



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO EM COBERTURAS A
PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO MUNICÍPIO DE
BARREIRAS-BA**

LUANE MOREIRA DA SILVA

BARREIRAS-BA
DEZEMBRO-2022

LUANE MOREIRA DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO EM COBERTURAS A
PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO MUNICÍPIO DE
BARREIRAS-BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do
Oeste da Bahia, como requisito à obtenção do grau de
Engenheira Civil.

Orientador: D. Sc. Elier Pavón de la Fé

**BARREIRAS-BA
DEZEMBRO-2022**

FICHA CATALOGRÁFICA

S586 Silva, Luane Moreira da.

Análise do desempenho térmico em coberturas a partir de simulação computacional no município de Barreiras-Ba. / Luane Moreira da Silva. – 2022.

82f.: il.

Orientador: Prof. D.SC. Elier Pavón De La Fé.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) –
Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das
Tecnologias. Barreiras, BA, 2022.

1. Propriedades térmicas. 2. Desempenho térmico. 3. Coberturas. 4. Simulação computacional. I. De La Fé, Elier Pavón. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 548.86

Biblioteca Universitária de Barreiras - UFOB

LUANE MOREIRA DA SILVA

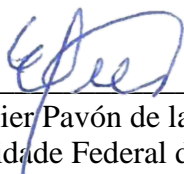
**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO EM COBERTURAS A
PARTIR DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO MUNICÍPIO DE
BARREIRAS-BA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do
Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção do
grau de Engenharia Civil.

Aprovada em 10 de dezembro de 2022

Banca Examinadora

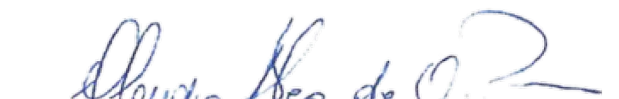
Orientador(a):



D.Sc. Elier Pavón de la Fé
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Assinado de forma digital por Hindira Feitoza de Araújo
Dados: 2022.12.21 18:21:10- 18'02"
Versão do Adobe Acrobat Reader: 2022.001.20169

Eng.ª Civil Hindira Feitoza de Araújo
Membro Externo



Professor M.Sc. Cláudio Alex de Oliveira Pires
Universidade Federal do Oeste da Bahia

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me abençoar grandemente para que eu pudesse concluir mais uma etapa. Por toda a força, coragem e proteção para que eu conseguisse enfrentar quaisquer problemas nessa caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Elier Pavón, é com muita admiração e carinho que venho agradecer por todo apoio, comprometimento, dedicação, paciência e ensinamentos, não somente durante este trabalho, mas também na pesquisa e em todo o curso.

Ao meu pai, Luiz, e minha mãe, Jocélia, por serem meus maiores apoiadores, por toda dedicação, amor, educação e sacrifício para que eu pudesse chegar até aqui. Aos meus irmãos Luiz Jr, Leonardo e Luara, por todo incentivo, cobranças, apoio e ensinamentos. Ao meu gato Pretinho, apesar de passar o ano inteiro longe, sempre fui recebida com muito carinho (e alguns arranhões).

À minha família por todo apoio, em especial Raimunda, Antônio, Raian, Júnior, Girlândia, Fátima, Vicente, Mayse, David, Roque, Celma, Bruno e Dani. Ao meu dindo Jairo, quem me ajudou em toda a mudança para Barreiras e por todo apoio. À minha dinda Ângela (*in memoriam*), por todas as conversas e apoio antes de entrar na universidade.

Aos meus amigos, Priscila, Samela, Ian, Fernanda, Genivaldo Jr, Giovane, Tallita, Jefferson, Jaedson, Daví, Mikael, Alan, Mayanna, Matheus Gulliver e Eduarda, por toda a amizade durante esses anos, por todos os momentos compartilhados, apoio e conversas.

Aos meus amigos da AGF Engenharia, Arthur, Maria, Murillo e Mayara, por todo apoio, resenhas, aprendizados, incentivos e conselhos.

Aos professores Tamila Marques e Eduardo Reis, por toda preocupação, cuidado, conversas e apoio.

À Dalvânia, Anderson e família, por todo cuidado e apoio durante esses anos.

Aos amigos e colegas que conheci dentro e fora da universidade, que acrescentaram de alguma forma na minha vida acadêmica, pessoal e profissional.

Aos professores que me acompanharam ao longo do BIC&T e da Engenharia Civil e que se dedicam à arte de ensinar.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

RESUMO

Geralmente, as pessoas passam a maior parte do seu tempo dentro de edificações, seja trabalhando, habitando ou fazendo algum tipo de atividade. Diante disso, o ambiente tem um papel essencial no dia a dia, influenciando a produtividade, bem-estar e consumo energético. No que tange ao sistema de cobertura, a parte do edifício habitacional mais exposto à radiação direta do sol, ele exerce predominantemente influência na carga térmica transmitida aos ambientes. O presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio das cargas térmicas obtidas por meio de simulação computacional no software EnergyPlus, o desempenho térmico das coberturas quando submetidas às condições climáticas do município de Barreiras-BA, considerando o meio adiabático para que fosse analisado apenas o modelo em questão, sem troca com o meio. As simulações foram feitas em cinco diferentes tipos de materiais para cobertura, com sete diferentes modelos computacionais, que se diferenciaram em três camadas, telha, laje e forro. Com o resultado das simulações computacionais, realizou-se a análise de variância (ANOVA) entre o tipo de material, modelo utilizado e a carga térmica de resfriamento, seguido do teste comparativo de médias, Teste de Tukey. Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que o aumento das camadas nos modelos de cobertura influencia diretamente na queda de $CgTR$, melhorando seu desempenho térmico. No grupo da telha cerâmica, os modelos que atenderam à norma de desempenho NBR 15220/2005, em relação à transmitância térmica, foram telha cerâmica com forro de madeira e telha cerâmica com laje e forro (independente do material do forro). No grupo da telha fibrocimento, os modelos que atenderam à norma de desempenho, em relação à transmitância térmica, foram telha fibrocimento com laje e forro (independente do material do forro). No grupo da telha metálica, os modelos que atenderam à NBR 15220/2005, em relação à transmitância térmica, foram telha metálica com forro (independente do material do forro) e telha metálica com laje e forro (independente do material do forro). A isotelha apresentou valores nulos de $CgTR$ para todos os sete modelos de cobertura e todos atenderam ao critério de transmitância térmica pela norma de desempenho NBR 15220/2005. A cobertura de laje aparente com EPS apresentou menor valor de $CgTR$, em relação à laje maciça, contudo nenhum dos dois modelos de cobertura com laje aparente atendem aos critérios da norma de desempenho NBR 15220/2005 para os valores de transmitância térmica.

Palavras-chave: desempenho térmico; coberturas; simulação computacional; cargas térmicas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de radiação solar e difusa, respectivamente.	17
Figura 2 - Comportamento da umidade do ar em relação ao da sua temperatura	19
Figura 3 - Rosa dos ventos do TRY de Florianópolis, com direção e velocidades mais frequentes.....	20
Figura 4 - Zonas bioclimáticas definidas pela norma de Desempenho Térmico em Edificações.....	22
Figura 5 - Região da zona bioclimática 7	25
Figura 6 - Carta bioclimática apresentando as normais climatológicas	25
Figura 7 - Fluxograma das etapas da metodologia do trabalho.....	34
Figura 8 - Modelo volumétrico do modelo computacional	35
Figura 9 - Divisão de um sistema de cobertura a ser simulado.....	36
Figura 10 - Combinações possíveis para as soluções de cobertura	36
Figura 11 - Exemplo de composição a partir do fluxograma dos sistemas de cobertura	37
Figura 12 - Principais etapas de modelagem do ambiente no software SketchUp.....	40
Figura 13 - Temperatura e umidade relativa da cidade de Barreiras conforme arquivo climático	41
Figura 14 - Interface do software EnergyPlus (Ep-Launch) e IDF Editor.....	42
Figura 15 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com telha cerâmica	44
Figura 16 - Carga de aquecimento em relação ao modelo de cobertura de telhas cerâmicas	45
Figura 17 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho	46
Figura 18 – CgTR média para cada tipo de cobertura do grupo cerâmico em função da transmitância térmica (U)	47
Figura 19 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com telha fibrocimento	48
Figura 20 - Carga de aquecimento em relação ao modelo de cobertura de telhas fibrocimento	49
Figura 21 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho	50
Figura 22 - CgTR média para cada tipo de cobertura do grupo fibrocimento em função da transmitância térmica (U)	50
Figura 23 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com telha metálica	51
Figura 24 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho	53
Figura 25 - CgTR média para cada tipo de cobertura do grupo de telhas metálicas em função da transmitância térmica (U)	53
Figura 26 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho	55
Figura 27 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com laje aparente	56
Figura 28 - Carga de aquecimento em relação ao modelo de cobertura de lajes aparentes	56
Figura 29 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho	57
Figura 30 - Comparativo de CgTR entre todos os modelos de cobertura	58

Figura 31 - Comparativo de CgTA entre todos os modelos de cobertura	59
Figura 32 - Building	73
Figura 33 - Site:Location	73
Figura 34 - RunPeriod	74
Figura 35 - Material	74
Figura 36 - Material:AirGap	75
Figura 37 - Construction	75
Figura 38 - Building Surface Detailed	76
Figura 39 - HVACTemplate:Thermostat	76
Figura 40 - HVACTemplate:Zone:IdealLoadAirSystem	77
Figura 41 - Output:Variable	78
Figura 42 - Resultado do Teste de Tukey para o tipo de material	80
Figura 43 - Resultado do Teste de Tukey para os modelos de cobertura	80
Figura 44 - Relação tipo de material, modelo de cobertura e CgTR	80
Figura 45 - Análise estatística com ANOVA	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 7.	26
Tabela 2 - Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 7	26
Tabela 3 - Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 7	26
Tabela 4 - Aberturas para ventilação, adaptadas para zona bioclimática 7	26
Tabela 5 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa, adaptado para a zona bioclimática 7.....	26
Tabela 6 - Composição das soluções de coberturas a serem simulados	37
Tabela 7 - Composição dos modelos de cobertura simulados.....	38
Tabela 8 - Resultados a serem analisados e variáveis de saída do software de simulação .	43
Tabela 9 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo cerâmico.....	46
Tabela 10 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo fibrocimento	49
Tabela 11 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo de telhas metálicas.....	52
Tabela 12 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo de isotelhas	54
Tabela 13 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura com laje aparente.....	57
Tabela 14 - Comparativo entre os valores de transmitância térmica (U) entre todos os modelos de cobertura simulados	59
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros utilizados para a análise estatística	60
Tabela 16 – Resultado da ANOVA considerando fator múltiplo sem repetição.....	60
Tabela 17 - Teste de Tukey em relação às variáveis material e módulo de CgTR média...	61
Tabela 18 - Teste de Tukey em relação aos modelos de cobertura e módulo de CgTR média	61
Tabela 19 – Resultado das simulações e resultado da transmitância térmica	79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 CONFORTO TÉRMICO	14
2.1.1 Variáveis do Conforto Térmico.....	15
2.2 BIOCLIMATOLOGIA	16
2.2.1 Variáveis do clima.....	17
2.2.2 Estratégias bioclimáticas	20
2.2.3 Zoneamento bioclimático.....	21
2.3 DESEMPENHO TÉRMICO	22
2.3.3 RTQ-R.....	27
2.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO DESEMPENHO TÉRMICO APLICADO ÀS EDIFICAÇÕES	29
2.5 ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 MODELO DE TESTES A SER SIMULADO.....	34
3.1.1 Características do modelo computacional	34
3.1.2 Propriedades da envoltória	35
3.2 PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	35
3.2.1 Definição dos sistemas	36
3.2.2 Realização das simulações	40
3.2.3 Modelagem do ambiente.....	40
3.2.4 Definição do arquivo climático	40
3.2.5 Configurações de simulação	41
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA	43
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE TELHAS CERÂMICAS	43
4.2 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE TELHAS DE FIBROCIMENTO	47

4.3	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE TELHAS DE METÁLICAS	51
4.4	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE ISOTELHAS	54
4.5	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE LAJE APARENTE.....	55
4.6	COMPARATIVO DE CARGAS TÉRMICAS ENTRE OS GRUPOS DE COBERTURAS.....	58
4.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	60
5.	CONCLUSÃO.....	62
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A.....	72
	ANEXO B	73
	APÊNDICE A	79
	APÊNDICE B.....	80

1. INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA

No contexto atual, existem muitas formas de garantir o conforto térmico do usuário para os diferentes tipos de edificações, muitas vezes operando sistemas de climatização e deixando em segundo plano soluções que utilizam o clima de forma favorável. Entretanto, após um longo período de uso intensivo de energia operante, e com a situação de crise de energia, construir com o clima não é mais uma posição ecológica, idealista ou contestatória, mas sim uma necessidade quando se analisa o panorama mundial e local da evolução do consumo em relação à disponibilidade de energia (MASCARÓ, 1991, apud SILVA, 2018).

A Arquitetura deve servir ao homem e seu conforto, o que abrange o seu conforto térmico. O homem tem melhores condições de vida e de saúde quando seu organismo pode funcionar sem ser submetido a fadiga ou estresse, inclusive térmico. A Arquitetura, como uma de suas funções, deve oferecer condições térmicas compatíveis ao conforto térmico humano no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas externas (FROTA; SHIFFER, 2001).

Em edificações localizadas em países de clima quente, como o Brasil, a aplicação de materiais que tenham aquecimento reduzido, em função da menor absorção da radiação solar, pode proporcionar menores ganhos de calor melhorando o bem estar dos ocupantes e reduzindo o consumo de energia com condicionamento de ar (LAMBERTS *et al.*, 2016).

No que tange ao sistema de cobertura, a parte do edifício habitacional mais exposto à radiação direta do sol, ele exerce predominantemente influência na carga térmica transmitida aos ambientes (casas térreas e último pavimento de sobrados ou prédios). Dessa forma, irá interferir diretamente no conforto térmico dos usuários e no consumo de energia para acionamento de equipamentos de ventilação forçada e/ou condicionamento artificial do ar (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais (ABNT, 2013) estabelece os seguintes critérios de avaliação do desempenho térmico em edificações: cálculo das propriedades térmicas da envoltória; simulação computacional do comportamento térmico da edificação para o clima local; e medições de temperatura *in loco*.

O trabalho proposto visa analisar soluções de coberturas, em um modelo computacional, para a cidade de Barreiras-BA, considerando o desempenho térmico dos mesmos. Através da simulação computacional, será realizada a análise da carga térmica para o protótipo, alterando os sistemas de coberturas, com o intuito de comparar suas respostas ao desempenho térmico. Para a realização das simulações, será utilizado o software *EnergyPlus*.

1.2 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo analisar, a partir da simulação computacional, o desempenho térmico de diferentes soluções de coberturas submetidas às condições climáticas do município de Barreiras – BA, com base na quantificação de cargas térmicas do ambiente.

Os objetivos específicos são:

- Modelar e simular um protótipo habitacional;
- Simular mudanças de envoltória no sistema de cobertura;
- Analisar o desempenho térmico de diferentes soluções de coberturas com base na quantificação de cargas térmicas do ambiente;
- Comparar as diversas soluções de coberturas diante da carga térmica de resfriamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONFORTO TÉRMICO

Geralmente, as pessoas passam a maior parte do seu tempo dentro de edificações, seja trabalhando, habitando ou fazendo algum tipo de atividade. Diante disso, o ambiente tem um papel essencial no dia a dia, influenciando a produtividade, bem-estar e consumo energético (LABEEEE, c2022).

A importância do estudo de conforto térmico está baseada em três fatores. São eles: a satisfação do ser humano ou seu bem-estar em se sentir confortável; a produtividade do ser humano, apesar de não haver resultados conclusivos sobre tal assunto, os estudos mostram uma clara tendência de que o desconforto causado por calor ou frio reduz a produtividade; e a conservação da energia, uma vez que as pessoas passam grande parte de suas vidas em ambientes condicionados artificialmente (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A *ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* define o conforto térmico como uma condição da mente exposta através da satisfação com o ambiente térmico em que a pessoa está incluída. A não satisfação pode ser causada pela sensação de desconforto pelo calor ou frio, quando o balanço térmico não está estável, ou seja, há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente (LAMBERTS *et al.*, 2016).

O corpo humano é um sistema termodinâmico, produz calor e interage com o ambiente para alcançar o equilíbrio térmico. Além disso, há uma troca constante de calor do corpo com o meio, que é influenciada pelos fatores de adaptação fisiológica, ambientais e individuais. Logo, faz necessário conhecer a termorregulação humana e o balanço térmico do corpo humano, uma vez que a sensação de conforto térmico está diretamente ligada ao esforço do organismo em manter o balanço térmico (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Segundo Lamberts *et al.* (2016), como há variação biológica entre as pessoas, é impossível que todos os ocupantes de um ambiente se sintam confortáveis termicamente, portanto, busca-se sempre criar condições de conforto para um grupo, ou seja, condições nas quais a maior porcentagem das pessoas se encontre em conforto térmico.

O conhecimento do clima, aliado ao dos mecanismos de trocas de calor e do comportamento térmico dos materiais, permite uma consciente intervenção da arquitetura, incorporando os dados relativos ao meio ambiente externo de modo a aproveitar o que o clima apresenta de agradável e amenizar seus aspectos negativos (FROTA; SHIFFER, 2001).

2.1.1 Variáveis do Conforto Térmico

Conforme Lamberts *et al.* (2016), as variáveis do conforto térmico estão classificadas em ambientais e humanas. As humanas estão relacionadas com o metabolismo gerado pela atividade física e resistência térmica oferecida pela vestimenta. Já as variáveis ambientais são a temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade relativa do ar. Como também, outros fatores influenciam nas condições de conforto, entre eles estão: sexo, idade, raça, hábitos alimentares, peso e altura, que variam de pessoa para pessoa.

A temperatura do ar é a variável mais importante do conforto térmico. A sensação de conforto baseia-se na perda de calor do corpo pelo diferencial de temperatura entre a pele e o ar, complementada pelos outros meios termo-reguladores. O calor é produzido pelo corpo através do metabolismo e suas perdas dependem da temperatura do ar, sendo inversamente proporcionais, tais como inferiores quando a temperatura está alta ou superiores quando a temperatura está mais baixa (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Para o conforto, é interessante conhecer também a temperatura operativa. Esta resume as perdas da temperatura do corpo, que está submetido a um ambiente real com efeitos desiguais por todos os lados. A temperatura operativa é uma temperatura teórica que provoca uma perda de calor equivalente a todos os fenômenos que provocam esta perda caso o corpo estivesse em um ambiente imaginário submetido apenas a uma temperatura homogênea (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A velocidade do ar é uma variável ambiental que influencia diretamente no conforto térmico, pois favorece as trocas de calor entre a pele e o meio, a partir da convecção e evaporação. Nas palavras de Lamberts *et al.* (2016), quando o ar se desloca através de meios mecânicos, a exemplo de um ventilador, o coeficiente de convecção aumenta, crescendo também a sensação de perda de calor (convecção forçada). Com o deslocamento do ar, há um aumento também da evaporação no corpo humano, a água em contato com a pele é removida com mais eficiência, logo tem-se uma redução na sensação de calor.

A umidade relativa do ar é definida, por Lamberts *et al.* (2011), como o montante de vapor de água do ar, em relação com o máximo montante de vapor de água que o ar pode conter a uma dada temperatura. Esse vapor se forma pela evaporação da água, processo que supõe a mudança do estado líquido ao gasoso, sem modificação da sua temperatura (LAMBERTS *et al.*, 2016).

A umidade do ar, juntamente com a velocidade do ar, influencia na perda de calor por evaporação. Conforme a temperatura do meio aumenta, dificultando as perdas por convecção e radiação, o organismo aumenta sua eliminação por evaporação. Quanto maior a umidade relativa, menor a eficiência da evaporação na remoção do calor. O que implica na importância de uma ventilação adequada (LAMBERTS *et al.*, 2016).

2.2 BIOCLIMATOLOGIA

Segundo Bogo *et al.* (1994), a bioclimatologia aplicada às edificações se distingue em duas metodologias de projeção: a indireta, em que se procura estabelecer estratégias de intervenção arquitetônica pela análise e interpretação qualitativa do clima; e direta, na qual se objetiva dimensionar as estratégias de intervenção pela análise e interpretação quantitativa dos elementos climáticos. Alguns métodos diretos usam as cartas bioclimáticas, são estudos desenvolvidos por Olgyay (1963) e (1968), Givoni (1969), Givoni e Milne (1979), Gonzalez (1986), Givoni (1992), Zonas de Conforto de ASHRAE (74, 85, 92), Szokolay (1987) e Watson e Labs (1983).

Segundo Lamberts *et al.* (2016), a bioclimatologia é o estudo da relação entre o clima e o ser humano. As classificações do clima variam com os autores, mas, em geral, podem ser considerados macroclima, mesoclima e microclima. No macroclima, nota-se as características climáticas de uma região, medidas em estações meteorológicas. Já o mesoclima e o microclima, são características de alterações locais na radiação solar, temperatura do ar, umidade e vento (LAMBERTS *et al.*, 2016).

No Brasil, os principais arquivos climáticos utilizados pelos programas de simulação computacional são o *Test Reference Year* (TRY), *Typical Meteorological Year* (TMY), *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA) e INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão .epw) (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Conforme Lamberts *et al.* (2016), o arquivo climático TRY representa um ano de dados médios para um local específico, sem extremos de temperatura, e compreende as variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de orvalho, umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos, nebulosidade, pressão barométrica e radiação solar. Por sua vez, o TMY também representa um ano climático sem extremos de temperatura, entretanto é gerado pela compilação de meses sem extremos de temperatura, a partir de uma série de dados anuais disponíveis. Sendo assim, é gerado por dados climáticos de meses provenientes de anos diferentes.

