

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMGRAD ENGENHARIA CIVIL**

Josafá de Lima Silva

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
COBERTURA EM PROJETO HABITACIONAL**

Porto Alegre
Janeiro 2018

JOSAFÁ DE LIMA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
COBERTURA EM PROJETO HABITACIONAL**

Trabalho de Diplomação apresentado a COMGRAD Engenharia
Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Orientador: Luis Carlos Bonin
Coorientador: Gustavo Longaray Moraga

Porto Alegre
Janeiro 2018

JOSAFÁ DE LIMA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS DE
COBERTURA EM PROJETO HABITACIONAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, janeiro de 2018

Prof. Luis Carlos Bonin
Me. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientador

Gustavo Longaray Moraga
Me. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luis Carlos Bonin (UFRGS)
Me. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof. Miguel Aloysio Sattler (UFRGS)
PhD pela University of Sheffield

Profa. Eugênia Aumond Kuhn (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, por acreditar nos caminhos que trilhei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe Loide, por apoiar minhas decisões, acreditar em cada passo que dei e acima de tudo pela perseverança na vida, que me inspirou em muitos momentos.

Agradeço aos meus irmãos, Azenate, Natanael e Eliezer, por fazerem parte da minha vida e me inspirar a ir além.

Agradeço aos meus amigos, em especial a Rai Spanhol, pelo apoio quando tudo era apenas sonho, e pelos longos anos de amizade e companheirismo.

Agradeço a Professora Ana Paula Kirchheim, pela ajuda em diversas fases do curso e pelo apoio inicial a esse trabalho, e por toda atenção e dedicação ao longo dos anos.

Agradeço ao Professor Luis Carlos Bonin, orientador deste trabalho, pelas longas horas de ensinamento, pela sabedoria e apoio nos momentos difíceis e pelas dicas para que esse trabalho se tornasse sempre melhor.

Agradeço ao Gustavo Moraga, coorientador deste trabalho, pelo auxílio, apoio e dedicação nas diversas fases de desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelos longos anos de ensinamento, dedicação e por todo o conhecimento repassado durante o período de curso.

Homens de ação, cujos pensamentos estão demasiado absorvidos pelo trabalho quotidiano para verem algo além disso. São essencialmente homens, não podemos passar sem eles, e, no entanto, não devemos permitir que toda a nossa visão seja cerceada pelas limitações de homens de ação.

Pearl S. Buck

RESUMO

Dos sistemas que constituem a envoltória de uma edificação térrea, a cobertura é o sistema que recebe maior incidência da radiação solar, totalizando, em média, o dobro da irradiação incidente sobre o sistema de fechamento vertical. Esse fator impacta diretamente no desempenho térmico da edificação, podendo gerar gastos com sistema de condicionamento artificial para atingir um determinado nível de conforto do usuário. Este trabalho analisa o Desempenho Térmico de uma edificação, com modificações no sistema de cobertura, em projeto habitacional unifamiliar, fazendo uso do procedimento simplificado e do método de simulação computacional propostos na NBR 15575:2013. A simulação computacional foi realizada no programa *OpenStudio*, que opera com os algoritmos do programa *EnergyPlus*. Para a envoltória da edificação, adotou-se um tipo de fechamento vertical, com quatro configurações de sistema de cobertura, no qual foram feitas modificações que otimizam seu comportamento térmico. Após, foi feita uma análise qualitativa dos resultados das diferentes configurações propostas. Os resultados demonstraram que é possível atingir resultados favoráveis para a zona bioclimática 3, com as modificações propostas, pois as mesmas amenizam as características desfavoráveis do sistema.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Carta bioclimática adotada para o Brasil	15
Figura 2- Zoneamento bioclimático brasileiro	23
Figura 3- Esquema clássico de estrutura	28
Figura 4- Planta casa modelo A sem varanda.....	33
Figura 5- Parede de placa de concreto.....	35
Figura 6- Cobertura de telha cerâmica	35
Figura 7- Cobertura de telha fibrocimento	36
Figura 8- Orientação de Projeto para verão e inverno.....	38
Figura 9- Dia típico de verão para a configuração 1	44
Figura 10- Dia típico de verão para a configuração 2	44
Figura 11- Dia típico de inverno para a configuração 1	46
Figura 12- Dia típico de inverno para a configuração 2	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Taxas metabólicas para algumas atividades.....	20
Quadro 2- Método simplificado: critérios de avaliação para o sistema de coberturas quanto a transmitância térmica.....	25
Quadro 3- Método de simulação: requisitos de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.....	26
Quadro 4- Método de simulação: requisitos de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno	26
Quadro 5- Configuração dos sistemas utilizados na simulação	34
Quadro 6- Critérios e nível de desempenho segundo método simplificado da NBR 15575	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características dos materiais utilizados na simulação.....	34
Tabela 2- Dados de dias típicos de verão e inverno para Porto Alegre.....	38

LISTA DE SIGLAS

ABCI – Associação Brasileira de Construção Industrializada

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CAD – *Computer-aided Design*

NBR – Norma Brasileira

ZB – Zona bioclimática

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – refletância à radiação solar

α – absortividade à radiação solar

τ – transmissividade térmica

λ – condutividade térmica (W/m.K)

ϕ – atraso térmico (h)

C_T – capacidade térmica total (kJ/m².K)

L_{CLO} – resistência térmica do vestuário (clo)

MET – taxa metabólica (met)

R_T – resistência térmica total (m².K/W)

U – transmitância térmica (W/m².K)

T_{AR} – temperatura do ar (°C)

TRM – temperatura média radiante (°C)

V – velocidade do ar (m/s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 DIRETRIZES DE PESQUISA	10
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	10
2.2 OBJETIVO DE PESQUISA	10
2.3 PRESSUPOSTO	10
2.4 DELIMITAÇÕES	10
2.5 LIMITAÇÕES	11
2.6 DELINEAMENTO	11
3 REVISÃO DA LITERATURA E DEFINIÇÕES	13
3.1 ENERGIA E CALOR	13
3.2 CONFORTO TÉRMICO	14
3.2.1 Variáveis climáticas	16
3.2.1.1 Radiação solar	16
3.2.1.2 Temperatura e umidade do ar	16
3.2.1.3 Vento	17
3.2.2 Envoltória construtiva	18
3.2.3 Atividade física e a vestimenta	19
3.3 DESEMPENHO TÉRMICO	21
3.3.1 Normas de desempenho térmico	21
3.3.2 NBR 15575 e NBR 15220	22
3.3.3 Definição dos requisitos e critérios para avaliação do desempenho térmico	24
3.3.3.1 Método simplificado	25
3.3.3.2 Método de simulação	25
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	26
3.4.1 EnergyPlus	27
3.4.2 OpenStudio SketchUp Plug-in	27
3.5 SISTEMAS DE COBERTURA	27
3.5.1 Telhado	29
3.6 ISOLAMENTO TÉRMICO	31
4 METODOLOGIA	32
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO DE ESTUDO	32
4.2 CONFIGURAÇÕES DE PROJETO	34
4.3 ELABORAÇÃO DO MODELO SIMULAÇÃO	36
4.3.1 Modelo tridimensional e zonas térmicas	37
4.3.2 Localização e período de simulação	37

4.3.3	Arquivo climático	38
4.3.4	Cargas térmicas, densidade de ocupação e uso	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	NBR 15575:2013 – MÉTODO SIMPLIFICADO	40
5.1.1	Configurações 1 e 2	41
5.1.2	Configuração 3	41
5.1.3	Configuração 4	41
5.2	NBR 15.575:2013 – MÉTODO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	43
5.2.1	Período de verão	43
5.2.2	Período de inverno	45
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A	53

1 INTRODUÇÃO

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, é uma necessidade quando se analisa o panorama mundial e local da evolução do consumo em relação à disponibilidade de energia (MASCARÓ, 1991).

A maior parte do consumo de energia elétrica em residências destina-se a geladeiras, chuveiros e lâmpadas, porém, mais recentemente, o ar condicionado começa a participar desde cenário com maior consumo, chegando a 20% na média nacional. Esse valor tende a crescer ainda num futuro próximo conforme aumente o poder aquisitivo da população e devido a não adequação das edificações ao clima local (LAMBERTS et al., 2014).

Condicionamento térmico natural é uma estratégia de adequação do projeto da envolvente do edifício, sendo descrito por Rivero (1985) como a técnica que estuda os métodos para que o espaço habitado apresente as condições térmicas exigidas pelo ser humano, sem recorrer a nenhum tipo de energia, tendo como elementos principais o meio (M), o homem (H) e a envolvente (E). Para tal técnica, mesmo tendo a necessidade de instalações térmicas, é possível diminuir os custos dos equipamentos e as despesas, mediante o uso de um bom projeto.

A envolvente, constituída principalmente de paredes e cobertura, é o fator onde o projetista tem maior influência, sendo responsável pelo fluxo de calor entre os ambientes internos e externo. Usualmente, o calor que chega na envoltória de um edifício térreo provém em 80% pela cobertura e 20% pela fachada, esses valores vão se invertendo à medida que a edificação vai se verticalizando. Portanto, a resolução adequada da cobertura, do ponto de vista térmico, será fundamental para o desempenho da edificação como um todo, principalmente em sistemas construtivos horizontalizados por ser o principal elemento de ganho de calor. (MASCARÓ, 1991).

O trabalho proposto vem analisar o sistema de cobertura, em um projeto Modelo, para a cidade de Porto Alegre, RS, considerando o desempenho térmico do mesmo. A cobertura do projeto modelo é constituída de telhas cerâmicas, sendo um sistema de ampla aceitação e difusão na construção nacional. O trabalho propôs a substituição do tipo de telha cerâmica por telhas de fibrocimento.

Um dos principais motivos dessa proposta de troca é averiguar a possibilidade de projetar dentro dos níveis exigidos de desempenho térmico, com sistemas de telhas de fibrocimento. Essa troca foi pensada devido às características do sistema proposto e considerações sobre, entre elas custo e facilidade de instalação. O sistema também apresenta características que possibilitam, a um custo reduzido, fazer modificações que otimizam seu comportamento térmico. O trabalho teve foco principal especificar que, independente do sistema de cobertura, com um projeto pensado termicamente, e soluções simples, podemos resolver problemas de desempenho insatisfatório.

Para a análise, foi utilizada a NBR 15575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c), que define requisitos mínimos de desempenho, para os diferentes sistemas em habitações populares. A norma tem como característica incentivar e balizar o desenvolvimento tecnológico e orientar a avaliação de eficiência técnica e econômica das edificações. Vale ressaltar, também, que ao exigir um nível mínimo de desempenho térmico para os sistemas, a norma aponta que o conforto térmico do usuário não fique dependente dos sistemas ativos para climatização do ambiente.

Por fim, este trabalho tem o objetivo de fornecer um corpo de conhecimento sobre sistemas de cobertura e desempenho térmico, desta forma, auxiliando a fundamentação para escolha e análise de sistemas de cobertura em habitações populares visando melhorias térmicas.

2 DIRETRIZES DE PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: como se comporta o sistema de cobertura para cada uma das quatro configurações propostas, considerando o seu desempenho térmico, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c), em um projeto de habitação popular unifamiliar, localizada na região de Porto Alegre.

2.2 OBJETIVO DE PESQUISA

O presente trabalho tem como objetivo principal a análise térmica de um sistema de cobertura cerâmica, relativamente a um sistema de cobertura com telhas de fibrocimento com modificações visando melhorar os níveis de desempenho térmico, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013b, 2013c), para um projeto habitacional na região de Porto Alegre - RS.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho parte do pressuposto de que o sistema de cobertura tem uma significativa influência no desempenho térmico de uma edificação residencial térrea, em projeto inserido na região de Porto Alegre, e que modificações nesse sistema podem vir a gerar um melhor desempenho, sem a necessidade de gastos com sistemas ativos para que a edificação atinja os níveis mínimos de desempenho térmico exigidos por norma.

2.4 DELIMITAÇÕES

Foram conservados os aspectos arquitetônicos que constam no projeto, exceto a envoltória, onde foi modificado o sistema de cobertura e componentes do mesmo, sendo mantido constante o fechamento vertical, para todas análises. Para as diretrizes de modelagem foram consideradas as instruções da norma NBR 15575 (ABNT, 2013c). Possíveis divergências com a norma são destacadas, com as devidas anotações pertinentes.

2.5 LIMITAÇÕES

O desenvolvimento do trabalho ficará restrito apenas em edificação unifamiliar, com variação de sistema de cobertura em projeto de convencional para habitações de baixa renda, no município de Porto Alegre.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado segundo as etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definições e propriedades térmicas;
- c) pesquisa e caracterização dos sistemas de cobertura;
- d) definição de parâmetros para avaliação de desempenho térmico;
- e) avaliação do desempenho térmico para as diferentes configurações apresentadas;
- f) apresentação e análise dos resultados;
- g) considerações finais.

O presente trabalho foi dividido em cinco partes principais: Introdução, Diretrizes de Pesquisa, Revisão da Literatura e Definições, Metodologia, Resultados e Discussões. A Introdução apresentada no primeiro capítulo trata da definição e objeto de estudo proposto neste trabalho. A segunda parte aborda as Diretrizes de Pesquisa, fazendo o delineamento do estudo para a análise proposta.

A Revisão da Literatura e Definições, foram embasados por pesquisa bibliográfica, com o intuito de compreender os conceitos de desempenho e conforto térmico, juntamente com as instruções normativas brasileiras, NBR 15575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c) e 15220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c), que abordam métodos, parâmetros e critérios de avaliação de desempenho térmico.

