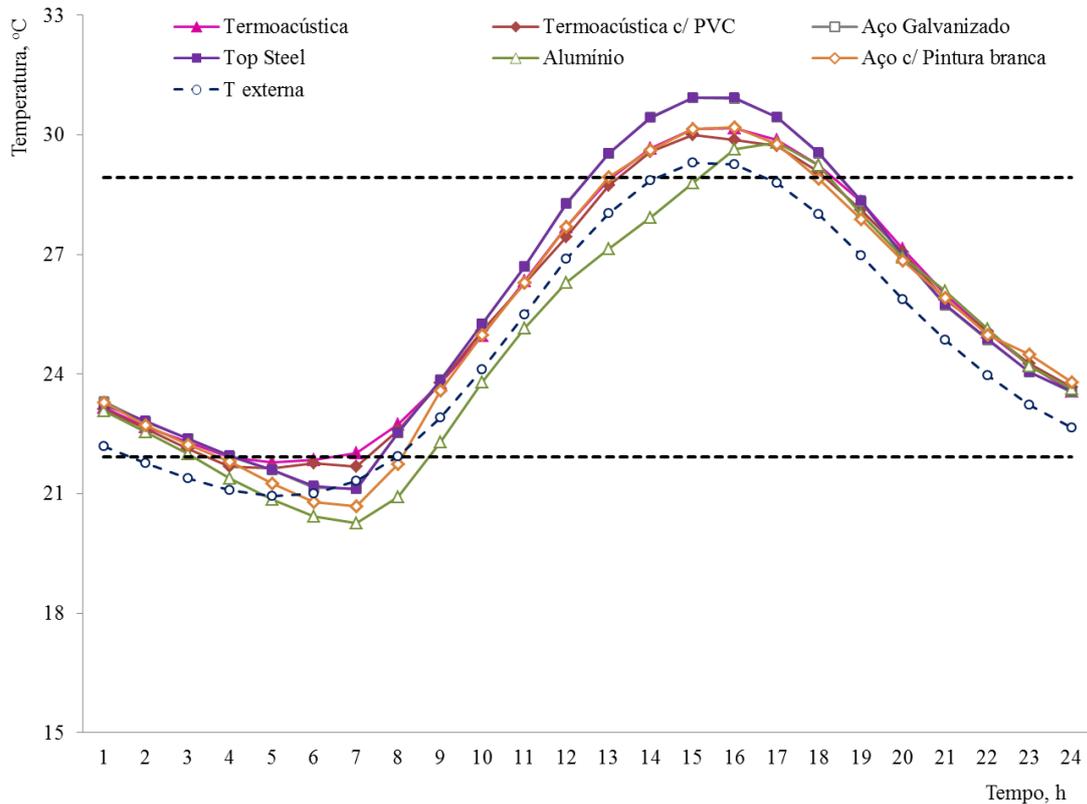


Figura 5.19 - Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Santa Maria (RS).

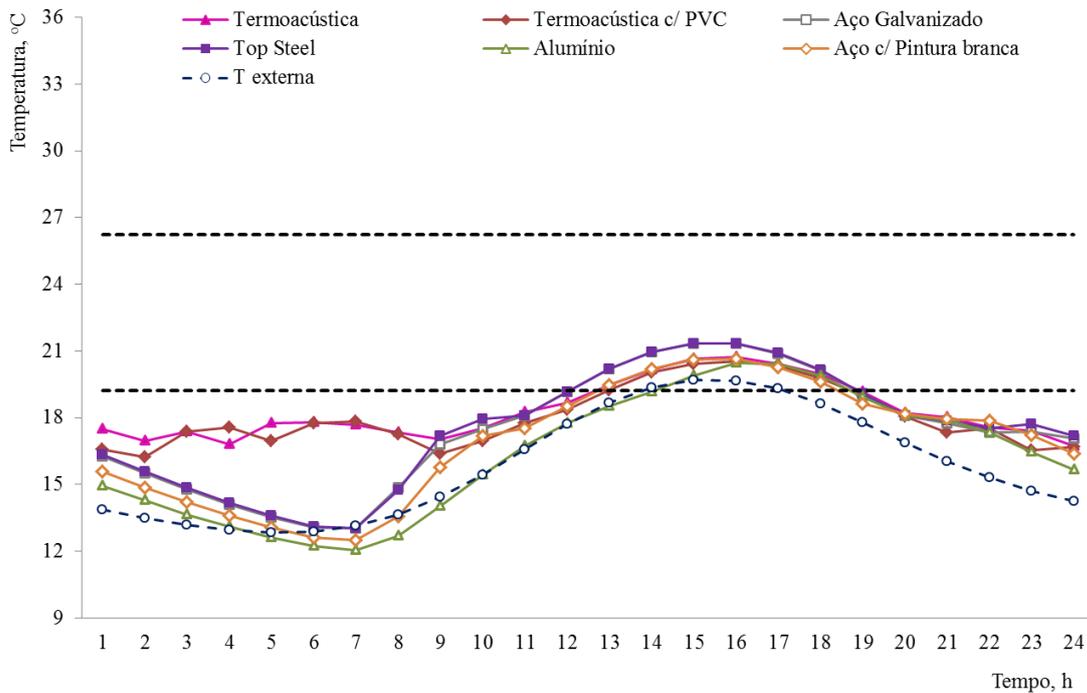


Figura 5.20 - Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Santa Maria (RS).

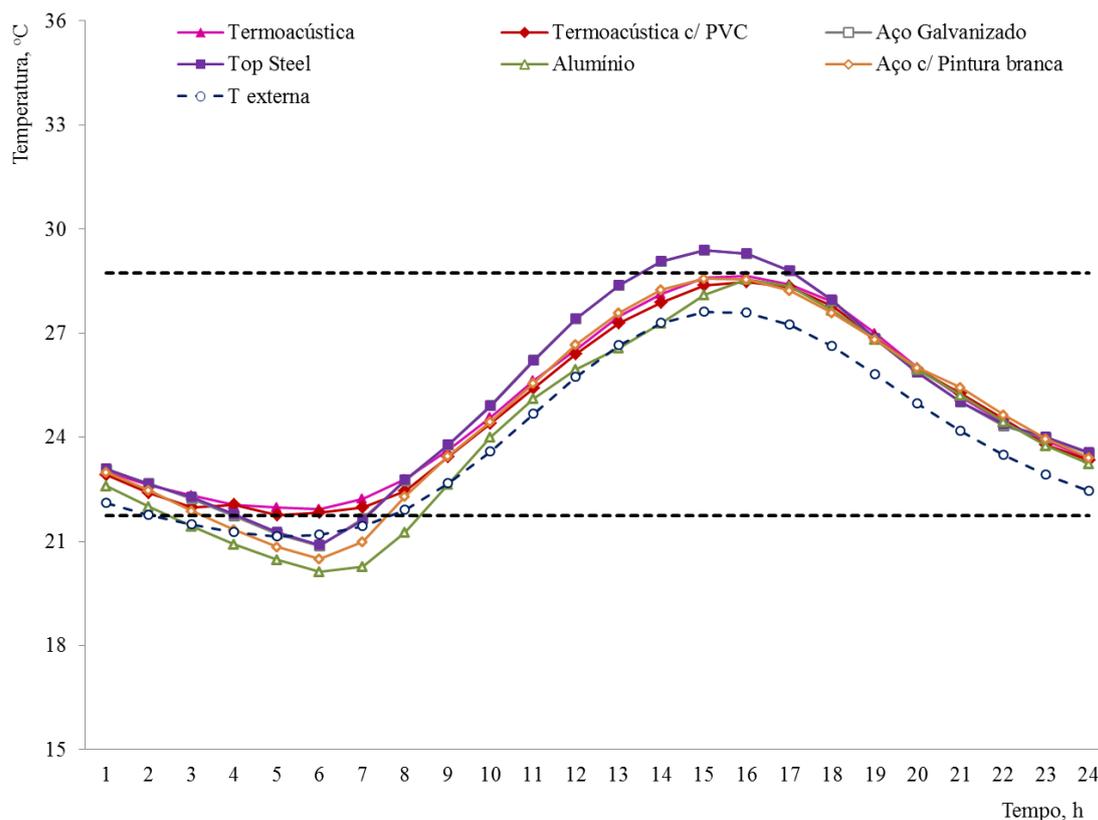


Figura 5.21 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Belo Horizonte (MG).

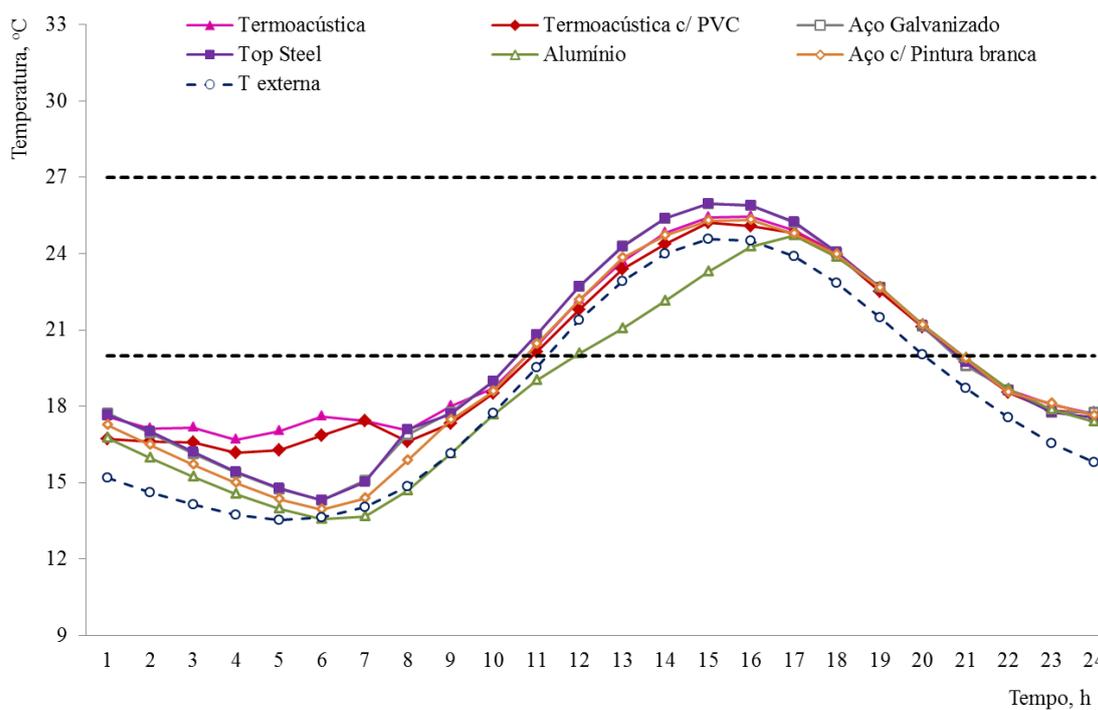


Figura 5.22 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Belo Horizonte (MG).

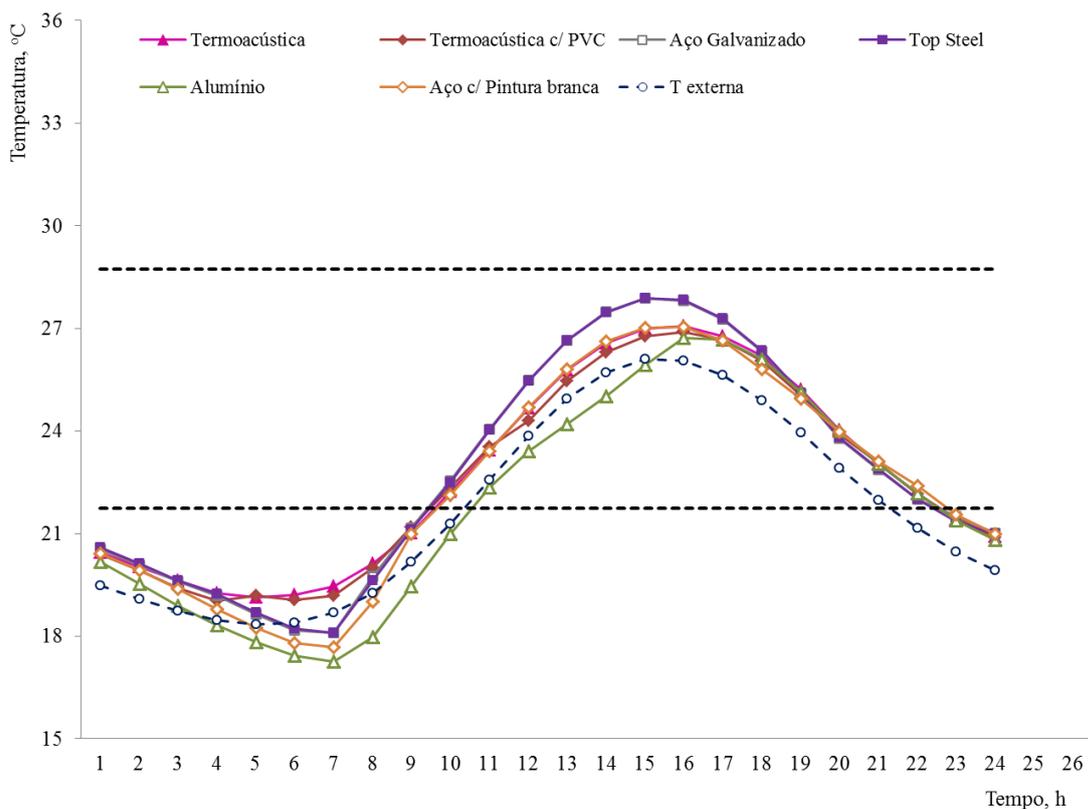


Figura 5.23 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Brasília (DF).