2.2.1 Variáveis do clima

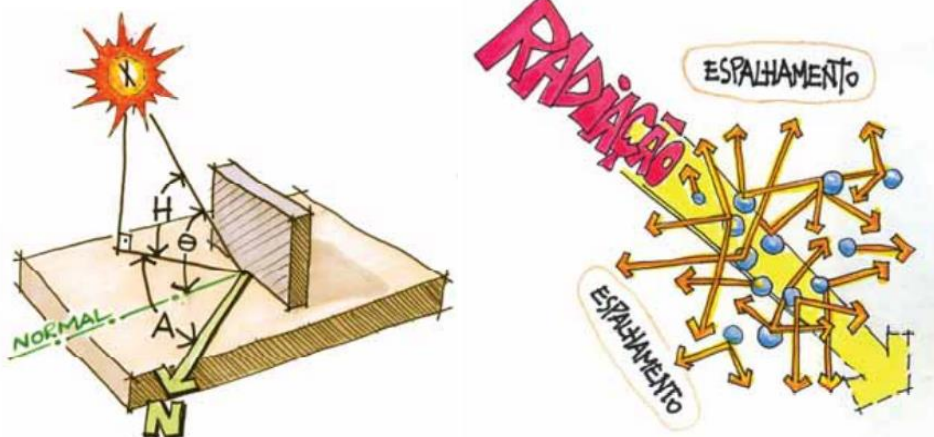
As variáveis climáticas são quantificadas em estações meteorológicas e descrevem as características gerais de uma região em termos de sol, nuvens, temperatura, ventos, umidade e precipitações (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004). Portanto, é essencial o conhecimento sobre esses fatores para o projeto de edificações que sejam adequadas ao conforto de seus usuários e mais eficientes em relação ao consumo de energia.

- Radiação Solar

A radiação solar é a principal fonte de energia para o planeta. Seja por fonte de calor ou de luz, o Sol é um elemento de extrema importância no estudo da eficiência energética na edificação (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004).

A radiação solar pode ser classificada em direta ou difusa. Após sua penetração na atmosfera, a radiação começa a sofrer interferências em seu trajeto em direção à superfície terrestre. A parcela que atinge a Terra diretamente é chamada de radiação direta e sua intensidade depende da altura solar (H) e do ângulo de incidência dos raios solares em relação à superfície receptora (θ). Uma parte da radiação global incidente na atmosfera sofre um espalhamento, tendo sua direção alterada, constituindo a parcela difusa da radiação solar. Quanto mais nublado for o céu, maior a radiação difusa (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004). A Figura 1 ilustra a radiação solar e difusa.

Figura 1 - Ilustração de radiação solar e difusa, respectivamente.



Fonte: Lamberts *et al.* (2014)

Segundo Zanoni (2015), a radiação solar sofre a influência das diferentes latitudes, épocas do ano e horas do dia, de acordo com o ângulo zenital e a posição do sol (altura solar e azimute). Contudo, além das variações temporais e espaciais decorrentes da trajetória do sol e da geometria da insolação, os valores de irradiância solar na superfície

horizontal sofrem variações decorrentes das condições de transparência atmosférica, como por exemplo, nebulosidade, tipos de nuvens, aerossóis, vapor de água, poeira, fumaça, etc, que influenciam na variação da camada ou perfil atmosférico a ser atravessado pela radiação solar.

- Temperatura

A temperatura é a variável mais conhecida e mais fácil de ser medida. Sua variação na superfície da Terra resulta basicamente dos fluxos das grandes massas de ar e da diferente recepção da radiação do sol de local para local. O processo ocorre indiretamente: a radiação solar atinge o solo onde é absorvida em parte e transformada em calor. Logo, a temperatura do solo aumenta e, por convecção, aquece o ar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004; LAMBERTS *et al.*, 2016).

Para amenizar as temperaturas no interior da edificação, o projetista pode levar em conta as características da inércia térmica. O solo se mantém em temperaturas mais amenas que o ar exterior. Após ser aquecida pelo sol, a terra retém o calor por muito mais tempo que o convencional (FELICE JÚNIOR, 2015).

A temperatura do ar é consequência de um balanço energético, que é influenciado pelos processos de radiação solar incidente e o coeficiente de absorção da superfície receptora, condutividade e capacidade térmica do solo que determinam a transmissão de calor por condução e as perdas por evaporação, convecção e radiação. A partir desses fenômenos, a temperatura começa a se elevar com a saída do sol, chegando a um máximo que ocorre cerca de duas horas após a passagem do sol pelo meridiano como consequência do calor armazenado na Terra. Após isso, o balanço começa a ser negativo, a energia perdida é maior que a recebida, fazendo com que a temperatura da superfície da Terra comece a descer até alcançar um valor próximo ao do nascer do Sol (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Conforme Lamberts *et al.* (2016), conhece-se o comportamento da temperatura em um local através das normais climatológicas. Elas fornecem temperaturas máximas e mínimas cuja diferença, em um intervalo de tempo, é conhecida como amplitude térmica. A amplitude depende do fator umidade, sendo estes inversamente proporcionais. Quando o ar está mais úmido, a amplitude é pequena; quando o ar está mais seco, a variação de temperatura é mais alta.

- Umidade

A umidade é regulada pela vegetação e pelo ciclo hídrico. O regime de chuvas, juntamente com a fonte de lagos, rios e mares regula a umidade a partir da evaporação enquanto a vegetação atua na umidade do ar através da evapotranspiração (LAMBERTS *et al.*, 2016).

O ar a certa temperatura pode conter uma determinada quantidade de água. Quanto maior a temperatura do ar, menor sua densidade e, conseqüentemente, maior a quantidade de água. Se o conteúdo de água evaporada no ar é o maior possível para aquela temperatura, diz-se que o ar está saturado. Sendo assim, qualquer quantidade de água a mais em estado de vapor condensará. Deste fenômeno se originam a névoa, o orvalho e a chuva. Quando o conteúdo de vapor de água no ar é menor que o máximo possível para aquela temperatura, diz-se que esta proporção é a umidade relativa do ar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004). A Figura 2 ilustra o comportamento do ar em relação ao da sua temperatura.

Figura 2 - Comportamento da umidade do ar em relação ao da sua temperatura



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2004)

- Vento

Uma das principais causas da distribuição dos ventos é o desequilíbrio de radiação entre as latitudes baixas e altas. O aquecimento desigual da Terra e de sua atmosfera pela radiação solar gera energia potencial, parte da qual se transforma em energia cinética pela elevação do ar quente na região próxima ao equador, abrindo caminho para a entrada do ar frio que vem do norte e sul (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Conforme Frota e Schiffer (2001), a variação de temperatura do ar no globo provoca deslocamentos de massas de ar, uma vez que se a Terra não girasse sobre si mesma, o movimento de ar seria constante e ascendente dos pólos para o Equador. E,

- *Ventilação*: corresponde uma estratégia de resfriamento natural do ambiente construído, a partir da substituição do ar interno, mais quente, pelo externo, mais frio.
- *Resfriamento evaporativo*: utilizada para aumentar a umidade relativa do ar e diminuir a temperatura. Pode ser obtido de forma direta, com o uso de vegetação, fontes d'água ou outros recursos que resultem na evaporação da água diretamente no ambiente, ou indireta, a partir de tanques d'água sombreados executados sobre a laje de cobertura.
- *Inércia térmica para resfriamento*: utiliza-se componentes construtivos com inércia térmica superior, permitindo que a amplitude da temperatura interior diminua em relação a exterior.
- *Resfriamento artificial*: deve ser utilizado quando as estratégias de ventilação, resfriamento evaporativo e massa térmica não proporcionam condições desejadas de conforto.
- *Umidificação*: é recomendada quando a temperatura do ar está menor que 27°C e a umidade relativa abaixo de 20%. Através de recipientes com água já é possível aumentar a umidade relativa do ar, aberturas herméticas podem manter esta umidade, além do vapor d'água gerado por atividades domésticas ou provenientes de plantas.
- *Inércia térmica e aquecimento solar*: adota-se componentes construtivos com maior inércia térmica, além de aquecimento solar passivo e isolamento térmico.
- *Aquecimento solar passivo*: deve ser adotado para os casos com baixa temperatura do ar. Pode ser alcançada através da orientação da edificação e de cores que maximizem os ganhos de calor, através de aberturas zenitais, de coletores de calor colocados no telhado e de isolamento para reduzir perdas térmicas.

As estratégias sugeridas no Brasil são ditas pela NBR 15220-3: Desempenho térmico em edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005). Cabe ressaltar que é necessário verificar o clima local, para identificar em qual zona climática se encaixa, uma vez que as estratégias são específicas para cada lugar.

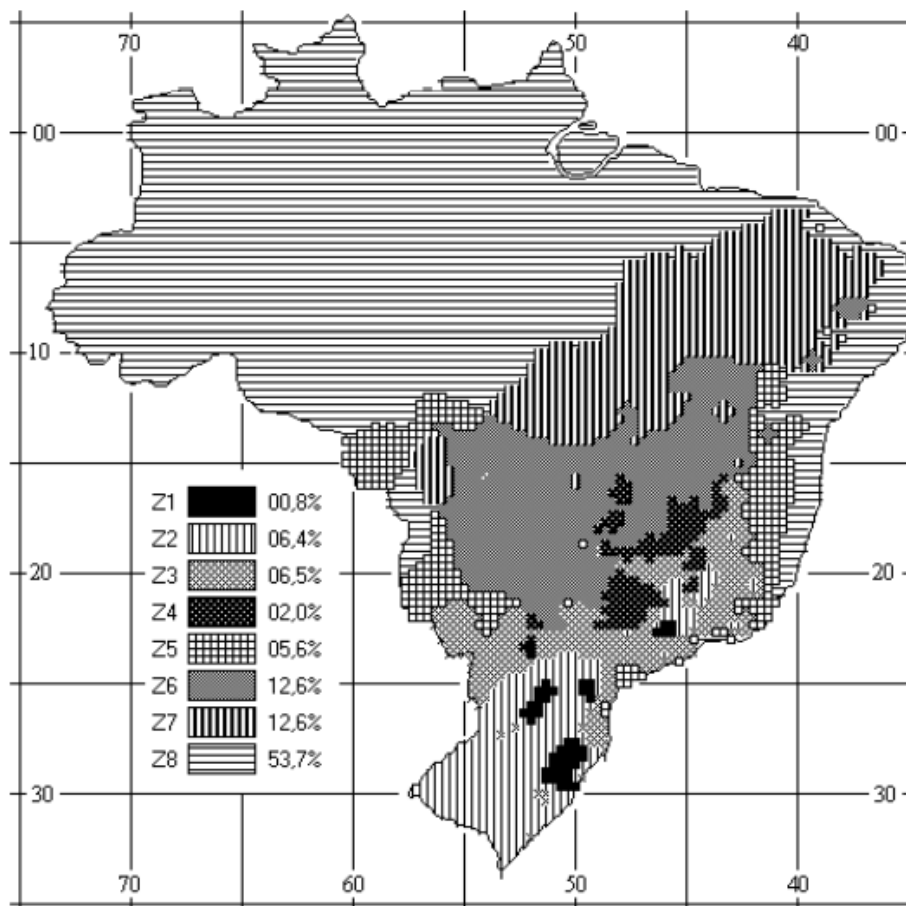
2.2.3 Zoneamento bioclimático

Segundo Lamberts *et al.* (2016), o zoneamento bioclimático brasileiro é dividido em oito zonas bioclimáticas e elas são definidas de acordo com o clima e as necessidades

humanas de conforto. Para cada zona, são relacionadas as estratégias consideradas adequadas para adoção nas edificações.

A norma de Desempenho NBR 15220-3 (ABNT, 2005) estabeleceu a subdivisão das condições climáticas brasileiras para projeto, conforme apresentado pela Figura 4.

Figura 4 - Zonas bioclimáticas definidas pela norma de Desempenho Térmico em Edificações



Fonte: Lamberts et al. (2016)

A legenda do gráfico representa a razão, em porcentagem, da área da zona bioclimática em relação à área do território brasileiro.

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO

O desempenho térmico de edificações é um fator essencial nas edificações. A avaliação do desempenho térmico objetiva identificar a resposta global do projeto arquitetônico proposto em relação às trocas térmicas entre o ambiente construído e o ambiente externo (SIQUEIRA *et al.*, 2005).

Segundo Lima (2014), o desempenho térmico de edificações é influenciado pelas características dos materiais que compõem seus elementos e interfere no conforto térmico de seus usuários. O correto desempenho térmico propicia “condições adequadas para o

sono e atividades normais em uma habitação, contribuindo ainda para a economia de energia” (CBIC, 2013).

O comportamento térmico nas edificações é determinado, sobretudo, em função das condições ambientais externas. Isso se deve a sua menor ocupação quando comparada a um edifício comercial, por exemplo, em que há maior geração de calor derivado de equipamentos e dos indivíduos. No caso das edificações residenciais, os ganhos de calor através de sua envoltória e aberturas existentes, assim como as condições de exposição à insolação e à ventilação, são os principais fatores determinantes do desempenho térmico (LAMBERTS *et al.*, 2010b).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas traz formas de avaliar e otimizar o desempenho térmico das edificações pelas normas NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013), e NBR 15220: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005), respectivamente. Além destas, o governo brasileiro traz um terceiro documento relacionado ao desempenho térmico de habitações, o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (MARQUES, 2013).

2.3.1 NBR 15575

A norma brasileira de Edificações Habitacionais – Desempenho tem como objetivo estabelecer critérios de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais, a fim de aumentar a qualidade dos imóveis. Está fundamentada nos conceitos de segurança, habitabilidade, higiene, saúde, durabilidade e sustentabilidade, analisando as condições de exposição da edificação ao longo da sua vida útil e a partir das necessidades dos habitantes.

Está dividida em seis partes, estruturado por elementos da construção. Tais como: Parte 1 – Requisitos Gerais; Parte 2 – Requisitos para os sistemas estruturais; Parte 3 – Requisitos para os sistemas de piso; Parte 4 – Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas; Parte 5 – Requisitos para os sistemas de coberturas e Parte 6 – Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

De acordo com Carvalho (2012), a ABNT NBR 15575: 2013 define os requisitos, critérios e métodos de avaliação do desempenho mínimo obrigatório para sistemas das edificações, considerando-se as necessidades dos usuários e as condições de exposição da edificação, ao longo de uma vida útil mínima obrigatória.

Conforme a norma, são utilizados três procedimentos para avaliação do desempenho térmico das edificações, são eles: simplificado, simulação e medição. No simplificado, os requisitos e critérios são estabelecidos pelas normas NBR 15575-4 e NBR

15575-5, para os sistemas de vedação e cobertura, respectivamente. Uma vez que os resultados não são satisfatórios, recorre-se aos métodos de simulação ou medição.

Nota-se, então, como a norma de desempenho é essencial para garantir que todos os sistemas de uma edificação possuam os desempenhos mínimos obrigatórios, ponderando as necessidades dos usuários e as condições de exposição da edificação, com o intuito que esta cumpra sua vida útil mínima obrigatória.

2.3.2 NBR 15220

A Norma Brasileira de Desempenho Térmico em Edificações está dividida em cinco partes, sendo elas:

- Definições, símbolos e unidades;
- Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
- Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
- Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico;

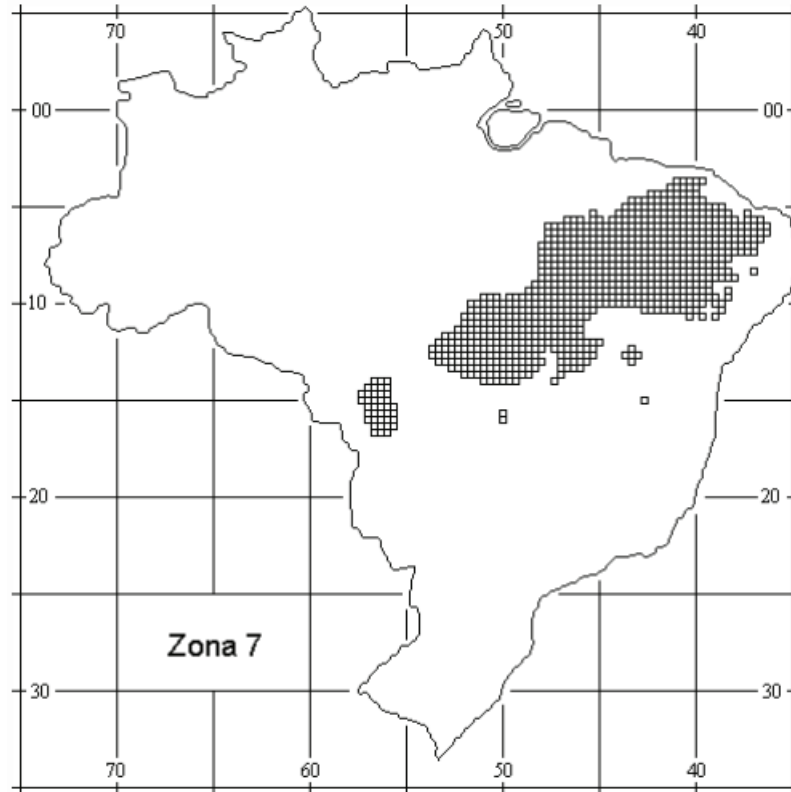
Na primeira parte são detalhadas as propriedades térmicas dos materiais, elementos e componentes construtivos. Na parte dois, são vistos os procedimentos para os cálculos das para análise de desempenho térmico. A terceira parte trata das informações a respeito do zoneamento bioclimático, na qual são apresentadas as recomendações e diretrizes para edificações unifamiliares de interesse social, com o intuito de otimizar o desempenho nas diversas zonas. Nas duas últimas partes, quarta e quinta, são vistos definições e métodos de medição da resistência e condutividade térmica.

2.3.2.1 O município de Barreiras conforme a NBR 15220-3

A cidade de Barreiras se localiza no zoneamento bioclimático 7, conforme o anexo A, da NBR 15220-3, sendo o mesmo uma relação de determinadas cidades que foram classificadas quanto ao clima.

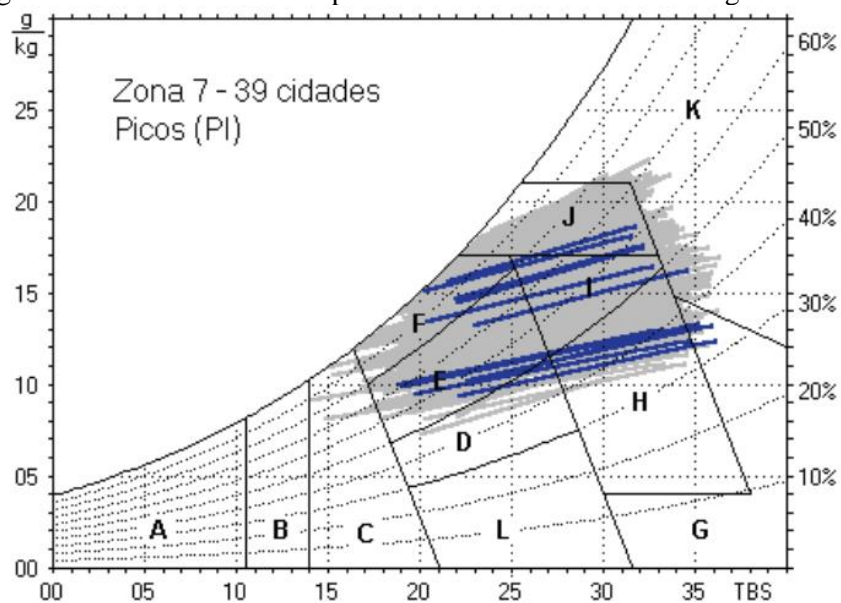
A zona bioclimática 7 possui as seguintes características bioclimáticas, conforme Figuras 5 e 6, e diretrizes para desempenho térmico vistas nas Tabela 1, 2 e 3.

Figura 5 - Região da zona bioclimática 7



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Figura 6 - Carta bioclimática apresentando as normais climatológicas



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Tabela 1 - Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 7.

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Pequenas	Sombrear aberturas

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Tabela 2 - Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 7

Vedações externas
Parede: Pesada
Cobertura: Pesada

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Tabela 3 - Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 7

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	H) Resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento J) Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

No Anexo C são expostos as recomendações e diretrizes para adequação da edificação ao clima local, tal como as Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Aberturas para ventilação, adaptadas para zona bioclimática 7

Aberturas para ventilação	A (em % da área do piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

Tabela 5 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa, adaptado para a zona bioclimática 7

Vedações externas	Transmitância térmica – U W/(m².K)	Atraso térmico – ϕ h	Fator Solar - FS₀ %
Paredes pesadas	$U \leq 2,20$	$\phi \leq 6,5$	$FS_0 \leq 3,5$
Coberturas pesadas	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 6,5$	$FS_0 \leq 6,5$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

2.3.3 RTQ-R

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) apresenta-se em quatro volumes os quais tem os principais conteúdos referentes à etiquetagem. O Volume 1 contém um texto de apresentação do processo; o Volume 2 apresenta o RTQ-R; o Volume 3 apresenta o RAC-R, Regulamento de Avaliação de Conformidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, estabelecendo o processo de avaliação da conformidade da edificação e os critérios para etiquetagem junto ao Organismo de Inspeção Acreditado; e o Volume 4 apresenta o manual explicativo para aplicação do RTQ-R (LAMBERTS *et al.*, 2016).

O RTQ-R apresenta requisitos para classificação da eficiência energética de unidades habitacionais de acordo com a Zona Bioclimática e a região geográfica em que as edificações se localizam (MATTOS, 2018). O regulamento especifica a classificação do nível de eficiência de edificações composta pela avaliação de três itens: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar (LAMBERTS *et al.*, 2016).