Posteriormente, foi feita uma pesquisa sobre programas computacionais que têm sido utilizados para projetar ambientes termicamente confortáveis. Juntamente, foram definidos os parâmetros para análise de desempenho, de acordo com norma NBR 15575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c). A pesquisa bibliográfica se estende paralelamente às etapas seguintes, para o necessário aprofundamento de assuntos ao longo do trabalho.

A seguir, em Métodos, realizou-se a caracterização da edificação unifamiliar, bem como os critérios e parâmetros adotados para sua análise e as incertezas associadas ao método. Para tal, foram apresentadas as características do projeto padrão e do projeto base, com modificações e condições relevantes de orientação da edificação, bem como dados de seus padrões de uso. Nessa etapa, ocorreram as definições de modelagem para a edificação.

Por fim, foram apresentados os Resultados e Discussões, tendo como tópicos principais a avaliação de desempenho térmico pelo procedimento simplificado e o método de simulação. No processo de avaliação de desempenho térmico na forma simplificada foi feito o cálculo analítico para as configurações propostas. Esta análise inicial foi feita com o intento de avaliar se as configurações propostas continham as condições mínimas elegíveis por norma. Posteriormente, ocorreu a análise do desempenho feita por meio de simulação computacional, para as configurações que não atingiram as condições mínimas de desempenho térmico, tendo sido criado um modelo tridimensional para avaliação termodinâmica da edificação.

Após, foram apresentadas as considerações finais em relação aos principais aspectos do estudo realizado. No Apêndice foram apresentadas as metodologias de cálculo para avaliação do sistema de cobertura, pelo método simplificado.

3 REVISÃO DA LITERATURA E DEFINIÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as definições sobre: características térmicas, sistemas de cobertura, normas de desempenho, conforto e desempenho térmico. Vale ressaltar que os temas conforto térmico dos usuários e desempenho térmico de edifícios, ou sistemas, apesar de estarem relacionados, foram separados em subseções, uma vez que apresentam características distintas. Devido à influência em projetos de condicionamento térmico, serão ambos definidos.

3.1 ENERGIA E CALOR

A energia não pode ser criada ou destruída; o que temos nos processos são apenas conversões de algumas formas de energia em outras (BRAGA FILHO, 2004). A energia pode se manifestar de diferentes formas. Estamos interessados principalmente no **calor**, que pode ser definido com a forma de energia que é transferida de um sistema para outro, em consequência da diferença de **temperatura** entre eles (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Temperatura foi descrita por Bejan (1996) como sendo a propriedade termodinâmica que determina se o sistema está em **equilíbrio térmico** com outro sistema; onde haverá o equilíbrio térmico apenas se as temperaturas dos dois sistemas são iguais. Em contrapartida, existindo uma diferença de temperaturas entre duas regiões no espaço, essa tende a desaparecer pela passagem de **calor** de uma para outra. Ao conjunto de fenômenos que caracterizam essa passagem de calor damos o nome de **transmissão de calor** (COSTA, 1974).

Çengel e Ghajar (2012) explicam que o calor pode ser transferido de três diferentes modos: condução, convecção e radiação. A transferência de calor irá sempre ocorrer da maior para a melhor temperatura quando houver diferença entre elas.

Na menção da palavra **condução**, Bergman *et al.* (1998) atenta que devemos imediatamente visualizar conceitos das atividades atômicas e moleculares, pois são processos nesses níveis que mantêm este modo de transferência de calor. Frota e Shiffer (1988, p. 24) completam dizendo que condução pode ser vista como a “troca de calor entre dois corpos que se tocam ou mesmo partes do corpo estejam a temperaturas diferentes”.

Para fluidos, líquidos e gases, o principal mecanismo de troca de calor está associado à movimentação do fluido. Sempre que tivermos movimento relativo entre um determinado corpo

e o fluido que o cerca, estando ambos em diferentes temperaturas, poderemos esperar certa intensificação (isto é, um aumento) nas taxas de troca de calor. Esse tipo de mecanismo de troca de calor, envolvendo contato térmico entre fluido em movimento relativo e uma superfície, é chamado de **convecção** (BRAGA FILHO, 2004).

Frota e Shiffer (1988, p. 22), no tocante à convecção, esclarecem que “no caso de superfície horizontal, o sentido de fluxo desempenha papel importante. Quando o fluxo é ascendente, há coincidência do sentido do fluxo com o natural deslocamento ascendente das massas de ar aquecidas, enquanto que no caso de fluxo descendente, o ar, aquecido pelo contato com a superfície, encontra nela mesma uma barreira para sua ascensão, dificultando a convecção – seu deslocamento e sua substituição por uma nova camada de ar a temperatura inferior à sua”.

Ao contrário da condução e da convecção, a transferência por **radiação** não exige a presença de um meio interveniente, definida por Çengel e Ghajar (2012) como, “energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas [...]”. Bejan (1996) completa como sendo transferência de calor finita, mesmo que o espaço entre os corpos esteja completamente evacuado.

3.2 CONFORTO TÉRMICO

Conforto Térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação do usuário com o ambiente térmico que o envolve (ASHRAE, 2013). Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente Conforto Térmico.

Diversos fatores influem para que se possa sentir conforto térmico. Entre eles estão “as **variáveis ambientais** que podem ser medidas diretamente, sendo a temperatura do ar (T_{AR} – °C), a temperatura radiante (TRM – °C), a umidade relativa (UR - %) e a velocidade do ar (V – m/s). Além dessas variáveis, a **atividade física** (MET – *met* ou W/m^2) e a **vestimenta** (I_{CLO} – *clo* ou m^2C/W) também interagem na sensação de conforto térmico do homem (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Para caracterizar a sensação de bem-estar ocasionada por um ambiente, adota-se o conceito de **temperatura efetiva**; essa é definida como sendo a temperatura de um recinto que, contenha ar praticamente em repouso (velocidades compreendidas entre 0,1 e 0,15 m/s) e esteja

completamente saturado de umidade, proporcionando a mesma sensação de frio ou calor que o ambiente em consideração (COSTA, 1974). Como complemento, Costa (1974, p. 207) esclarece que a relação entre temperatura de máximo conforto e zona de conforto:

[...] está relacionada com as condições de despesa mínima de energia do organismo, a qual, conforme vimos, se verifica quando o mesmo não tem que lutar contra o frio ou calor. Estas condições, ditas de neutralidade térmica, dependem dos mesmos fatores que influenciam sobre o metabolismo, de modo que, na realidade, não podemos falar de uma temperatura de máximo conforto, mas sim de zona de conforto. Assim, se dá o nome de zona de conforto ao conjunto de condições distintas do ar, caracterizadas na carta Psicrométrica, capaz de proporcionar sensações de bem-estar consideradas como ótimas para a maioria das pessoas. Tal zona, além de ter limites variáveis de pessoa para pessoa, só tendo sentido como elemento estatístico, varia como o vestuário, atividade, clima, estação do ano, idade, sexo etc.

Extensa pesquisa, tem sido feita em seres humanos para determinar a zona de conforto térmico e identificar as condições em que o corpo se sente confortável em um ambiente (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Uma das maneiras de determinação é a carta da figura 1, construída sobre o diagrama psicrométrico, que relaciona a temperatura de bulbo seco, bulbo úmido e a umidade relativa, para a mesma pressão atmosférica.

Figura 1- Carta bioclimática adotada para o Brasil



(fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Lamberts *et al.* (2014) fazem uma descrição de cada uma dessas zonas bioclimáticas, onde conhecendo os valores das variáveis – temperatura do ar e umidade relativa – o projetista poderá ter indicações fundamentais sobre a estratégia bioclimática a ser adotada no desenho do edifício.

Sabendo que para cada tipo de ambiente ou configuração climática há uma forma mais adequada de se construir, nos próximos itens serão explanados alguns conceitos básicos nos quais o engenheiro deve se basear ao projetar uma edificação.

3.2.1 Variáveis climáticas

É fundamental o conhecimento das variáveis climáticas para o projeto de edificações mais adequadas ao conforto do seu ocupante e mais eficientes em termos de consumo de energia. Elas “descrevem as características gerais em termos de sol, nuvens, temperatura, ventos, umidade relativa e precipitações” (LAMBERTS *et al.*, 2014, p. 71).

3.2.1.1 Radiação solar

Lamberts *et al.* (2014, p. 73) esclarecem que “de todos os elementos climáticos, a radiação solar é o de comportamento mais conhecido, bastando marcar a altura e o azimute solar em uma **carta solar** para saber onde está o Sol em determinado período do ano”, sendo possível tirar partido ou, evitar a luz e o calor solar em uma edificação.

Para os autores, “a radiação solar é um dos mais importantes contribuintes para o ganho térmico em edifícios. Na escala de edificação, a transferência de calor por radiação pode ser dividida em cinco partes principais: radiação solar direta, radiação solar difusa, radiação solar refletida pelo solo e pelo entorno, radiação térmica emitida pelo solo aquecido e pelo céu, e radiação térmica emitida pelo edifício” (LAMBERTS *et al.*, 2014, p. 113).

Mascaró e Mascaró (1992) destacam que para se ter menores valores de captação da radiação solar de verão, a maior fachada deve estar direcionada para o Norte e Sul que tem o melhor desempenho térmico. Por isso, poderá haver economia de energia em edifícios que sejam pensados de maneira a aproveitar a condição de localização.

3.1.1.2 Temperatura e umidade do ar

“A temperatura, juntamente com a umidade, é a responsável pelas trocas de calor com o exterior efetuadas pelo corpo humano e determina, para o ambiente, as suas características de conforto térmico” (COSTA, 1982, p. 171).

“A temperatura é a variável climática mais conhecida e de mais fácil medição. A variação da temperatura 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” (LAMBERTS *et al.*, 2014, p. 77).

Çengel e Ghajar (2012) citam a temperatura do ambiente como o índice de conforto mais importante, sendo que a maioria das pessoas se sente confortável na temperatura operacional no intervalo de 23°C a 27°C. Fatores climáticos como a altitude, o relevo e a vegetação também afetam a temperatura em escalas locais, além dos supracitados, outro fator que pode afetar a temperatura em uma edificação é o processo de urbanização.

Pela definição de Lamberts *et al.* (2014, p. 80), “a umidade do ar resulta da evaporação da água contida nos mares, rios, lagos e na terra, bem como da evapotranspiração dos vegetais”, onde a umidade relativa tende a aumentar quando há diminuição da temperatura e a diminuir quando há aumento da temperatura.

Segundo Çengel e Ghajar (2012), a umidade relativa do ar tem efeito considerável sobre o conforto, uma vez que é a medida relativa da capacidade do ar para absorver umidade, e, portanto, afeta a quantidade de calor que o corpo pode dissipar por evaporação. Os autores declaram que “o nível desejável de umidade relativa está na ampla faixa de 30 a 70%, com 50% sendo o nível mais desejável”.

3.1.1.3 Vento

“Outro fator de grande influência sobre o conforto térmico é a velocidade excessiva do ar ou corrente de ar, que afetam tanto a edificação, quanto o corpo humano, no qual provoca resfriamento local indesejável” (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Rivero (1985) cita que o conhecimento do regime dos ventos permite aproveitar suas vantagens e defender-se de seus efeitos desfavoráveis. “Através do diagrama rosa-dos-ventos, pode-se conhecer as probabilidades de ocorrência de vento para as principais orientações e sua velocidade, dessa forma auxiliando o projetista na colocação de aberturas, de forma a aproveitar o vento fresco no período quente e evitar o vento forte no período frio” (LAMBERTS *et al.*, 2014, p. 79).

Lamberts *et al.* (2014, p. 79) completam que “as condições do vento local podem ser alteradas com a presença de vegetação, edificações e outros anteparos naturais ou artificiais. Podendo-se

tirar partido do perfil topológico de um terreno para canalizar os vetos, desviando-os ou trazendo-os para a edificação”.

3.2.2 Envoltória construtiva

Segundo Rivero (1985, p. 124), “a composição de um edifício deve adequar-se às solicitações do meio exterior de maneira a satisfazer, na melhor forma possível, as exigências térmicas das pessoas que o usam”. O autor complementa referindo que o microclima de um espaço interior é formado por uma envolvente que procura resolver as exigências físico-químicas e de segurança, onde é importante, entre outros, a forma do volume e os materiais dos fechamentos exteriores.

A envolvente é constituída de materiais e elementos construtivos que se comportam termicamente em função de suas **propriedades térmicas**, tornando-se importante entender a maneira como essas propriedades se comportam frente às condições da edificação. Entre as propriedades mais relevantes podemos citar: transparência; absorvidade, refletividade, transmissividade e emissividade; condutividade térmica; capacidade térmica; resistência térmica total; transmitância térmica; fluxo de calor e fator solar.

Segundo Lamberts *et al.* (2014, p. 209), os elementos construtivos podem ter desempenhos diferentes em relação à radiação térmica incidente, que terá uma parcela refletida, uma absorvida e uma parcela transmitida diretamente para o ambiente interior, “cujos valores dependerão respectivamente da **refletividade** (ρ), **absortividade** (α), e **transmissividade** (τ) do material. A soma destas três parcelas da radiação térmica incidente corresponde a 100% do total”.

Mascaró (1991, p. 54), esclarece que “quanto maior é a radiação incidente refletida por uma superfície, menor será o aumento da temperatura da envolvente do edifício. A cor é uma boa indicadora do fator de reflexão solar de uma superfície ou material, mas não tem o mesmo desempenho em relação à radiação térmica”.