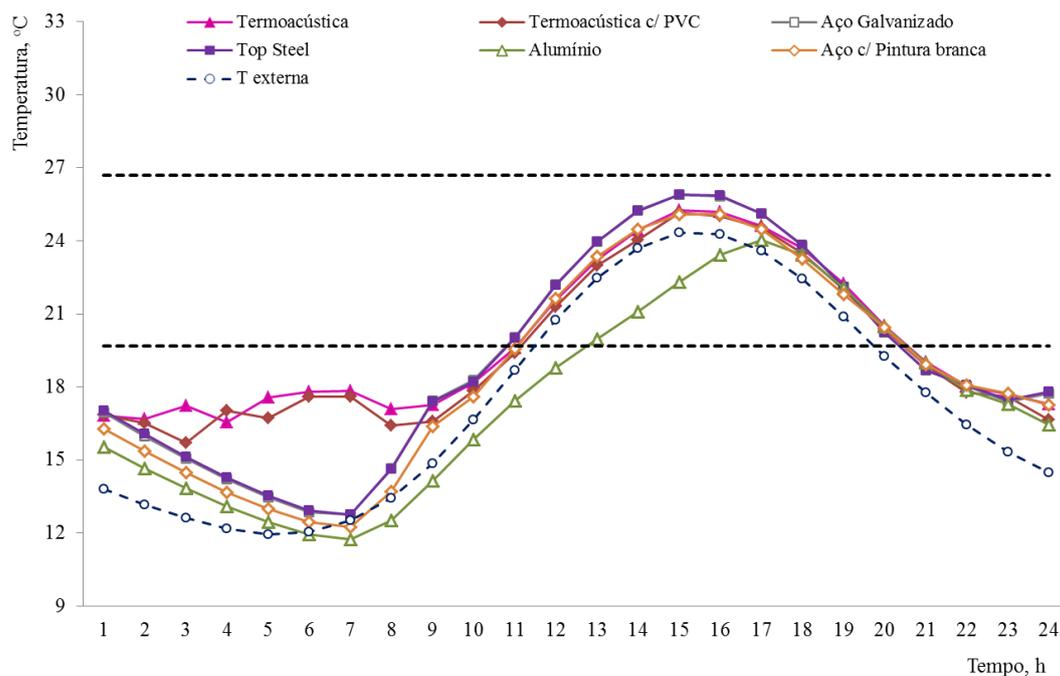


Figura 5.24 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Brasília (DF).

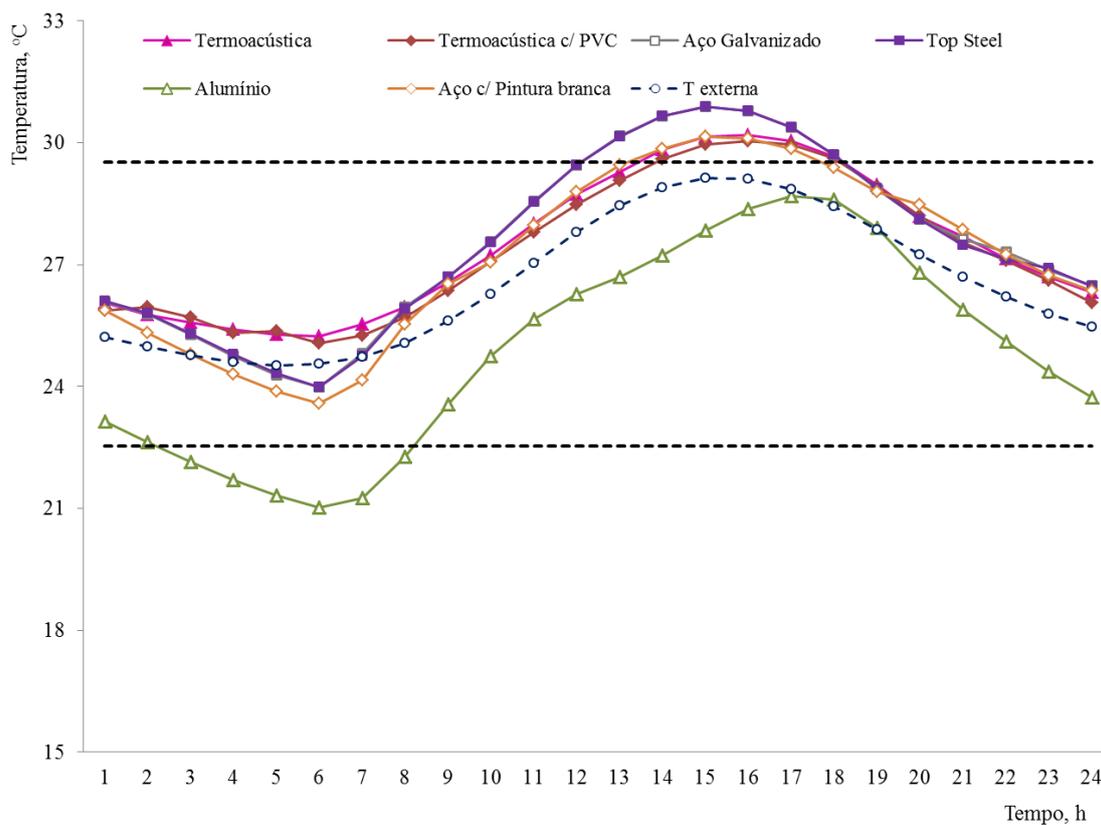


Figura 5.25 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Niterói (RJ).

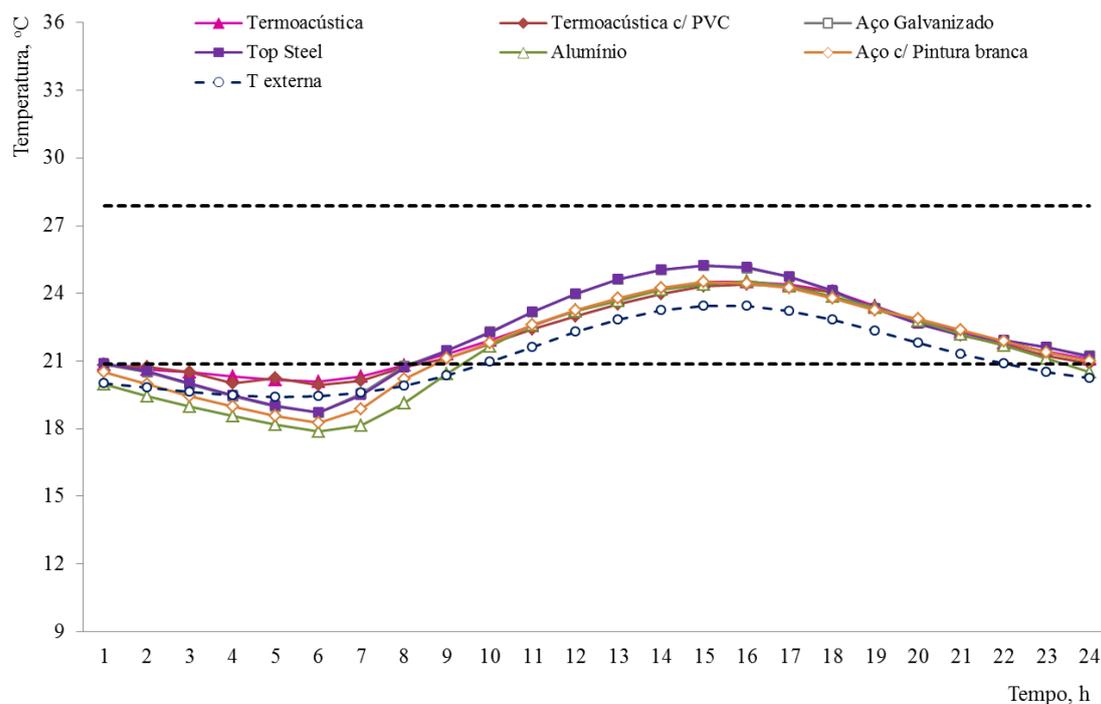


Figura 5.26 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Niterói (RJ).

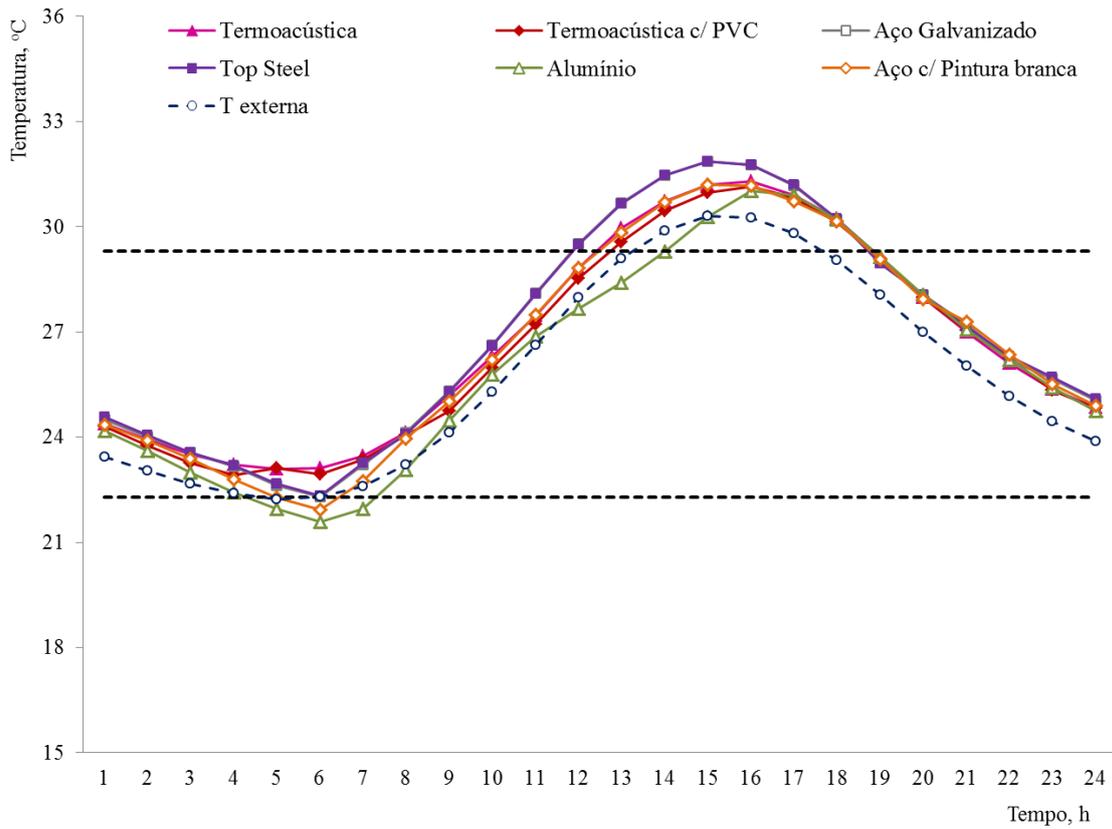


Figura 5.27 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Campo Grande (MS).

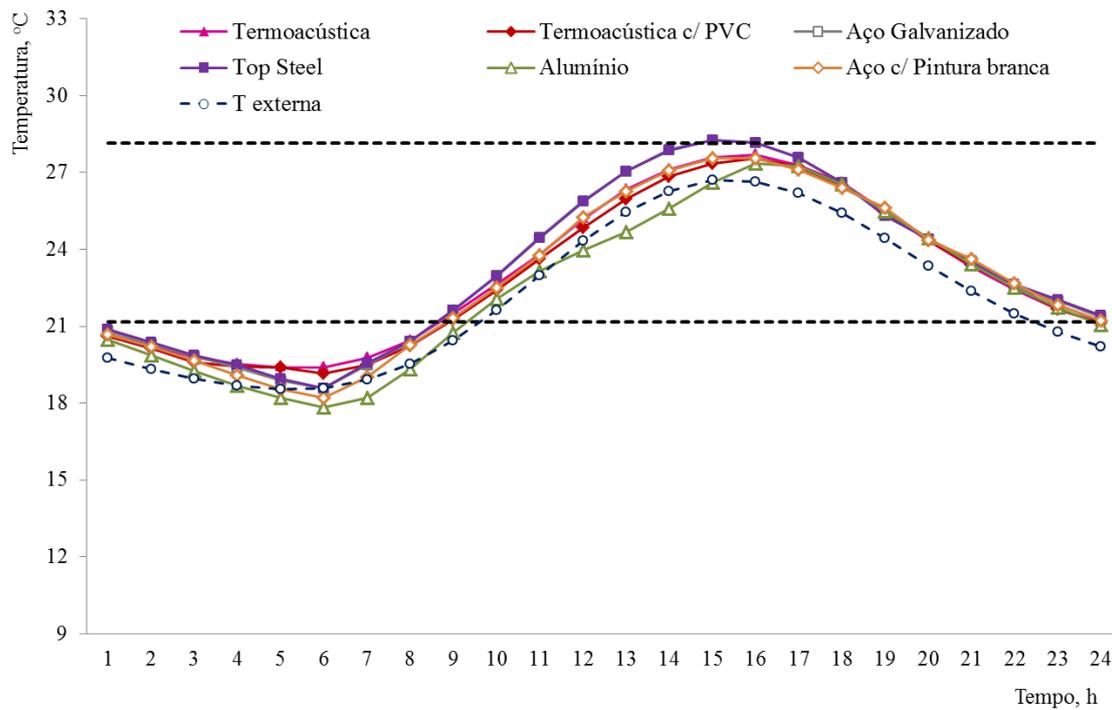


Figura 5.28 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Campo Grande (MS).

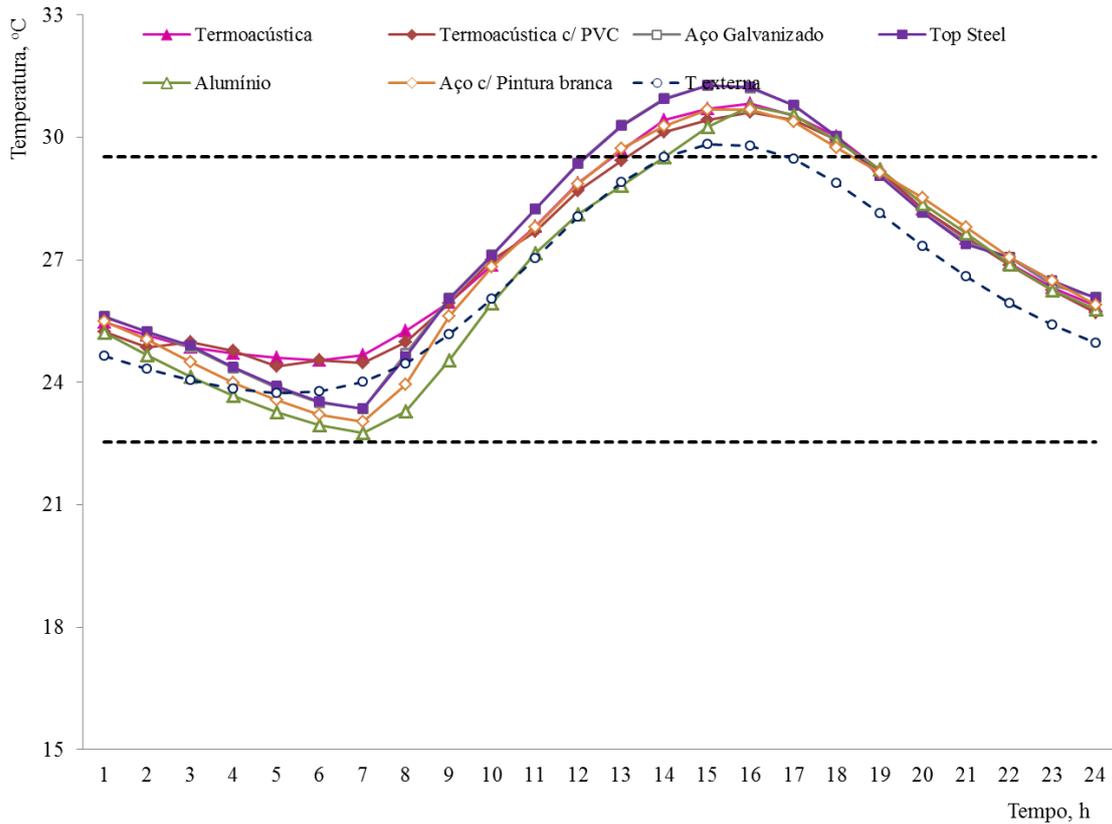


Figura 5.29 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Porto Nacional (TO).