O regulamento tem caráter voluntário visando preparar o mercado construtivo a assimilar a metodologia de classificação e obtenção da etiqueta e pode ser feito através de dois métodos: método prescritivo ou método de simulação computacional. Neles são avaliadas as Unidades Habitacionais Autônomas, as Edificações Unifamiliares, as Edificações Multifamiliares e as Áreas de Uso Comum de edificações multifamiliares ou de condomínios de edificações residenciais (MATTOS, 2018).

2.3.4 Propriedades térmicas dos materiais

A propriedade térmica é definida como a resposta de um material à aplicação de calor. Os materiais e elementos construtivos se comportam termicamente em função de suas propriedades térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2016).

Uma edificação de adequado desempenho térmico deve controlar as propriedades termofísicas da sua envoltória, tais como a transmitância e inércia térmicas. (Aste, Angelotti e Buzetti, 2009, apud Marques, 2013). Contudo, dados do projeto e do tipo de ocupação também atuarão em seu desempenho térmico, por isso todos os parâmetros devem ser analisados conjuntamente.

As recomendações sobre os materiais a serem utilizados na construção da edificação tratam apenas de uma das suas características térmicas. No entanto, não é

aceitável fazer uma análise isolada de uma propriedade térmica, sendo que a unidade de um material é a combinação de todas suas propriedades. (KAPPAUN, 2012)

Estudar sobre as propriedades térmicas permite traçar estratégias para que a edificação responda de maneira eficiente às variações do clima. Como também, a correta escolha dos materiais construtivos tem papel fundamental para um bom desempenho térmico, oferecendo conforto aos usuários. (KAPPAUN, 2012)

Condutividade térmica (λ) é definida por Lamberts, Dutra e Pereira (2014) como a capacidade em conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo e depende da densidade do material, dada em W/(m.K).

Calor específico (c) é o quociente da capacidade térmica pela massa, J/(kg.K), caracterizando a capacidade de um material em acumular calor. (KAPPAUN, 2012). Quanto maior o calor específico de um material, maior será a quantidade de calor absorvida para haver um incremento de sua temperatura (DORNELLES, 2004).

Absortância à radiação solar (α) é um parâmetro adimensional que varia de zero a um, de menor a maior absortância. A cor tem grande influência nessa propriedade, sendo o emprego de cores mais escuras nas superfícies, e em climas que não sejam os frios, pode comprometer bastante o desempenho térmico da edificação. (ARAÚJO, 2018)

Resistência térmica (R) é a sua propriedade em resistir à passagem do calor, dada em (m².K)/W. Quanto maior a espessura do material, maior será a resistência que esse material oferece à passagem do calor. É inversamente proporcional à condutividade térmica. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Transmitância térmica (U) está relacionada com a espessura do componente e a condutividade térmica dos materiais constituintes. É a propriedade que está relacionada à permissão da passagem de energia e está em função dos materiais que a compõe. É também inversamente proporcional à resistência térmica, tendo como unidade W/(m².K) (KAPPAUN, 2012).

Capacidade térmica (C_T) é a menor ou maior capacidade de um material construtivo em armazenar calor, em J/(m².K). Depende de outras características como espessura (e), calor específico (c) e densidade (d). Também é conhecida como inércia térmica, em que o elemento armazena energia em forma de calor e a libera após certo tempo. Um elemento que possui uma inércia térmica alta, juntamente com componentes de adequado isolamento, um bom desempenho térmico é mantido durante as horas de maior temperatura e radiação solar no exterior. (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Atraso térmico (ϕ) é o tempo gasto entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor, tem como unidade h (hora). Depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão dispostas. Logo, quanto maior o atraso térmico, maior será o intervalo de tempo para que o calor chegue ao interior da edificação (ARAÚJO, 2018).

2.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO DESEMPENHO TÉRMICO APLICADO ÀS EDIFICAÇÕES

Segundo Mendes *et al.* (2005), o conceito de eficiência energética passou a consolidar em muitos escritórios de engenharia e arquitetura, pois necessitava promover o uso de tecnologias que proporcionassem o mesmo serviço consumindo menos energia. A avaliação do desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa, visto que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares. O computador foi fundamental para o desenvolvimento dos modelos físicos que representam o comportamento térmico e energético de edificações, permitindo a simulação em diferentes cenários (MENDES *et al.*, 2005).

Seguindo o raciocínio de Mendes *et al.* (2005), as primeiras ferramentas computacionais para simulação de edificações foram desenvolvidas na década de 70, tendo como referência o programa NBSLD, desenvolvido nos Estados Unidos (EUA). Posteriormente, surgiram as estações de trabalho operando em ambientes Unix, no qual foram as seguintes ferramentas, ainda utilizadas nos dias atuais: DOE-2, BLAST, RADIANCE e ESP-r. Programas mais modernos e complexos puderam ser desenvolvidos com o avanço dos recursos computacionais, sendo: ENERGYPLUS, FLUENT, CFX e PHOENICS. Contudo, por tratarem de fenômenos físicos complexos, esses softwares ainda costumam ser empregados apenas em centros de pesquisas de universidades e institutos (MENDES *et al.*, 2005).

De acordo com Ryan e Sanquist (2012), as ferramentas de simulação consideram os componentes construtivos em conjunto com os sistemas de condicionamento artificial do ar e estratégias de eficiência energética, como a ventilação natural e os sombreamentos. Sendo assim, os resultados obtidos a partir das simulações podem ajudar na tomada de decisões diante de projetos arquitetônicos, projetos de sistemas de condicionamento artificial que exigem alto consumo energético e de políticas públicas.

Conforme Li e Wen (2014), o uso de programas computacionais de simulação energética tem contribuído para a gestão de recursos energéticos no setor. Contudo, ser fiel à forma do sistema energético de edifícios não é simples, uma vez que a relação entre os fatores que influenciam esses sistemas é complexa e dificilmente edificações reais são monitoradas a fim de se obter informações seguras que sirvam de patamar comparativo entre a simulação e a edificação real.

O EnergyPlus é um software gratuito e conhecido internacionalmente, seu desenvolvimento foi através da união dos programas DOE-2 e BLAST e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Foi desenvolvido para a simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas (MELO, 2009). Apresenta recursos para simular o consumo de energia e as trocas térmicas resultantes dos efeitos radiantes e convectivos nos ambientes internos durante cada intervalo de tempo da simulação (CRAWLEY *et al.*, 2004). Além disso, o programa utiliza informações climáticas horárias do lugar, a descrição arquitetônica e construtiva do edifício, os padrões de uso e ocupação, a potência instalada em sistemas de iluminação, a carga dos equipamentos, as características do sistema de condicionamento do ar, etc (BARBOSA *et al.*, 2013).

2.5 ESTUDO DO DESEMPENHO TÉRMICO

De acordo com os estudos realizados por Dias (2011), Dias (2016), Araújo (2018), Michels (2018), Santos (2019), Zanella (2019), Balvedi (2020), Almeida (2020) e Silva (2021), percebe-se a relevância do estudo sobre o desempenho térmico, visto que os materiais influenciam diretamente nos parâmetros térmicos e, conseqüentemente, podem apresentar desempenhos diferentes dos estabelecidos pelas normas brasileiras.

Dias (2011) avaliou o desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em estruturas de aço. A análise baseou-se na influência da cor, do material e da geometria do telhado no desempenho da cobertura. Em relação às telhas, cores mais claras, as que possuem menor coeficiente de absorção, são mais adequadas para a maioria das zonas bioclimáticas. Quanto ao material, 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, de menor espessura e mais leves, sem material isolante, apresentam desempenho térmico satisfatório. Para as regiões climáticas com elevada amplitude térmica, as telhas metálicas tipo sanduiche, utilizando material isolante entre as camadas, são mais adequadas. Já sobre a geometria, não foi possível definir um único

telhado como sendo o mais eficiente para todas as situações climáticas. As diferenças de comportamento térmico entre as diversas geometrias de coberturas intensificam-se quando combinadas com aberturas que auxiliam na ventilação natural do ambiente.

Dias (2016) realizou seu trabalho no desempenho térmico das coberturas verdes através de simulações computacionais em três cidades brasileiras. O trabalho apresenta um método em que foram isolados os componentes da cobertura, anulando a interação dos outros componentes da envoltória com os elementos climáticos. Foram obtidas reduções expressivas de cargas térmicas transmitidas para o interior da sala de testes simulada somente com a alteração do albedo da superfície. O fibrocimento mostrou-se um material cujas propriedades não são favoráveis a um bom desempenho térmico, apesar de ser amplamente utilizado em edificações. O efeito resultante da redução da absorvância mostrou-se uma forma prática de aperfeiçoar o desempenho térmico no caso da utilização desse material. Com a adição da camada de isolamento, reduziu-se consideravelmente as cargas térmicas necessárias em todos os tipos testados, contudo as coberturas verdes são poucos influenciadas pela utilização da camada isolante.

Araújo (2018) analisou duas composições de paredes comumente utilizadas na cidade de Barreiras, Bahia, e propôs 27 composições de paredes, as quais tiveram seus custos/m², custo-benefício e parâmetros de transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico calculados por norma e utilizados para avaliação do desempenho térmico. Dentre as 27 composições propostas, apenas 16 atenderam às diretrizes, além disso, as paredes frequentemente utilizadas na cidade, não atenderam às diretrizes normativas para o valor de absorvância térmica adotado.

Michels (2018) avaliou o emprego de uma bancada experimental em escala reduzida para determinar a transferência de calor em áticos. Foram desenvolvidas medições em telhado de dimensões reais, simulações computacionais, medições no equipamento FPX 314 e o desenvolvimento de um modelo matemático para cavidades retangulares e fechadas. Em relação ao estudo 1, todas as coberturas com laje de concreto e telhas de fibrocimento, constatou-se que: as resistências térmicas das coberturas apresentaram valores que variaram de 0,17 m²K/W a 0,20 m²K/W, com desvio padrão de 0,013; a influência exercida pelo fluxo de calor na resistência térmica foram de R=0,43 m²K/W e R=0,20m²K/W para o período de temperaturas altas e o período de temperaturas amenas, respectivamente; a rápida oxidação da superfície do isolamento reflexivo utilizado com a face aluminizada para cima, sua emissividade passou de 0,06 (material novo) para 0,70 em seis meses de uso; e o isolamento reflexivo aumentou a resistência térmica do

ático, sendo que a cobertura com alumínio voltado para baixo obteve resistência de 2,14 m²K/W durante o verão e 0,67 m²K/W para o período do inverno, mas sem isolamento esses valores foram 0,43 m²K/W e de 0,20 m²K/W, para o período do verão e inverno, respectivamente.

Santos (2019) avaliou as condições existentes das coberturas dos edifícios dos edifícios da Esplanada dos Ministérios, na cidade de Brasília. A avaliação das exigências funcionais serviu para identificar as principais anomalias nas coberturas por meio da caracterização do estado de conservação dos materiais e componentes e o critério de prioridade de intervenção. Na avaliação de desempenho térmico e acústico, os sistemas apresentaram resultados insatisfatórios para o desempenho térmico.

Zanella (2019) analisou a influência do tipo de telha no desempenho térmico da edificação utilizando simulação computacional. Os resultados de temperatura interna obtidos para as dependências do térreo, no dia típico de inverno, demonstraram pouco influenciados pelo tipo de material utilizado no telhado. A diferença de temperatura entre a telha de fibrocimento e a telha sanduíche foi muito pequena. Para dias de verão, esta diferença se tornou mais expressiva, o modelo com telha de fibrocimento apresenta resultados de temperatura de até 1,27°C superior em relação à telha sanduíche. As dependências da cobertura sofreram influência direta do telhado, o modelo construtivo com telha sanduíche apresenta uma vantagem térmica superior a 4,50°C para o dia típico de inverno e 11,00°C para o dia típico de verão. Foi demonstrado também que é possível melhorar o desempenho térmico dos ambientes da cobertura acrescentando forro de gesso ao modelo construtivo com telha de fibrocimento.

Balvedi (2020) estudou a influência da tipologia de cobertura verde no desempenho termoenergético de edificações e no seu entorno, em três zonas bioclimáticas distintas. Alguns parâmetros da cobertura verde se mostraram fundamentais para a obtenção de melhores níveis de eficiência energética em edificações. O índice de área foliar, a espessura e transmitância térmica do substrato são características que merecem atenção ao empregar uma cobertura verde como estratégia passiva de eficiência energética. A mesma é difundida como uma boa opção para climas quentes e frios, contudo, observa-se que a escolha inadequada da tipologia pode ser prejudicial dependendo das condições climáticas. Além disso, a combinação inadequada das características que compõem a cobertura verde pode acarretar em maiores consumos de energia.

Almeida (2020) analisou o desempenho térmico de sistemas de vedação e cobertura de uma edificação empregando o software EnergyPlus. O estudo foi feito com base no

clima da cidade de Rio Verde – GO, através da análise de dois tipos de sistema de cobertura, telha cerâmica e telha de fibrocimento, e três tipos de sistema de vedação, tijolo maciço aparente, tijolo de 8 furos quadrados assentados na menor e maior direção, com o intuito de avaliar qual sistema de vedação e sistema de cobertura se comportaria melhor na cidade em questão. O conjunto tijolo de 8 furos assentados na menor direção e cobertura de fibrocimento apresentaram os melhores resultados.

Seguindo o trabalho de Araújo (2018), Silva (2021) buscou analisar o desempenho térmico de diferentes composições de paredes e a influência dos parâmetros: orientação solar, absorvância térmica e espessura dos materiais quando submetidos às condições climáticas da cidade de Barreiras, Bahia. O autor escolheu 6 dentre as 27 composições propostas por Araújo (2018), e através da simulação computacional, efetuou simulações do desempenho térmico por cargas térmicas para cada uma delas, de forma simples, sem variação de parâmetro, e paramétrica, em que os parâmetros orientação solar e absorvância foram variados em dois e três níveis, respectivamente. A análise por cargas térmicas se mostrou diretamente relacionada com a transmitância térmica das paredes, diferente da capacidade térmica, a qual não houve variação significativa. A orientação solar e a absorvância apresentaram influência significativa na carga térmica, afetados pela mudança de oeste para sul. E, por fim, a espessura dos materiais resultou em decréscimo da carga térmica.

A partir da análise da revisão dos trabalhos citados, observa-se a relevância do estudo sobre o desempenho térmico em edificações e a importância da simulação computacional para o mesmo. A metodologia da simulação será baseada no trabalho de Silva (2021), em que o procedimento simplificado será associado com o procedimento de simulação da norma, uma vez que foram percebidas discrepâncias entre os resultados obtidos pelos dois métodos, impossibilitando a análise por apenas um procedimento. Em relação ao desempenho térmico, notou-se uma tendência nos parâmetros de maior influência para seu aprimoramento, como capacidade térmica das paredes e transmitância da cobertura.

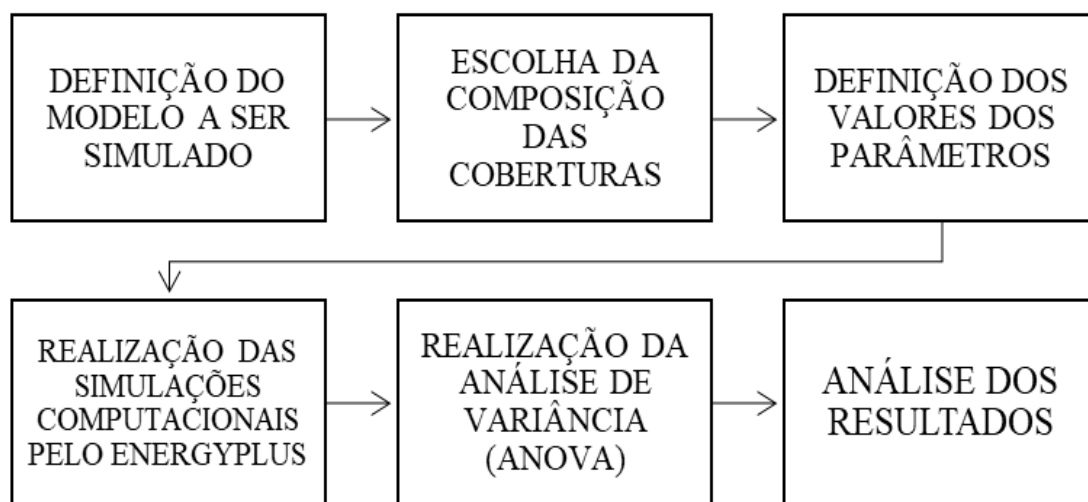
3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste em analisar o desempenho térmico de diferentes soluções de coberturas quando submetidos às condições climáticas da cidade de Barreiras-Ba. Serão escolhidas as soluções de coberturas comumente utilizadas na região e efetuadas simulações computacionais do desempenho térmico por cargas térmicas, através do

software EnergyPlus, sendo as composições de coberturas compostas por três camadas em cada tipo de cobertura e cinco tipos de combinações diferentes. Vale ressaltar que, existem casos em que a cobertura possuirá apenas duas camadas, como resultados de combinações onde não será utilizado laje ou forro. Com o resultado das simulações, será realizada uma análise de variância (ANOVA), seguido de um teste de comparações de médias (Tukey).

O fluxograma, Figura 7, sintetiza as etapas da metodologia do trabalho.

Figura 7 - Fluxograma das etapas da metodologia do trabalho.



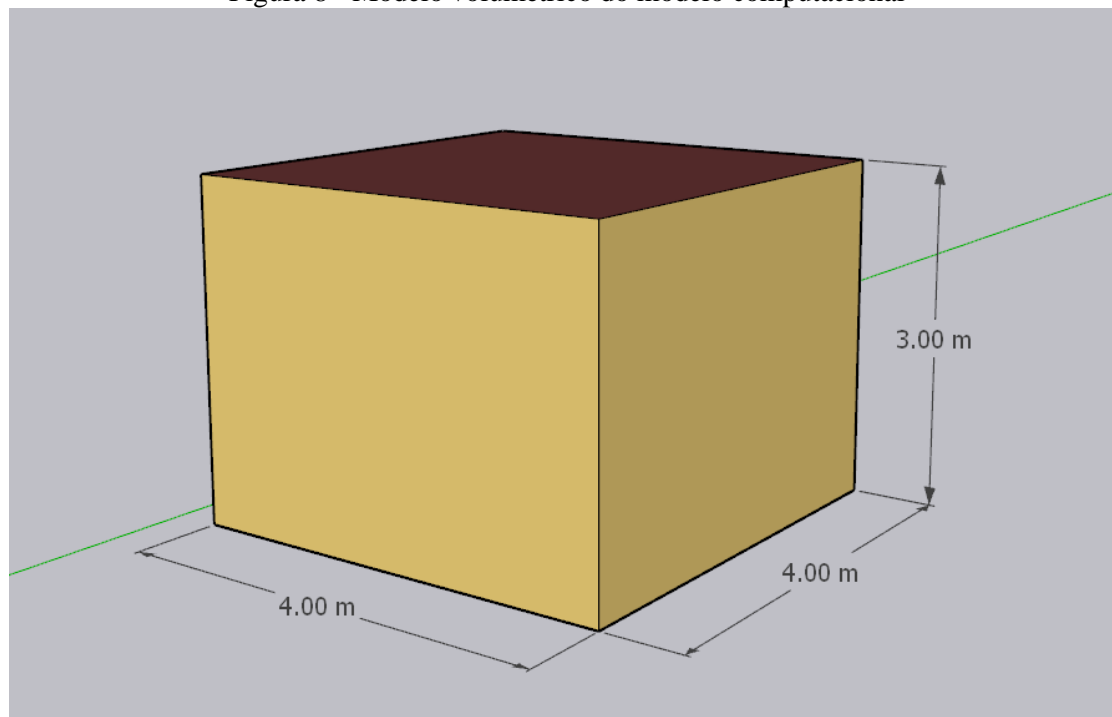
Fonte: Autora.

3.1 MODELO DE TESTES A SER SIMULADO

3.1.1 Características do modelo computacional

Primeiramente iniciou-se a determinação do protótipo em que será simulado. Para comparar os resultados obtidos através de diferentes modelagens de coberturas no programa EnergyPlys versão 9.4.0, foi utilizada um modelo computacional. Para facilitar a simulação, considerou-se um cubo com as dimensões expostas na Figura 8. As dimensões foram consideradas de forma a facilitar a simulação no software e a fim de representar uma edificação.

Figura 8 - Modelo volumétrico do modelo computacional



Fonte: Autora.

3.1.2 Propriedades da envoltória

O piso do protótipo é composto por uma laje maciça de concreto de 100 mm e piso cerâmico de 10 mm. As paredes externas e internas possuem os mesmos componentes, sendo eles: blocos cerâmicos de 8 furos com 90 mm de espessura e argamassa de 25 mm de espessura dos dois lados. As características das coberturas com as espessuras de cada sistema estão descritas no tópico 3.3.

Em processo similar a Silva (2021), o entorno do ambiente será definido como cidade (Terrain:City), considerando uma cidade com várias edificações. A análise de desempenho será baseada nas cargas térmicas de condicionamento do ambiente, utilizando o sistema de cargas térmicas ideais (Ideal Loads Air System), com temperaturas do termostato definidas em 22°C para aquecimento, e 24°C para resfriamento. Uma vez que a análise considera somente a influência do clima, não serão consideradas as contribuições de calor oriundas do uso de equipamentos elétricos e nem da ocupação de pessoas.