A maioria das superfícies do edifício comporta-se como corpos negros (absorvem e emitem a radiação recebida), refletindo muito pouco a radiação térmica. A propriedade térmica que rege a emissão da radiação para o ambiente interno é a **emissividade** (ϵ), Lamberts *et al.* (2014, p. 210) a definem “como a propriedade física dos materiais que diz qual a quantidade de energia

térmica é emitida por unidade de tempo. Os materiais de construção podem ser organizados em dois grupos bem definidos: os metálicos, com baixa emissividade, e os não metálicos, com alta emissividade”.

Condutividade térmica (λ) foi descrita por Çengel e Ghajar (2012) como medida da capacidade de um material de conduzir calor, onde um alto valor de condutividade indica que o material é bom condutor de calor, enquanto um valor baixo indica que o material é um mal condutor de calor ou **isolante**.

Além da capacidade de um material conduzir calor, outra característica importante é a capacidade de armazenamento de calor de um material, chamado de **capacidade térmica total (C_T)**, quanto maior a capacidade térmica de um material, maior a quantidade necessária para variar um grau de temperatura de seus componentes por unidade de área (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A seguir temos a **resistência térmica total (R_T)**, definida como somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo resistências superficiais internas e externas (ABNT, 2005a).

Transmitância térmica (U), ou coeficiente global de transferência de calor, é definida pela NBR 15.220-1 (ABNT, 2005a) como o inverso da resistência térmica total, ou seja, a propriedade que quantifica a capacidade do material em transmitir calor.

Por último, podemos citar o **atraso térmico (φ)**, definido como o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor (ABNT, 2005a).

3.2.3 Atividade física e a vestimenta

Frota e Shiffer (2001) afirmam que as cargas térmicas no interior de um edifício podem ser advindas de pessoas, iluminação ou equipamentos. No caso do calor dissipado pelo corpo humano, a quantidade de calor liberado para o ambiente é essencialmente dependente da atividade exercida. Lamberts *et al.* (2014) destacam que quanto maior a atividade física, tanto maior será o calor gerado por metabolismo.

O homem é um ser **homeotermo**, sua temperatura corporal é praticamente constante, sendo a temperatura do corpo bastante mais elevada do que a do meio ambiente e independente de suas variações (COSTA, 1974). Devido a essa pouca variação de temperatura, Rivero (1985) esclarece que o organismo é sensível o suficiente para alertar-nos quando as condições do meio são termicamente desfavoráveis, e que o problema do homem é eliminar exatamente o calor que está gerando, onde, se perder uma quantidade maior experimentará uma sensação de frio, e se menor, de calor.

No corpo humano essa passagem de calor para o ambiente ocorre de duas formas distintas: calor sensível e calor latente. O **calor sensível**, também chamado de calor específico, foi definido por Çengel e Ghajar (2012), como a quantidade de calor que um grama de substância deve receber ou ceder para que nela aconteça a variação de um grau de temperatura. Diferente do calor sensível, **calor latente** é quando fornecemos energia térmica a uma substância, a sua temperatura não varia, mas seu estado de agregação se modifica.

O quadro 1 mostra alguns valores de energia dissipada em função da atividade realizada pelo indivíduo.

Quadro 1- Taxas metabólicas para algumas atividades

Atividade	Nível de Atividade W/Pessoa	Nível de Atividade W/m ²	met [1 met = 58.1 W/m ²]
Descansando			
Dormindo	72	40	0.7
Sentado (Quieto)	108	60	1
De Pé (relaxando)	126	70	1.2
Atividades de Escritório			
Lendo (sentado)	99	55	1
Escrevendo	108	60	1
Digitando	117	65	1.1
Arquivando (sentado)	126	70	1.2
Arquivando (de pé)	144	80	1.4
Caminhando	180	100	1.7
Empacotando	216	120	2.1

(fonte: ENERGYPLUS, 2013)

Outro fator que influencia no conforto térmico é a **resistência térmica do vestuário**, sendo medida em “clo”: do inglês *clothing*, sendo que 1 *clo* representa uma resistência térmica de 0,155m²C/W e equivale à resistência térmica de um terno completo. A pele troca calor por

condução, convecção e radiação com a roupa, que por sua vez troca calor com o ar por convecção e com outras superfícies por radiação (LAMBERTS et al., 2014).

3.3 DESEMPENHO TÉRMICO

Um conjunto de exigências é necessário que para o usuário se sinta satisfeito com a edificação e seus sistemas, a NBR 15575 (ABNT, 2013c) divide essas exigências em três grupos: **segurança, habitabilidade e sustentabilidade**, sendo o desempenho térmico um dos fatores que compõem o requisito habitabilidade.

A NBR 15575 (ABNT, 2013c), define desempenho como sendo o comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas. Já desempenho térmico das edificações, é descrito como uma exigência de habitabilidade e, como tal, tem diversos requisitos a serem preenchidos de maneira a atender os índices preestabelecidos de conforto térmico (CBIC, 2013). Através da análise destas definições, o conceito de desempenho adotado pelo trabalho diz respeito ao comportamento em uso para o edifício habitacional e seus sistemas.

3.3.1 Normas de desempenho térmico

Segundo a 15575 (ABNT, 2013c, p. 1), “Normas de desempenho são estabelecidas buscando atender às exigências dos usuários [...], quanto ao comportamento em uso de uma edificação e seus sistemas e não na prescrição de como os sistemas são construídos.”. Normas de desempenho indicam ao que o prédio deve atender para que tenha um desempenho desejado (mínimo, intermediário ou superior), independente do sistema construtivo (CHVATAL, 2014).

O desenvolvimento desse trabalho baseou-se na NBR 15575 - Edificações Habitacionais: Desempenho (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c), que versa sobre ambientes condicionados naturalmente. Podemos citar também, de forma complementar, a NBR 15220 - Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) que fornece dados, definições e método de cálculos para avaliação do desempenho térmico pela NBR 15575.

3.3.2 NBR 15575 e NBR 15220

A NBR 15575 (ABNT, 2013), tem como objetivo final atender às necessidades dos usuários que se traduzem nos aspectos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Ela é composta por seis partes, sendo a primeira de requisitos gerais, considerando o prédio como um todo. Nas partes seguintes, são apresentadas exigências específicas para os sistemas que compõem a edificação (CHVATAL, 2014). O método de avaliação de desempenho térmico, objetivo do estudo deste trabalho, é apresentado nas partes 1, 4 e 5.

Vale citar que as partes 4 e 5 da norma tratam, respectivamente, de requisitos específicos de desempenho para sistemas de vedações verticais internas e externas e para sistemas de cobertura, entre os quais estão os de conforto térmico. O trabalho proposto tem foco nos sistemas de cobertura, sendo estudado também os sistemas de vedações devido à influência no desempenho da edificação.

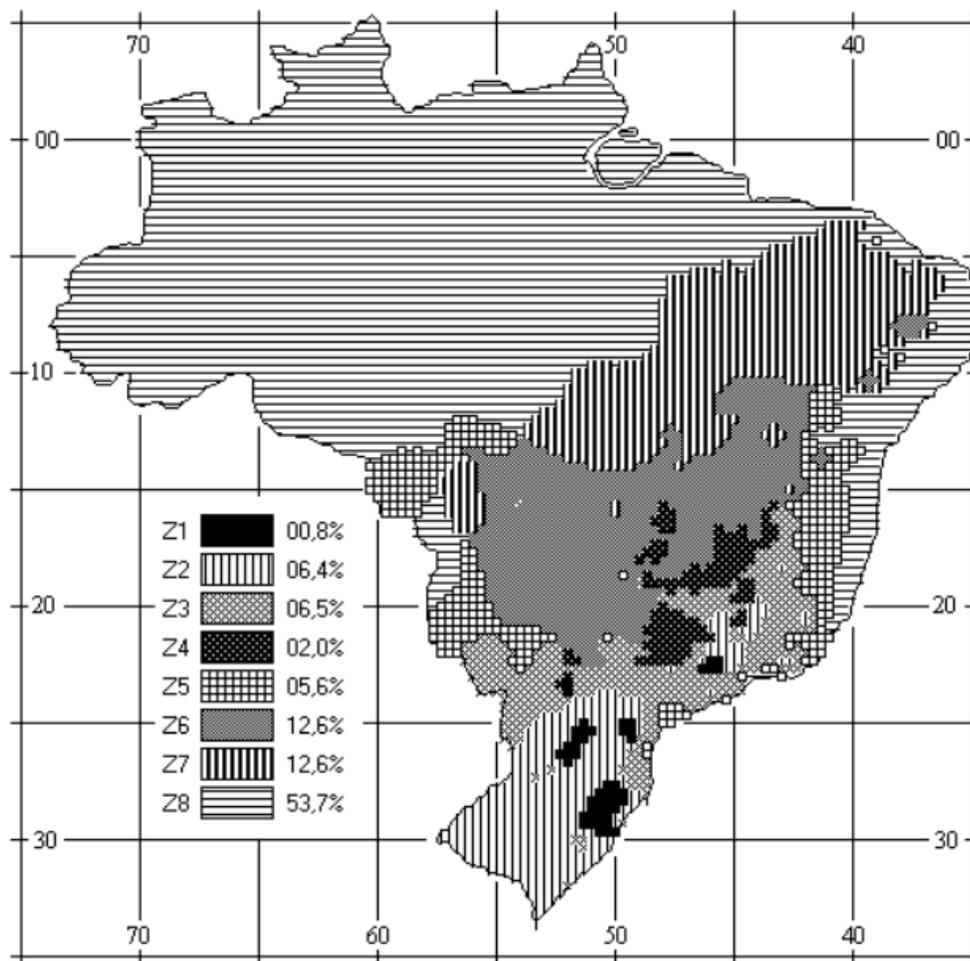
A norma define níveis de desempenho para os diferentes sistemas, sendo necessário garantir um nível que atenda ao projeto e às premissas de projeto. A definição de níveis mínimos visa garantir as necessidades básicas de segurança, saúde, higiene e de economia.

A NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) tem caráter complementar e apresenta recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto. O objetivo principal dessa norma é otimizar o desempenho térmico das edificações, através de uma melhor adequação climática.

A NBR 15220 (ABNT, 2005) é composta de cinco partes, sendo a primeira norma brasileira que aborda o conforto térmico para o usuário. Nas partes 1, 2 e 3, a norma, faz definições, apresenta métodos de cálculo de propriedades, e estabelecendo um zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c).

Para estabelecer o zoneamento bioclimático brasileiro, a NBR 15220 (ABNT, 2005c) subdivide o país em oito **Zonas Bioclimáticas**, conforme figura 2. Definindo as características principais e dando diretrizes para cada uma destas oito zonas bioclimáticas em relação ao tamanho de janelas, ao sombreamento necessário, ao tipo ideal de paredes e coberturas e também às estratégias bioclimáticas mais recomendadas para o local (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Figura 2- Zoneamento bioclimático brasileiro



(fonte: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005, p. 37)

Lamberts *et al.* (2014, p. 98) descrevem que as características básicas de cada zona bioclimática são:

A zona bioclimática 1 inclui as cidades de Curitiba, Caxias do Sul, Lajes, São Joaquim e Campos do Jordão e tem como principais recomendações construtivas o uso de aberturas para ventilação de dimensões médias, o sombreamento destas aberturas de forma a permitir o sol do inverno e o uso de paredes e coberturas de inércia térmica leve, sendo as coberturas idealmente isoladas. As principais estratégias bioclimáticas para essa região são o aquecimento solar e a grande inércia térmica nas vedações internas.

A zona bioclimática 2 tem as mesmas diretrizes construtivas da zona 1, porém inclui a necessidade de ventilação cruzada no verão. Inclui as cidades de Laguna, Uruguaiana, Pelotas, Ponta Grossa e Piracicaba.

A zona bioclimática 3 inclui as cidades de Florianópolis, Camburiú, Chapecó, Porto Alegre, Rio Grande, Torres, São Paulo, Campinas, Pindamonhangaba, Sorocaba, Belo Horizonte, Foz do Iguaçu, Jacarezinho, Paranaguá e Petrópolis e recomenda como diretrizes construtivas o mesmo que a zona 2, incluindo paredes externas leves e refletoras a radiação solar.

Na zona bioclimática 4 tem como principais recomendações construtivas o uso de aberturas médias, sombreamento necessário nas aberturas durante todo o ano, paredes pesadas e coberturas leve com isolamento térmico. As principais estratégias bioclimáticas para esta zona são o resfriamento evaporativo, a inércia térmica das vedações internas para o período frio. As cidades de Brasília, Franca, Limeira, Ribeirão Preto e São Carlos se situam nesta zona.

A zona bioclimática 5 inclui as cidades de Niterói, São Francisco do Sul e Santos. Suas principais recomendações construtivas são janelas de tamanho médio com sombreamento, paredes leves e refletoras, coberturas leves isoladas termicamente, uso de ventilação cruzada no verão e de vedações internas pesadas (com grande inércia térmica) no inverno.

A zona bioclimática 6 inclui as cidades de Goiânia, Campo Grande e Presidente Prudente e tem como principais diretrizes construtivas o uso de aberturas médias sombreadas, paredes pesadas, coberturas leves com isolamento térmico, uso de resfriamento evaporativo e de ventilação seletiva no verão e uso de vedações internas pesadas no inverno.