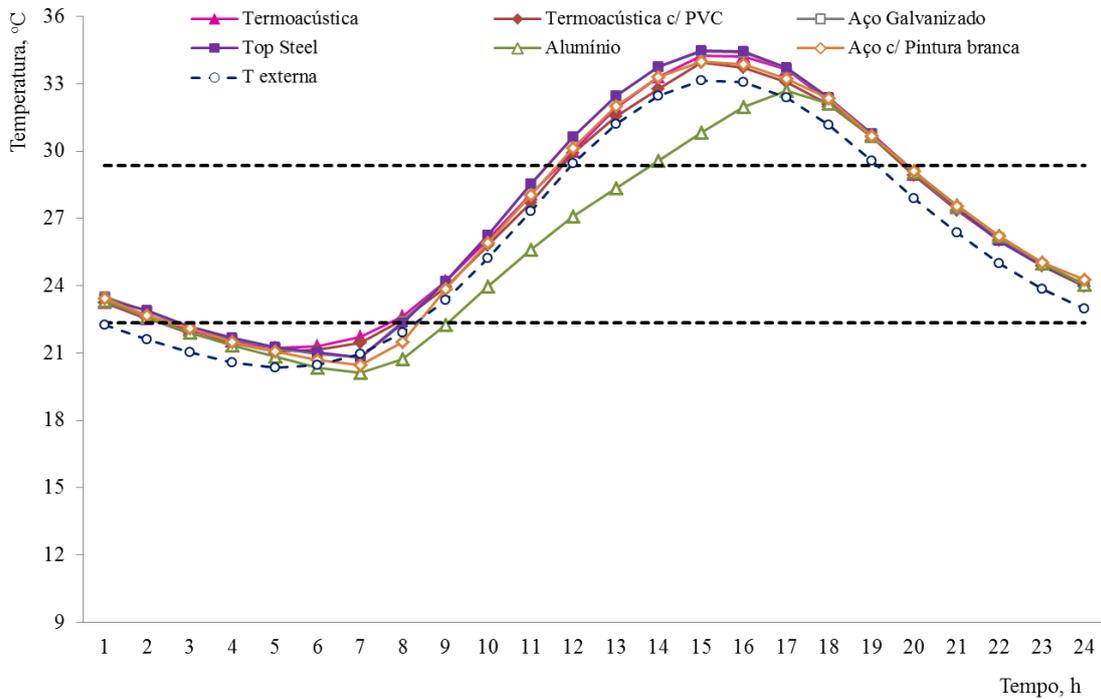


Figura 5.30 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Porto Nacional (TO).

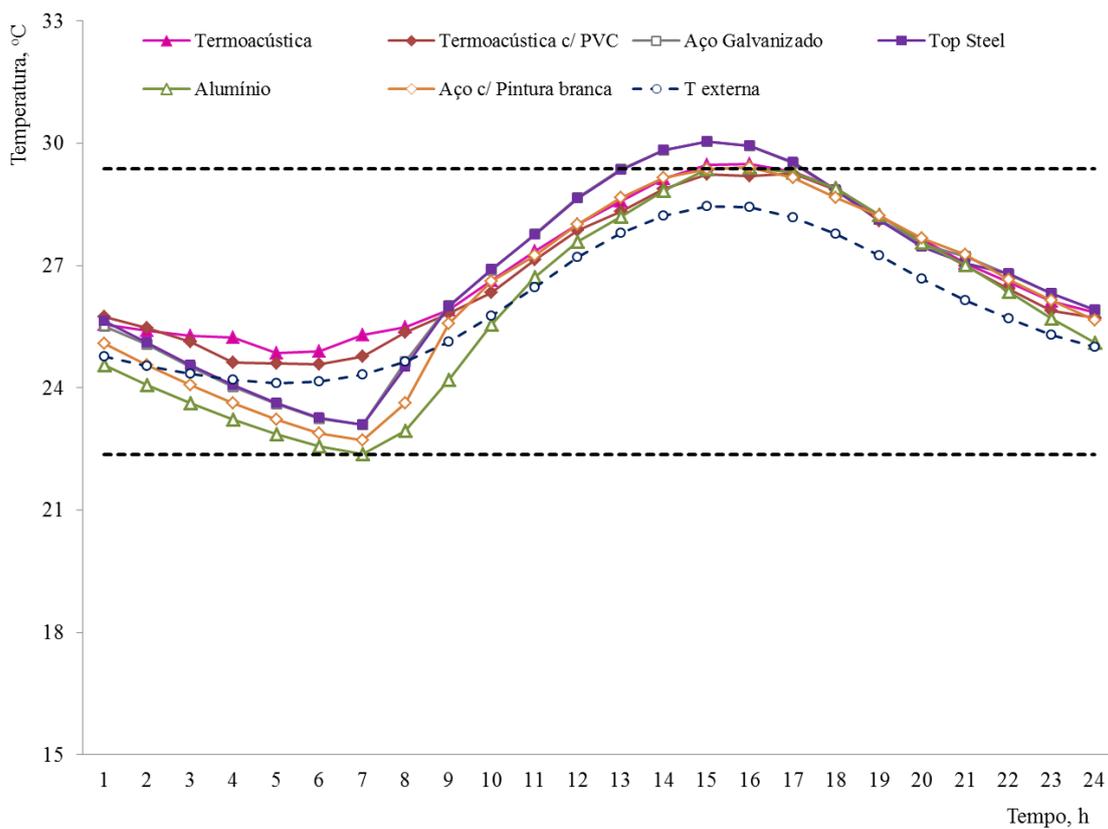


Figura 5.31 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de verão em Manaus (AM).

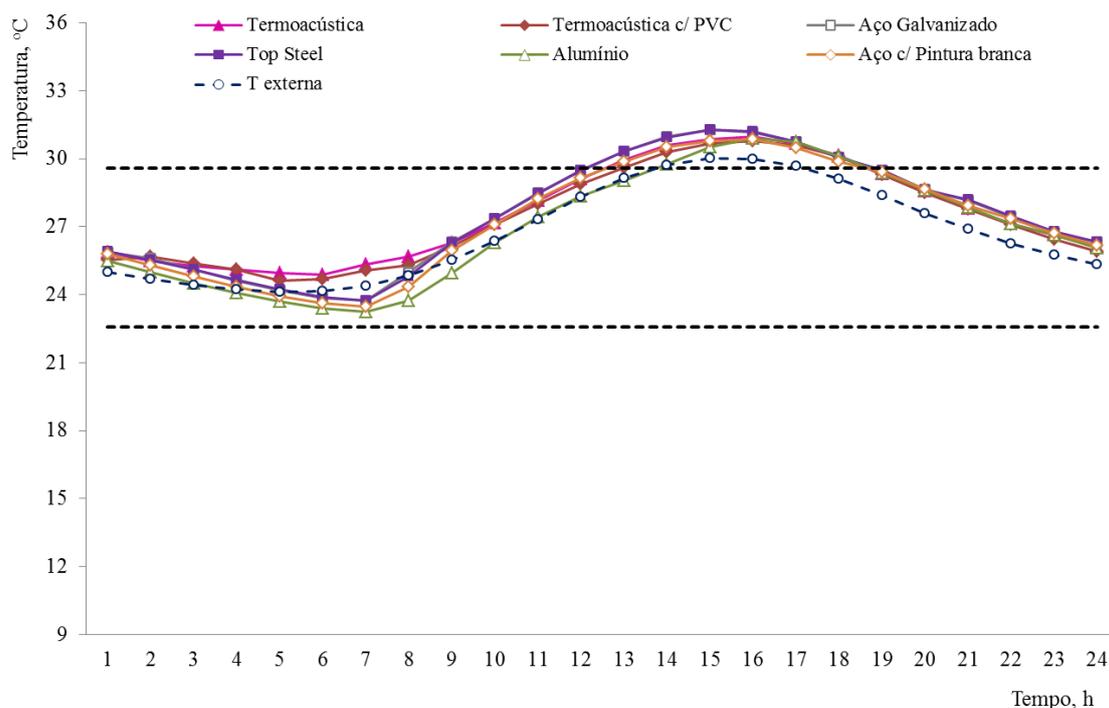


Figura 5.32 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas com diferentes materiais metálicos, no dia típico de inverno em Manaus (AM).

Tabela 5.5 – Temperaturas máximas do galpão com telha em diferentes materiais metálicos, nas diferentes zonas bioclimáticas, no dia típico de verão

Cidades/telhas	T. externa	Termoacústica	Termoacústica c/ PVC	Aço galvanizado	Top steel	Alumínio	Aço c/ Pintura branca
Curitiba	24,8	25,9	25,8	26,6	26,6	25,7	25,8
Santa Maria	29,3	23,2	23,1	23,3	23,2	23,1	23,3
Belo Horizonte	27,6	28,6	28,4	29,4	29,4	28,5	28,6
Brasília	26,1	27,1	26,9	27,9	27,9	26,7	27,0
Niterói	29,1	30,2	30,0	30,9	30,9	28,7	30,1
Campo Grande	30,3	31,3	31,1	31,9	31,9	31,0	31,2
Porto Nacional	29,8	30,8	30,6	31,3	31,3	30,8	30,7
Manaus	28,4	29,5	29,3	30,0	30,0	29,4	29,4

Tabela 5.6 – Temperaturas máximas do galpão com telha em diferentes materiais metálicos, nas diferentes zonas bioclimáticas, no dia típico de inverno

Cidades/telhas	T. externa	Termoacústica	Termoacústica c/ PVC	Aço galvanizado	Top steel	Alumínio	Aço c/ Pintura branca
Curitiba	18,6	19,6	19,4	19,9	19,9	19,1	19,5
Santa Maria	19,7	17,5	16,6	16,3	16,4	14,9	15,6
Belo Horizonte	24,6	25,4	25,2	26,0	26,0	24,7	25,3
Brasília	24,3	25,2	25,2	25,9	25,9	24,0	25,1
Niterói	23,4	24,5	24,4	25,2	25,2	24,6	24,5
Campo Grande	26,7	27,7	27,5	28,3	28,3	27,4	27,6
Porto Nacional	33,1	34,3	34,0	34,5	34,5	32,7	34,0
Manaus	30,0	31,0	30,8	31,3	31,3	30,9	30,9

Para as condições climáticas de verão, de um modo geral, observa-se pelos resultados obtidos que as telhas *Topsteel* no período diurno apresenta o pior desempenho. Este fato se deve pela sua alta capacidade de absorção da radiação solar em função da cor escura utilizada em sua composição (manta asfáltica). Observa-se também que a telha de alumínio, embora tenha baixa capacidade térmica, apresenta desempenho satisfatório, devido a sua alta refletância à radiação solar. As demais telhas apresentam no período diurno comportamento térmico similar.

Para as regiões mais frias, como no caso de Curitiba, percebe-se um melhor desempenho das telhas termoacústicas. A proximidade da temperatura interna dos ambientes localizados nestas cidades com a zona de conforto deve-se a presença de material isolante resistivo em sua composição que aumenta sua capacidade térmica.

Também, utilizou-se a temperatura superficial interna como parâmetro de avaliação de desempenho térmico de galpões com coberturas compostas por diferentes materiais metálicos. Nas figuras 5.33 a 5.38 e na tabela 5.7 apresenta-se a correlação entre as temperaturas superficiais internas das diferentes telhas metálicas para a cidade de Belo Horizonte (zona bioclimática 3).