3.2 PROCESSO DE SIMULAÇÃO

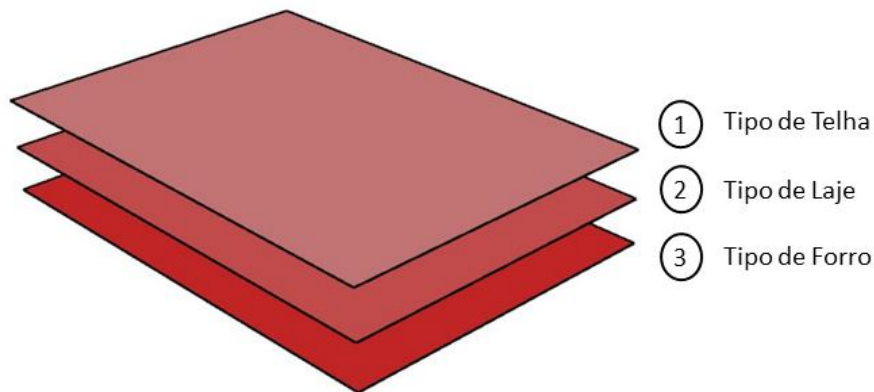
As simulações serão feitas em apenas uma etapa. Esta consiste em simular cada uma das composições das coberturas, sendo 3 camadas, em cada tipo de cobertura, e 5 tipos de cobertura.

3.2.1 Definição dos sistemas

O desempenho será determinado pela quantificação das cargas térmicas para resfriamento do ambiente. A partir da temperatura do termostato, as cargas são fornecidas ou retiradas do ambiente, representando um melhor desempenho aquele sistema que necessitar de menos cargas.

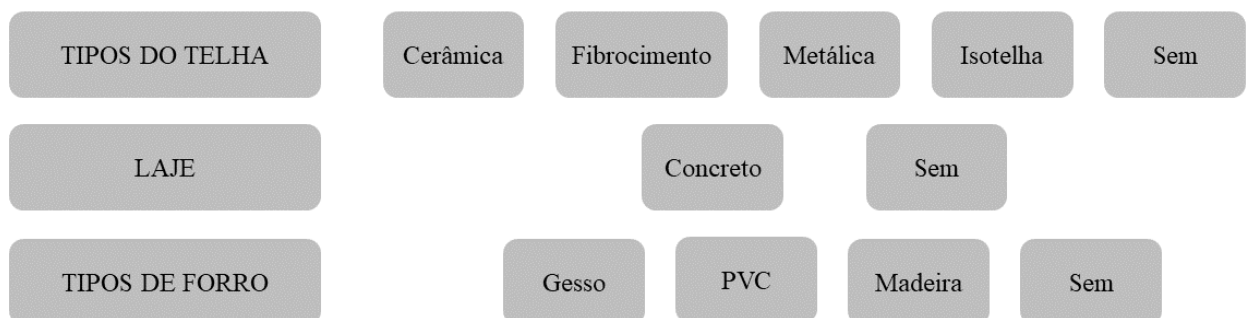
Os sistemas de coberturas adotados são divididos em três camadas, como visto na Figura 9, sendo elas: o tipo de telha, o tipo de laje e o tipo de forro. A Figura 10 representa as possíveis combinações das soluções que serão utilizadas para a simulação. Salienta-se que existem casos onde a cobertura terá apenas duas camadas como resultado de combinações onde não será utilizada laje ou forro.

Figura 9 - Divisão de um sistema de cobertura a ser simulado.



Fonte: Autora

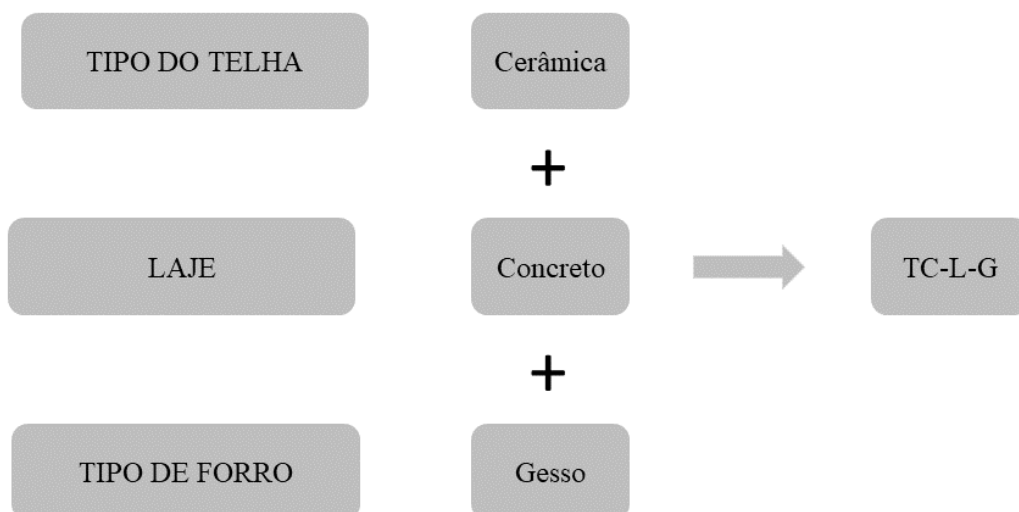
Figura 10 - Combinações possíveis para as soluções de cobertura



Fonte: Autora

A Figura 11 representa um exemplo de combinação dos sistemas de cobertura como visto no fluxograma.

Figura 11 - Exemplo de composição a partir do fluxograma dos sistemas de cobertura



Fonte: Autora

A partir dessa combinação de telha cerâmica, com laje de concreto e forro de gesso foi possível obter um dos modelos a ser simulado intitulado TC-L-G, visto na Tabela 6.

A composição dos sistemas de cobertura, escolhidas para o presente trabalho, está descrita na Tabela 6, dividida por código, o tipo de telha e a espessura de cada camada do sistema. As propriedades dos materiais estão no Anexo A.

Tabela 6 - Composição das soluções de coberturas a serem simulados

	<i>Código*</i>	<i>Espessura (m)</i>		
		<i>Telha</i>	<i>Laje</i>	<i>Forro</i>
1	TC	0,01	-	-
2	TC-G	0,01	-	0,01
3	TC-P	0,01	-	0,01
4	TC-M	0,01	-	0,01
5	TC-L-G	0,01	0,12	0,01
6	TC-L-P	0,01	0,12	0,01
7	TC-L-M	0,01	0,12	0,01
8	TF	0,004	-	-
9	TF-G	0,004	-	0,01
10	TF-P	0,004	-	0,01
11	TF-M	0,004	-	0,01
12	TF-L-G	0,004	0,12	0,01
13	TF-L-P	0,004	0,12	0,01
14	TF-L-M	0,004	0,12	0,01
15	TM	0,006	-	-
16	TM-G	0,006	-	0,01
17	TM-P	0,006	-	0,01
18	TM-M	0,006	-	0,01
19	TM-L-G	0,006	0,12	0,01
20	TM-L-P	0,006	0,12	0,01
21	TM-L-M	0,006	0,12	0,01

22	IT	0,03	-	-
23	IT-G	0,03	-	0,01
24	IT-P	0,03	-	0,01
25	IT-M	0,03	-	0,01
26	IT-L-G	0,03	0,12	0,01
27	IT-L-P	0,03	0,12	0,01
28	IT-L-M	0,03	0,12	0,01
29	L	-	0,12	-
30	LEPS	-	0,12	-

***Telha:** TC – Telha Cerâmica; TF – Telha de Fibrocimento; TM – Telha Metálica; TI – Telha tipo Isotelha;

Forro: G – Gesso; P – PVC; M – Madeira; **Laje:** LEPS – Laje Treliçada com EPS; L – Laje de Concreto.

Fonte: Autora

Cabe ressaltar que nem todas as combinações possíveis diante do fluxograma foram consideradas para a simulação, tal como telha e laje apenas. Sendo assim, dentre as combinações possíveis mostradas na Figura 10, foram escolhidas as representadas na Tabela 6.

Na Tabela 7, tem-se a composição dos modelos de cobertura para a simulação, especificando a espessura dos seus materiais e câmara de ar considerada entre as camadas.

Tabela 7 - Composição dos modelos de cobertura simulados

Composição das coberturas*	Descrição
TC	Telha Cerâmica com e=0,01m.
TC-G	Telha Cerâmica com e=0,01m e Forro de Gesso com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5,0 cm.
TC-P	Telha Cerâmica com e=0,01m e Forro de PVC com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5 cm.
TC-M	Telha Cerâmica com e=0,01m e Forro de Madeira com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5cm.
TC-L-G	Telha Cerâmica com e=0,01m, Laje de Concreto Maciça com e=0,12m e Forro de Gesso com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5,0 cm.
TC-L-P	Telha Cerâmica com e=0,01m, Laje de Concreto Maciça com e=0,12m e Forro de PVC com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5,0 cm.
TC-L-M	Telha Cerâmica com e=0,01m, Laje de Concreto Maciça com e=0,12m e Forro de Madeira com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5,0 cm.
TF	Telha Fibrocimento com e=0,004m.
TF-G	Telha Fibrocimento com e=0,004m e Forro de Gesso com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5,0 cm.
TF-P	Telha Fibrocimento com e=0,004m e Forro de PVC com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5 cm.
TF-M	Telha Fibrocimento com e=0,004m e Forro de Madeira com e=0,01m. Câmara de ar com e > 5cm.

TF-L-G	Telha Fibrocimento com $e=0,004m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de Gesso com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TF-L-P	Telha Fibrocimento com $e=0,004m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de PVC com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TF-L-M	Telha Fibrocimento com $e=0,004m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de Madeira com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TM	Telha Metálica com $e=0,006m$.
TM-G	Telha Metálica com $e=0,006m$ e Forro de Gesso com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TM-P	Telha Metálica com $e=0,006m$ e Forro de PVC com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5$ cm.
TM-M	Telha Metálica com $e=0,006m$ e Forro de Madeira com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5cm$.
TM-L-G	Telha Metálica com $e=0,006m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de Gesso com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TM-L-P	Telha Metálica com $e=0,006m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de PVC com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TM-L-M	Telha Metálica com $e=0,006m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de Madeira com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TI	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$.
TI-G	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$ e Forro de Gesso com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TI-P	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$ e Forro de PVC com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5$ cm.
TI-M	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$ e Forro de Madeira com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5cm$.
TI-L-G	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de Gesso com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TI-L-P	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de PVC com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.
TI-L-M	Isotelha com revestimento de material metálico com $e=0,0005m$ e núcleo isolante com PIR (Poliisocianurato) com $e=0,03m$, Laje de Concreto Maciça com $e=0,12m$ e Forro de Madeira com $e=0,01m$. Câmara de ar com $e > 5,0$ cm.

L	Laje de Concreto Maciça com e=0,12m.
LEPS	Laje de Concreto com e=0,04m e EPS com e=0,08m.

*Telha: TC – Telha Cerâmica; TF – Telha de Fibrocimento; TM – Telha Metálica; TI – Telha tipo Isotelha;

Forro: G – Gesso; P – PVC; M – Madeira; Laje: LEPS – Laje Treliçada com EPS; L – Laje de Concreto.

Fonte: Autora

3.2.2 Realização das simulações

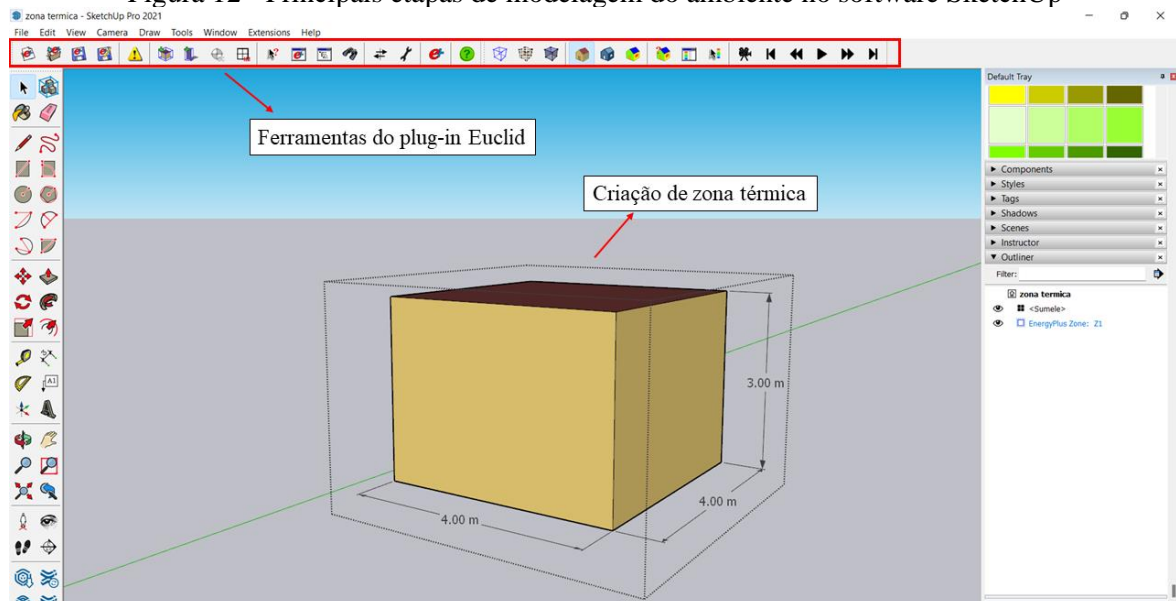
Para a realização das simulações será utilizado o programa *EnergyPlus*, versão 9.4.0, com o auxílio do *plug-in Euclid*, adicionado ao software SketchUp 2021, que ajudará na modelagem do ambiente a ser simulado.

3.2.3 Modelagem do ambiente

Primeiramente será feita a modelagem do ambiente a ser simulado. O *plug-in Euclid* facilita a criação e modificação das entradas de geometria para a construção de modelos de energia, conforme seu desenvolvedor, então foi escolhido para a modelagem.

A modelagem será baseada na criação dos ambientes em que atuam as trocas de calor, conhecidos também como zonas térmicas, definição das dimensões e características das superfícies do ambiente em que será simulado. Em seguida, o arquivo será exportado em formato “.idf” para o simulador *EnergyPlus*. A Figura 12 apresenta as principais etapas para a modelagem no software SketchUp. As dimensões do modelo foram arbitrárias, com o intuito de facilitar a simulação, representando apenas um cubo.

Figura 12 - Principais etapas de modelagem do ambiente no software SketchUp



Fonte: Autora.

3.2.4 Definição do arquivo climático

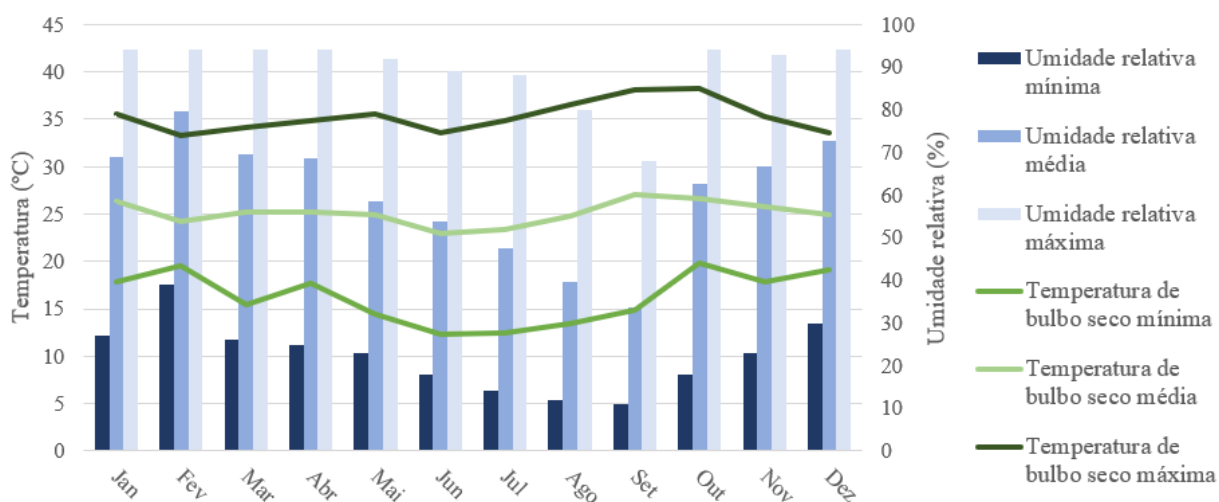
Como a simulação será feita para a cidade de Barreiras (BA), será utilizado um arquivo climático, disponível no site “climate.onebuilding.org”, que dispõe de todas as informações meteorológicas do município em questão.

Conforme Roriz (2012), os arquivos TMY são formados com base em uma sequência de dados históricos de vários anos, em que, para cada estação e mês, exclui-se sucessivamente os anos mais quentes e mais frios, até que sobre apenas um, considerado como o mês típico do local. Logo, o TMY é formado pelos 12 meses selecionados, podendo estes ser de diferentes anos.

A norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2013), que estabelece os requisitos e critérios de desempenho, não exige que se faça a simulação computacional para desempenho térmico, no inverno, nas zonas bioclimáticas 6, 7 e 8. A cidade de Barreiras, como visto na revisão bibliográfica, está inserida na zona bioclimática 7, então serão realizadas simulações apenas para o verão.

Para determinar o dia típico do verão, foi plotado um gráfico com as variáveis temperatura e umidade relativa do ar, com seus valores máximos, mínimos e médios mensais, representados pela Figura 13. De acordo com a norma, o dia típico de verão é definido como o dia mais quente do ano, sendo caracterizado apenas pelos valores da temperatura do ar exterior medidos no local, sendo este o dia 17/09.

Figura 13 - Temperatura e umidade relativa da cidade de Barreiras conforme arquivo climático



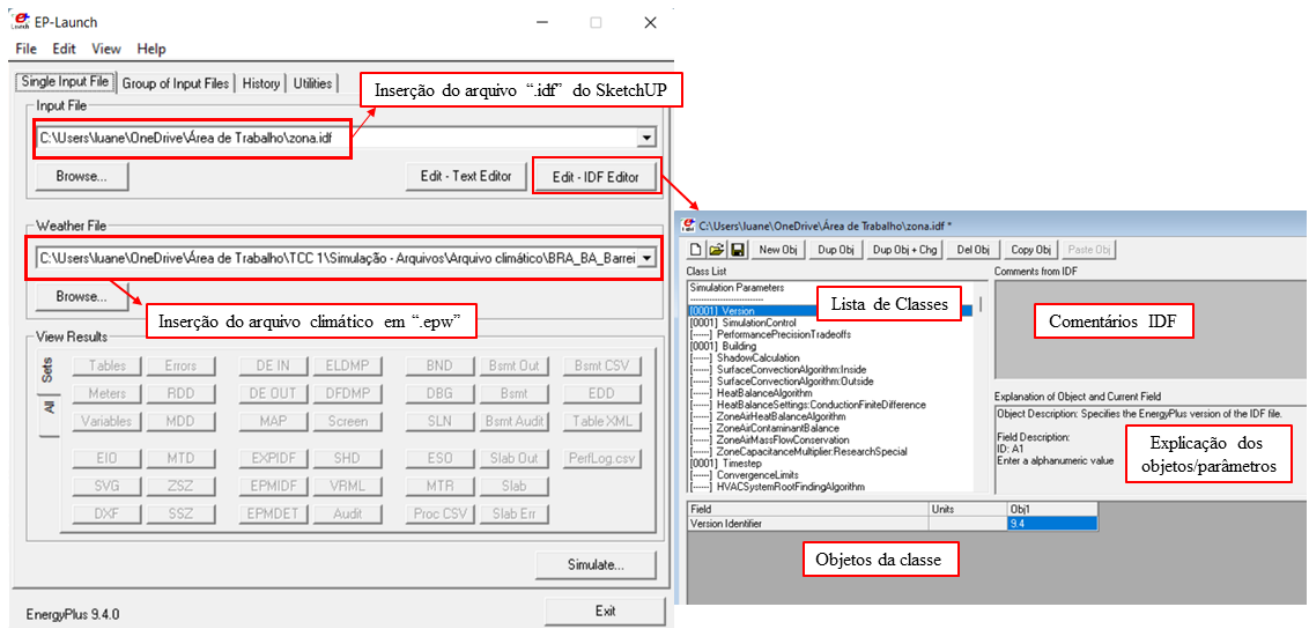
Fonte: Adaptado de climate.onebuilding.org (2022)

3.2.5 Configurações de simulação

Posterior à modelagem do ambiente, as configurações serão feitas no EP-Launch, a interface de operação do *EnergyPlus*. Neste ambiente operacional, serão inseridos os arquivos “.idf” da modelagem do ambiente e o arquivo climático da cidade de Barreiras-

Ba, em “.epw”. A Figura 14 apresenta as interfaces do EnergyPlus (Ep-Launch) e IDF Editor.

Figura 14 - Interface do software EnergyPlus (Ep-Launch) e IDF Editor.



Fonte: Autora.

As principais classes a serem configuradas para a realização das simulações são:

- *Building* – está relacionada com a orientação da edificação;
- *RunPeriod* – dia em que a simulação será realizada;
- *Material* – especificação das propriedades dos materiais;
- *Construction* – onde foram definidas as composições das paredes;
- *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem* – definição do sistema de condicionamento de ar e sua operação;
- *Output:Variable* – quais variáveis serão extraídas do resultado das simulações.

As classes configuradas estão representadas no ANEXO B. Além disso, os materiais que compõem as coberturas terão suas propriedades térmicas e espessuras adotadas conforme a NBR 15220 (ABNT, 2005), fabricantes e literaturas a respeito do tema, conforme ANEXO A.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de determinar a influência de cada parâmetro no desempenho térmico das soluções de coberturas, será realizada a análise de variância (ANOVA). Será feita uma análise fatorial, a partir da variável independente “tipo de material”, obtendo como resultado a carga térmica por arrefecimento, variável dependente, pois é quem determinará o desempenho térmico em todas as simulações.

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de resultados buscará mensurar o desempenho térmico das coberturas a partir da carga térmica de resfriamento e avaliar a resposta térmica devido às suas diferentes composições em relação ao clima do município de Barreiras – BA e ao modelo de simulação utilizado, apresentados na Tabela 7. Os resultados serão tratados estatisticamente com a Análise de Variância (ANOVA), para comparar a distribuição das amostras, e o Teste de Tukey, como complemento do teste de variância, para analisar o melhor tipo de solução.