A zona bioclimática 7 inclui como recomendações construtivas o uso de aberturas pequenas e sombreadas o ano todo, o uso de paredes e de coberturas pesadas e o uso de resfriamento evaporativo, de inércia térmica para resfriamento e de ventilação seletiva no verão. Inclui as cidades de Cuiabá e Teresina.

A zona bioclimática 8 inclui as cidades de Belém, Corumbá, Fernando de Noronha, Fortaleza, João Pessoa, Maceió, Manaus, Natal, Recife, Rio Branco, Rio de Janeiro, Santarém, Salvador, São Luiz e Vitória. Suas principais diretrizes construtivas são o uso de aberturas grandes e totalmente sombreadas, o uso de paredes e coberturas leves e refletoras e o uso de ventilação cruzada permanente durando o ano todo.

3.3.3 Definição dos requisitos e critérios para avaliação do desempenho térmico

Foi feito um levantamento para verificação de diretrizes técnicas de desempenho térmico de habitações unifamiliares. Como base, inicialmente, utilizou-se os requisitos e critérios da NBR 15575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c), onde a habitação deve reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática definida na NBR 15220 (ABNT, 2005c).

A NBR 15575 (ABNT, 2013c) aborda dois métodos (normativos) para avaliação do desempenho térmico das edificações: o método simplificado e o método de simulação. Caso o desempenho mínimo não seja obtido através do procedimento simplificado, deve-se proceder com o método de simulação.

3.3.3.1 Método simplificado

A NBR 15220 (ABNT, 2005b) estabelece os procedimentos para o cálculo das propriedades térmicas – resistência, transmitância e capacidade térmica, atraso térmico e fator solar – de elementos e componentes da edificação.

A transmitância térmica e absorvância à radiação são critérios estabelecidos para avaliação do sistema de cobertura pelo método simplificado, sua determinação segue conforme procedimentos apresentados na norma. Os procedimentos de cálculo para definir a transmitância térmica dos sistemas para as configurações propostas, estão no Apêndice A.

O quadro 2 apresenta os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica, onde o fluxo térmico considerado é descendente¹.

Quadro 2- Método simplificado: critérios de avaliação para o sistema de coberturas quanto a transmitância térmica

Transmitância térmica (U) W/m ² K					
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8 ¹⁾		Nível de desempenho
$U \leq 2,3$	$\alpha^{1)} \leq 0,6$	$\alpha^{1)} > 0,6$	$\alpha^{1)} \leq 0,4$	$\alpha^{1)} > 0,4$	<i>M</i>
	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	$U \leq 2,3$ FV	$U \leq 1,5$ FV	
$U \leq 1,5$	$\alpha^{1)} \leq 0,6$	$\alpha^{1)} > 0,6$	$\alpha^{1)} \leq 0,4$	$\alpha^{1)} > 0,4$	<i>I</i>
	$U \leq 1,5$	$U \leq 1,0$	$U \leq 1,5$ FV	$U \leq 1,0$ FV	
$U \leq 1,0$	$\alpha^{1)} \leq 0,6$	$\alpha^{1)} > 0,6$	$\alpha^{1)} \leq 0,4$	$\alpha^{1)} > 0,4$	<i>S</i>
	$U \leq 1,0$	$U \leq 0,5$	$U \leq 1,0$ FV	$U \leq 0,5$ FV	

¹⁾ Na zona bioclimática 8 também estão atendidas coberturas com componentes de telhas cerâmicas, mesmo que a cobertura não tenha forro.
 NOTA O fator de ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220/2.

(fonte:ABNT, 2013b)

3.3.3.2 Método de simulação

A seguir, temos o método de simulação, onde são comparados os valores de temperatura do ar máximos e mínimos no ambiente em relação à temperatura do ar externa conforme prescrição da norma para o dia típico de verão e inverno. Os quadros 3 e 4 apresentam os requisitos do método de simulação para condições de verão e inverno, respectivamente.

¹ A norma indica valores de transmitância térmica ($U \leq 3,7$) e capacidade térmica ($CT \geq 130$) para paredes externas, sendo estes valores referentes à zona bioclimática 3, com $\alpha \leq 6$.

Quadro 3- Método de simulação: requisitos de avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^\circ \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1\text{o C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^\circ \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2\text{o C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1\text{o C})$

$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

(fonte: ABNT, 2013c)

Quadro 4- Método de simulação: requisitos de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 51)	Zonas bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^\circ \text{C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^\circ \text{C})$	
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^\circ \text{C})$	

$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

(fonte: ABNT, 2013c)

3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Podemos dizer de forma simplificada, que o processo de simulação computacional consiste na criação de um modelo tridimensional, seguido da inserção de um arquivo climático, período de análise, rotinas (*schedules*) de ocupação dos usuários, descrição dos materiais constituintes da edificação e composição, seguido pela definição das características das superfícies.

Devido ao avanço da tecnologia e melhora de recursos gráficos, tem-se difundido o uso da simulação computacional no ambiente construído. Componentes construtivos, sistemas de

iluminação, desempenhos térmicos, podem ser avaliados em diferentes cenários e diferentes alternativas com o uso de simulação computacional, tornando os projetos mais eficientes (MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, 2005).

Para simulação do modelo, serão utilizados softwares para modelagem tridimensional e estudo de eficiência energética em edificações.

3.4.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um software que permite criar modelos de aquecimento, iluminação, ventilação, arrefecimento e fluxos de água, permitindo a solução integrada de várias disciplinas diferentes. No Brasil, a NBR 15575 (ABNT, 2013c) recomenda o emprego do programa na realização das simulações, facultando a utilização de outros programas, desde que permitam a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima.

3.4.2 *OpenStudio SketchUp Plug-in*

O *OpenStudio* é uma coleção de plataformas cruzadas (*Windows, Mac e Linux*) para suportar a modelagem de energética integral de construção usando o *EnergyPlus* e a análise avançada de iluminação natural usando o *Radiance*. O *OpenStudio* inclui interfaces gráficas, juntamente com um *Software Development Kit* (SDK). As aplicações gráficas incluem o *plug-in* do *OpenStudio SketchUp*, o *OpenStudio Application*, o *ResultsViewer* e a Ferramenta de análise paramétrica. O *OpenStudio SketchUp Plug-in* é uma extensão da popular ferramenta de modelagem *SketchUp* 3D da Trimble que permite aos usuários criar rapidamente a geometria necessária para o *EnergyPlus*².

3.5 SISTEMAS DE COBERTURA

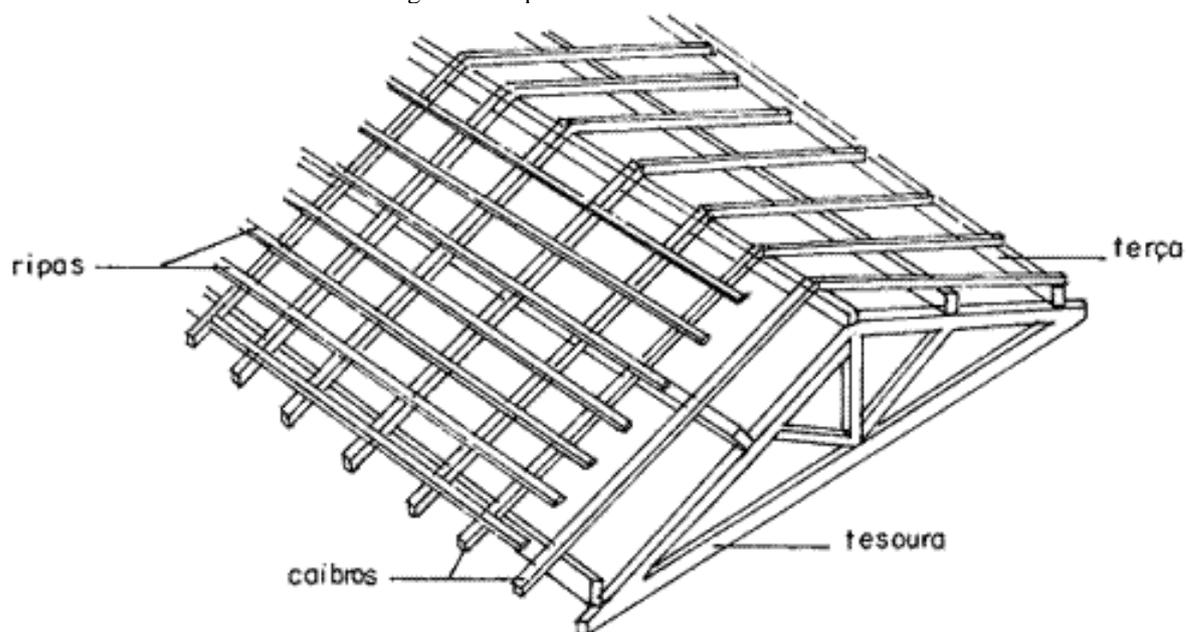
Segundo Moliterno (2010, p. 2), “o **telhado** destina-se a proteger o edifício contra a ação das intempéries, tais como a chuva, vento, raios solares, neve e também impedir a penetração de

² OpenStudio. Disponível em: < <https://www.openstudio.net/> > Acesso em 10 de novembro de 2017.

poeiras e ruídos no seu interior”. O telhado é composto de duas partes principais, sendo elas, a armação e a cobertura.

A **armação** é descrita como sendo um conjunto de elementos estruturais para sustentação da cobertura (MOLITERNO, 2010). Diversos elementos fazem parte da armação, tais como: ripas, caibros, terças, tesouras e contraventamentos, podendo ser totalmente ou parcialmente executados em madeira, aço, alumínio ou concreto armado (figura 3).

Figura 3- Esquema clássico de estrutura



(fonte: Construção civil – blog do Engenheiro Civil³)

Moliterno (2010) define **cobertura** como sendo um elemento construtivo que tem a função de proteger o interior das edificações das intempéries e impedir a penetração de poeiras e ruídos, além de ser um condicionante térmico.

No final do século 20, Ferreira (1998) cita que componente ou elemento de pequenas dimensões eram o produto mais utilizado na constituição dos telhados nas coberturas tradicionais. O autor esclarece que havia uma tendência de aumento da dimensão dos componentes, que visa maior facilidade com relação à montagem em obra, bem como durante a etapa de fabricação. Menos de duas décadas depois, já é predominante a utilização de componente de grandes dimensões, com essa mudança estando principalmente ligada ao custo do sistema.

³ Disponível em: <http://construcaociviltips.blogspot.com.br/2011_09_01_archive.html>.

Devido à grande variedade de opções, para uma boa escolha do sistema de cobertura, entre outras condicionantes, temos que atentar para o desempenho térmico dos componentes do sistema.

Devido à exposição permanente à radiação solar, a cobertura é responsável pelo acréscimo de considerável parcela de carga térmica, principalmente em edificações térreas. Dentre os componentes da cobertura, a telha é o elemento construtivo mais importante em relação a este ganho de calor. Isso se deve principalmente, à pequena espessura do material. A solução é a utilização de forros apropriados, com ventilação e ou isolamento térmico.

A Associação Brasileira de Construção Industrializada – ABCI (1988) indica a necessidade de forro em coberturas simples, onde este acaba tendo dupla função: suportar instalações, nivelar o teto e correção térmica, onde o ar confinado entre a cobertura e forro, e o próprio participam desta correção.

Segundo Domínguez *et al.* (1992), no projeto de uma cobertura devem ser considerados simultaneamente três fatores:

- a) controle solar quantidade de sombra produzida e adequação da forma à da superfície ocupada;
- b) parcela de radiação que atravessa a cobertura em relação ao total que incide sobre ela (o que depende do tipo de cobertura e dos materiais utilizados);
- c) a quantidade de calor absorvido e dissipado pela cobertura (o que depende do tipo de cobertura, forma e da cor da superfície).

3.5.1 Telhado

A superfície do telhado é a parte mais exposta aos elementos climáticos, podendo ser formada por um ou mais planos, denominados também de água ou por uma ou mais superfície curvas (ABNT, 2005). Moliterno (2010) descreve os possíveis materiais que podem constituir a cobertura, entre eles podemos citar: telhas de cerâmica, telhas de concreto (planas ou capa e canal) ou de chapas ondulantes de fibrocimento, aço galvanizado, madeira aluminizada, PVC e fibra de vidro. No presente trabalho optou-se pela análise de dois tipos de telhas (cerâmica e fibrocimento) devido a sua grande utilização em edificações térreas.

A telha cerâmica é umas das mais utilizadas na construção de coberturas de telhados, sendo de fácil instalação, custo relativamente baixo e boa aceitação quanto à estética que proporcionam

para a edificação. Geralmente a telha cerâmica é fabricada por prensagem, com dimensões bem definidas (AMBROZEWICZ, 2012). Para sua produção é necessária uma seleção criteriosa da mistura de argilas que irão compor a massa, em função da telha a ser fabricada (ISAIA, 2007). Algumas telhas ainda podem ser submetidas à esmaltação que lhes confere maior impermeabilidade e brilho.

Já telhas de fibrocimento, são fabricadas com uma mistura íntima e homogênea, em presença de água, composta essencialmente de cimento Portland, agregados, adições ou aditivos com reforço de fibra, fios ou filamentos, com exceção de fibras de amianto (ABNT, 2005d). É um material que surgiu no mercado para substituir a fibra de amianto, um material que comumente era usado na confecção de telhas onduladas, mas que é tóxico a saúde⁴.

Sua principal vantagem frente às telhas cerâmicas é o peso do telhado, diminuindo o peso da estrutura, exigindo menos carregamento e vigas de suporte. Além disso, sua instalação é mais simples, necessitando menos ripas, com maior facilidade de limpeza, pois possui poucas reentrâncias.