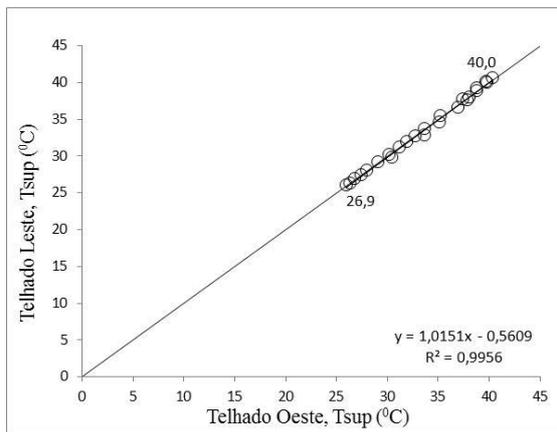


Figura 5.33 – Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha termo-acústica com lã de rocha

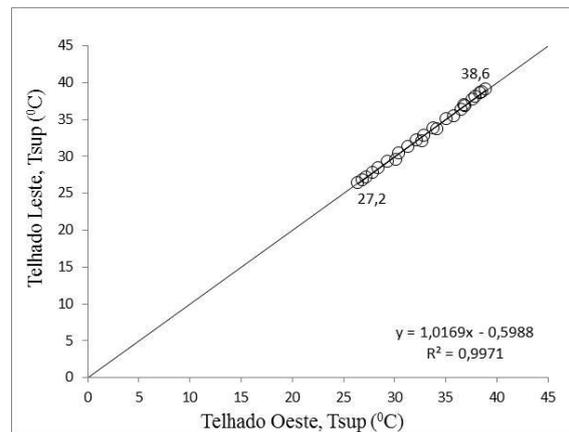


Figura 5.34 - Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha termo-acústica com poliuretano e PVC

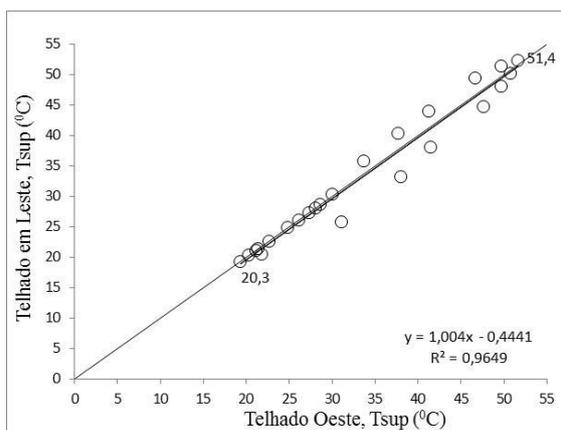


Figura 5.35 - Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha em aço galvanizado

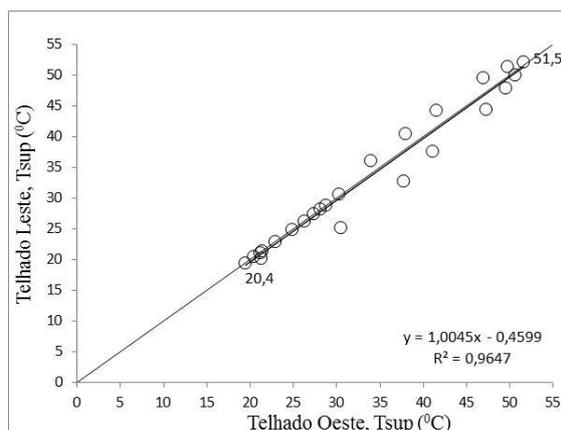


Figura 5.36 - Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha Top steel

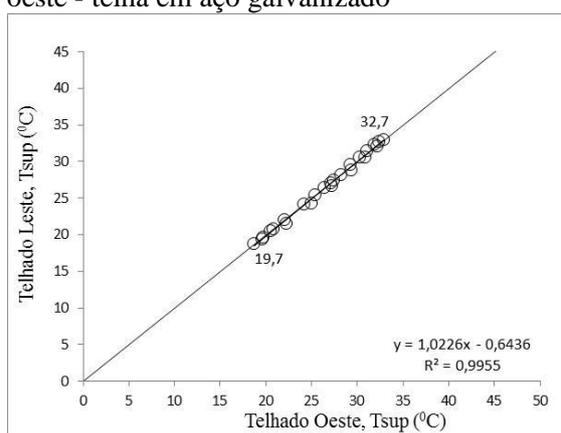


Figura 5.37 - Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha em alumínio

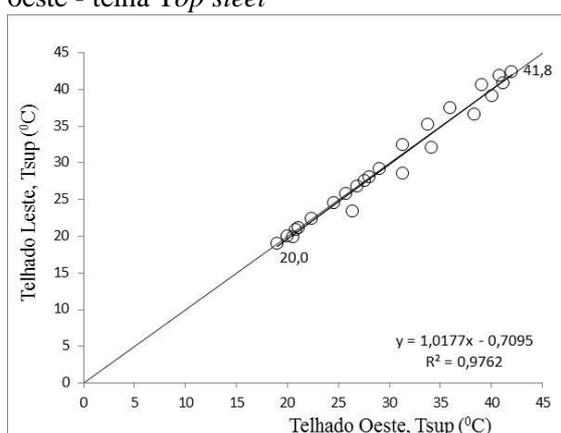


Figura 5.38 - Correlação da temperatura superficial das coberturas com orientação leste oeste - telha aço galvanizado com pintura branca

Tabela 5.7 – Matriz de coeficiente de determinação (r2) das telhas analisadas para a cidade de Belo Horizonte (Zona Bioclimática 03)

	Termoacústica com lâ de rocha	Termoacústica com lâ de rocha e PVC	Aço galvanizado	Top steel	Alumínio	Aço galvanizado com pintura branca
Termoacústica com lâ de rocha	1	0,99	0,81	0,83	0,95	0,90
Termoacústica com lâ de rocha e PVC		1	0,76	0,78	0,96	0,86
Aço galvanizado			1	1	0,79	0,98
Top steel				1	0,80	0,98
Alumínio					1	0,89
Aço galvanizado com pintura branca						1

Os resultados obtidos demonstram semelhanças e diferenças de comportamento térmico dos diferentes telhas. Observa-se que as telhas *Top steel* e aço galvanizado (figuras 5.35 e 5.36) apresentam comportamento térmico semelhante com relação a temperatura superficial interna. Estas telhas apresentam maior amplitude térmica em relação as demais telhas, com uma temperatura superficial interna máxima muito elevada o que resulta em uma pior correlação com as demais (tabela 5.5). Este fato ocorre como comentado anteriormente em função de sua alta absorvância, o que pode ser observado pela alta dispersão apresentada (figura 5.35 e 5.36).

Apesar de a telha *Top steel* ser denominada termo-acústica por seu fabricante, seu comportamento com relação à temperatura superficial interna do material é diferente das telhas que possuem material isolante resistivo em sua composição (lã de rocha e poliuretano). Os resultados comprovam que as diferentes camadas de materiais presentes nesta telha, apesar de o fabricante afirmar que auxiliam no seu desempenho térmico da telha pouco contribuem.

5.3 Desempenho térmico da cobertura quanto à geometria

Nas figuras de 5.39 a 5.54 apresentam-se os resultados de desempenho térmico do modelo de galpão estruturado em aço quanto à geometria de sua cobertura em escala horária por meio de curvas de temperatura do ar interno, de temperatura do ambiente externo e uma faixa de conforto sugerida pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004).

Nas Tabelas 5.8 e 5.9 apresenta-se um resumo das temperaturas máximas do galpão com diferentes geometrias de cobertura, nas zonas bioclimáticas, nas diferentes zonas bioclimáticas, nos dias típicos de verão e inverno, respectivamente.

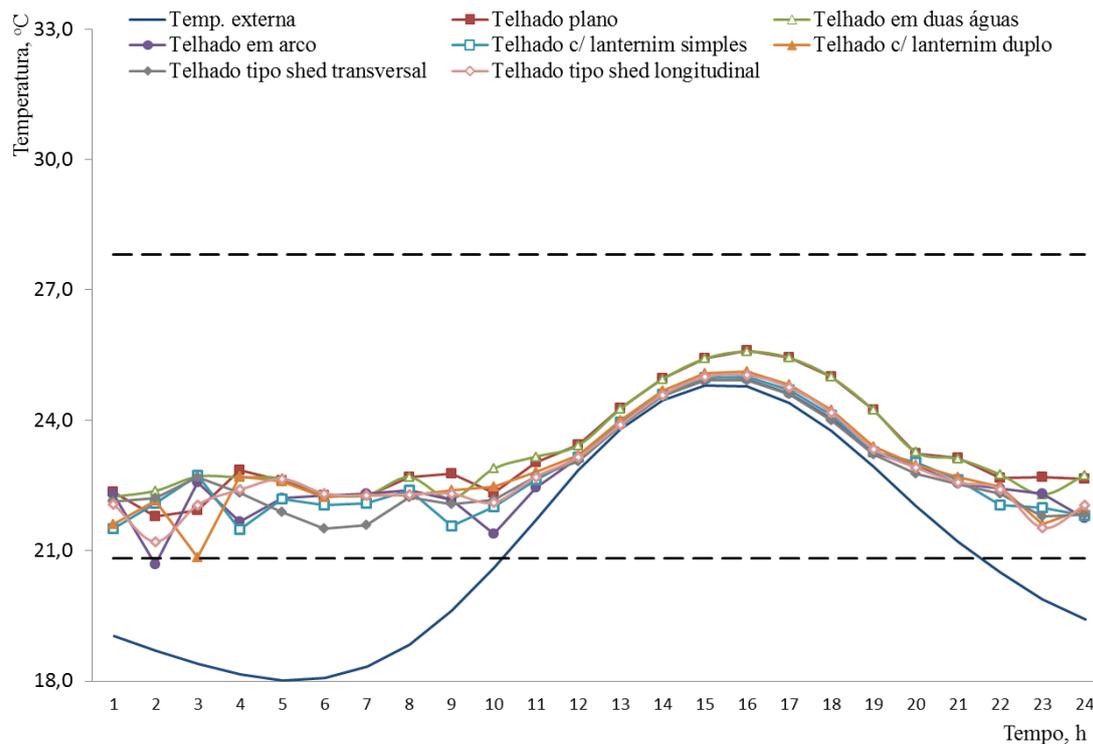


Figura 5.39 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Curitiba (PR)

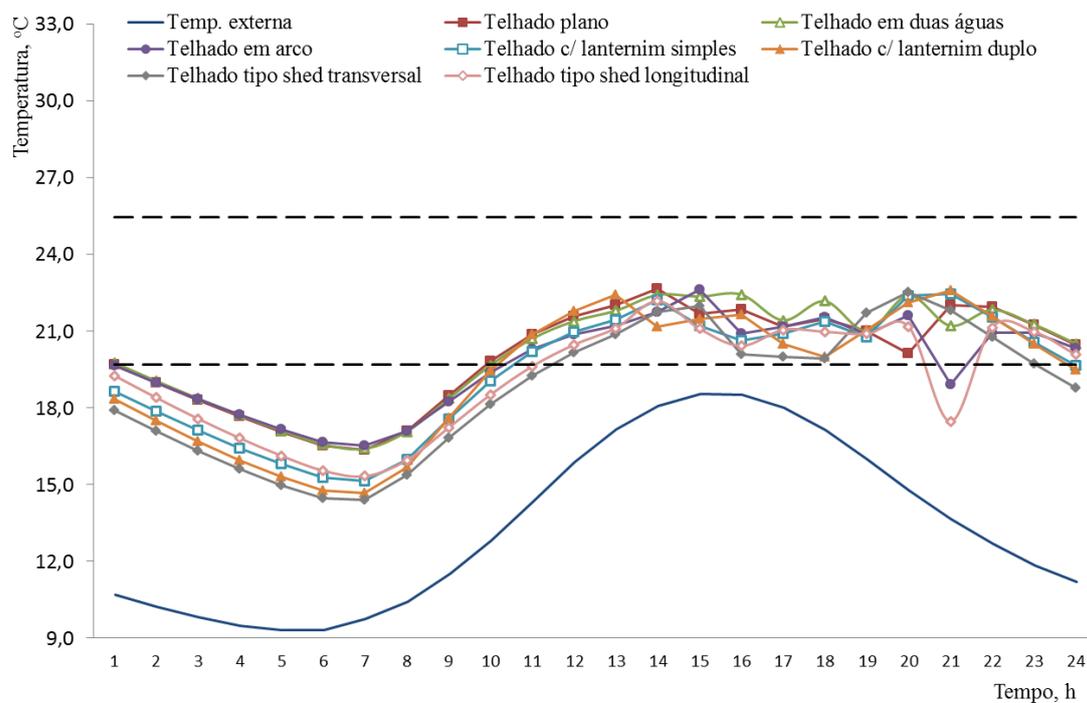


Figura 5.40 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Curitiba (PR)

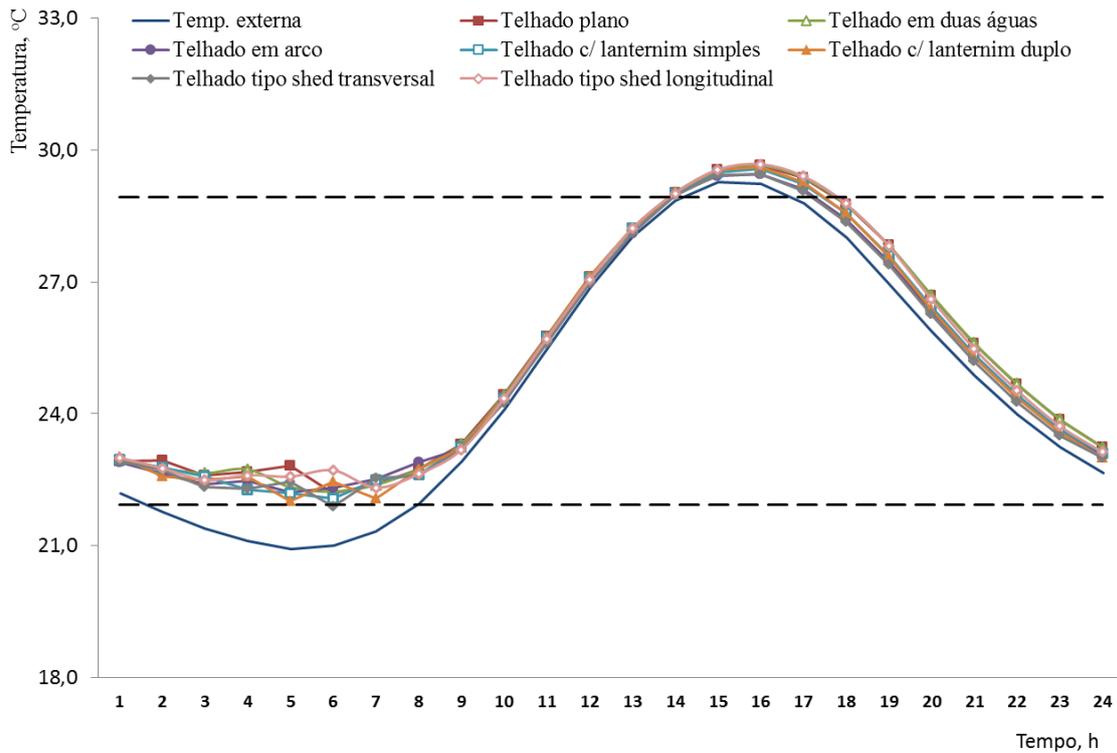


Figura 5.41 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Santa Maria (RS)