Tabela 8 - Resultados a serem analisados e variáveis de saída do software de simulação

Resultados	Variável de saída do software (Output: Variable)
Carga térmica de resfriamento	Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Energy
Carga térmica de aquecimento	Zone Ideal Loads Zone Total Heating Energy
Valor de transmitância térmica	Calculado conforme a NBR 15220-2/2005

Fonte: Autora

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

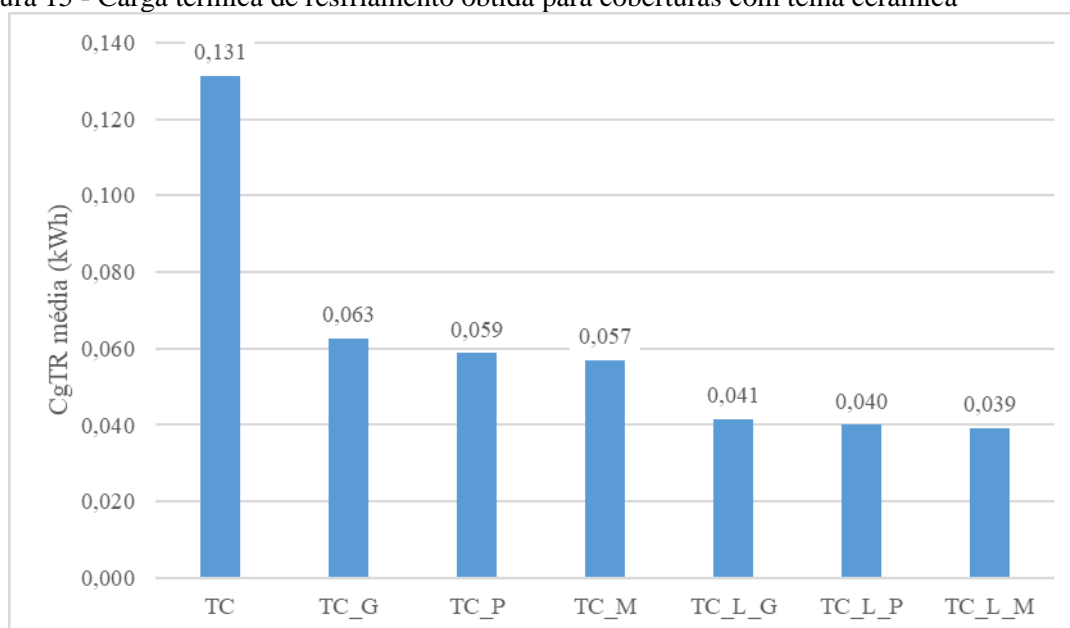
A seguir será abordada a discussão que no que tange os resultados das simulações computacionais, obtendo como resposta as cargas térmicas. Os valores de carga térmica por aquecimento (CgTA) foram apresentados apenas de forma expositiva, uma vez que não é significativa para a zona bioclimática em que o município em questão está inserido. No APÊNDICE A e B estão expostos os resultados obtidos a partir da simulação no EnergyPlus, assim como, os resultados do tratamento estatístico.

4.1 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE TELHAS CERÂMICAS

No presente tópico serão discutidos os resultados das cargas térmicas de resfriamento (CgTR) e cargas térmicas de aquecimento (CgTA) obtidas para cada um dos sete modelos de cobertura com telha cerâmica, conforme, visto anteriormente, na Tabela 6.

Tem-se, inicialmente, a Figura 15 representando a relação entre a CgTR e os tipos de cobertura do grupo de telhas cerâmicas.

Figura 15 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com telha cerâmica



TC: Telha Cerâmica; **TC_G:** Telha Cerâmica e Forro de Gesso; **TC_P:** Telha Cerâmica e Forro de PVC; **TC_M:** Telha Cerâmica e Forro de Madeira; **TC_L_G:** Telha Cerâmica, Laje de Concreto e Forro de Gesso; **TC_L_P:** Telha Cerâmica, Laje de Concreto e Forro de PVC; **TC_L_M:** Telha Cerâmica, Laje de Concreto e Forro de Madeira.

Fonte: Autora

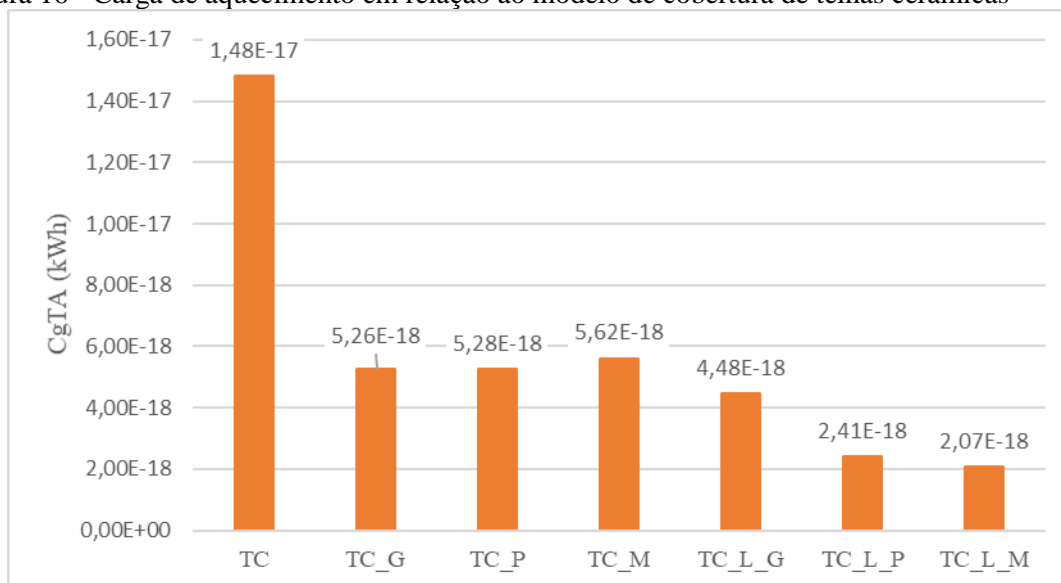
Na Figura 15, nota-se, primeiramente, como a inserção de mais uma camada no modelo de cobertura influencia diretamente na carga térmica de resfriamento, sendo possível observar que os modelos que possuem três camadas (telha, laje e forro) possuem menores valores de CgTR. Percebe-se também que as coberturas apresentam um desempenho melhor quando possuem forro de madeira, visto que nas camadas com telha e forro e telha, laje e forro, o forro de madeira apresenta como o menor dos três tipos, em ambos os casos, $CgTR=0,057$ e $CgTR=0,039$.

A diferença entre a telha aparente para o modelo com telha e forro, decresce a carga térmica em quase 50%. Já em relação ao modelo com laje e forro, tem-se uma diferença três vezes menor de CgTR. Entre o modelo de telha e forro para o de três camadas, o decréscimo é de 30% de CgTR.

Observa-se que a cobertura com apenas a telha cerâmica possui um alto valor de carga térmica, tornando-se a que possui menor desempenho térmico dentre as coberturas do grupo. A inserção da laje na cobertura, torna o modelo o tipo com melhor desempenho térmico, diferenciando-se apenas pelo material do forro.

Cabe ressaltar que os valores da carga de aquecimento foram tão pequenos, que não se tornaram significativos comparados com os valores da carga térmica de resfriamento, sendo assim, não foi possível correlacioná-los em um único gráfico. Então, plotou-se um gráfico individual, representado pela Figura 16.

Figura 16 - Carga de aquecimento em relação ao modelo de cobertura de telhas cerâmicas



TC: Telha Cerâmica; **TC_G:** Telha Cerâmica e Forro de Gesso; **TC_P:** Telha Cerâmica e Forro de PVC; **TC_M:** Telha Cerâmica e Forro de Madeira; **TC_L_G:** Telha Cerâmica, Laje de Concreto e Forro de Gesso; **TC_L_P:** Telha Cerâmica, Laje de Concreto e Forro de PVC; **TC_L_M:** Telha Cerâmica, Laje de Concreto e Forro de Madeira.

Fonte: Autora

Devido às características da zona bioclimática, em que está inserida o município de Barreiras, os valores de CgTA não são significativos, comparados aos valores de CgTR. Logo, a apresentação dos resultados será apenas expositiva.

Calculou-se a transmitância para cada modelo de cobertura do grupo cerâmico, sendo representados pela Tabela 9.

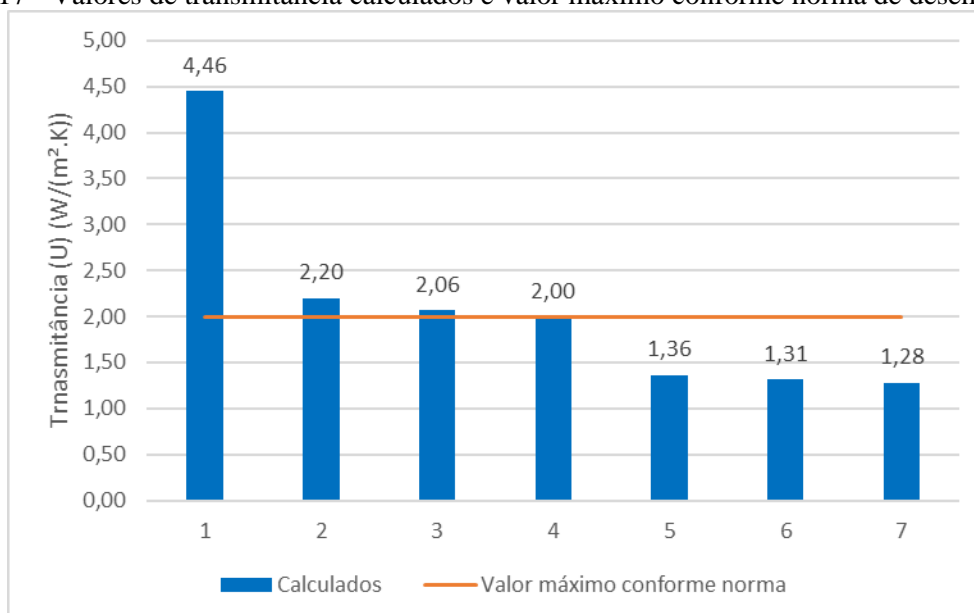
Tabela 9 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo cerâmico

Cobertura	U (W/(m ² .K))
1 TC	4,46
2 TC_G	2,20
3 TC_P	2,06
4 TC_M	2,00
5 TC_L_G	1,36
6 TC_L_P	1,31
7 TC_L_M	1,28

Fonte: Autora

Plotou-se então o gráfico com os valores de transmitância calculados e os valores máximos permitidos pela norma de desempenho.

Figura 17 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho

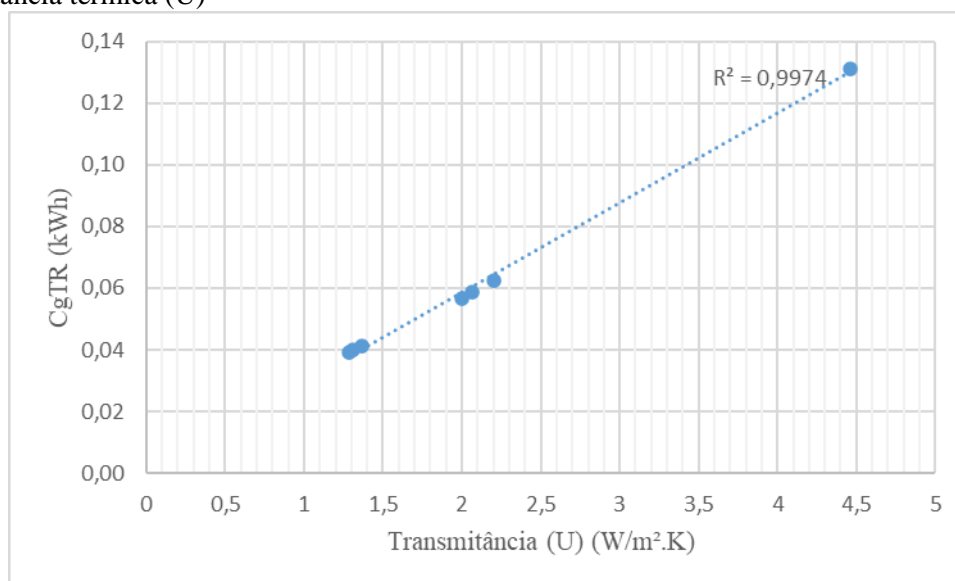


Fonte: Autora

Pela NBR 15220 (ABNT, 2005), para a zona bioclimática 7, a transmitância das coberturas (U) deve ser menor ou igual a 2 W/(m².K). Logo, percebe-se que as coberturas que atendem aos critérios da norma de desempenho são as coberturas 4, 5, 6 e 7, conforme Figura 17.

A fim de relacionar os valores de carga térmica de resfriamento (CgTR) com a transmitância térmica (U) dos mesmos, plotou-se um gráfico, representado na Figura 18.

Figura 18 – CgTR média para cada tipo de cobertura do grupo cerâmico em função da transmitância térmica (U)



Fonte: Autora

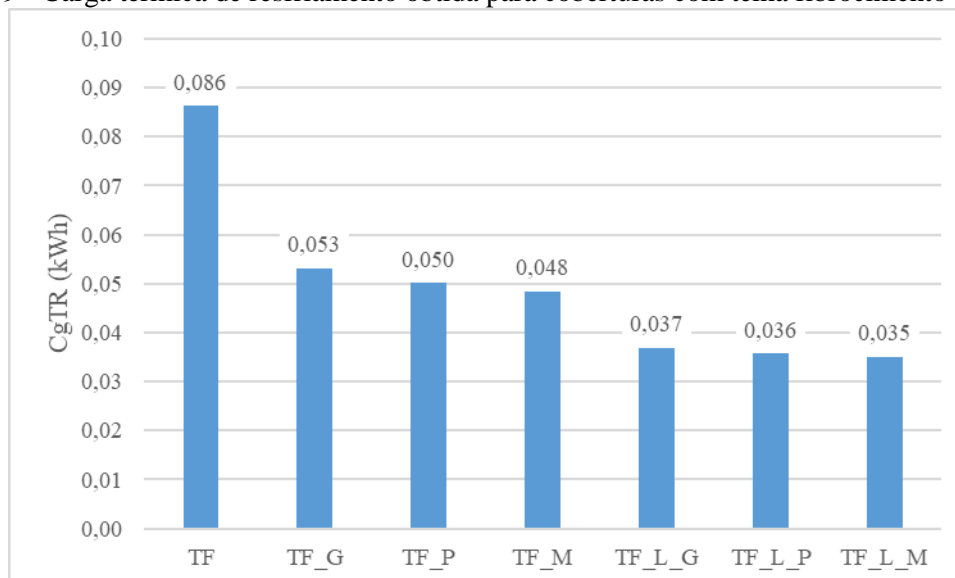
Com R^2 igual a 0,9974, temos uma correlação entre os dados obtidos, podendo traçar uma linha de tendência entre os valores. Observa-se que a relação obtida é estatisticamente significativa, uma vez que apresenta coeficiente de correlação linear (R) maior que 0,99. Além disso, é possível concluir que, neste caso, as variáveis são diretamente proporcionais. Sendo assim, quanto maior o número de camadas da cobertura, mais isolante se torna a cobertura e menos calor é conduzido pelas camadas.

4.2 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE TELHAS DE FIBROCIMENTO

Dando continuidade à discussão dos resultados da simulação computacional, no presente tópico serão discutidos os resultados das cargas térmicas de resfriamento (CgTR) e cargas térmicas de aquecimento (CgTA) obtidas para cada um dos sete modelos de cobertura com telha fibrocimento, conforme, visto anteriormente, na Tabela 6.

Inicialmente, plotou-se os valores de CgTR para cada tipo de cobertura do grupo de telhas fibrocimento, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com telha fibrocimento



TF: Telha Fibrocimento; **TF_G:** Telha Fibrocimento e Forro de Gesso; **TF_P:** Telha Fibrocimento e Forro de PVC; **TF_M:** Telha Fibrocimento e Forro de Madeira; **TF_L_G:** Telha Fibrocimento, Laje de Concreto e Forro de Gesso; **TF_L_P:** Telha Fibrocimento, Laje de Concreto e Forro de PVC; **TF_L_M:** Telha Fibrocimento, Laje de Concreto e Forro de Madeira.

Fonte: Autora

Na Figura 19, nota-se, como visto anteriormente na Figura 15, a relação entre a CgTR e as camadas dos modelos de cobertura. A carga térmica de resfriamento é inversamente proporcional e seus valores diminuem com o aumento das camadas.

As coberturas apresentam um desempenho melhor quando possuem forro de madeira, visto que nas camadas com telha e forro e telha, laje e forro, o forro de madeira apresenta como o menor dos três tipos, em ambos os casos, $CgTR=0,048$ e $CgTR=0,035$. Contudo, os valores se diferenciam na ordem de $1,0$ a $2,0 \times 10^{-3}$ kWh.

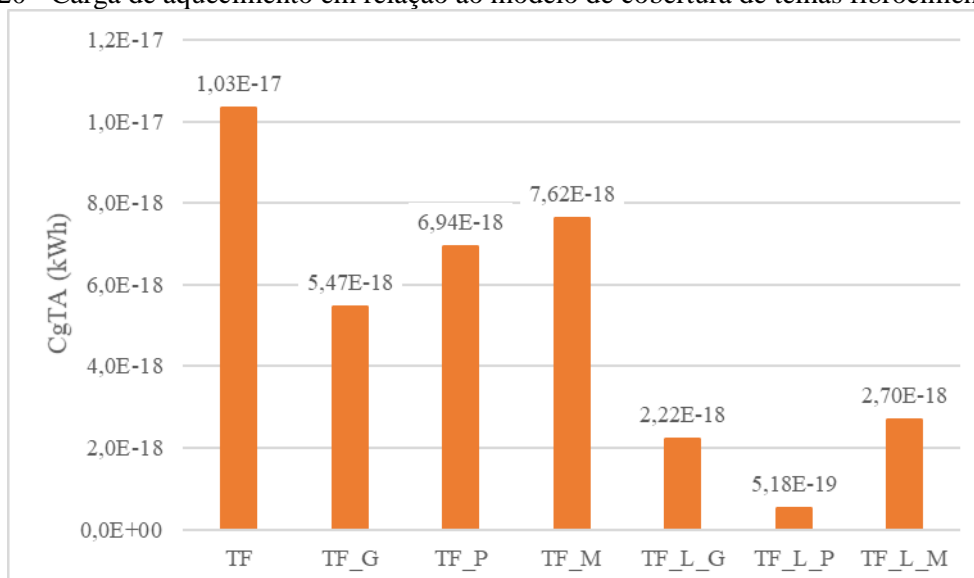
A diferença entre a telha aparente para o modelo com telha e forro, decresce a carga térmica em quase 40%. Já em relação ao modelo com laje e forro, tem-se uma diferença de quase 0% de CgTR. Entre o modelo de telha e forro para o de três camadas, o decréscimo é de 30% de CgTR.

Observa-se que a cobertura com apenas a telha fibrocimento possui o maior valor de carga térmica, tornando-se a de menor desempenho térmico dentre as coberturas do grupo. Bem como, a inserção da laje na cobertura torna o modelo com melhor desempenho térmico, diferenciando-se apenas pelo material do forro, assim como visto, anteriormente, no grupo cerâmico.

Cabe ressaltar que os valores da carga de aquecimento foram tão pequenos, que não se tornaram significativos comparados com os valores da carga térmica de resfriamento,

sendo assim, não foi possível correlacioná-los em um único gráfico. Então, plotou-se um gráfico individual, representado pela Figura 20.

Figura 20 - Carga de aquecimento em relação ao modelo de cobertura de telhas fibrocimento



TF: Telha Fibrocimento; **TF_G:** Telha Fibrocimento e Forro de Gesso; **TF_P:** Telha Fibrocimento e Forro de PVC; **TF_M:** Telha Fibrocimento e Forro de Madeira; **TF_L_G:** Telha Fibrocimento, Laje de Concreto e Forro de Gesso; **TF_L_P:** Telha Fibrocimento, Laje de Concreto e Forro de PVC; **TF_L_M:** Telha Fibrocimento, Laje de Concreto e Forro de Madeira.

Fonte: Autora

A apresentação dos resultados será apenas expositiva, uma vez que devido às características da zona bioclimática em que está inserida o município de Barreiras, os valores de CgTA não são significativos.

Calculou-se a transmitância para cada modelo de cobertura do grupo fibrocimento, sendo representados pela Tabela 10.

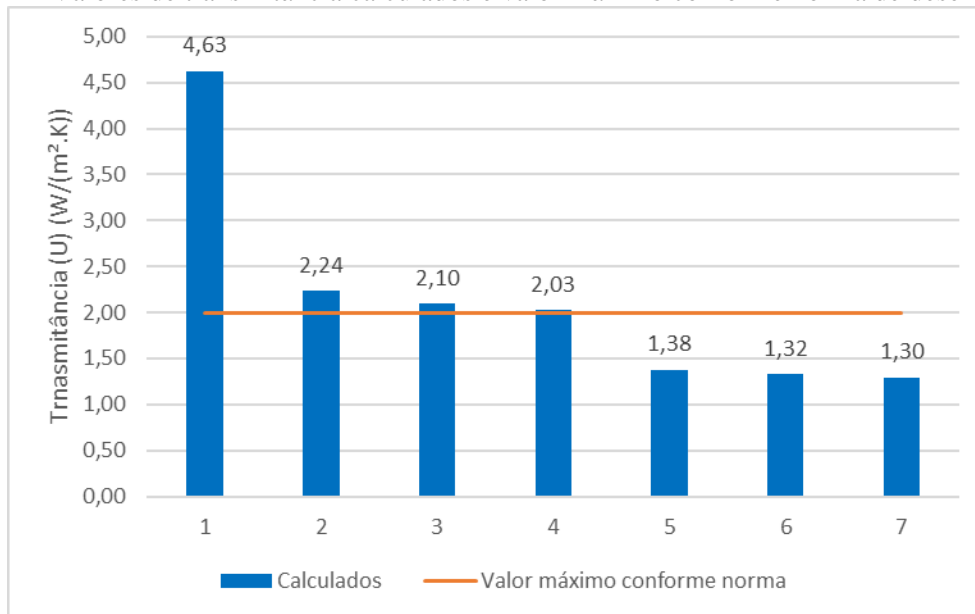
Tabela 10 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo fibrocimento

	Cobertura	U (W/(m ² .K))
1	TF	4,63
2	TF_G	2,24
3	TF_P	2,10
4	TF_M	2,03
5	TF_L_G	1,38
6	TF_L_P	1,32
7	TF_L_M	1,30

Fonte: Autora

Plotou-se então o gráfico com os valores de transmitância calculados e os valores máximos permitidos pela norma de desempenho.