A ABCI (1988, p.12-14) cita as principais características do telhado de fibrocimento:

Durabilidade – o fibrocimento dispensa manutenção, a assegurando automaticamente longa vida.

Impermeabilidade – no processo de fabricação, as delgadas camadas são enroladas contínua e fortemente, garantindo a impermeabilidade do produto.

Estanqueidade – devido ao processo produtivo – que garante a impermeabilidade – as telhas de fibrocimento apresentam características finais dimensionais e detalhes estudados de aplicação, que conferem à cobertura estanqueidade a toda prova, sem respingos.

Resistência mecânica – as fibras reforçadas e uniformemente espalhadas e distribuídas no cimento garantem ao fibrocimento a necessária resistência aos esforços de tração. Para os produtos denominados estruturais, o desenho do perfil tem grande influência na resistência. A resistência das telhas fibrocimento também está comprovada em casos de choques acidentais.

Menor peso – as telhas fibrocimento são mais leves que as tradicionais, proporcionando grande economia no madeiramento.

⁴ World Health Organization. Chrysotile Asbestos. 2014.

Outra característica a se destacar, é a facilidade de aderência de pintura à telha. Ripper (1995) cita diversos tipos de acabamentos, como semibrilho, fosco ou aveludado e de diversas cores. O autor esclarece que essa pintura pode ser feita em até seis meses de sua instalação.

As telhas de fibrocimento têm como sua principal aplicação cobertura e revestimentos externos de estruturas (elementos autoportantes), podendo ser usadas também em construções provisórias e auxiliares. A utilização de telhas desenvolvidas para construções auxiliares e provisórias em edificação residencial gerou uma cultura de que se trata de um material inferior. Entretanto, o uso em projeto, considerando suas características, a finalidade da ocupação e um correto dimensionamento fazem desse produto uma opção viável de construção dentro dos parâmetros necessários para habitabilidade.

3.6 ISOLAMENTO TÉRMICO

Há dois tipos de isolamento térmico (ou formas de redução da passagem do calor). O tipo mais simples e conhecido, chamando de isolamento por resistência, reduz a passagem do calor de um lugar constantemente mais quente a um constantemente mais frio. Entretanto, nos climas quentes, a maioria das cargas térmicas que se busca abrandar não é constante (MASCARÓ, 1991).

Conforme descrito inicialmente, a cobertura é o elemento do envolvente mais exposto à radiação solar, sendo fundamental para o bom desempenho da edificação um desenho adequado às solicitações climáticas. Mascaró (1991) explica que, por ser menor a amplitude de temperaturas diurnas e noturnas nos climas quente-úmidos do que nos climas quente-secos, o desenho da cobertura deve seguir critérios de isolar termicamente sem armazenar calor (pouco inércia térmica).

Vale ressaltar que as paredes, segundo sua localização e orientação, recebem certa quantidade de calor, com menor intensidade e por períodos mais breves que a cobertura, sendo aplicáveis a elas todos os critérios de projeto esboçados para cobertura. Logo, é relevante o projetista dar mais atenção às edificações localizadas nos centros urbanos, por causa do efeito da radiação térmica, particularmente quando o entorno não favorece o aproveitamento das condições do clima e do sítio (MASCARÓ, 1991).

4 METODOLOGIA

Os estudos serão direcionados ao desempenho térmico das coberturas em edificações unifamiliares localizadas na cidade de Porto Alegre, tendo-se por referência as Normas Técnicas - NBR 15575 (ABNT, 2013a, 2013b, 2013c).

A metodologia foi dividida em três partes, sendo elas:

- Caracterização do projeto de estudo
- Configurações de projetos
- Elaboração do modelo de simulação

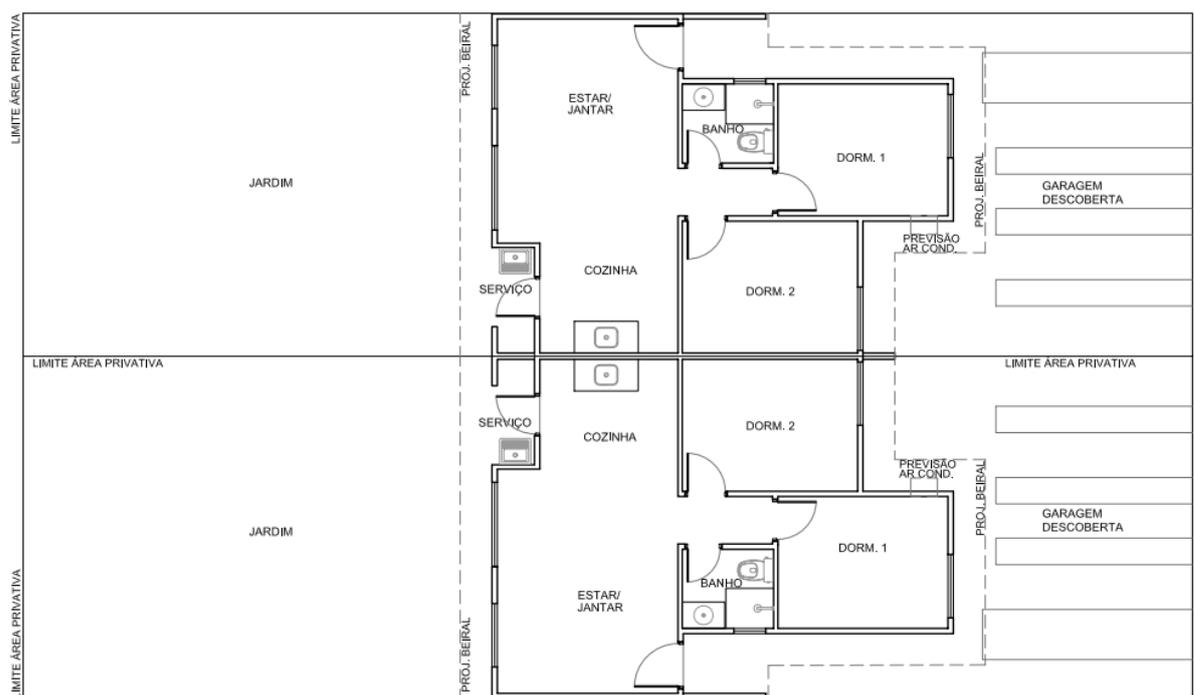
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO DE ESTUDO

Para o desenvolvimento do trabalho foi escolhido o projeto de uma habitação unifamiliar, que tem como característica ser constituinte de edificação em fita. Este tipo de edificação está cada vez mais disseminado, por ser considerado um método racional de construção.

A edificação é composta de estar/jantar, cozinha integrada à sala, área de serviço, dois dormitórios e banheiro, possui 38,7m² de área construída, e foi considerado como estando localizada na cidade de Porto Alegre, RS. A opção pela análise do projeto com esta configuração foi devido ao fato de ser uma edificação amplamente difundida na construção de casa populares.

A estrutura da habitação é composta por meios de sistemas construtivos convencionais e materiais padronizados. A habitação é composta basicamente, por pisos, aberturas e envoltória (vedações verticais e cobertura), conforme demonstra a figura 4.

Figura 4- Planta casa modelo A sem varanda



(fonte: Projeto arquitetônico do empreendimento)

O **fechamento vertical** foi concebido em concreto armado auto adensável com tela de aço, sem revestimento (pois os painéis que servem de fechamento já possuem acabamento) e pintado. Para a pintura externa foi utilizada tinta acrílica fosca (nas opções branco e menta), sobre massa acrílica texturizada, e para a interna, revestida com massa PVA, uma pintura com tinta PVA na cor branca.

O **telhado** é constituído de telha cerâmica com estrutura de madeira, tendo uma camada de forro em placa de gesso. Para a análise inicial será considerado um projeto padrão - configuração 1, conforme descrito, para fins comparativos. As análises posteriores, a telha cerâmica foi substituída por telha de fibrocimento, onde foram criadas mais 3 configurações.

Na composição de materiais para cálculo analítico e simulação foram utilizados dados das propriedades térmicas dos materiais e/ou componentes construtivos (tabela 1) disponibilizados na NBR 15220 (ABNT, 2005b) como referência por tratar-se de uma análise da edificação na fase de projeto. Faz-se exceção, para as telhas de fibrocimento, onde os valores foram retirados do catálogo da empresa Brasilit⁵.

⁵ Brasilit. Disponível em: <http://www.brasilit.com.br/sites/default/files/catalogos_folhetos/Cat%C3%A1logo-TelhasDeFibrocimento-Brasilit_1.pdf> Acesso em 3 de outubro de 2017.

Tabela 1- Características dos materiais utilizados na simulação

Material	Propriedade térmicas e físicas			
	Densidade [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]	Espessura média [m]
Telha cerâmica	2000	1,05	920	0,018
Telha fibrocimento	1600*	0,65	840	0,006
Placa de gesso	750	0,35	840	0,03
Isolamento	35	0,04	1420	0,025
Concreto	2400	1,75	1000	0,1

*Valor referente a telha fibrocimento da empresa Brasilit.
(fonte: adaptado de ABNT, 2005; elaborado pelo autor)

Em seguida, a partir do banco de dados de materiais, foram criadas composições simplificadas de cada elemento construtivo da edificação.

4.2 CONFIGURAÇÕES DE PROJETO

As seguintes configurações serão analisadas:

- 1) projeto padrão com telha cerâmica e forro;
- 2) substituição da telha cerâmica por telha de fibrocimento, sendo a configuração base onde foram feitas as modificações;
- 3) configuração base com adição de isolamento térmico (poliestireno expandido moldado);
- 4) configuração base com pintura de cor clara na telha de fibrocimento.

As configurações para a simulação da edificação são apresentadas no quadro 5, apresentando as características de cada sistema e seus respectivos componentes.

Quadro 5- Configuração dos sistemas utilizados na simulação

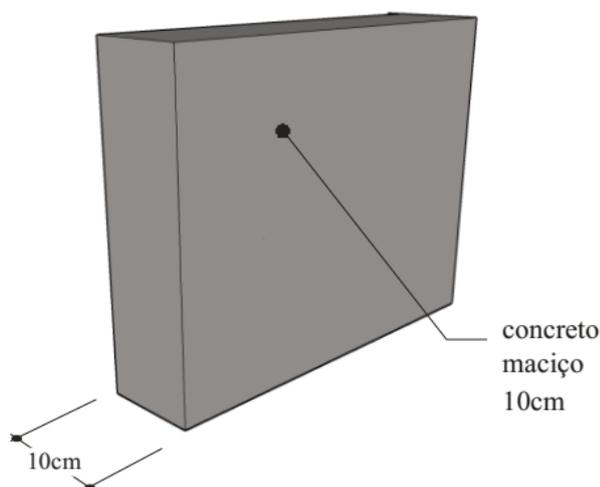
Configuração	Sistemas e subsistemas			
	Telhado	Forro gesso acartonado	Pintura na telha	Isolamento térmico
1	cerâmica	Sim	não	não
2	fibrocimento	Sim	não	não
3	fibrocimento	Sim	não	sim
4	fibrocimento	Sim	sim	não

(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme descrito anteriormente, todas as configurações serão compostas por parede de placas de concreto (figura 5), com espessura de 10cm, sem camada de argamassa de revestimento,

interna ou externa, conforme projeto, sendo a parede pintada diretamente. Para o valor de absorvância à radiação solar a ser utilizado nas simulações será considerado o definido na NBR 15575 (ABNT, 2013) para paredes com pintura na cor clara ($\alpha=0,3$).

Figura 5- Parede de placa de concreto

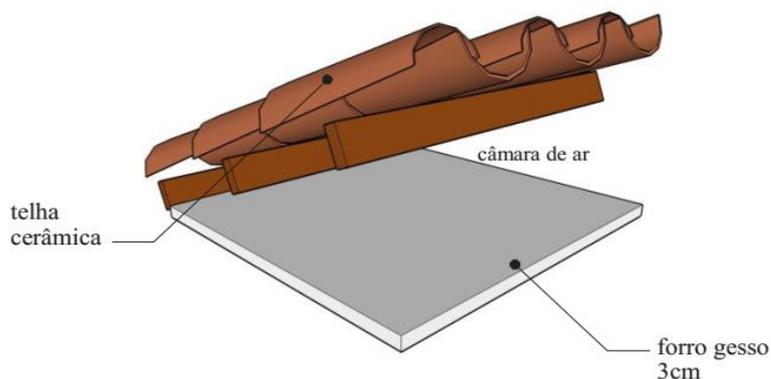


(fonte: PBEEDIFICA⁶)

Para todas as configurações, a cobertura será composta por telha, camada de ar e forro de placa de gesso com espessura de 30mm. Foi considerado uma camada de ar não ventilada, em superfície de alta emissividade ($\epsilon > 0,8$), com resistência térmica de $0,21 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, conforme valores sugeridos pela NBR 15220 (ABNT, 2003b).

A configuração 1 será constituída de telha de cerâmica, sem esmaltação, conforme figura 6.