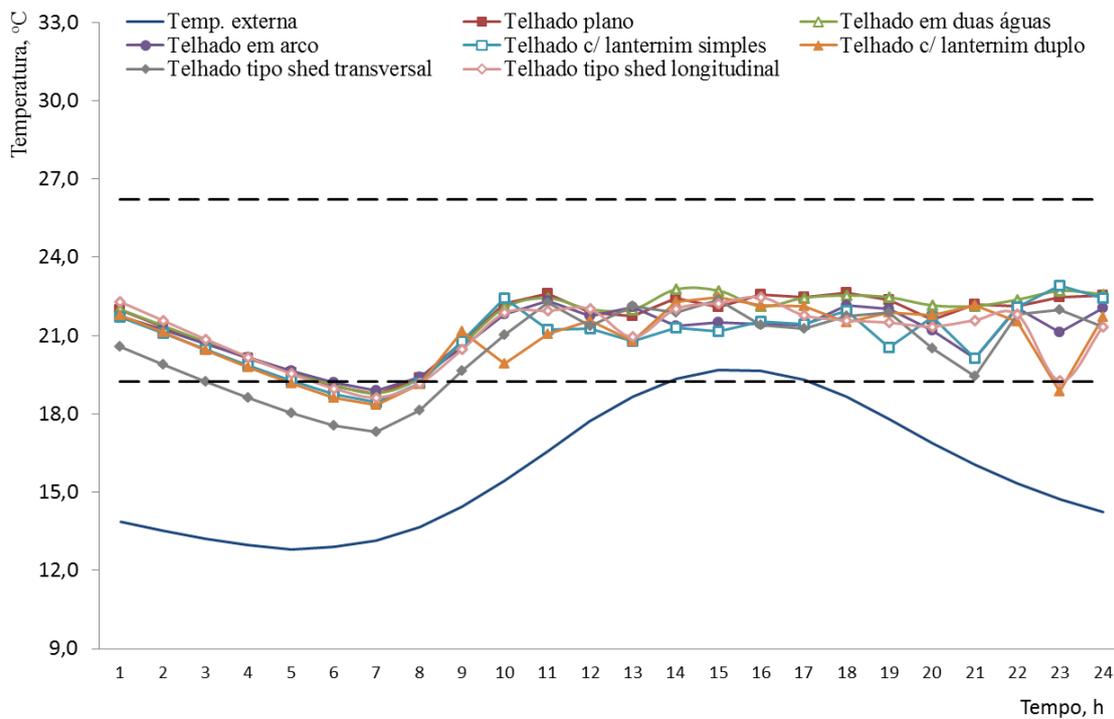


Figura 5.42 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Santa Maria (RS)

Nas figuras de 5.39 a 5.40 e de 5.41 a 5.42 apresentam-se os resultados das simulações para o município de Curitiba (PR), zona bioclimática 1, e para o município de Santa Maria (RS), zona bioclimática 2, respectivamente. Em ambas as cidades o clima é caracterizado por baixas temperaturas anuais, com invernos frios e muitas vezes rigorosos. Os resultados mostram que em alguns horários do dia no período da manhã, no dia mais frio do ano, as temperaturas internas estão abaixo da faixa de conforto.

No dia mais quente do ano, quando comparados os resultados do desempenho térmico das diferentes tipologias de cobertura em relação ao limite das temperaturas de conforto, os resultados mostram um melhor desempenho do telhado com lanternim duplo.

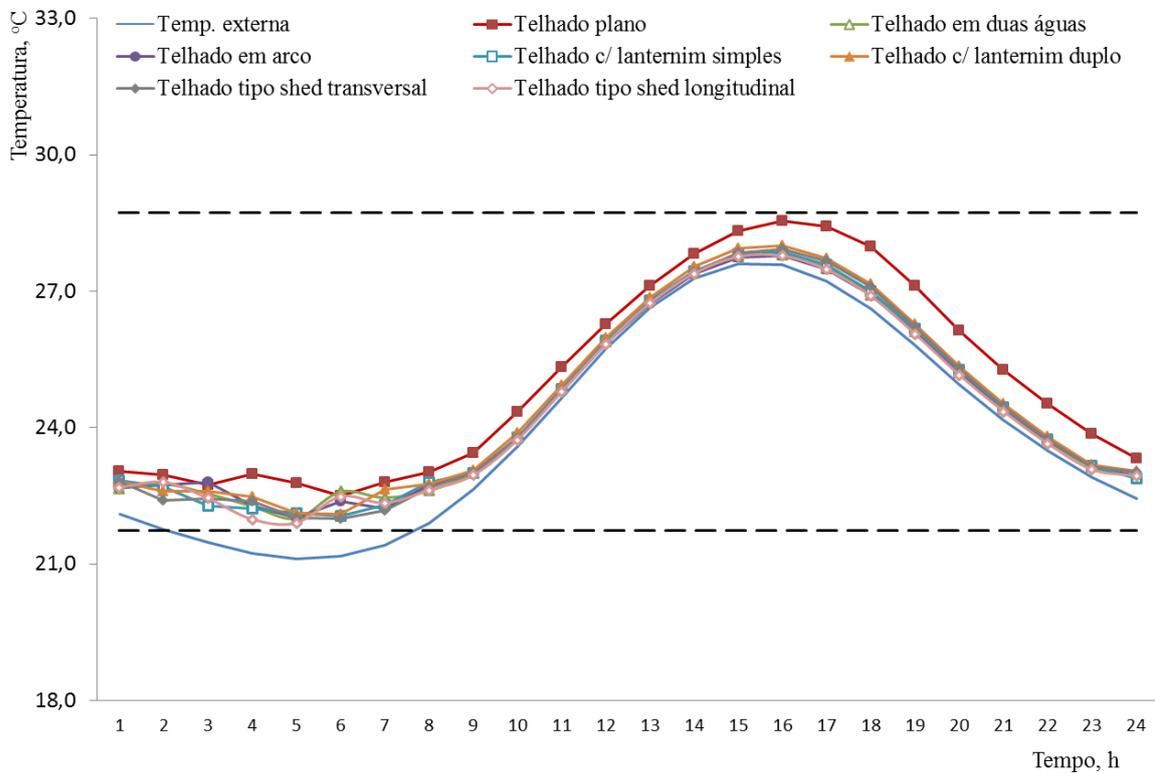


Figura 5.43 - Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Belo Horizonte (MG)

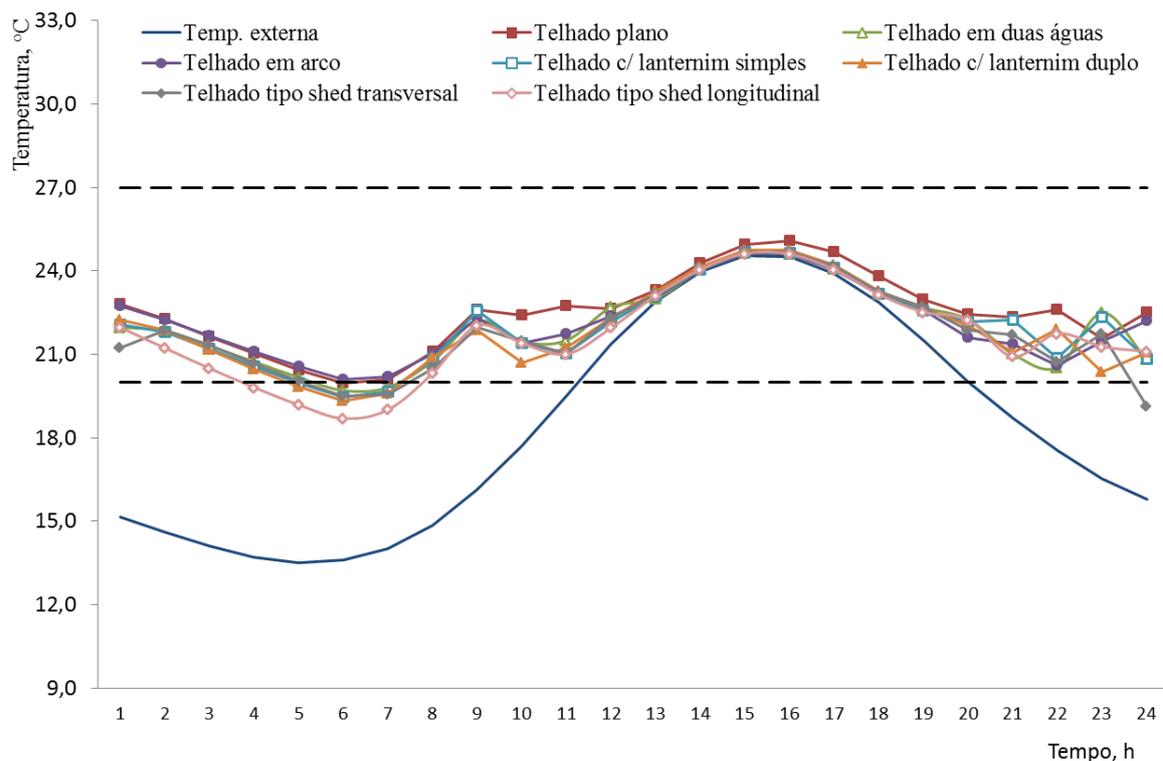


Figura 5.44 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Belo Horizonte (MG)

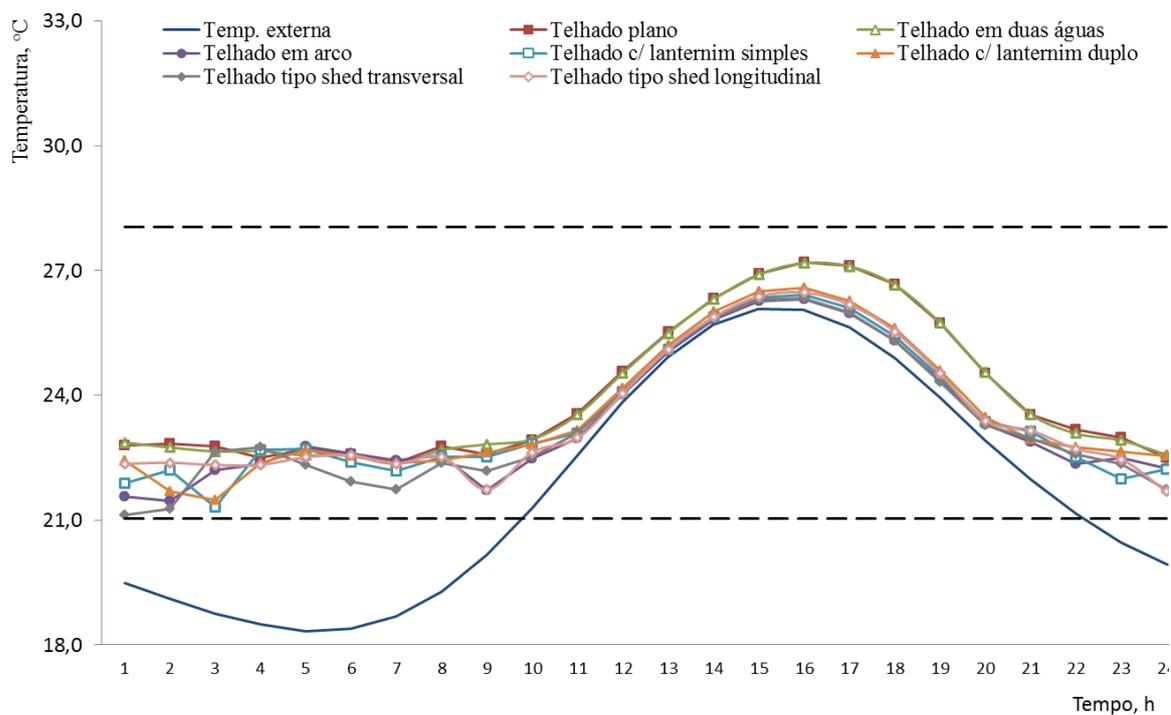


Figura 5.45 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Brasília (DF)

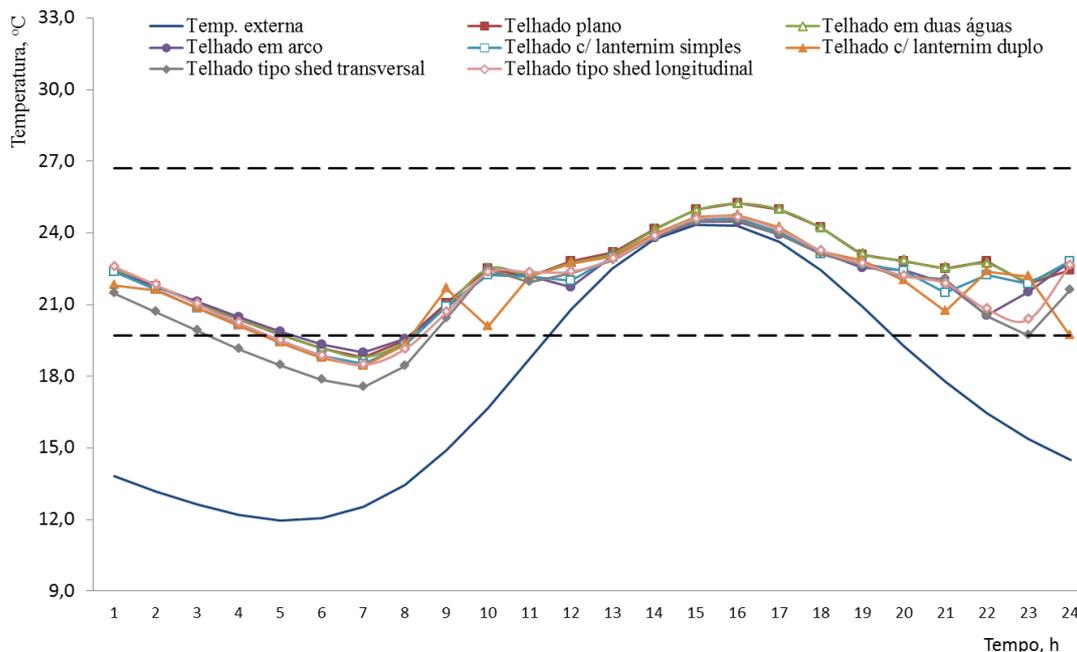


Figura 5.46 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Brasília (DF)

Tem-se nas figuras 5.43 a 5.44 e 5.45 a 5.46 os resultados das simulações para o município de Belo Horizonte (MG), zona bioclimática 3 (ZB-03) e para Brasília, Distrito Federal, zona bioclimática 4 (ZB-04), respectivamente. A cidade de Belo Horizonte é caracterizada predominantemente por invernos amenos e secos e verões quentes e chuvosos, com temperatura média anual de $21,8^{\circ}\text{C}$. A média de umidade relativa é de 65% com média de chuva de aproximadamente 1500 mm/ano. Já Brasília é caracterizada por duas estações bem definidas: invernos frios e secos e verões quentes e úmidos. Sua temperatura média anual é de 21°C e a média de umidade relativa é de 75% podendo chegar a 20% no inverno.