Figura 21 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho

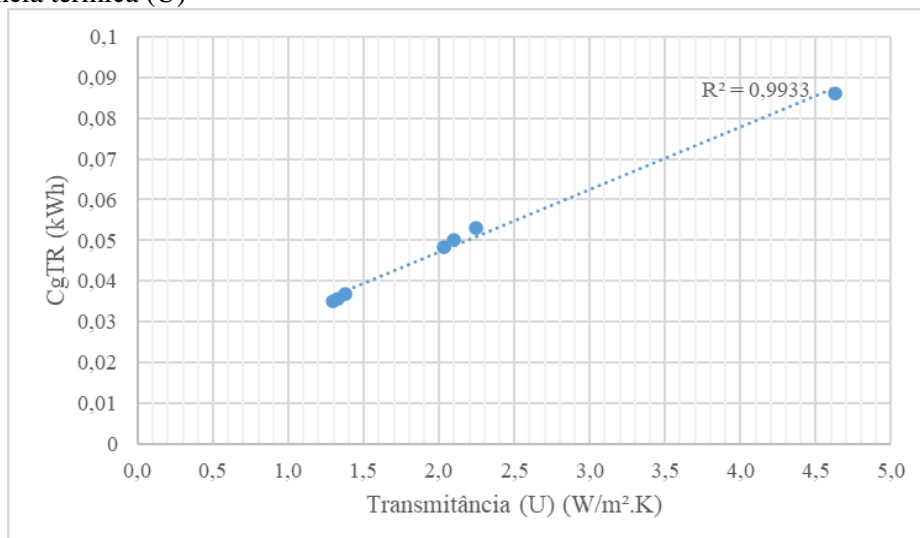


Fonte: Autora

Pela NBR 15220 (ABNT, 2005), para a zona bioclimática 7, a transmitância das coberturas (U) deve ser menor ou igual a 2 W/(m².K). Logo, a partir da Tabela 10, podemos perceber que as coberturas que atendem aos critérios da norma de desempenho são as coberturas 5, 6 e 7, conforme Figura 21.

Com o intuito de relacionar os valores de carga térmica de resfriamento (CgTR) com a transmitância térmica (U) dos mesmos, plotou-se um gráfico, representado na Figura 22.

Figura 22 - CgTR média para cada tipo de cobertura do grupo fibrocimento em função da transmitância térmica (U)



Fonte: Autora

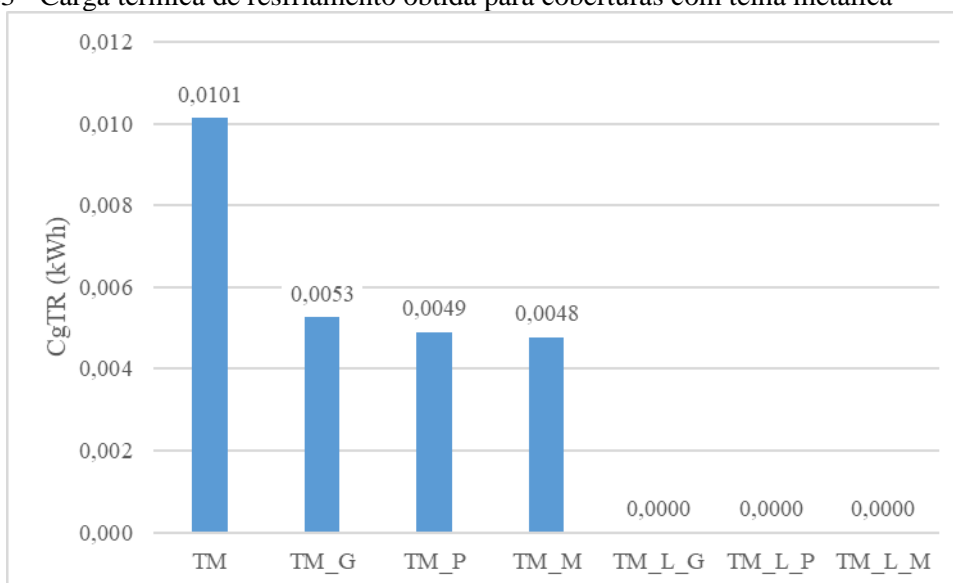
Tem-se uma correlação entre os dados obtidos, a partir do R^2 igual a 0,9933, podendo traçar uma linha de tendência entre os valores. Observa-se que a relação obtida é estatisticamente significativa, uma vez que apresenta coeficiente de correlação linear (R) maior que 0,99. Ademais, é possível concluir que, neste caso, as variáveis são diretamente proporcionais. Sendo assim, quanto maior o número de camadas da cobertura, mais isolante se torna a cobertura e menos calor é conduzido pelas camadas.

4.3 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE TELHAS DE METÁLICAS

Prosseguindo com os resultados das simulações, tem-se o grupo de telhas metálicas. Serão discutidos os resultados das cargas térmicas de resfriamento (CgTR) e cargas térmicas de aquecimento (CgTA) obtidas para cada um dos sete modelos de cobertura com telha metálica, conforme, visto anteriormente, na Tabela 6.

Inicialmente, plotou-se os valores de CgTR para cada tipo de cobertura do grupo de telhas metálica, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com telha metálica



TM: Telha Metálica; **TM_G:** Telha Metálica e Forro de Gesso; **TM_P:** Telha Metálica e Forro de PVC; **TM_M:** Telha Metálica e Forro de Madeira; **TM_L_G:** Telha Metálica, Laje de Concreto e Forro de Gesso; **TM_L_P:** Telha Metálica, Laje de Concreto e Forro de PVC; **TM_L_M:** Telha Metálica, Laje de Concreto e Forro de Madeira.

Fonte: Autora

Observa-se, primeiramente, que o padrão de resultados, visto nos grupos cerâmico e fibrocimento, não foi seguido. Ou seja, houveram valores nulos para as cargas térmicas de resfriamento (CgTR) para os modelos com três camadas (telha, laje e forro). Uma vez que não foram encontradas literaturas que explicassem o motivo de se obter valores nulos para cargas térmicas, deduz-se que devido à composição da cobertura, metal de baixa

emissividade adicionado às outras camadas que diminuem a carga térmica, obteve-se o conforto térmico com a solução e não foi preciso a retirada de energia (carga térmica) para o resfriamento do ambiente.

Nota-se que a cobertura com apenas a telha metálica possui o maior valor de carga térmica, tornando-se a de menor desempenho térmico dentre as coberturas do grupo. Bem como, a inserção de mais uma camada, no caso o forro, na cobertura diminui a carga térmica da cobertura, melhorando o seu desempenho térmico.

A diferença entre a telha aparente para o modelo com telha e forro, decresce a carga térmica em quase 50%. Já em relação ao modelo com laje e forro e modelo de telha e forro para o de três camadas, tem-se uma diferença de 100% de C_{gTR} , visto que os valores dos modelos com três camadas são nulos.

As coberturas apresentam um desempenho melhor quando possuem forro de madeira, visto que na camada com telha e forro, o forro de madeira apresenta como o menor dos três tipos, com $C_{gTR}=0,0048$. Contudo, os valores se diferenciam na ordem de 1,0 a $5,0 \times 10^{-4}$ kWh.

Os valores da carga de aquecimento foram todos nulos, portanto, não houve gráfico para plotar. Visto que os valores da C_{gTR} já foram extremamente baixos, era esperado obter este resultado.

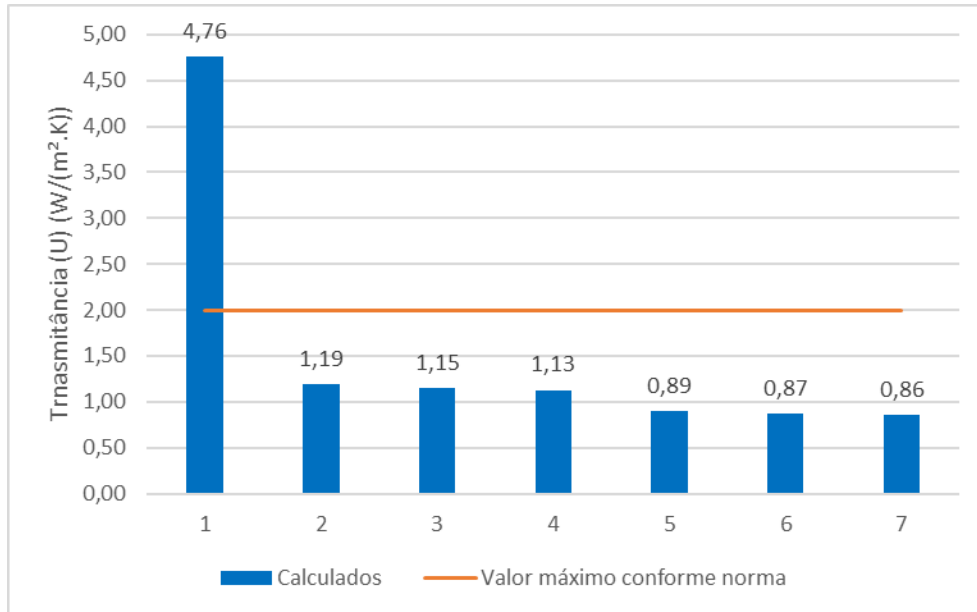
Tabela 11 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo de telhas metálicas

	Cobertura	U (W/(m².K))
1	TM	4,76
2	TM_G	1,19
3	TM_P	1,14
4	TM_M	1,12
5	TM_L_G	0,89
6	TM_L_P	0,87
7	TM_L_M	0,86

Fonte: Autora

Plotou-se então o gráfico com os valores de transmitância calculados e os valores máximos permitidos pela norma de desempenho.

Figura 24 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho

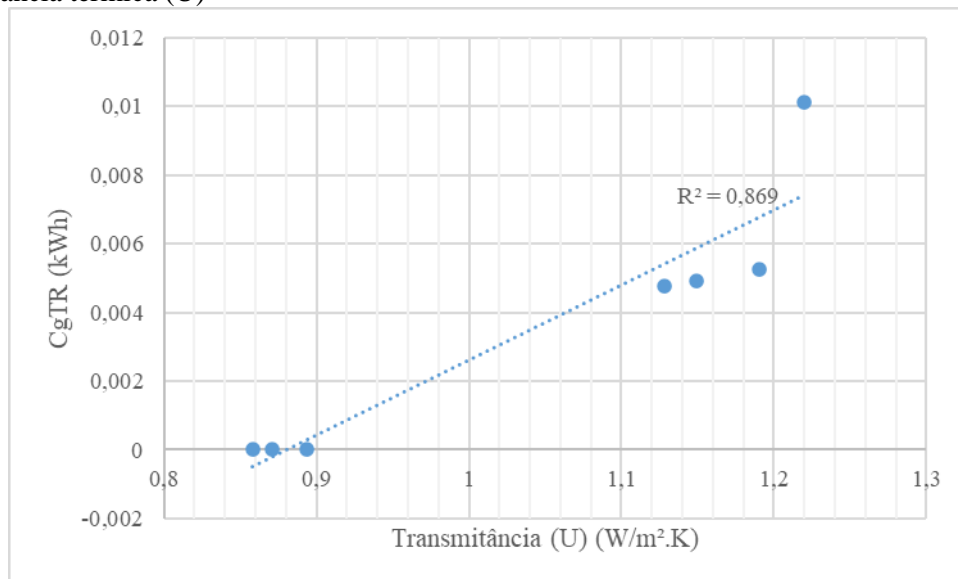


Fonte: Autora

Pela NBR 15220 (ABNT, 2005), para a zona bioclimática 7, a transmitância das coberturas (U) deve ser menor ou igual a 2 W/(m².K). Logo, a partir da Tabela 10, podemos perceber que única cobertura que não atende aos critérios da norma de desempenho é a 1, telha metálica aparente, conforme Figura 24.

Com o intuito de relacionar os valores de carga térmica de resfriamento (CgTR) com a transmitância térmica (U) dos mesmos, plotou-se um gráfico, representado na Figura 25.

Figura 25 - CgTR média para cada tipo de cobertura do grupo de telhas metálicas em função da transmitância térmica (U)



Fonte: Autora

Tem-se uma correlação entre os dados obtidos, a partir do R^2 igual a 0,869, podendo traçar uma linha de tendência entre os valores. Observa-se que a relação obtida é estatisticamente boa, uma vez que apresenta coeficiente de correlação linear (R) igual a 0,93. Ademais, é possível concluir que, neste caso, as variáveis são diretamente proporcionais, quanto maior o número de camadas da cobertura, mais isolante se torna a cobertura e menos calor é conduzido pelas camadas. E, neste caso, não há diferença de desempenho térmico entre o grupo com três camadas (telha, laje e forro), visto que os três se apresentaram nulos para a carga térmica de resfriamento.

4.4 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE ISOTELHAS

A isotelha é conhecida, popularmente, como telha sanduíche, em que é composta por duas camadas de metal e, entre essas duas camadas, um isolante térmico com maior espessura, o que proporciona melhor conforto térmico.

Em relação ao grupo de isotelhas, obteve-se apenas valores nulos para carga térmica de resfriamento (CgTR) e aquecimento (CgTA). Como não foi encontrada nenhuma literatura que explicasse os valores nulos de carga térmica na simulação, pode-se deduzir que devido à composição dos materiais da isotelha, metal de baixa emissividade e isolante térmico com maior espessura, proporcionaram bons valores de conforto térmico a ponto de não necessitar de energia para ser retirada do ambiente.

Portanto, apresenta-se apenas os valores de transmitância calculados, representados pela Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura do grupo de isotelhas

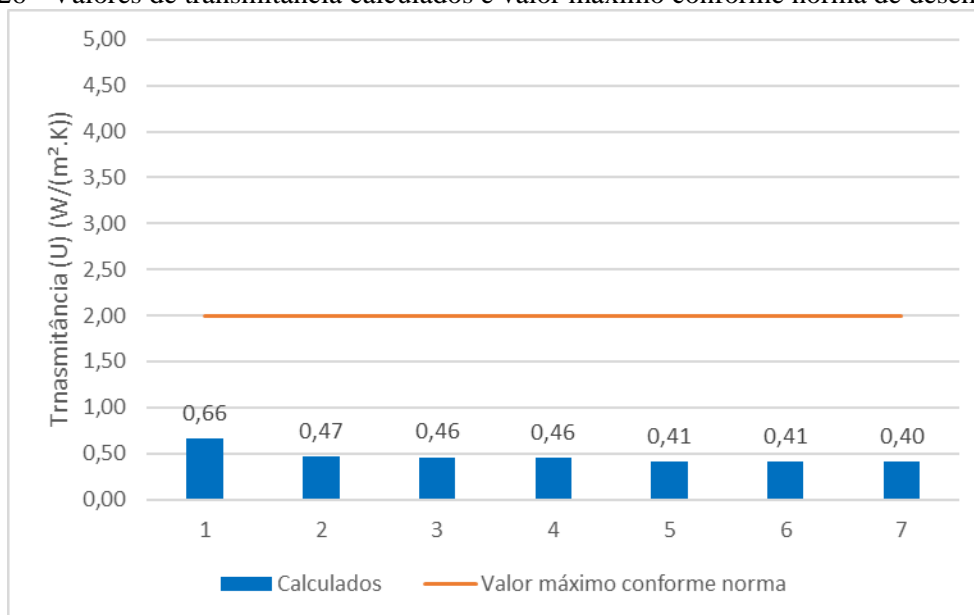
	Cobertura	U (W/(m².K))
1	IT	0,66
2	IT_G	0,47
3	IT_P	0,46
4	IT_M	0,46
5	IT_L_G	0,41
6	IT_L_P	0,41
7	IT_L_M	0,41

IT: Isotelha; **IT_G:** Isotelha e Forro de Gesso; **IT_P:** Isotelha e Forro de PVC; **IT_M:** Isotelha e Forro de Madeira; **IT_L_G:** Isotelha, Laje de Concreto e Forro de Gesso; **IT_L_P:** Isotelha, Laje de Concreto e Forro de PVC; **IT_L_M:** Isotelha, Laje de Concreto e Forro de Madeira.

Fonte: Autora

Plotou-se então o gráfico com os valores de transmitância calculados e os valores máximos permitidos pela norma de desempenho.

Figura 26 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho



Fonte: Autora

Pela NBR 15220/2005, para a zona bioclimática 7, a transmitância das coberturas (U) deve ser menor ou igual a 2 W/(m².K). Logo, a partir da Figura 26, podemos perceber que as todas as coberturas atendem aos critérios da norma de desempenho.

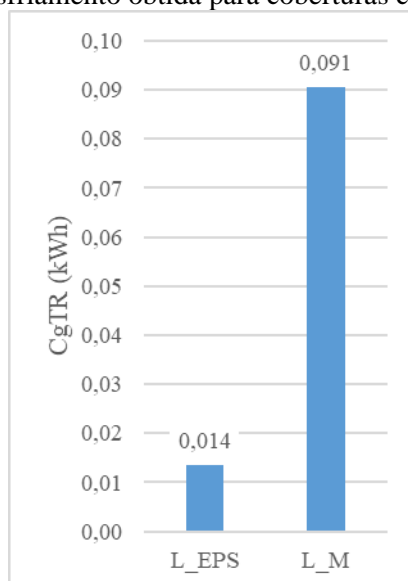
Por não apresentar valores de carga térmica de resfriamento e por atender aos critérios normativos da norma de desempenho, pode-se afirmar que os modelos de cobertura com isotelhas são os que apresentam melhor desempenho térmico, dentre os vistos até aqui, para as condições climáticas estudadas.

4.5 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES DO GRUPO DE LAJE APARENTE

Dando continuidade à discussão dos resultados da simulação computacional, no presente tópico serão discutidos os resultados das cargas térmicas de resfriamento (CgTR) e cargas térmicas de aquecimento (CgTA) obtidas para os dois modelos de cobertura com laje aparente, conforme, visto anteriormente, na Tabela 6.

Inicialmente, plotou-se os valores de CgTR para a laje maciça e com EPS, conforme a Figura 27.

Figura 27 - Carga térmica de resfriamento obtida para coberturas com laje aparente

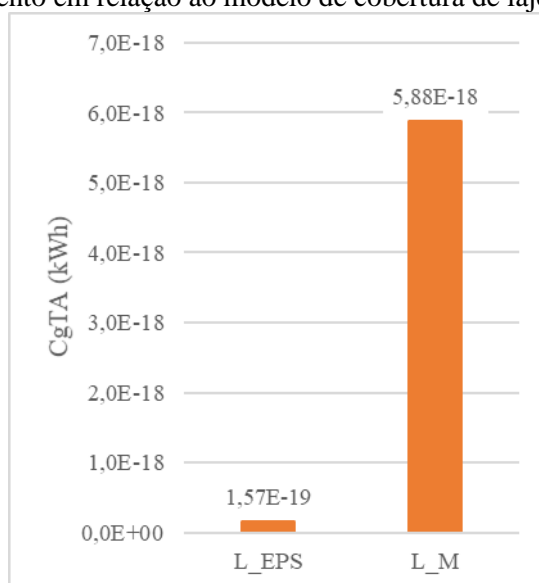


L_EPS: Laje de Concreto com EPS; **L_M:** Laje de Concreto Maciça.
Fonte: Autora

A cobertura de laje aparente com EPS apresenta um desempenho melhor do que a laje maciça, visto pela diferença entre a carga térmica das duas, sendo igual a $7,7 \times 10^{-2}$ kWh. A presença do EPS traz uma grande queda na CgTR, melhorando o seu desempenho térmico.

Os valores da carga de aquecimento foram tão pequenos, que não se tornaram significativos comparados com os valores da carga térmica de resfriamento, sendo assim, não foi possível correlacioná-los em um único gráfico. Então, plotou-se um gráfico individual, representado pela Figura 28.

Figura 28 - Carga de aquecimento em relação ao modelo de cobertura de lajes aparentes



L_EPS: Laje de Concreto com EPS; **L_M:** Laje de Concreto Maciça.
Fonte: Autora

A apresentação dos resultados será apenas expositiva, uma vez que devido às características da zona bioclimática em que está inserida o município de Barreiras, os valores de CgTA não são significativos.

Calculou-se a transmitância para cada modelo de cobertura do grupo fibrocimento, sendo representados pela Tabela 13.

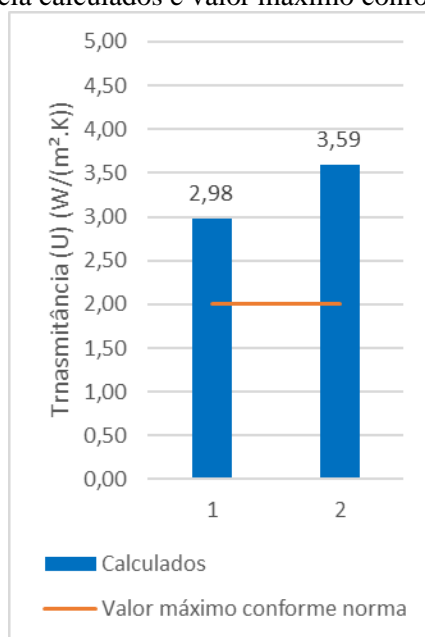
Tabela 13 - Valores de transmitância térmica (U) para cada tipo de cobertura com laje aparente

Cobertura		U (W/(m ² .K))
1	L_EPS	2,98
2	L_M	3,59

Fonte: Autora

Plotou-se então o gráfico com os valores de transmitância calculados e os valores máximos permitidos pela norma de desempenho.