Figura 6- Cobertura de telha cerâmica



(fonte: PBEEDIFICA⁷)

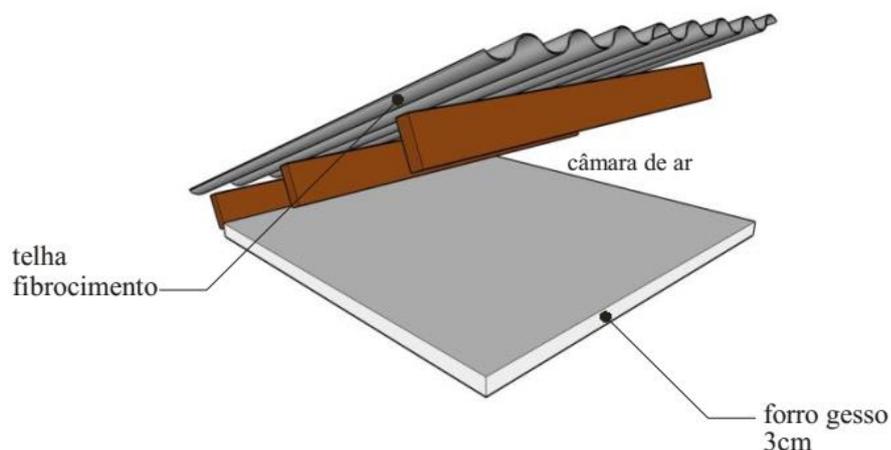
⁶ PBE Edifica. Disponível em:

<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos_rac/AnexoV.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2017.

⁷ Idem

Na configuração 2, serão substituídas as telhas cerâmicas por telhas de fibrocimento, mantendo as demais características do sistema (figura 7).

Figura 7- Cobertura de telha fibrocimento



(fonte: PBEEDIFICA⁸)

Para a configuração 3 será inserido na configuração 2 uma camada de isolamento térmico com espessura de 25mm. O material utilizado será poliestireno expandido moldado.

Por fim, temos a configuração 4 onde será implementada cor reflexiva ($\alpha=0,3$) na superfície exterior da telha de fibrocimento, aumentando assim a capacidade da superfície de refletir a radiação solar incidente.

4.3 ELABORAÇÃO DO MODELO SIMULAÇÃO

As simulações para o estudo do desempenho térmico foram realizadas a partir do programa *OpenStudio*, versão 1.12.0, que faz modelagem de energia de construção integral usando o programa *EnergyPlus*. Para a interface gráfica o programa inclui o *plug-in* do *OpenStudio SketchUp*, sendo uma extensão da ferramenta de modelagem *SketchUp 3D* que permite uma rápida criação da geometria necessária para o *Energy Plus*.

O método de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2013c) estabelece determinadas configurações para o modelo computacional: serão simulados os recintos de permanência prolongada, como

⁸ PBE Edifica. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos_rac/AnexoV.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2017.

salas e dormitórios, desconsiderando a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, outros equipamentos em geral) e com uma taxa de infiltração de ar de 1 troca por hora nos ambientes.

A norma ainda define que para conjunto habitacional de edificações térreas, deverá ser selecionado uma unidade habitacional com o maior número de paredes expostas. A unidade considerada faz fronteira (nos ambientes do quarto e cozinha) com outra unidade igual, sendo que a parede da sala/estar foi considerada como pertencente a uma edificação de ponta de fita, onde recebe maior incidência solar direta na parede.

O modelo tridimensional e as zonas térmicas, definidas na interface gráfica, foram as variáveis iniciais que geraram o arquivo base de simulação. Após foram definidas as demais características necessárias para simulação. As definições, bem como as etapas de construção do arquivo de simulação estão descritos nos itens abaixo.

4.3.1 Modelo tridimensional e zonas térmicas

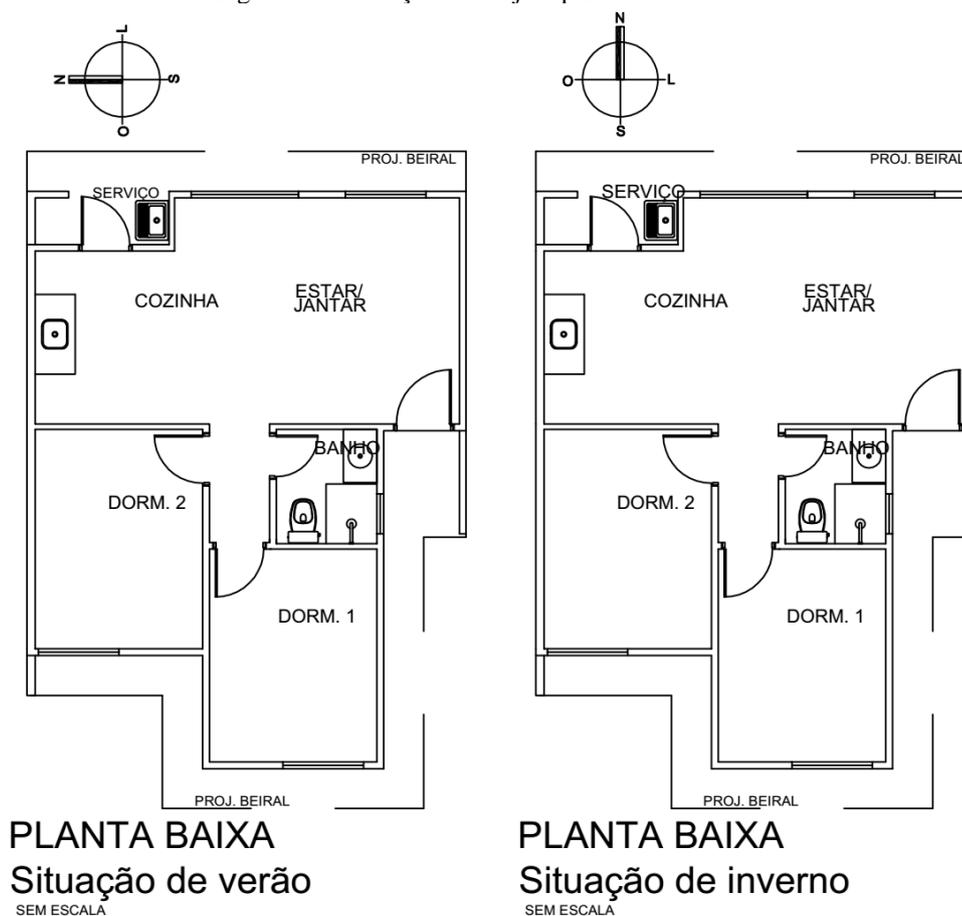
Para os 5 (cinco) ambientes existentes no prédio, foram definidas 3 (três) zonas térmicas, com pé direito de 2,75m e desenhadas a partir das linhas médias de suas paredes. A área de corredor que dá acesso aos dormitórios e banho não foram motivo de análise, conforme recomendado na NBR 15575 (ABNT, 2013c). Esta consideração se deve ao fato de serem áreas de transição e seu comportamento térmico não tem grande influência no cotidiano dos usuários. Devido ao fato de ser uma análise em fase de projeto, sombreamentos de estruturas pré-existentes e de vegetação não foram consideradas no modelo.

4.3.2 Localização e período de simulação

A edificação está localizada na cidade de Porto Alegre, RS, que faz parte da Zona Bioclimática 3 – ZB 3. Segundo a norma, a simulação deve ser realizada para condições de verão e inverno, definidas por dias típicos de projeto.

A orientação solar de análise foi definida de tal forma que a unidade a ser avaliada tenha a condição mais crítica do ponto de vista térmico, sendo estas no verão, a dos dormitórios com janelas voltados para a direção Oeste e uma parede exposta voltada para o Norte e, no inverno, os dois dormitórios na direção Sul e uma parede exposta voltada para Leste (figura 8).

Figura 8- Orientação de Projeto para verão e inverno



(fonte: Projeto arquitetônico do empreendimento, adaptado pelo autor)

4.3.3 Arquivo climático

Os seguintes valores para os dias típicos de inverno e verão são apresentados pela NBR 15575 (ABNT, 2013c), conforme apresentado na tabela.

Tabela 2- Dados de dias típicos de verão e inverno para Porto Alegre

Variáveis climáticas	Verão	Inverno
Temperatura extrema diária [°C]	35,9 (máxima)	4,3 (mínima)
Amplitude diária de temperatura [°C]	9,6	8,6
Temperatura de bulbo úmido [°C]	23,9	12,1
Nebulosidade [décimos]	5	6

(fonte: adaptado de ABNT, 2013c; elaborado pelo autor)

Além dos dados geográficos, os seguintes dados de entrada são necessários para a simulação do desempenho térmico, considerando o dia típico: período simulado, dia e mês considerado,

tipo do dia (dia típico de verão ou inverno), temperatura máximas de bulbo seco, variação diária da temperatura de bulbo seco.

Cabe destacar que o programa *EnergyPlus*, recomendado para o método de simulação computacional da NBR 15575 (ABNT, 2013c), requer dados extras que não foram estabelecidos na norma para o processo de simulação do dia típico. Devido às especificações desta norma conterem dados incompletos do dia típico, dificultando a compatibilização das informações necessárias para a realização da simulação computacional, serão adotados os arquivos climáticos disponíveis para a cidade de Porto Alegre na análise.

Foi utilizado o Ano Climático de Referência (TRY), conforme sugestão de Lamberts et al., (2014), que possui valores horários de temperatura e umidade relativa, entre outros. O TRY foi desenvolvido para o uso na simulação de construção para 17 principais capitais de estados no Brasil. Os dados de origem foram fornecidos pela Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento - Instituto Brasileiro do Frio, ABRAVA/IBF junto ao Centro Técnico Aeroespacial - Instituto de Aeronáutica e Espaço, CTA/IAE INFRAERO. A LabEEE revisou, montou e formatou os dados.

4.3.4 Cargas térmicas, densidade de ocupação e uso

Para análise segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013c), não foram consideradas cargas térmicas referentes a pessoas, equipamentos e iluminação na determinação da temperatura do ar interna. Pelo fato de não serem feitas estas considerações, a variação de ocupação, uso ou situação de funcionamento não foram motivo de estudo para edificação. Vale ressaltar que as cargas térmicas têm influência direta sobre o conforto do usuário, podendo, em um estudo mais aprofundado, serem consideradas por meio de um embasamento teórico para tal.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na pesquisa foram aplicados o procedimento simplificado e o método de simulação computacional da NBR 15575 (ABNT, 2013c) para o projeto de habitação unifamiliar. O objetivo foi verificar se as configurações propostas alcançam os valores mínimos estabelecidos na norma para o desempenho térmico considerando a envoltória.

As configurações 1 e 2, projeto padrão e onde houve a troca do telhado, apresentaram características idênticas entre si em ambos os procedimentos de análise. As configurações seguintes conseguiram alcançar o objetivo proposto - fazer modificações com o intento de melhorar o comportamento térmico do sistema.

De posse dos resultados realizou-se a interpretação dos dados obtidos, disponibilizados na forma de texto e tabelas, seguida de uma breve análise. Primeiramente foi feita uma apresentação dos resultados do cálculo simplificado para as configurações propostas. Logo após, foram apresentados os resultados de avaliação do desempenho térmico pelo método de simulação para as configurações que não atingiram as condições mínimas definidas por norma.

5.1 NBR 15575:2013 – MÉTODO SIMPLIFICADO

Como o critério de avaliação da norma (simplificado) considera apenas fluxo de calor descendente, foram feitos os cálculos considerando apenas a situação de verão. A aplicação do procedimento simplificado implica na verificação do atendimento aos limites para a transmitância térmica (U) e a absorvância a radiação solar (α) das coberturas. As equações de cálculo são apresentadas no Apêndice A, onde são apresentados os cálculos para análise das configurações propostas.

O quadro 6 apresenta os critérios e nível de desempenho para as configurações, sendo as configurações 1 e 2 consideradas insuficientes do ponto de vista térmico, e as configurações 3 e 4 atingiram, respectivamente, os níveis intermediário e mínimo de desempenho.

Quadro 6- Critérios e nível de desempenho segundo método simplificado da NBR 15575

Sistema construtivo – cobertura	Transmitância Térmica [W/(m ² .K)]		Desempenho
	Calculado	Mínimo	
Configuração 1	1,91	U<1,5 ($\alpha > 0,6$)	Insuficiente
Configuração 2	1,94	U<1,5 ($\alpha > 0,6$)	Insuficiente
Configuração 3	0,87	U<1,5 ($\alpha > 0,6$)	Intermediário
Configuração 4	1,94	U<2,3 ($\alpha < 0,6$)	Mínimo

(fonte:adaptado de ABNT, 2013b; elaborado pelo autor)

5.1.1 Configurações 1 e 2

Conforme o quadro apresentado, podemos verificar que os dois sistemas, configuração 1 e 2, apresentam resultados similares e não satisfazem os níveis mínimos de desempenho considerando U e α , havendo dessa forma a necessidade de análise pelo método de simulação computacional.

5.1.2 Configuração 3

Para a configuração 3, onde foi inserido uma camada de isolamento térmico no sistema de cobertura com telhado de fibrocimento, o nível de desempenho atingido foi o mínimo exigido pela norma. Esta opção de modificação é interessante por ter influência positiva termicamente, tanto no período de verão, como no inverno, aumentando a resistência térmica da cobertura.

Para o período de inverno, a utilização do isolamento para a telha de fibrocimento virá a sanar uma característica desfavorável deste material, devido a sua baixa inércia térmica. Com o isolamento as trocas térmicas irão ocorrer de forma mais lenta, onde a temperatura interna sofrerá uma influência mais branda do meio externo.

5.1.3 Configuração 4

Na configuração 4 foi proposta a pintura de cor clara na superfície, modificando a absorvância a radiação e aumentando assim a capacidade da superfície de refletir a radiação, e aumentando também a capacidade de devolver a energia térmica (calor) absorvido como radiação térmica, diminuindo a temperatura da envolvente da edificação.