Para estas duas zonas bioclimáticas, observam-se nos resultados que todas as diferentes configurações de coberturas apresentam comportamento térmico semelhante. Para a condição climática de verão, todas as geometrias apresentam bom desempenho térmico, ou seja, encontram-se dentro da faixa de conforto durante todo o dia. Já em relação à condição climática do dia mais frio do ano alcança-se a condição de conforto em grande parte do dia, ficando abaixo apenas em um período durante a madrugada.

Quando comparados os desempenhos térmicos das diferentes tipologias de cobertura, nas duas cidades e nas duas condições climática um bom desempenho para o telhado em arco. O bom desempenho do telhado em arco deve-se à geometria da

cobertura que possibilita uma maior troca de calor com uma melhor distribuição da radiação sobre uma superfície, como as superfícies curvas (abóbada, cúpula), em dias frios em várias direções e também a uma maior eficiência do mecanismo de convecção de calor interno em dias quentes (maior volume).

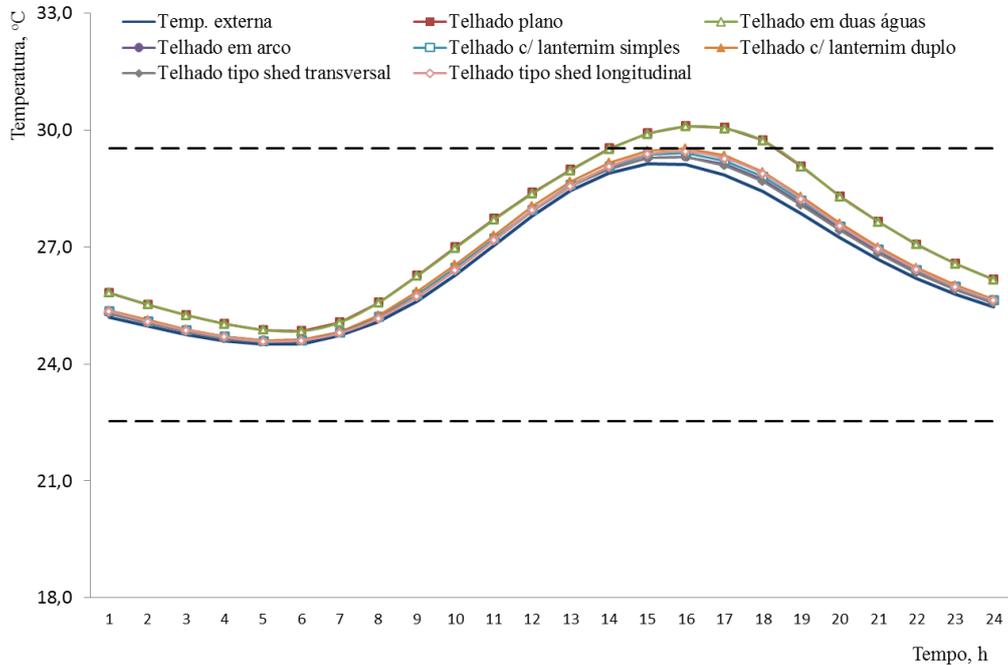


Figura 5.47 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Niterói (RJ)

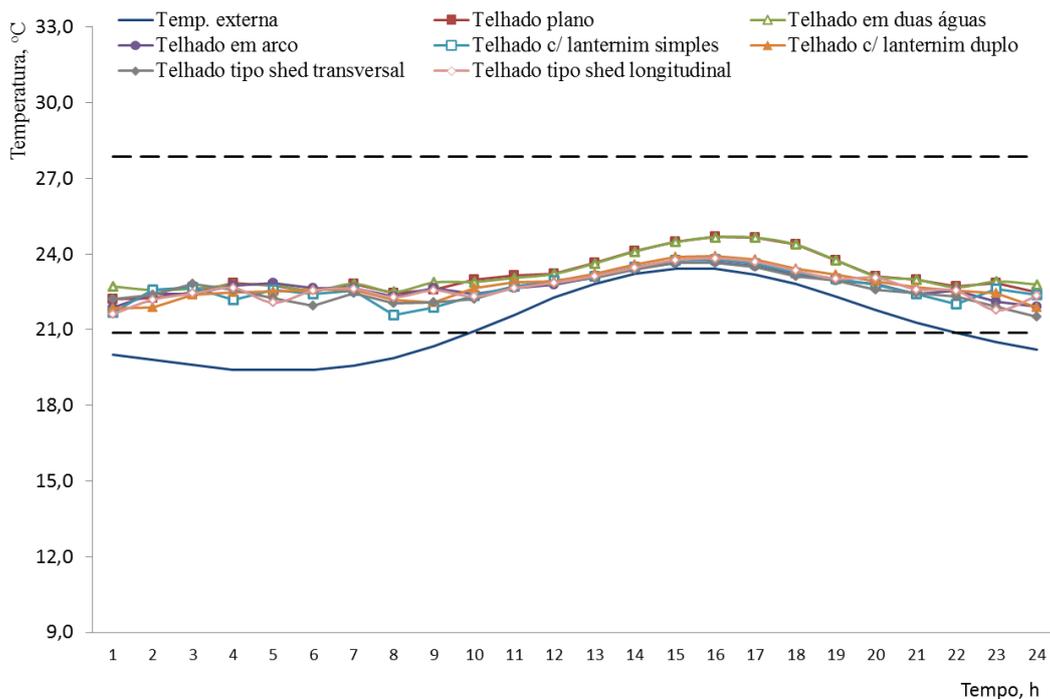


Figura 5.48 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Niterói (RJ)

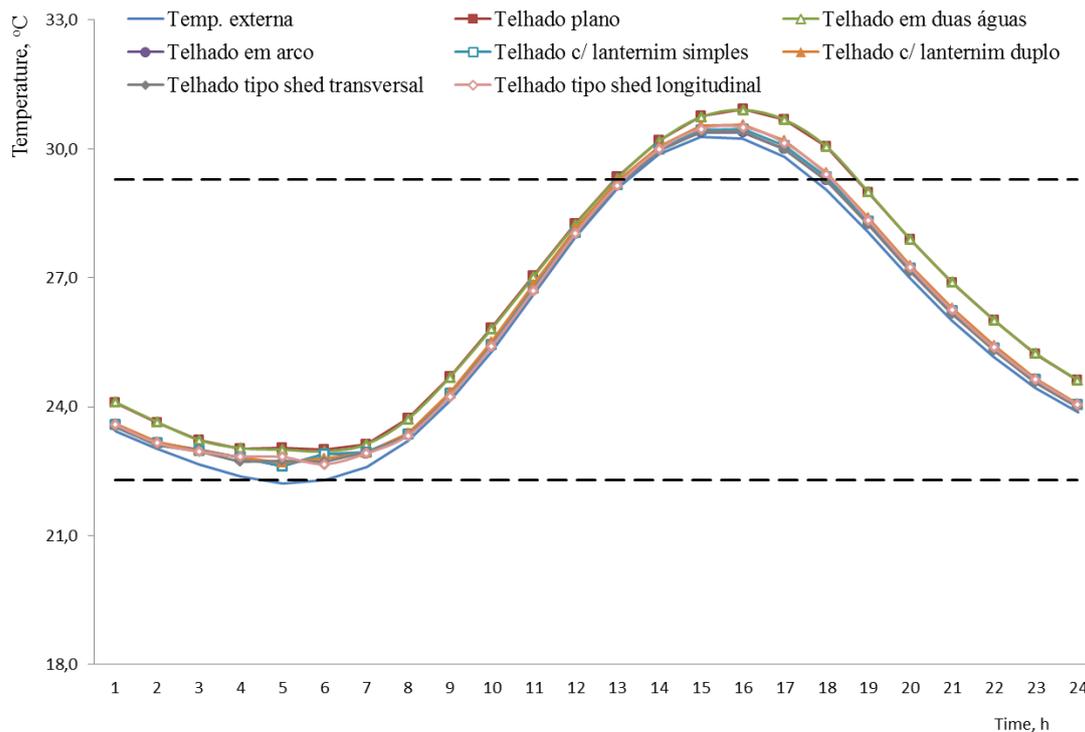


Figura 5.49 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Campo Grande (MS)

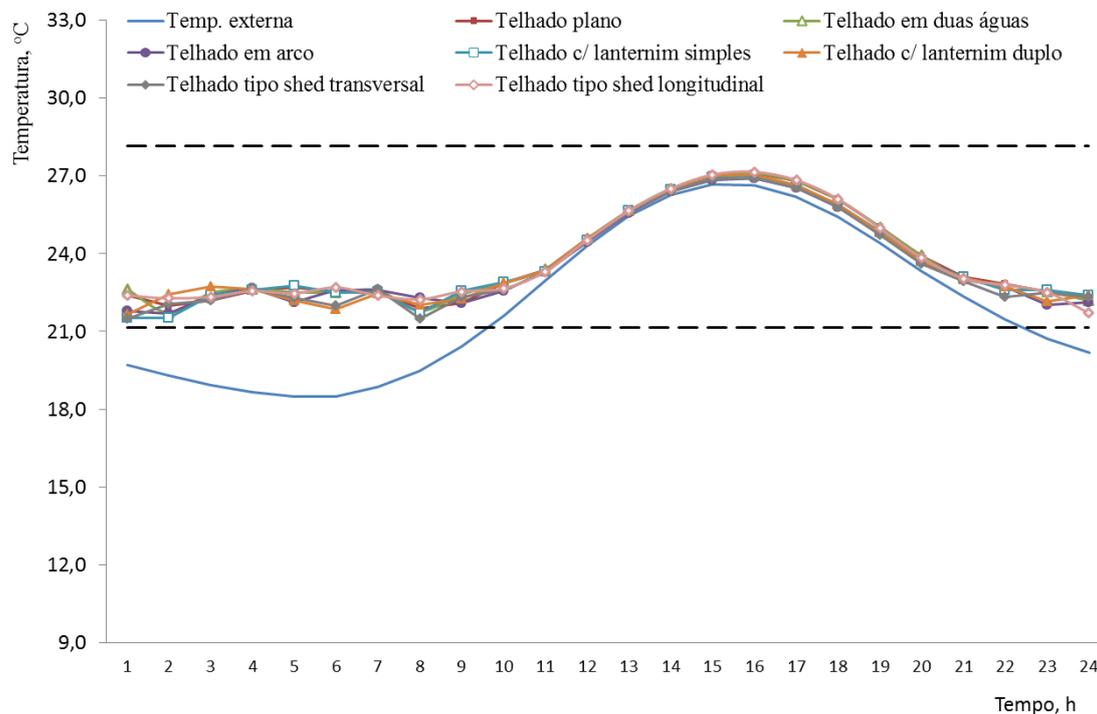


Figura 5.50 - Evolução temporal da temp. interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Campo Grande (MS)

Nas figuras de 5.47 a 5.48 e 5.49 a 5.50 são apresentados os resultados das simulações para o município de Niterói (RJ), zona bioclimática 5 e para o município Campo Grande (MS), zona bioclimática 6. Niterói é caracterizado por verões quentes e invernos moderados, com uma temperatura média de 22,6 °C, ausência de estações secas, apenas reduzindo as chuvas no inverno. Já Campo Grande, assim como Brasília, é caracterizado por duas estações bem definidas: invernos frios e secos e verões quentes e úmidos.

Quando comparado o desempenho térmico dos galpões com diferentes tipologias de cobertura, na cidade de Niterói e Campo Grande, o telhado tipo *shed* transversal e o telhado com lanternim duplo apresentam melhores resultados respectivamente, nas duas condições climáticas. Deve-se este fato ao maior número de aberturas nestas coberturas atenuando às altas temperaturas médias e a baixa amplitude térmica anuais, aproximando-se, nestes casos, mais da zona de conforto.

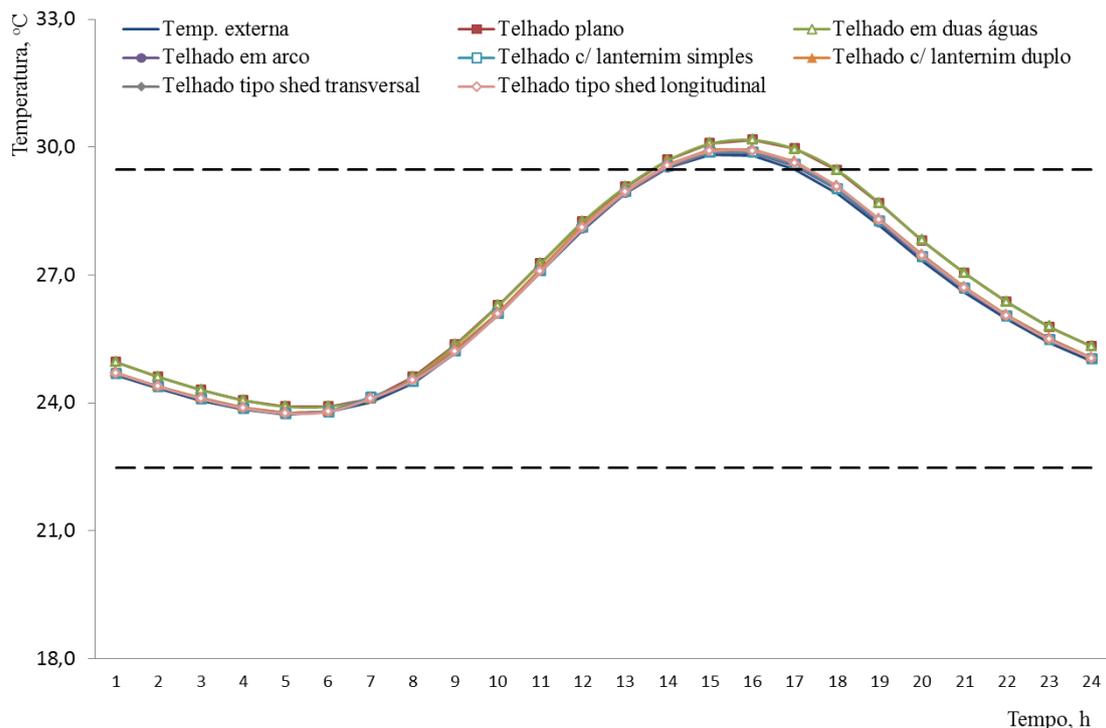


Figura 5.51 - Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Porto Nacional (TO)