Figura 29 - Valores de transmitância calculados e valor máximo conforme norma de desempenho



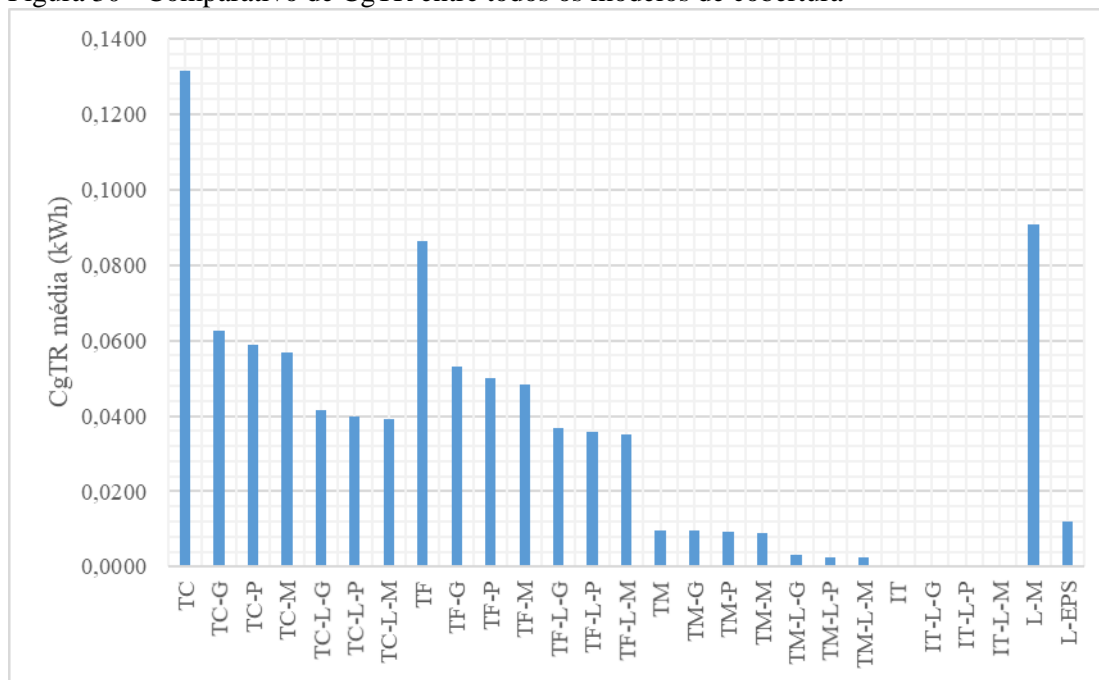
Fonte: Autora

Pela NBR 15220 (ABNT, 2005), para a zona bioclimática 7, a transmitância das coberturas (U) deve ser menor ou igual a 2 W/(m².K). Logo, a partir da Figura 29, podemos perceber que nenhuma das coberturas atendem aos critérios da norma de desempenho.

4.6 COMPARATIVO DE CARGAS TÉRMICAS ENTRE OS GRUPOS DE COBERTURAS

Com o intuito de analisar de forma geral os resultados de todas as coberturas verificadas na simulação computacional, plotou-se o gráfico representado pela Figura 30.

Figura 30 - Comparativo de CgTR entre todos os modelos de cobertura



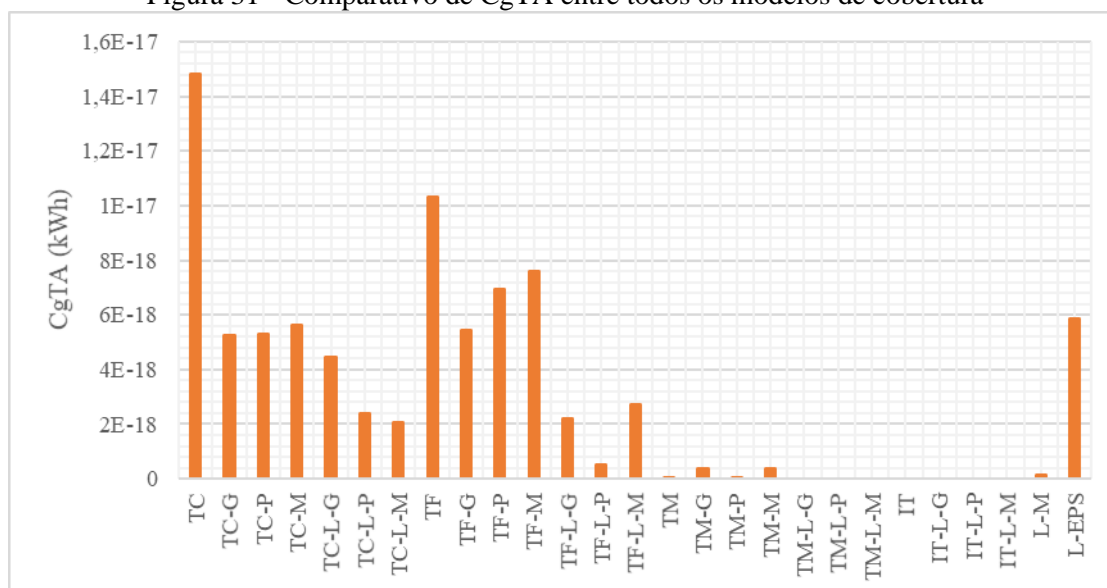
Fonte: Autora

Sendo os modelos com apenas uma camada na cobertura, nota-se que a telha cerâmica possui maior valor de CgTR em relação aos demais, sendo esta a de menor desempenho térmico dentre os modelos, uma vez que é necessário retirar maior quantidade de energia para garantir o conforto térmico no ambiente.

Os valores de carga térmica da telha metálica e da isotelha foram os mais baixos comparados aos outros modelos e explica-se a partir do baixo valor de emissividade do material da superfície, tornando-as as coberturas com melhor desempenho térmico para a região bioclimática estudada, levando em consideração apenas a CgTR. Considerando que as propriedades da cerâmica e fibrocimento, possuem maior valor de emissividade à radiação e baixa condutividade térmica. A laje maciça possui elevada CgTR, sendo um pouco maior do que a telha de fibrocimento, além disso, a inserção de EPS na laje melhora significativamente sua carga térmica.

Em relação aos valores de CgTA de todos os modelos de cobertura, tem-se o gráfico representado pela Figura 31.

Figura 31 - Comparativo de CgTA entre todos os modelos de cobertura



Fonte: Autora

Devido às condições da zona bioclimática 7, os valores de carga térmica de aquecimento são poucos significativos, uma vez que estão da ordem de 10^{-17} kWh. Ademais, pode-se notar que a cobertura TC apresenta maior CgTA e tem decréscimo significativo quando acrescentadas as camadas de laje e forro.

O grupo das telhas fibrocimento também possuem um dos maiores valores de CgTA, contudo, não há decréscimo tão significativo na carga térmica, como no grupo cerâmico, ao inserir a camada de forro.

Tabela 14 - Comparativo entre os valores de transmitância térmica (U) entre todos os modelos de cobertura simulados

Transmitância (U) W/m ² .K						
	Cerâmica	Fibrocimento	Metálica	Isotelha	Laje Maciça	Laje EPS
1	4,46	4,63	4,76	0,66	3,59	2,98
2	2,20	2,24	1,19	0,47		
3	2,06	2,10	1,15	0,46		
4	2,00	2,03	1,13	0,46		
5	1,36	1,38	0,89	0,41		
6	1,31	1,32	0,87	0,41		
7	1,28	1,30	0,86	0,40		

Fonte: Autora

A partir da Tabela 14, nota-se que para a telha aparente, somente as isotelhas são ideais a serem utilizadas, pois o valor de transmitância atende à norma de desempenho. Comumente, são utilizadas telhas cerâmicas aparentes nas residências, contudo, pode-se

perceber que a mesma proporciona baixo conforto térmico e apresentou pior desempenho diante dos outros tipos de cobertura. Tem-se, também, um receio de utilizar telhas metálicas nas edificações, porém percebe-se que, utilizando material de baixa emissividade, obtêm-se valores de transmitância e carga térmica de resfriamento melhores que outros materiais, como cerâmica e fibrocimento.

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste tópico será analisada a influência do tipo de material na carga térmica por resfriamento nos modelos de simulação e condições climáticas do município em estudo. Recorreu-se a análise de variância (ANOVA) para avaliar a influência significativa dos resultados e o Teste de Tukey como determinante na diferença estatística entre as médias das variáveis.

4.7.1 ANOVA – Tipo de Material e Modelo de Simulação

Para a análise estatística considerou-se os dados da Tabela 13, analisando os modelos de simulação, tipo de material e a carga térmica de resfriamento de cada um. Ressalta-se que não foi possível analisar a influência do grupo de isotelhas, uma vez que as cargas térmicas resultantes foram nulas.

Tabela 15 - Resumo dos parâmetros utilizados para a análise estatística

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Telha	3	0,227257744	0,07575	0,00378
Telha + Forro de Gesso	3	0,125524483	0,04184	0,00079
Telha + Forro de PVC	3	0,118203016	0,0394	0,0007
Telha + Forro de Madeira	3	0,114316361	0,03811	0,00065
Telha + Laje + Forro de Gesso	3	0,081634521	0,02721	0,00043
Telha + Laje + Forro de PVC	3	0,078239835	0,02608	0,00042
Telha + Laje + Forro de Madeira	3	0,07669261	0,02556	0,00041
Cerâmica	7	0,4301948	0,06146	0,00105
Fibrocimento	7	0,345639212	0,04938	0,00032
Metálica	7	0,046034556	0,00658	1,3E-05

Fonte: Autora

Como resultado, tem-se a Tabela 14. Para ter influência das variáveis de forma significativa, o valor de P tem que ser menor que 0,05 e o valor de F tem que ser maior que o F crítico.

Tabela 16 – Resultado da ANOVA considerando fator múltiplo sem repetição

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Linhas	0,005538221	6	0,00092	4,05441	0,01876	2,99612
Colunas	0,011642461	2	0,00582	25,5696	4,7E-05	3,88529

Erro	0,002731946	12	0,00023
Total	0,019912629	20	

SQ: Soma dos quadrados; gl: Graus de Liberdade; MQ: Média Quadrática; F: Fisher; valor-P: Probabilidade.

Fonte: Autora

Logo, há diferença significativa dos modelos e materiais utilizados, visto que $F > F$ crítico para a carga térmica de resfriamento. Pelo valor de P, todos são menores que 0,05 e confirma-se a diferença significativa entre eles. Contudo, não é possível afirmar como as variáveis se diferem e faz-se necessário o Teste de Tukey para avaliação.

4.7.2 Teste de Tukey – Tipo de Material e Modelo de Simulação

Para o Teste de Tukey, considerou-se dois casos: significância entre os materiais e entre os modelos utilizados. Para o primeiro caso, tem-se a Tabela 15 representando a relação entre as variáveis material e CgTR.

Tabela 17 - Teste de Tukey em relação às variáveis material e módulo de CgTR média

Materiais	Módulo de CgTR média (kWh)
Cerâmica - Fibrocimento	0,012079
Cerâmica - Metálica	0,054880
Fibrocimento - Metálica	0,042801

Fonte: Autora

Como calculado, o DMS (diferença mínima significativa) foi igual a 0,07469. Para que haja diferença significativa, o módulo da média tem que ser menor que este valor. Portanto, podemos concluir que há diferença significativa entre os materiais de cobertura a partir da carga térmica de resfriamento.

É possível perceber que o módulo de CgTR média entre os materiais cerâmico e metálico possui maior valor, permitindo concluir que, dentre os tipos de materiais, são os que mais se diferem em termos de carga térmica de resfriamento. A diferença entre os materiais cerâmicos e fibrocimento é o mais baixo na comparação dos três materiais e confirma-se pelos valores próximos que apresentaram na simulação computacional.

No que tange o segundo caso, apresenta-se a Tabela 16, evidenciando a relação entre os modelos de cobertura diante do módulo de CgTR média.

Tabela 18 - Teste de Tukey em relação aos modelos de cobertura e módulo de CgTR média

Modelos	Módulo de CgTR média (kWh)
1 Telha - Telha + Forro de Gesso	0,033911

2	Telha - Telha + Forro de PVC	0,036352
3	Telha - Telha + Forro de Madeira	0,037647
4	Telha - Telha + Laje + Forro de Gesso	0,048541
5	Telha - Telha + Laje + Forro de PVC	0,049673
6	Telha - Telha + Laje + Forro de Madeira	0,050188
7	Telha + Forro de Gesso - Telha + Forro de PVC	0,002440
8	Telha + Forro de Gesso - Telha + Forro de Madeira	0,003736
9	Telha + Forro de Gesso - Telha + Laje + Forro de Gesso	0,014630
10	Telha + Forro de Gesso - Telha + Laje + Forro de PVC	0,015762
11	Telha + Forro de Gesso - Telha + Laje + Forro de Madeira	0,016277
12	Telha + Forro de PVC - Telha + Forro de Madeira	0,001296
13	Telha + Forro de PVC - Telha + Laje + Forro de Gesso	0,012189
14	Telha + Forro de PVC - Telha + Laje + Forro de PVC	0,013321
15	Telha + Forro de PVC - Telha + Laje + Forro de Madeira	0,013837
16	Telha + Forro de Madeira - Telha + Laje + Forro de Gesso	0,010894
17	Telha + Forro de Madeira - Telha + Laje + Forro de PVC	0,012026
18	Telha + Forro de Madeira - Telha + Laje + Forro de Madeira	0,012541
19	Telha + Laje + Forro de Gesso - Telha + Laje + Forro de PVC	0,001132
20	Telha + Laje + Forro de Gesso - Telha + Laje + Forro de Madeira	0,001647
21	Telha + Laje + Forro de PVC - Telha + Laje + Forro de Madeira	0,000516

Fonte: Autora

O valor de DMS para esta situação foi igual a 0,05688, sendo assim, os valores de CgTR médios devem ser menores ao da diferença mínima significativa. Observa-se pelo Teste de Tukey que há diferença significativa entre as médias de todos os modelos de cobertura.

Pela Tabela 16, nota-se a análise combinatória entre os modelos e valores de módulo de CgTR média. Comparando os modelos, é visível o baixo valor de módulo de CgTR média para os modelos que possuem o mesmo número de camadas, enquanto o modelos de camadas diferentes possuem maior módulo de CgTR média. Desse modo, existe uma relação de proporcionalidade entre o número de camadas e a CgTR.

Portanto, a partir da análise estatística realizada, conclui-se que dentre as variáveis de composição da cobertura, materiais e modelos de simulação, ambas apresentaram influência significativa em todas as coberturas analisadas, sendo que, pela análise das médias, o material metálico possui maior diferença significativa quando comparado com os materiais cerâmico e fibrocimento. Além disso, o número de camadas influencia diretamente na carga térmica de resfriamento.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho térmico, através da simulação computacional, de modelos de cobertura quando submetidos às condições

climáticas do município de Barreiras-BA, a partir das cargas térmicas de resfriamento. Portanto, escolheu-se cinco materiais diferentes para coberturas, mais utilizados na cidade em questão, e sete modelos de cobertura para cada material, a fim de realizar a simulação computacional. As principais conclusões obtidas neste trabalho são apresentadas abaixo.

- A cobertura com apenas telha cerâmica apresenta o maior valor de CgTR dentre todas as estudadas;
- O aumento das camadas nos modelos de cobertura influencia diretamente na queda de CgTR;
- Os modelos que possuíam forro de madeira apresentaram menor CgTR quando comparado aos modelos com forros de gesso e PVC;
- No grupo da telha cerâmica, os modelos que atenderam à norma de desempenho NBR 15220/2005, em relação à transmitância térmica, foram telha cerâmica com forro de madeira e telha cerâmica com laje e forro (independente do material do forro);
- No grupo da telha fibrocimento, os modelos que atenderam à norma de desempenho NBR 15220/2005, em relação à transmitância térmica, foram telha fibrocimento com laje e forro (independente do material do forro);
- No grupo da telha metálica, os modelos que atenderam à norma de desempenho NBR 15220/2005, em relação à transmitância térmica, foram telha metálica com forro (independente do material do forro) e telha metálica com laje e forro (independente do material do forro);
- Os modelos que possuem três camadas, telha, laje e forro, no grupo da telha metálica, apresentaram CgTR nulos;
- A isotelha apresentou valores nulos de CgTR para todos os sete modelos de cobertura e todos atenderam ao critério de transmitância térmica pela norma de desempenho NBR 15220/2005;
- A cobertura de laje aparente com EPS apresenta menor valor de CgTR, em relação à laje maciça;

- Nenhum dos dois modelos de cobertura com laje aparente não atendem aos critérios da norma de desempenho NBR 15220/2005 para os valores de transmitância térmica;
- Os valores de C_{gTA} foram insignificantes, ao comparados com os valores de C_{gTR} , em todos os modelos de cobertura;
- O desempenho térmico medido pela C_{gTR} mostrou-se diretamente proporcional à transmitância térmica, diante dos modelos de coberturas (com exceção das lajes aparentes) e condições climáticas adotadas, visto que quanto menor os valores de transmitância, menor as cargas térmicas e, portanto, melhor desempenho térmico;

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das conclusões obtidas no presente trabalho, sugere-se as seguintes pesquisas, a fim de complementar às pesquisas realizadas:

- Analisar a influência de outros parâmetros, como orientação solar, para uma edificação, a partir das condições climáticas do município estudado no presente trabalho;
- Acrescentar materiais isolantes que melhorem o desempenho térmico das coberturas que não atenderam à norma de desempenho;
- Simular uma edificação completa considerando a existência de troca de calor entre as pessoas e os ambientes, com o intuito de haver equivalência com o modelo real;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1 Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: p. 60, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1. Desempenho Térmico de Edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: p. 8. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3. Desempenho Térmico de Edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: p. 8. 2005.

ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. **Ashrae**, v. 2004, p. 30, 2004.

ALMEIDA, Raiza Peres de. **Análise do desempenho térmico de sistemas de vedação e cobertura de uma edificação empregando o software EnergyPlus**. Monografia (Em Engenharia Civil) – Instituto Federal Goiano. Campus Rio Verde, 2020.

ARAÚJO, H. F. DE. **Desempenho térmico de paredes: uma análise de parâmetros térmicos, custos/m² e custo-benefício no município de Barreiras-BA**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, 2018.

BALVEDI, Nádia Maria Welin. **Influência da tipologia de cobertura verde no desempenho termoenergético de edificações e no seu entorno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2020.

BARBOSA, Sabrina Andrade *et al.* **Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas**. Ambiente

Construído [online]. 2013, v. 13, n. 4 [Acessado 19 Junho 2022] , pp. 121-134. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000400009>>.

BOGO, A. *et al.* **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA E DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT 15575/2013.** Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

CARVALHO, P. P.. **Desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social com paredes de concreto armado na zona bioclimática 2 brasileira.** 108f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Santa Maria - RS, 2012.

Conforto Térmico. LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Disponível em: < <https://labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/conforto-termico>>. Acesso em 10 de junho de 2022.

DIAS, Adriano Ethur. **O desempenho térmico de uma cobertura verde em simulações computacionais em três cidades brasileiras.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 192 p. 2016.

DIAS, Alexandra da Silva. **Avaliação do desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em edificações estruturadas em aço.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2013.

DORNELLES, K.. **Estudos de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos,SP.** 148f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, São Carlos, 2004.

FELICE JÚNIOR, Jair Alberto. **O uso de estratégias bioclimáticas para benefício do conforto térmico e economia energética das edificações.** Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2015.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R.. **Manual de conforto térmico.** 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B & MILNE, M. *Architectural Design Based on Climate, Energy Conservation Through Buildings Design*, edited by Donald Watson, MacGraw Hill Book Company, 1979.

GIVONI, B. **Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines.** Energy and Buildings, v.18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GONZALEZ, E.; HINZ, E.; OTEIZA, P. de; QUIROS, C. **Proyecto Clima y Arquitectura.** Mexico Ediciones G.Gili, S.A. de C.V., V.1, 1986.

KAPPAUN, K.. **Avaliação do Desempenho Térmico em Edificações de Blocos Estruturais Cerâmicos e de Blocos Estruturais de Concreto para a Zona Bioclimática 2 Brasileira.** 125f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Santa Maria, RS, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R.. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 7.ed. p. 1- 382, 2004.

LAMBERTS, R. et al. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico.** Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010b. v. 1

LAMBERTS, R. *et al.*. **Conforto e Stress térmico.** Laboratório de eficiência energética em edificações, 2011.

LAMBERTS, R. *et al.*. **Desempenho térmico de edificações**. 239f. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Florianópolis, 7ed, 2016.

LI, Xiwang; WEN, Jin. *Review of building energy modeling for control and operation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 37, p. 517-537, 2014.

LIMA, T.. **Análise de Desempenho Térmico de Edificações Habitacionais : desenvolvimento de interface BIM para avaliações automatizadas segundo as normas ABNT NBR 15575 e ABNT NBR 15220**. 86f. Trabalho Final de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2014.

MARQUES, T. H. T.; CHVATAL, K. M. S. A review of the Brazilian NBR 15575 Standard: Applying the simulation and simplified methods for evaluating a social house thermal performance. **Simulation Series**, v. 45, n. 8, p. 94–101, 2013.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. E. R. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**. 2. ed. Porto Alegre: [s.n.].

MATTOS, T.. **Análise do desempenho térmico de habitações populares da microrregião de Guaratinguetá-SP**. 72f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2015.

MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; MATOS, M. **Apostila do curso básico do programa EnergyPlus**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. LabEEEE/UFSC. Florianópolis, 2009.

MENDES, N. *et al.* Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 5, n. 4, p. 47–68, 2005.

MICHELS, Caren. **Avaliação Experimental do Desempenho Térmico de Coberturas**. 240 p. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

OLGYAY, V. *Design with Climate*. Princeton University Press, New Jersey, 1963.

OLGYAY, V. *Clima y Arquitectura en Colombia*. Universidad del Valle. Facultad de Arquitectura. Cali, Colombia, 1968.

RYAN, Emily M.; SANQUIST, Thomas F. **Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions**. *Energy and Buildings*, v. 47, p. 375-382, 2012.

SANTOS, Lara Monalisa Alves dos. **Metodologia de avaliação de sistemas de coberturas para edifícios comerciais: Escritórios**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2019.

SILVA, Breno Henrique Protásio da. **Simulação do comportamento térmico de paredes para as condições climáticas do município de Barreiras, Bahia**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, 2021.

SILVA, Josafá de Lima. **Análise do desempenho térmico de sistemas de cobertura em projeto habitacional**. Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2018.

SIQUEIRA, T. C. P. A. et al. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações Engenharia Civil**. v. 58, n. 2, p. 133–138, 2005.

SZOKOLAY, S. V. **Thermal Design of Buildings**. RAI Education Division 2a Mugga Way Red Hill ACT 2603, Austrália, 1987.

ZANELLA, Rafael Vinicius. **Análise da influência do tipo de telha no desempenho térmico da edificação utilizando simulação computacional**. Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2019.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília.** Brasília: Universidade de Brasília, 2015.

ANEXO A

PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

ANEXO A – Propriedades térmicas dos materiais do sistema de cobertura para simulação

Material	Espessura (m)	Calor específico c (kJ/kg.K)	Condutividade λ (W/m.°C)	Densidade ρ (kg/m ³)
Telha Cerâmica	0,01	0,92	0,7	1200
Telha Fibrocimento	0,004	0,84	0,65	1700
Telha Metálica	0,006	0,88	230	2700
Isotelha	0,03	1,674	0,023	44
Laje de Concreto	0,12	1	1,75	2300
Forro de Gesso	0,01	0,84	0,5	1200
Forro de PVC	0,01	0	0,2	1300
Forro de Madeira	0,01	1,34	0,15	575
EPS	0,08	1,42	0,04	25

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005) e KingsPan.

ANEXO B

CLASSES UTILIZADAS NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ENERGYPLUS

Figura 32 - Building

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. The 'Class List' on the left has 'Building' selected. The 'Comments from IDF' section on the right contains the following text:

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Describes parameters that of the building. There are necessary correlatio this object and some entries in the Site:Weath Site:HeightVariation objects, specifically the T

Field Description:
ID: A1

Field	Units	Obj1
Name		C01
North Axis	deg	0
Terrain		City
Loads Convergence Tolerance Value	W	0,04
Temperature Convergence Tolerance Value	deltaC	0,4
Solar Distribution		FullInteriorAndExterior
Maximum Number of Warmup Days		25
Minimum Number of Warmup Days		6

Fonte: EnergyPlus

Figura 33 – Site:Location

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. The 'Class List' on the left has 'Site:Location' selected. The 'Comments from IDF' section on the right contains the following text:

Explanation of Object and Curr

Object Description: Specifies t
Weather data file location, if it

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1
Name		Barreiras_BA_BRA I
Latitude	deg	-12,15
Longitude	deg	-44,99
Time Zone	hr	-3
Elevation	m	470

Fonte: EnergyPlus

Figura 34 - RunPeriod

Class List

[-----] Compliance:Building

Location and Climate

[0001] Site:Location

[-----] Site:VariableLocation

[-----] SizingPeriod:DesignDay

[-----] SizingPeriod:WeatherFileDays

[-----] SizingPeriod:WeatherFileConditionType

[0001] RunPeriod

[0010] RunPeriodControl:SpecialDays

[0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime

[-----] WeatherProperty:SkyTemperature

[-----] Site:WeatherStation

[-----] Site:HeightVariation

[0001] Site:GroundTemperature:BuildingSurface

[-----] Site:GroundTemperature:FCfactorMethod

[-----] Site:GroundTemperature:Shallow

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Specify a Multiple run periods may be in

Field Description: descriptive ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1
Name		Periodo
Begin Month		1
Begin Day of Month		1
Begin Year		2020
End Month		1
End Day of Month		1
End Year		2020
Day of Week for Start Day		
Use Weather File Holidays and Special Days		No
Use Weather File Daylight Saving Period		No
Apply Weekend Holiday Rule		No
Use Weather File Rain Indicators		Yes
Use Weather File Snow Indicators		No
Treat Weather as Actual		No

Fonte: EnergyPlus

Figura 35 - Material

Class List

Surface Construction Elements

[0007] Material

[-----] Material:NoMass

[-----] Material:InfraredTransparent

[0002] Material:AirGap

[-----] Material:RoofVegetation

[-----] WindowMaterial:SimpleGlazingSystem

[0001] WindowMaterial:Glazing

[-----] WindowMaterial:GlazingGroup:Thermochromic

[-----] WindowMaterial:Glazing:RefractionExtinctionMethod

[0001] WindowMaterial:Gas

[-----] WindowGap:SupportPillar

[-----] WindowGap:DeflectionState

[-----] WindowMaterial:GasMixture

[-----] WindowMaterial:Gap

[-----] WindowMaterial:Shade

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Regular materials described with full set of thermal properties

Field Description:
ID: A1
Enter a alphanumeric value
This field is required.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		TelhaCeramica	LajeConcreto_12cm	TelhaFibrocimento	TelhaMetalica	ForroGesso	ForroMadeira	ForroPVC
Roughness		MediumRough	Rough	Rough	Smooth	MediumSmooth	MediumRough	Smooth
Thickness	m	0.01	0.12	0.004	0.0006	0.01	0.01	0.01
Conductivity	W/m-K	0.7	1.75	0.65	230	0.5	0.15	0.2
Density	kg/m3	1200	2300	1700	2700	1200	575	1300
Specific Heat	J/kg-K	920	1000	840	880	840	1340	960
Thermal Absorptance		0.95	0.95	0.46	0.05	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance		0.8	0.7	0.46	0.05	0.2	0.74	0.2
Visible Absorptance		0.8	0.7	0.46	0.05	0.2	0.74	0.2

Fonte: EnergyPlus

Figura 36 – Material:AirGap

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		F04 Wall air space r	F05 Ceiling air space
Thermal Resistance	m2-K/W	0,15	0,21

Class List	Comments from IDF
Surface Construction Elements ----- [0007] Material [-----] Material:NoMass [-----] Material:InfraredTransparent [0002] Material:AirGap [-----] Material:RoofVegetation [-----] WindowMaterial:SimpleGlazingSystem [0001] WindowMaterial:Glazing [-----] WindowMaterial:GlazingGroup:Thermochromic [-----] WindowMaterial:Glazing:RefractionExtinctionMethod [0001] WindowMaterial:Gas [-----] WindowGap:SupportPillar [-----] WindowGap:DeflectionState [-----] WindowMaterial:GasMixture [-----] WindowMaterial:Gap [-----] WindowMaterial:Shade	Explanation of Object and Current Field ----- Object Description: Air Space in Opaque Cons ----- Field Description: ID: A1 Enter a alphanumeric value This field is required.

Fonte: EnergyPlus

Figura 37 - Construction

Field	Units	Obj1
Name		TCA
Outside Layer		TelhaCeramica
Layer 2		
Layer 3		
Layer 4		
Layer 5		
Layer 6		
Layer 7		
Layer 8		
Layer 9		
Layer 10		

Class List	Comments from IDF
[-----] MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Suction [-----] MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Redistribution [-----] MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:Diffusion [-----] MaterialProperty:HeatAndMoistureTransfer:ThermalConducti [-----] MaterialProperty:GlazingSpectralData [0001] Construction [-----] Construction:CfactorUndergroundWall [-----] Construction:FfactorGroundFloor [-----] Construction:InternalSource [-----] Construction:AirBoundary [-----] WindowThermalModel:Params [-----] WindowsCalculationEngine [-----] Construction:ComplexFenestrationState [-----] Construction:WindowEquivalentLayer [-----] Construction:WindowDataFile Thermal Zones and Surfaces -----	Explanation of Object ar ----- Object Description: Sta Up to 10 layers total, 8 Enter the material name ----- Field Description: ID: A1 Enter a alphanumeric v

Fonte: EnergyPlus

Figura 38 - Building Surface Detailed

Class List

- ThermalZones and Surfaces
-
- [0001] GlobalGeometryRules
-
- [0001] GeometryTransform
-
- [0001] Zone
-
- [0001] ZoneList
-
- [0001] ZoneGroup
-
- [0005] BuildingSurface:Detailed
-
- [0001] Wall:Detailed
-
- [0001] Roof:Ceiling:Detailed
-
- [0001] Floor:Detailed
-
- [0001] Wall:Exterior
-
- [0001] Wall:Adiabatic
-
- [0001] Wall:Underground
-
- [0001] Wall:Interzone
-
- [0001] Roof
-
- [0001] Ceiling:Adiabatic

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Allows for detailed entry of building heat transfer surfaces. Does not include subsurfaces such as windows or c

Field Description:
 ID: A1
 Enter an alphanumeric value
 This field is required.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Piso	Parede1	Parede2	Parede3	Parede4	Telhado
Surface Type		Floor	Wall	Wall	Wall	Wall	Roof
Construction Name		TCA	TCA	TCA	TCA	TCA	TCA
Zone Name		C01	C01	C01	C01	C01	C01
Outside Boundary Condition		Adiabatic	Adiabatic	Adiabatic	Adiabatic	Adiabatic	Outdoors
Outside Boundary Condition Object							
Sun Exposure		NoSun	NoSun	NoSun	NoSun	NoSun	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	NoWind	NoWind	NoWind	NoWind	WindExposed
View Factor to Ground							
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	4,571772034705	0,571772034705	0,571772034705	4,571772034705	4,571772034705	0,571772034705
Vertex 1 Y-coordinate	m	4,754345400218	0,754345400218	4,754345400218	4,754345400218	0,754345400218	4,754345400218
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	3	3	3	3	3
Vertex 2 X-coordinate	m	4,571772034705	0,571772034705	0,571772034705	4,571772034705	4,571772034705	0,571772034705
Vertex 2 Y-coordinate	m	0,754345400218	0,754345400218	4,754345400218	4,754345400218	0,754345400218	0,754345400218
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	3
Vertex 3 X-coordinate	m	0,571772034705	0,571772034705	4,571772034705	4,571772034705	0,571772034705	4,571772034705
Vertex 3 Y-coordinate	m	0,754345400218	4,754345400218	4,754345400218	0,754345400218	0,754345400218	0,754345400218
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	3
Vertex 4 X-coordinate	m	0,571772034705	0,571772034705	4,571772034705	4,571772034705	0,571772034705	4,571772034705
Vertex 4 Y-coordinate	m	4,754345400218	4,754345400218	4,754345400218	0,754345400218	0,754345400218	4,754345400218
Vertex 4 Z-coordinate	m	0	3	3	3	3	3

Fonte: EnergyPlus

Figura 39 - HVACTemplate:Thermostat

Class List

- [-----] Exterior:Lights
- [-----] Exterior:FuelEquipment
- [-----] Exterior:WaterEquipment
-
- HVAC Templates**
-
- [-----] HVACTemplate:Thermostat
- [-----] HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem
- [-----] HVACTemplate:Zone:BaseboardHeat
- [-----] HVACTemplate:Zone:FanCoil
- [-----] HVACTemplate:Zone:PTAC
- [-----] HVACTemplate:Zone:PTHP
- [-----] HVACTemplate:Zone:WaterToAirHeatPump
- [-----] HVACTemplate:Zone:VRF
- [-----] HVACTemplate:Zone:Unitary
- [-----] HVACTemplate:Zone:VAV
- [-----] HVACTemplate:Zone:VAV:FanPowered
- [-----] HVACTemplate:Zone:VAV:HeatAndCool

Field	Units	Obj1
Name		Constant Setpoint T
Heating Setpoint Schedule Name		
Constant Heating Setpoint	C	24
Cooling Setpoint Schedule Name		
Constant Cooling Setpoint	C	26

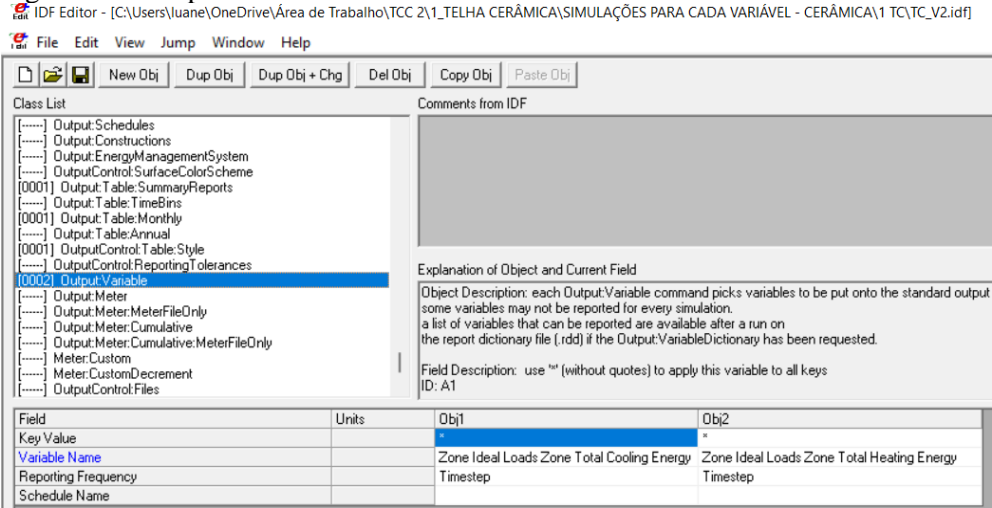
Fonte: EnergyPlus

Figura 40 - HVACTemplate:Zone:IdealLoadAirSystem

Field	Units	Obj1
Zone Name		C01
Template Thermostat Name		Constant Setpoint T
System Availability Schedule Name		
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0,0156
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0,0077
Heating Limit		NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Sensible Heating Capacity	W	
Cooling Limit		NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Total Cooling Capacity	W	
Heating Availability Schedule Name		
Cooling Availability Schedule Name		
Dehumidification Control Type		ConstantSensibleHe
Cooling Sensible Heat Ratio	dimensionless	0,7
Dehumidification Setpoint	percent	60
Humidification Control Type		None
Humidification Setpoint	percent	30
Outdoor Air Method		None
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s	0,00944
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s	

Fonte: EnergyPlus

Figura 41 – Output:Variable



Fonte: EnergyPlus

APÊNDICE A

RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

Tabela 19 – Resultado das simulações e resultado da transmitância térmica

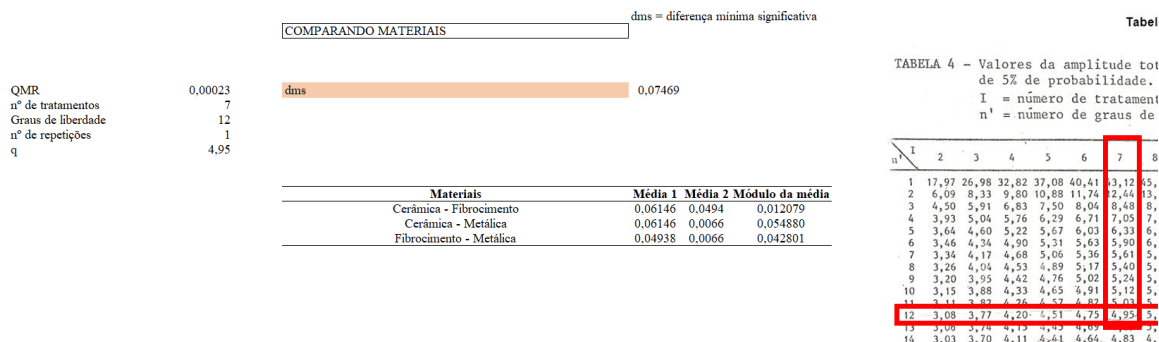
Tipo	CgTR (kWh)	CgTA (kWh)	U (W/(m².K))
TC	0,1313	1,48215E-17	4,45859873
TC-G	0,0626	5,25506E-18	2,20125786
TC-P	0,0588	5,2805E-18	2,06489676
TC-M	0,0568	5,61703E-18	1,99619772
TC-L-G	0,0414	4,4779E-18	1,36452242
TC-L-P	0,0400	2,40548E-18	1,31086142
TC-L-M	0,0392	2,07242E-18	1,28283445
TF	0,0862	1,03251E-17	4,62633452
TF-G	0,0532	5,46669E-18	2,24137931
TF-P	0,0501	6,94352E-18	2,10016155
TF-M	0,0485	7,61891E-18	2,02913632
TF-L-G	0,0369	2,22045E-18	1,37983321
TF-L-P	0,0357	5,18104E-19	1,32498544
TF-L-M	0,0351	2,70154E-18	1,29635785
TM	0,0097	4,16334E-20	4,76131329
TM-G	0,0098	3,70074E-19	1,19043922
TM-P	0,0093	3,70074E-20	1,14939082
TM-M	0,0090	3,81061E-19	1,12778637
TM-L-G	0,0033	0	0,8939766
TM-L-P	0,0026	0	0,87062699
TM-L-M	0,0024	0	0,85817449
IT	0,0000	0	0,66035027
IT-G	0,0000	0	0,46634225
IT-P	0,0000	0	0,45990802
IT-M	0,0000	0	0,45640958
IT-L-G	0,0000	0	0,41272527
IT-L-P	0,0000	0	0,4076775
IT-L-M	0,0000	0	0,40492618
L-M	0,0906	1,57E-19	2,04678363
L-EPS	0,0119	5,88E-18	2,79318735

Fonte: Autor

APÊNDICE B

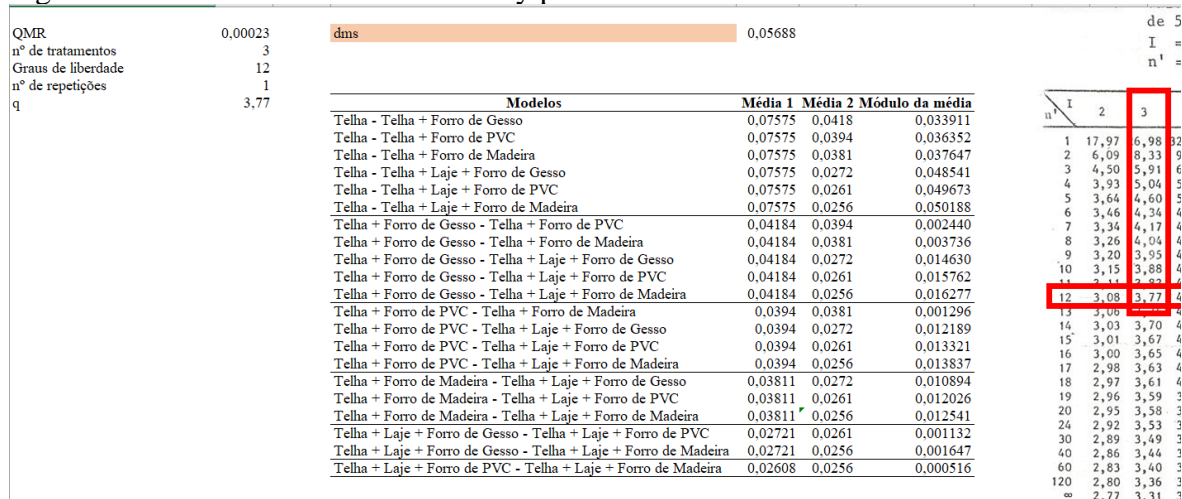
RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA O TIPO DE MATERIAL E MODELOS DE SIMULAÇÃO

Figura 42 - Resultado do Teste de Tukey para o tipo de material



Fonte: Autora

Figura 43 - Resultado do Teste de Tukey para os modelos de cobertura



Fonte: Autora

Figura 44 - Relação tipo de material, modelo de cobertura e CgTR

	Cerâmica	Fibrocimento	Metálica
Telha	0,131335	0,086242571	0,00968047
Telha + Forro de Gesso	0,062617	0,053155973	0,009751332
Telha + Forro de PVC	0,058805	0,050102612	0,00929542
Telha + Forro de Madeira	0,056847	0,048474938	0,008994198
Telha + Laje + Forro de Gesso	0,041394	0,036918799	0,003321971
Telha + Laje + Forro de PVC	0,039974	0,035693797	0,002572229
Telha + Laje + Forro de Madeira	0,039223	0,035050523	0,002418936

Fonte: Autora

Figura 45 - Análise estatística com ANOVA

Anova: fator duplo sem repetição

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Telha	3	0,227257744	0,07575	0,00378
Telha + Forro de Gesso	3	0,125524483	0,04184	0,00079
Telha + Forro de PVC	3	0,118203016	0,0394	0,0007
Telha + Forro de Madeira	3	0,114316361	0,03811	0,00065
Telha + Laje + Forro de Gesso	3	0,081634521	0,02721	0,00043
Telha + Laje + Forro de PVC	3	0,078239835	0,02608	0,00042
Telha + Laje + Forro de Madeir	3	0,07669261	0,02556	0,00041
Cerâmica	7	0,4301948	0,06146	0,00105
Fibrocimento	7	0,345639212	0,04938	0,00032
Metálica	7	0,046034556	0,00658	1,3E-05

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Linhas	0,005538221	6	0,00092	4,05441	0,01876	2,99612
Colunas	0,011642461	2	0,00582	25,5696	4,7E-05	3,88529
Erro	0,002731946	12	0,00023			
Total	0,019912629	20				

Fonte: Autora