Para valores de absorvidade menores que 0,6, a norma indica valores superiores de transmitância térmica para cada nível de desempenho. Desta forma os valores de transmitância térmica da cobertura de fibrocimento ($U=1,94\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), quando feita a pintura de cor clara atinge o nível mínimo de desempenho ($U<2,3\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$).

Devido às características dos países tropicais, onde há pouca variação térmica no decorrer do ano e temperaturas brandas no inverno, a pintura da superfície de exposição é uma solução de fácil aplicabilidade que proporciona características térmicas favoráveis. Em estudos, como os de Chvatal (2014) que faz uma análise sobre a transmissão de calor para o ambiente interno com variação da transmitância térmica e absorvância à radiação, a temperatura interna diminui significativamente conforme os valores de absorvância a radiação solar (α) diminuem. Nesta situação a temperatura interna acaba sendo pouco influenciada pela variação de transmitância térmica (U).

Apesar de ser uma técnica que gera ganhos no desempenho térmico do sistema, é relevante considerar a variação da cor da superfície dos materiais ao longo de sua vida útil de projeto, geralmente para tons mais escurecidos. A norma cita valores de absorvância à radiação superiores e inferiores a 0,6. Entretanto, nos casos de valores inferiores, não faz menção à sua manutenção abaixo do estabelecido no decorrer da vida útil do sistema, que garantiria o desempenho do sistema.

Como a análise do desempenho térmico feita considera as características do material e não a variação destas ao longo da vida, foi consultado um fabricante da área⁹ para esclarecimentos a respeito da variação da cor ao longo da vida útil do produto (fibrocimento), onde foi informado que, “O principal fator que afeta a “vida” útil desta propriedade (α) é a sujidade pela deposição de particulados tipos fuligem ou poeira ou de matéria orgânica e consequente formação de fungos e líquens sobre a superfície das telhas. Como todo telhado, a limpeza com produtos adequados pode recuperar grande parte desta cor original, mas uma parcela da “alvura” poderá ser perdida pela característica de impregnação destes fungos/liquens”.

Desta maneira, tanto no sistema de cobertura com telha de fibrocimento sem modificação, quanto o pintando, a manutenção e limpeza são fatores que virão a garantir o desempenho térmico ao longo do tempo. Unindo as características de baixa absorvância à radiação com a

⁹ Resposta fornecida, via e-mail, pela empresa Saint-Gobain Brasilit referente a variação da cor do telhado fibrocimento com o tempo.

preocupação em manter essa característica, a Saint-Gobain Brasilit desenvolveu o telhado *TopComfort* – telhas térmicas de fibrocimento. O diferencial desta telha consiste na pigmentação da camada de fibrocimento externa com cimento branco e dióxido de titânio (TiO₂), onde proporciona propriedades térmicas melhoradas, também não sofrendo delaminação ao longo do tempo. Essa pode ser uma solução viável termicamente para o sistema de cobertura, mesmo sendo um material diferenciado e com valores acima do sistema convencional, podendo o projetista fazer uma análise dos ganhos energéticos ao longo do tempo.

5.2 NBR 15.575:2013 – MÉTODO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

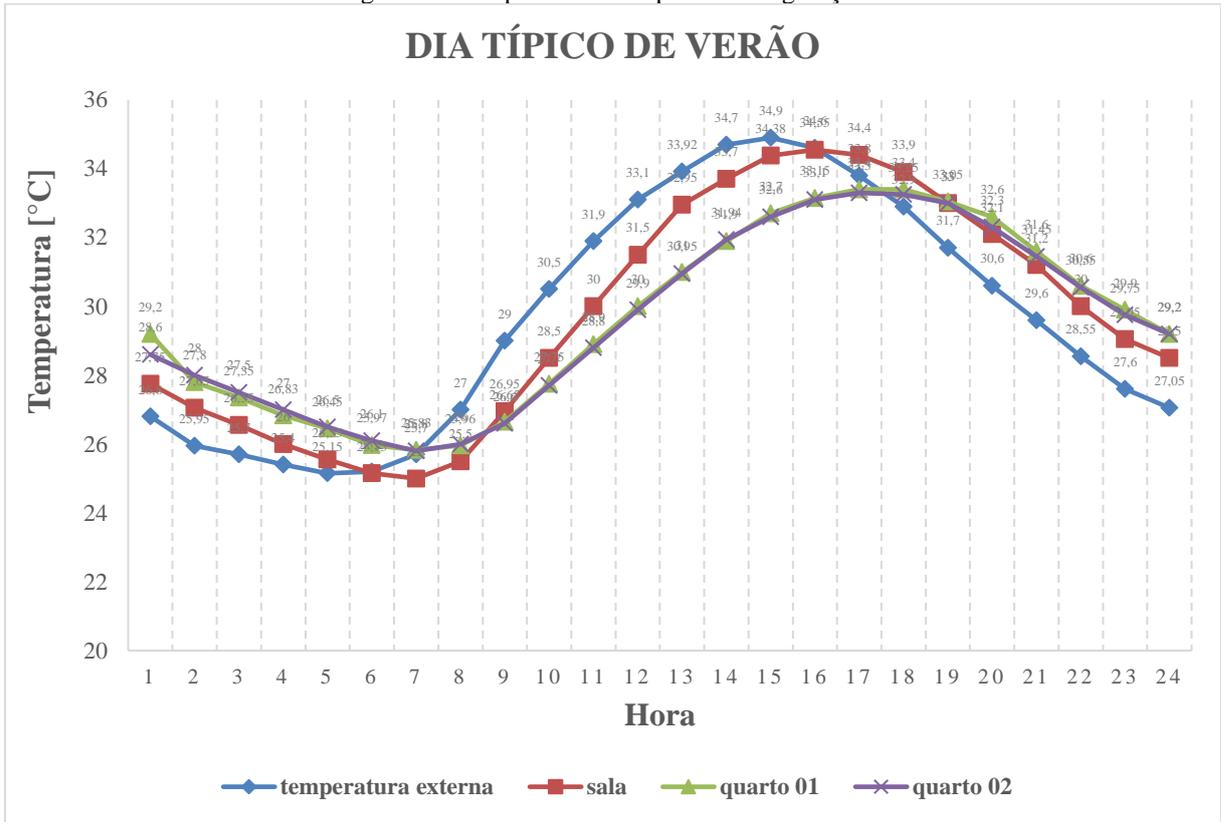
Para o método de simulação computacional foram obtidas as temperaturas máximas e mínimas do ar no interior da habitação para os dias típicos de verão e inverno respectivamente, e seus valores foram comparados com os distintos níveis de desempenho.

Foram analisadas as configurações 1 e 2 por não atingirem o desempenho mínimo exigido por norma. Para o período de verão, as duas configurações atingiram um nível de desempenho mínimo. Para o período de inverno, apenas a configuração 1 foi aprovada, sendo reprovada a configuração 2. Entretanto, ambas as configurações têm características semelhantes, que serão discutidas abaixo.

5.2.1 Período de verão

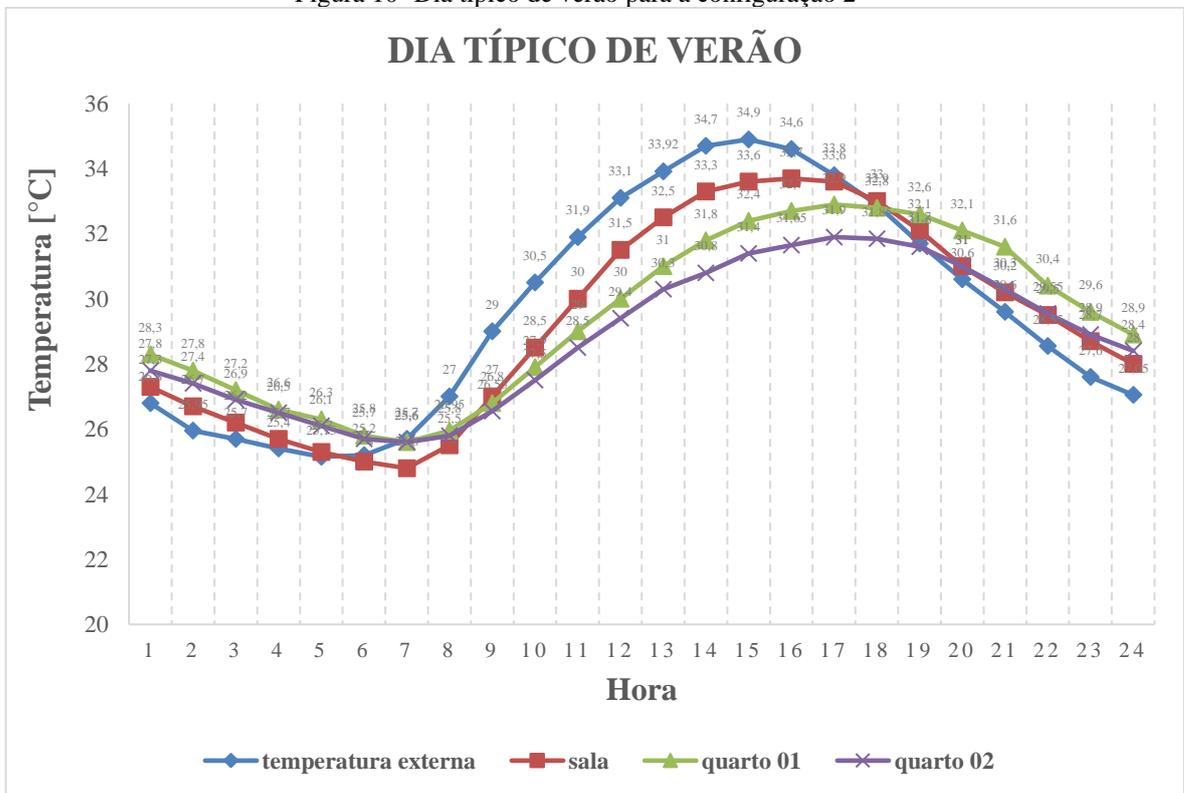
Os resultados da aplicação do método de simulação, nas configurações 1 e 2, referentes ao verão, são apresentados nas figuras 10 e 11. Nos gráficos são representados os valores de temperatura para cada hora do dia, em cada ambiente e a temperatura do ar externo.

Figura 9- Dia típico de verão para a configuração 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10- Dia típico de verão para a configuração 2



(fonte: elaborado pelo autor)

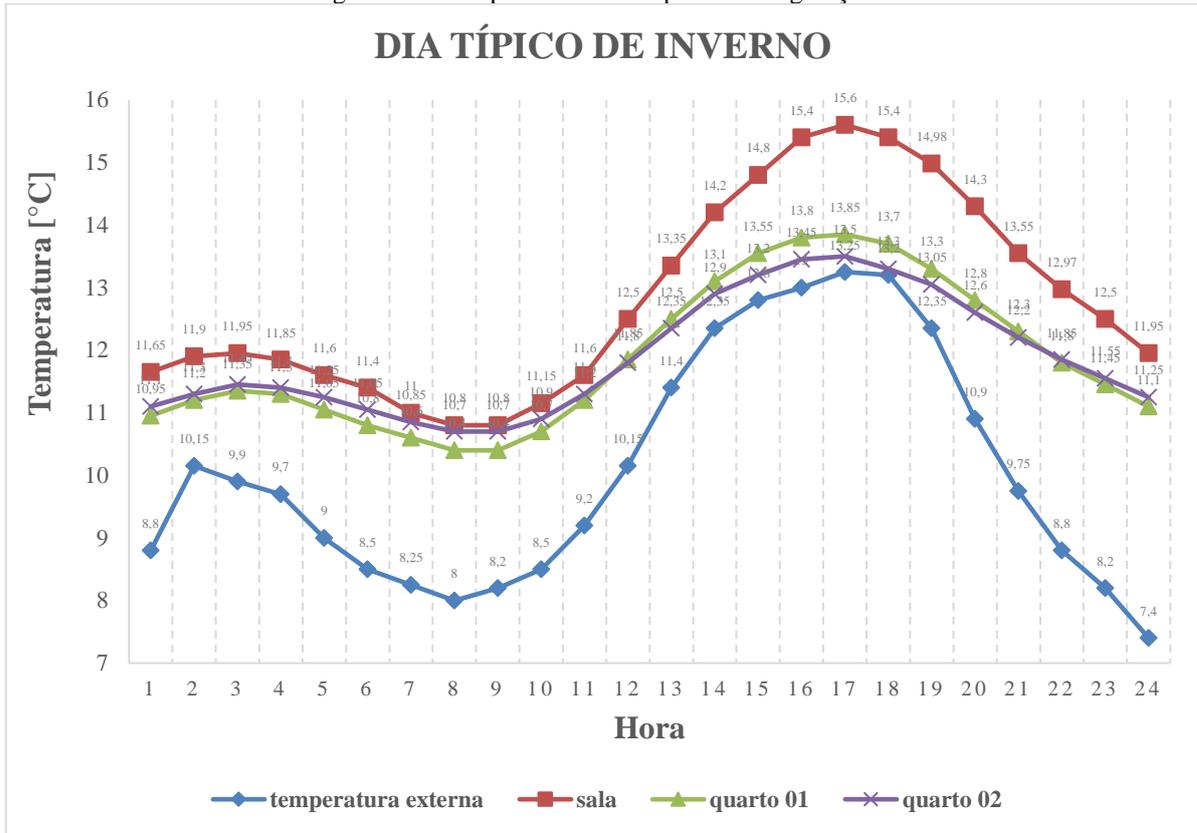
Conforme apresentado nas figuras, a temperatura externa máxima diária foi de 34,9°C. As configurações 1 e 2 tiveram a sala como o ambiente mais crítico ao longo do dia. Para a sala da configuração 1, a temperatura máxima foi de 34,59°C, e para a configuração 2, 33,7°C. Em todos os ambientes a temperatura máxima interna, foi menor que a externa, atingindo assim o nível mínimo de desempenho.