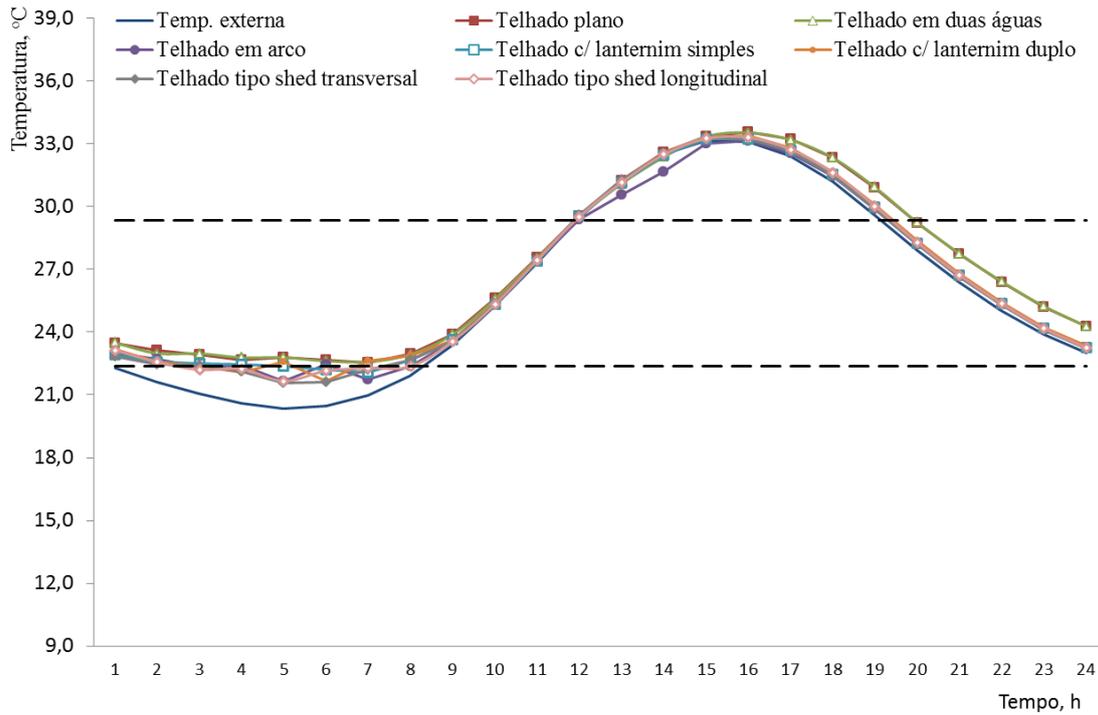


Figura 5.52 - Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Porto Nacional (TO)

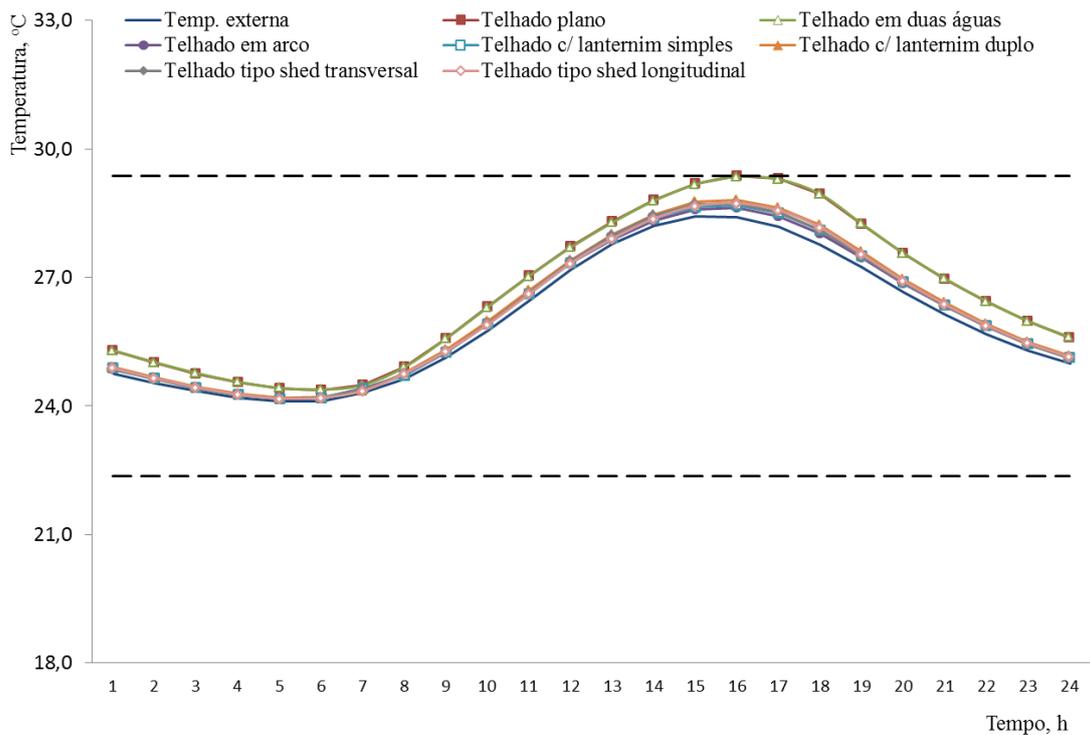


Figura 5.53 - Evolução temporal da temperatura interna e externa (°C) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de verão em Manaus (AM)

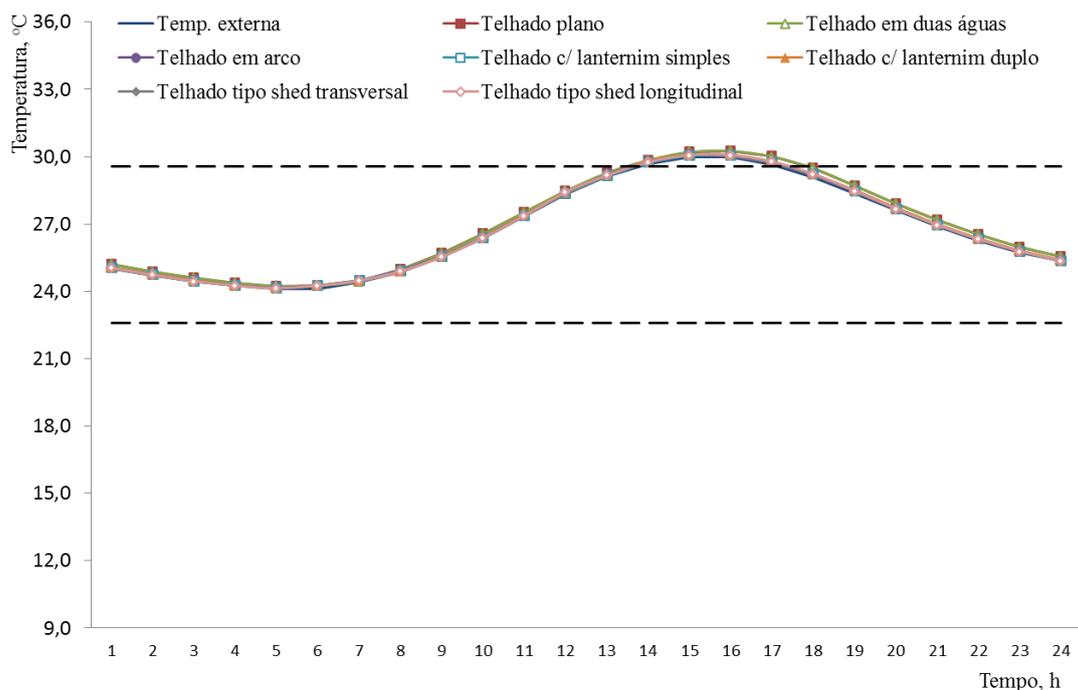


Figura 5.54 - Evolução temporal da temperatura interna e externa ($^{\circ}\text{C}$) do modelo com coberturas formadas por diferentes geometrias, no dia típico de inverno em Manaus (AM)

Nas figuras de 5.51 a 5.52 e de 5.53 a 5.54, apresentam-se os resultados das simulações para o município de Porto Nacional (TO), zona bioclimática 7 (ZB-07), e o município de Manaus (AM), zona bioclimática 8 (ZB-08). Seu clima é caracterizado por temperaturas quente o ano todo, sem períodos de frio no inverno, reduzida amplitude térmica e duas estações bem definidas no ano: úmida e menos úmida.

Observa-se pelos resultados, comparando-se o desempenho térmico dos galpões com diferentes tipologias de cobertura, que as coberturas em *shed* transversal apresentam melhores resultados, inverno e verão, nas duas regiões bioclimáticas. As altas temperaturas e umidade são atenuadas pelo maior número de aberturas na cobertura que auxiliam na ventilação natural da edificação.

Tabela 5.8 – Temperaturas máximas do galpão com diferentes geometrias de cobertura, nas zonas bioclimáticas, no dia típico de verão

Cidades/telhas	Temp externa	Telhado plano	Telhado em duas águas	Telhado em arco	Telhado c/ lanternim simples	Telhado c/ lanternim duplo	Telhado tipo shed transversal	Telhado tipo shed longitudinal
Curitiba	24,81	25,60	25,58	25,01	25,04	24,92	24,94	25,12
Santa Maria	29,29	29,66	29,65	29,57	29,68	29,45	29,45	29,61
Belo Horizonte	27,62	28,54	27,80	27,78	27,87	28,01	27,92	27,78
Brasília	26,10	27,20	27,18	26,30	26,41	26,58	26,47	26,34
Niterói	29,14	30,11	30,09	29,40	29,45	29,30	29,32	29,53
Campo Grande	30,30	30,92	30,91	30,46	30,51	30,39	30,38	30,56
Porto Nacional	29,82	30,18	30,17	29,89	29,91	29,91	29,87	29,95
Manaus	28,45	29,37	29,35	28,69	28,73	28,72	28,62	28,81

Tabela 5.9 – Temperaturas máximas do galpão com diferentes geometrias de cobertura, nas zonas bioclimáticas, no dia típico de inverno

Cidades/telhas	Temp externa	Telhado plano	Telhado em duas águas	Telhado em arco	Telhado c/ lanternim simples	Telhado c/ lanternim duplo	Telhado tipo shed transversal	Telhado tipo shed longitudinal
Curitiba	18,58	22,67	22,44	22,46	22,18	22,51	22,65	22,58
Santa Maria	19,71	22,62	22,76	22,90	22,46	22,36	22,34	22,46
Belo Horizonte	24,56	25,07	24,63	24,63	24,66	24,74	24,69	24,63
Brasília	24,34	25,25	25,23	24,48	24,59	24,76	24,65	24,52
Niterói	23,45	24,69	24,67	23,78	23,83	23,66	23,69	23,93
Campo Grande	26,70	27,11	27,10	27,00	27,15	26,90	26,89	27,03
Porto Nacional	33,14	33,55	33,53	33,24	33,29	33,26	33,15	33,37
Manaus	30,03	30,25	30,25	30,07	30,08	30,09	30,10	30,10

Na tabela 5.10 relacionam-se as coberturas que apresentaram melhor desempenho térmico, nos horários mais quentes do dia para as duas condições climáticas analisadas. Percebe-se que, no geral, o galpão com coberturas compostas por lanternim duplo apresentou melhor desempenho térmico para quase todas as regiões bioclimáticas, no dia típico de inverno, exceto para as cidades de Manaus e Porto Nacional, onde a cobertura em *shed* transversal mostrou-se mais eficiente, devido principalmente a temperatura e umidade elevadas destas cidades durante todo o ano.

Também para os horários de maior temperatura diária, no dia típico de verão, os telhados em Shed transversal mostraram-se mais eficientes nas zonas com temperaturas quentes e os telhados em arco nas zonas com temperaturas amenas e frias.

Tabela 5.10 – Coberturas com melhor desempenho nos horários de maior temperatura para as zonas bioclimáticas brasileiras nas duas situações climáticas

Cidades	Coberturas com melhor desempenho térmico	
	Dia típico de verão	Dia típico de inverno
Curitiba (PR)	Telhado com lanternim duplo	Telhado com lanternim simples
Santa Maria (RS)	Telhado com lanternim duplo	Telhado em <i>shed</i> transversal
Belo Horizonte (MG)	Telhado em <i>shed</i> long. e arco	Telhado c/ duas águas e em arco
Brasília (DF)	Telhado em arco	Telhado em arco
Niterói (RJ)	Telhado com lanternim duplo	Telhado com lanternim duplo
Campo Grande (MS)	Telhado em <i>shed</i> transversal	Telhado em <i>shed</i> transversal
Porto Nacional (TO)	Telhado em <i>shed</i> transversal	Telhado em <i>shed</i> transversal
Manaus (AM)	Telhado em <i>shed</i> transversal	Telhado em arco

Para avaliação do desempenho térmico foram calculados os números acumulados de graus hora diário da temperatura interna do galpão. O cálculo de graushora indica a quantidade de graus de temperatura interna que precisam ser retirados (graus hora de resfriamento) ou acrescentados (graus hora de aquecimento) do ambiente, para que este se encontre dentro da faixa de conforto.

Na tabela 5.11 mostram-se os resultados do cálculo de graus hora de resfriamento para as diferentes tipologias de cobertura nas oito cidades analisadas para a situação climática de verão. Nos resultados referentes ao cálculo de graus-hora para os dias típicos de verão, observa-se que o telhado com melhor desempenho térmico é o telhado em arco em todas as cidades analisadas exceto em Manaus (AM) e Belo Horizonte (MG), onde o telhado em *shed* transversal obteve o melhor desempenho

térmico.

Tabela 5.11 - Cálculo de Graus-hora de resfriamento para as diferentes tipologias de cobertura nas oito cidades analisadas para o dia típico de verão

	Plano	Duas águas	Arco	Lant. simples	Lant. duplo	Shed long.	Shed transv.
Curitiba	-	-	-	-	-	-	-
Santa Maria	1,9	1,9	1,2	1,6	1,6	1,9	1,2
Belo Horizonte	-	-	-	-	-	-	-
Brasília	-	-	-	-	-	-	-
Niterói	1,7	1,6	-	-	-	-	-
Campo Grande	6,2	6,1	3,6	3,8	4,3	4,0	3,6
Porto Nacional	2,0	2,0	0,8	1,0	1,2	1,0	1,0
Manaus	-	-	-	-	-	-	-

Na tabela 5.12 o cálculo de graus-hora refere-se ao dia típico de inverno. Os resultados apontam o telhado com lanternim duplo como a cobertura de melhor desempenho para a maioria das cidades analisadas, exceto as cidades que apresentam temperaturas anuais altas, Porto Nacional e Manaus, que está totalmente acima da temperatura mínima da faixa de conforto.

Tabela 5.12 - Cálculo de Graus-hora para as diferentes tipologias de cobertura nas oito cidades analisadas no dia típico de inverno

	Plano	Duas águas	Arco	Lant. simples	Lant. duplo	Shed long.	Shed transv.
Curitiba	-	-	-	-	-	-	-
Santa Maria	-	-	-	-	-	-	-
Belo Horizonte	-	-	-	-	-	-	-
Brasília	-	-	-	-	-	-	-
Niterói	-	-	-	-	-	-	-
Campo Grande	-	-	-	-	-	-	-
Porto Nacional	21,8	21,4	16,8	18,9	19,9	19,2	19,1
Manaus	2,0	2,0	1,4	1,3	1,5	1,3	1,4

5.4 Desempenho térmico versus desempenho estrutural – zona 7

Tem-se na figura 5.55 a análise comparativa do desempenho térmico, dado pela quantidade de graus-hora de resfriamento e o desempenho estrutural, dado pelo peso estrutural da estrutura suporte, das diferentes soluções construtivas das coberturas metálicas para a cidade de Campo Grande, no dia típico de verão.

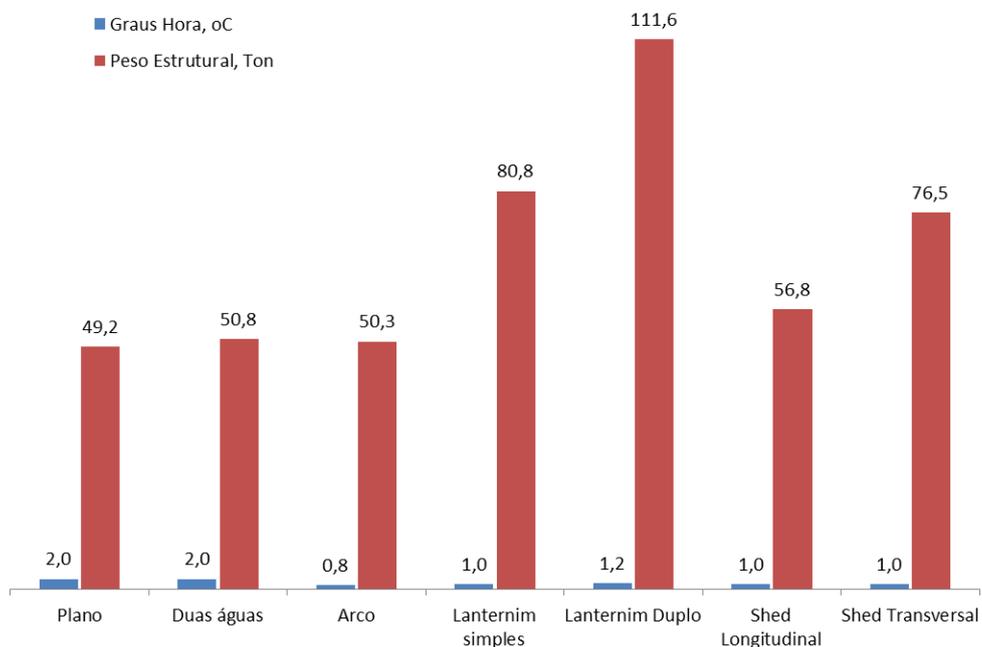


Figura 5.55 – Relação graus-hora de resfriamento e peso estrutural das diferentes tipologias de cobertura para a cidade de Porto Nacional analisada para o dia típico de verão

Observa-se pelos resultados que a cobertura curva apresenta-se como a melhor solução construtiva para o dia típico de verão, visto que além de apresentar um bom desempenho estrutural quando comparada com outras soluções construtivas, possui o melhor desempenho térmico em dias de altas temperaturas, (maior volume de ar interno).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho avaliou-se o desempenho térmico de galpões de multiuso utilizando coberturas metálicas. As análises englobaram a influência da cor, do material e da geometria do telhado no desempenho térmico da cobertura.

Quanto à cor das telhas, como esperado, as telhas com cores mais claras, ou seja, com menor coeficiente de absorção são mais adequadas para a maioria das zonas bioclimáticas.

Quanto ao material utilizado, os resultados mostraram que para regiões de clima quente e ameno e com baixa amplitude térmica, nos horários com intensa radiação solar, as telhas metálicas simples, ou seja, de menor espessura e mais leves, sem material isolante apresentam desempenho térmico satisfatório. Para regiões climáticas com elevada amplitude térmica as telhas metálicas, tipo sanduiche, utilizando material isolante entre as camadas são mais adequadas.

Quanto a geometria, não é possível definir um único telhado como sendo o mais eficiente para todas as situações climáticas, comprovando a afirmativa que um mesmo volume de espaço interior com geometrias de coberturas diversas apresenta comportamentos térmicos globais diferentes, dependendo do local onde a construção está inserida.

As diferenças de comportamento térmico entre as diversas geometrias de cobertura analisadas intensificam-se quando combinadas com aberturas que auxiliam na ventilação natural do ambiente. Estas aberturas proporcionam a renovação do ar, podendo ocasionar ganho ou perda de calor, dependendo da diferença entre a temperatura do ar interno e externo.

De forma geral, pode-se concluir que entre as coberturas sem aberturas para ventilação, a tipologia em arco foi a de melhor desempenho e que mais se aproximou da faixa de conforto nas condições climáticas de verão, sendo mais eficiente que o telhado plano e o de duas águas. Atribui-se este resultado a influência da inclinação do telhado sobre o condicionamento térmico ambiental no interior da edificação, Quanto maior a inclinação menor a influência da radiação na temperatura interna e melhor a circulação de ar na edificação por diferença de pressão, O telhado em arco apresenta-se mais eficiente termicamente, pois sua geometria exige grandes raios de curvatura, favorecendo as trocas térmicas por convecção no interior do ambiente.

Para o telhado que utiliza a ventilação natural como estratégia de resfriamento, por meio do efeito chaminé, pode-se considerar que em dias quentes, a cobertura *shed* transversal foi o que apresentou melhor desempenho térmico.

Quando comparado o desempenho térmico, em graus-hora necessário para o resfriamento do galpão com o peso da estrutura, na zona bioclimática 7, a cobertura curva apresenta-se como a melhor solução construtiva tanto para o dia típico de verão quanto para o de inverno, visto que além de apresentar um bom desempenho estrutural, menor peso, quando comparada com outras soluções construtivas, possui o melhor desempenho térmico (maior volume de ar interno).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUTSU, M. **Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil**, 1998, 156 f, Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, **ANSY/ASHRAE 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2004. 26p

AMORIM, C. N. D. **Desempenho térmico de edificações e simulação computacional no contexto da arquitetura bioclimática**: Estudo de Casos na Região de Brasília, 1998, Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 1998.

ANANDA. **Catálogo: Ananda** - Qualidade em aço transformado. Piracicaba, 2010.

ARCOWEB. Sidônio Porto: Fábrica Ipel, Cajamar, SP. Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/sidonio-porto-fabrica-ipel-07-07-2003.html>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

ARCOWEB. Ubyrajara Gilioli: Escola, São Paulo. Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/ubyrajara-gilioli-escola-sao-23-05-2006.html>> Acesso em: 20 nov. de 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15220**: Desempenho Térmico em Edificações, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15575**: Edifícios Habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho, Rio de Janeiro, 2008.

BELLEI, I. H. **Edifícios Industriais em Aço - Projeto e Cálculo**. 5. ed. São Paulo: PINI, 2006.

BRASILIT, **Telha Top steel**. São Paulo, 2010.

BUTTNER, S. B. **Avaliação de desempenho térmico e energético de coberturas em clima tropical continental**. 2009. Dissertação (Mestrado Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CAMARGO, M. G., SATO, N. M.; PRADO, R. T. Estudo comparativo do desempenho térmico de protótipos com e sem utilização de barreiras de radiação na cobertura. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2007. p. 290 – 299.

CBA, COMPANHIA BRASILEIRA DE AÇO. **Catálogo: Votoral** - Telhas de Alumínio, São Paulo, 2006.

CHAVES, M. R. **Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões industriais leves**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

CLARKE, J. **Energy simulation in building design**. Adam Hilger Ltd, Bristol, U. K., p. 387, 1985.

COMPUTERS AND STRUCTURES, Inc. SAP 2000 advanced - Structural Analysis Program - Version 10. Berkley: **Computers and Structures, Inc.**, 2005.

CPTEC. Banco de dados climatológicos. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: nov. 2009.

CRAWLEY, D. B.; et al. **EnergyPlus: Energy Simulation Program**. ASHRAE journal. Atlanta: ASHRAE. v,42. 2000. pp. 49-56.

CRAWLEY, D. B.; et al. *Energyplus: new capabilities in a whole-building energy simulation program*. In: Sétima Conferência Internacional IBPSA. Rio de Janeiro, 2001. pp.51-58.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. **The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment**. 2001.

DE DEAR, R. J., BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. 2002.

DOE. United States Department of Energy. Disponível em: <www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/>. Acesso em: abr. 2011.

EUCATEX. Catálogo: Sistema Metálico - A versatilidade do aço nos produtos Eucatex, São Paulo, 2006.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering**. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture**. London: Applied Science Publishers, 1976.

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

GRANJA, A. D. **Transmissão de Calor em Regime periódico: efeito da inércia térmica em fechamentos opacos** - Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, P. D.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ª Edição, Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2008, Original Inglês.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 7730**: Ergonomics of the thermal environment - analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Genebra, 1994.

ISOESTE, construtivos isotérmicos. Sistemas de coberturas. São Paulo, 2010.

LAMBERTS, R., PEREIRA, F., e DUTRA, L. **Eficiência Energética na Arquitetura**. PW ed., São Paulo, 1997.

MACIEL, A. A. **Projeto bioclimático em Brasília**: Estudo de caso em edifício de escritórios. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MARKO. Catálogo: Roll-on - Sistema de cobertura metálica. Rio de Janeiro, 2008.

MAZON, A. A. O. **Ventilação natural em galpões utilizando lanternins**. Ouro Preto: UFOP, 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

- MICHELS, C. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. Santa Catarina: UFSC, 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.
- MOLITERNO, A. **Projeto de telhados em estrutura de madeira**. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.
- NOGUEIRA, G. S. **Análise de sistemas estruturais para galpões compostos por perfis leves**. Ouro Preto: UFOP, 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- OLIVEIRA, A. G. **Proposta de método para avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente e úmido**. 2006. 201 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – PPGAU, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- OLGYAY, V. **Clima e arquitetura em Colômbia**. Universidade del Valle, Faculdade de Arquitetura, Cali, Colômbia, 1968.
- OLGYAY, V. **Design with climate bioclimatic approach to architecture regionalism**. Universidade de Princeton, Nova Jersey, 3a, ed.1973.
- PERALTA, G. **Desempenho térmico de telhas: Análise de monitoramento e normalização específica**. São Carlos: 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- PINHO, F. O. Galpões em Pórticos de Aço. **Construção Metálica**, n.70, Mai-Jun, 2005.
- RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2.Ed., Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores, 1986.
- ROMERO, M. A. B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. 3.Ed., Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2007.
- SANTOS, A. F. **Estruturas Metálicas - Projeto e Detalhes para Fabricação**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1977.
- TELAPORT. **Manual Técnico**. Recife, 2010.
- VERSAGE, R. S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.
- VITTORINO, F., SATO, M. N.; AKUTSU, M.. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2003. pp. 1277 – 1284.

ANEXO I

Nas tabelas A.1 a A.14 apresentam-se os resultados da simulação no programa SAP2000 para o pré-dimensionamento sem otimização da estrutura do galpão estruturado em ação com diferentes soluções construtivas para cobertura.

A.1 – Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com cobertura em arco

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	40	240	12,4656
H200X46.1	Frame	84	346,74052	15,7014
W360X64	Frame	117	355,12045	22,1456

A.2 – Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com cobertura em arco

Tipo de objeto	Material	Peso total (ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	22,1456	117
Frame	A572GR50	28,1669	124

A.3 - Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com cobertura em duas águas

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	40	240	12,4656
H200X46.1	Frame	84	349,30978	15,8177
W360X64	Frame	45	360,60658	22,4877

A.4 - Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com cobertura em duas águas

Tipo de objeto	Material	Peso total (Ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	22,4877	45
Frame	A572GR50	28,2833	124

A.5 - Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com cobertura plana

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	40	240	12,4656
W360x64	Frame	45	342	21,3274
H200x46.1	Frame	84	340,1811	15,4043

A.6 – Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com cobertura plana

Tipo de objeto	Material	Peso total (Ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	21,3274	45
Frame	A572GR50	27,8699	124

A.7 - Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com cobertura lanternim duplo

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	120	720	37,3968
L76x8	Frame	360	444,57095	4,0199
H250X115	Frame	84	324,13115	37,97
W460X74	Frame	133	418,04857	30,7194
W610X125	Frame	2	12	1,4875

A.8 - Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com cobertura lanternim duplo

Tipo de objeto	Material	Peso total (ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	74,1967	579
Frame	A572GR50	37,3968	120

A.9 - Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com um lanternim na cobertura

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	56	336	17,4518
L76x8	Frame	144	139,37764	1,2603
H200x46.1	Frame	112	470,63762	21,3118
W530X92	Frame	86	424,4385	38,7751
W610X125	Frame	4	16,265	2,0162

A.10 - Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com um lanternim na cobertura

Tipo de objeto	Material	Peso total (Ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	42,0516	234
Frame	A572GR50	38,7636	168

A.11 - Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com cobertura em shed longitudinal

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	56	336	17,4518
W360x64	Frame	81	377,2928	23,5282
L76x8	Frame	171	170,7075	1,5436
H200x46.1	Frame	72	315,6171	14,292

A.12 - Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com cobertura em shed longitudinal

Tipo de objeto	Material	Peso total (Ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	25,0718	252
Frame	A572GR50	31,7438	128

A.13 - - Lista de materiais com as propriedades das seções utilizadas para galpão com cobertura em shed transversal

Seção	Tipo de objeto	Número de peças	Comprimento total (m)	Peso total (Ton)
W310X52	Frame	104	533,7674	27,7239
W360x64	Frame	77	530,8	33,1011
H200x46.1	Frame	84	345,0947	15,6268

A.14 - Lista de materiais com o tipo de aço utilizado na estrutura do galpão com cobertura em shed transversal

Tipo de objeto	Material	Peso total (Ton)	Número de peças
Frame	A992Fy50	33,1011	77
Frame	A572GR50	43,3507	188