Mesmo as duas configurações apresentando características semelhantes, para a situação de verão, a configuração 2 teve um menor ganho térmico. Esse cenário pode ter sido influenciado pela refletância do material. Mesmo apresentando valores elevados de absorvância à radiação, são valores menores do que os apresentados para o material da configuração 1.

5.2.2 Período de inverno

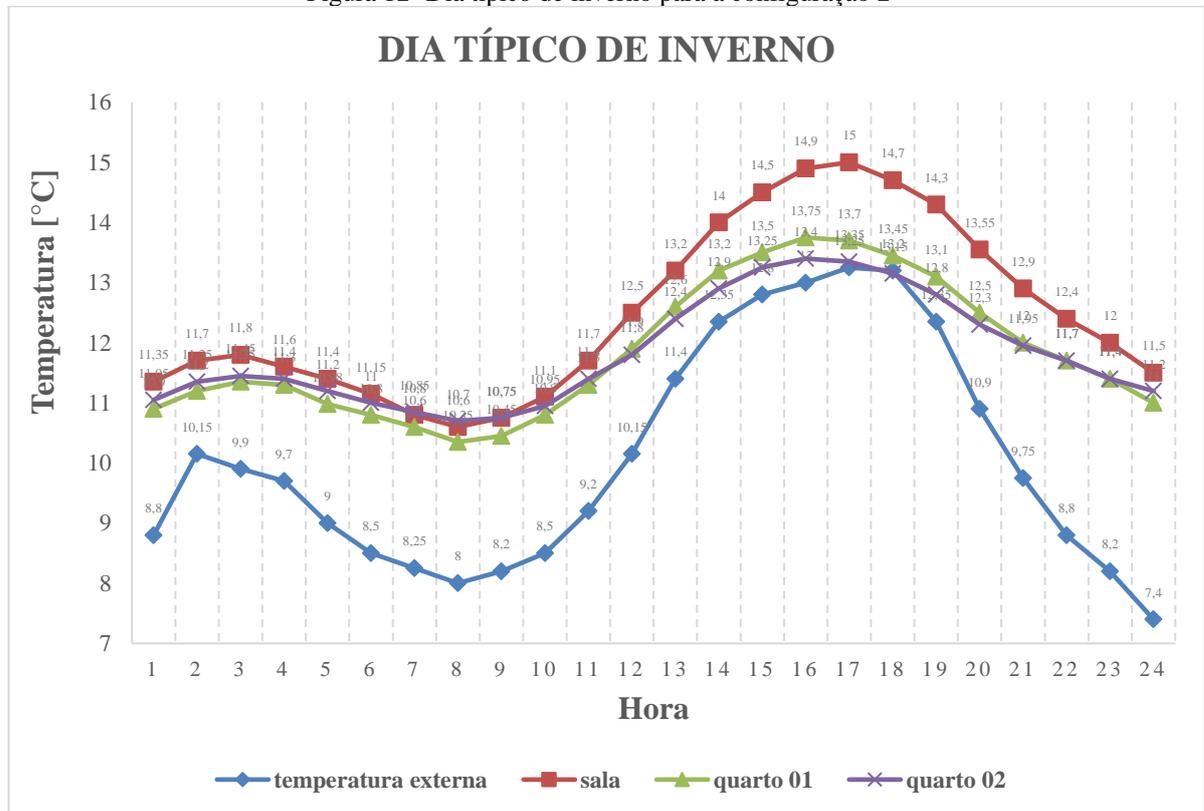
Nas figuras 12 e 13 são apresentados os resultados da simulação para o período de inverno das duas configurações, tendo como temperatura externa mínima diária o valor de 7,4°C. Para a configuração 1, dentre os ambientes internos, o quarto 01 teve a menor temperatura do dia, 10,4°C. Já para a configuração 2, o valor mínimo foi de 10,35°C, novamente no quarto 01. Mesmo apresentando valores muito próximos, segundo a NBR 15575, apenas a configuração 1 apresenta o desempenho mínimo requerido.

Figura 11- Dia típico de inverno para a configuração 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12- Dia típico de inverno para a configuração 2



(fonte: elaborado pelo autor)

Os quartos tiveram os piores resultados na simulação. Isto já era esperado, pois a situação mais crítica de projeto considerou a menor incidência solar neles, para o período de inverno.

Mesmo uma configuração sendo reprovada e outra aprovada pelo método, quando analisada a temperatura nos ambientes ao longo do dia, nenhum dos sistemas apresenta vantagens quando comparados entre si. As duas configurações se situaram no limiar da aprovação pelo método de simulação.

Vale ressaltar que a aprovação ou reprovação foram consideradas de forma puramente matemática. Considerando-se os valores para aceitação de projeto, para o contexto, as duas configurações têm uma diferença de $0,05^{\circ}\text{C}$, sendo também esta a diferença para atingir o nível mínimo de desempenho. Desta forma, em uma análise do ponto de vista térmico e considerando as margens de possíveis variação na análise, podemos considerar a configuração 2 dentro do nível mínimo estabelecido por norma.

Por fim, conforme descrito para a situação de verão, o menor ganho térmico do material da configuração 2 poderá estar associando à sua refletância. Estudos analisando a variação da absorvância e seu nível de influência no ganho térmico seriam necessários para maior entendimento e compreensão dos resultados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para as configurações com as modificações propostas, o desempenho mínimo foi alcançado, tornando-as aplicáveis ao projeto. As modificações foram propostas para o sistema de telha fibrocimento. Entretanto, a colocação de isolamento no sistema com telha cerâmica tende a surtir o mesmo efeito. Só deve-se atentar que o sistema com telha cerâmica é mais dispendioso e demorado na sua instalação do que a cobertura com fibrocimento.

A modificação com pintura que é viável no sistema com telhas de fibrocimento, acaba sendo impraticável para telhas cerâmicas. Entretanto, já existem opções de telhas cerâmicas pigmentadas de fábrica, assim como as opções que estão entrando no mercado para fibrocimento com pigmento, porém as telhas devem ser conservadas na cor clara para manter suas características térmicas. Levando em consideração esta manutenção da cor, a telha de fibrocimento com dióxido de titânio é uma característica que pode influenciar na escolha do sistema.

Por fim, o sistema atinge o nível de desempenho considerado mínimo pela norma. Porém, cabe destacar que independente da conformidade com a norma de desempenho as temperaturas internas, para o dia típico de verão e de inverno, estão com valores muito distantes da zona de conforto (intervalo de 23°C a 27° C). De modo que, o usuário buscando conforto térmico terá que recorrer a sistema ativos de condicionamento, porém se os critérios fossem mais rígidos haveria menores gastos energéticos.

Comparando termicamente a configurações 1 e 2, tanto no procedimento simplificado quanto o método de simulação, e considerando a transmitância e a temperatura interna dos ambientes analisados, os dois sistemas apresentam características similares. Desta forma, a escolha da melhor solução para o projeto de estudo poderá se ater a outras características que vão além do desempenho térmico da cobertura, como custo, velocidade de execução, estéticas, entre outras.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1, Desempenho térmico de edificações - parte 1: Definições, símbolos e unidades. p. 7, 2005a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2, Desempenho térmico de edificações: parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. p. 23, 2005b.
- ABNT - 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. p. 23, 2005c.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15210, Telha ondulada de fibrocimento sem amianto e seus acessórios - Parte 1: Classificação e Requisitos. p. 16, 2005d.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-4, Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4 : Sistemas de vedações verticais internas e externas. 2013a.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-5, Edificações habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. p. 63, 2013b.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1, Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais Prefácio. p. 60, 2013c.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9952, Manta asfáltica para impermeabilização. 2014.
- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção - Normas, Especificações, Aplicação e Ensaios de Laboratório**. 1. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2012.
- ANALYSIS-BIO. **Programa Analysus-BIO: módulo bioclimatologia**. Florianópolis Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, , 2006. Disponível em: <www.labee.ufsc.br>
- ASHARE. ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. **American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers**, v. ASHRAE Sta, p. 58, 2013.
- BEJAN, A. **Transferência de calor**. São Paulo: Edigar Blucher, 1996.
- BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1998.
- BRAGA FILHO, W. **Transmissão de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

CBIC – CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de calor e massa**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CHVATAL, K. M. S. **Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações**. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 119–134, 2014.

COSTA, E. C. DA. **Física aplicada à construção; conforto térmico**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1974.

COSTA, E. C. DA. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. 5 reimpress ed. São Paulo: Editora Blucher, 1982.

FERREIRA, O. P. **Produtos e tecnologias existentes para a construção da cobertura de habitações no Brasil**. III SIMPÓSIO IBERO-AMERICANO DE TELHADOS PARA HABITAÇÃO. *Anais...*São Paulo: 1998

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 1988.

ISAIA, G. C. (ED.). **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e o Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro de Concreto, 2007.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. p. 382, 2014.

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.].

MASCARÓ, L. E. R. **Energia na edificação: estratégias para minimizar seu consumo**. 2. ed. São Paulo: Editora Projeto Editores Associados Ltda, 1991.

MASCARÓ, L. E. R. **Luz, Clima e Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: Nobel, 1983. 189 p. :il.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. *Ambiente Construído*, v. 5, n. Porto Alegre, p. 47–68, 2005.

MOLITERNO, A. **Estruturas, Caderno de projetos de telhados em estruturas**. [s.l: s.n.].

NARANJO, A. et al. **Desempenho térmico das edificações**. 6. ed. Florianópolis: [s.n.].

RIPPER, E. **Manual Prático de Materiais de Construção: Recebimento, transporte interno, estocagem e aplicação**. São Paulo: Pini, 1995.

RIVERO, R. O. **Arquitetura e Clima: acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, UFRGS, 1985, 240p..

APÊNDICE A

Cálculo da resistência e transmitância térmica.

Telha cerâmica – considerando uma espessura de 18mm.

A resistência térmica do conjunto será:

$$R_{tc} = R_{si} + R_f + R_{ar} + R_t + R_{se} \quad (1)$$

Onde:

R_{si}: resistência superficial interna

$$R_{si} = 0,17 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

R_{se}: resistência superficial externa

$$R_{se} = 0,04 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

R_f: resistência térmica do forro

$$R_f = \frac{e[m]}{\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]} = \frac{0,03}{0,35} = 0,085 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

R_{ar}: resistência térmica da camada de ar

Tratando-se de uma câmara de ar horizontal no caso crítico de calor vindo de cima (verão) e sendo, tanto de telha quanto de fibrocimento, materiais de alta emissividade, conforme tabela A.1 da NBR 15.220.

$$R_{ar} = 0,21 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

R_t: resistência térmica da telha

$$R_t = \frac{0,018}{1,05} = 0,017 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

O cálculo da resistência térmica do conjunto resume-se à soma das resistências térmicas das partes componentes, segundo a fórmula (1):

$$R_{tc} = 0,17 + 0,085 + 0,21 + 0,017 + 0,04$$

$$R_{tc} = 0,522 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

A transmitância térmica é o inverso da resistência térmica do conjunto, portanto temos:

$$U = \frac{1}{R_{tc}} = 1,91 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Telha de fibrocimento – sendo feita a mesma análise no sistema composto de telha de fibrocimento com espessura de 6mm, temos:

R_{si}: resistência superficial interna

$$R_{si} = 0,17 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rse: resistência superficial externa

$$R_{se} = 0,04 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rf: resistência térmica do forro

$$R_f = \frac{e[m]}{\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]} = \frac{0,030}{0,35} = 0,085 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rar: resistência térmica da camada de ar

$$R_{ar} = 0,21 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rt: resistência térmica da telha

$$R_{tc} = \frac{0,006}{0,65} = 0,0092 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rtc: resistência térmica do conjunto

$$R_{tc} = 0,17 + 0,085 + 0,21 + 0,0092 + 0,04 = 0,514 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

U: transmitância térmica

$$U = \frac{1}{R_{tc}} = 1,94 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Telha de fibrocimento com camada de isolamento – sendo feita a mesma análise no sistema composto de telha de fibrocimento com espessura de 6mm e isolamento térmico de 25mm, temos:

Rsi: resistência superficial interna

$$R_{si} = 0,17 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rse: resistência superficial externa

$$R_{se} = 0,04 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Ri: resistência térmica do isolamento

$$R_i = \frac{e[m]}{\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]} = \frac{0,025}{0,04} = 0,625 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rf: resistência térmica do forro

$$R_f = \frac{e[m]}{\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]} = \frac{0,030}{0,35} = 0,085 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rar: resistência térmica da camada de ar

$$R_{ar} = 0,21 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rt: resistência térmica da telha

$$R_{tc} = \frac{0,006}{0,65} = 0,0092 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Rtc: resistência térmica do conjunto

$$R_{tc} = 0,17 + 0,625 + 0,085 + 0,21 + 0,0092 + 0,04 = 1,14 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

U: transmitância térmica

$$U = \frac{1}{R_{tc}} = 0,87 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$