

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MILENA FAVERI RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA DE RESIDÊNCIA DE STEEL
FRAME EM CURITIBA**

**CURITIBA
2016**

MILENA FAVERI RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA DE RESIDÊNCIA DE STEEL
FRAME EM CURITIBA**

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-graduação em Construções Sustentáveis, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger.

**CURITIBA
2016**

MILENA FAVERI RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ENVOLTÓRIA DE RESIDÊNCIA DE STEEL
FRAME EM CURITIBA**

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Construções Sustentáveis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Banca:

Prof. Dr. André Nagalli
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Profa. Dra. Christine Laroca
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Curitiba
2016

“O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, professor Eduardo L. Krüger, por contribuir prontamente na solução de dúvidas e direcionar com objetividade o desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Carlos Alberto da Costa, por compartilhar experiências da construção da casa modular e disponibilizar informações imprescindíveis para a elaboração desse trabalho.

Ao Rodrigo Victorelli, por me apoiar sempre.

RESUMO

O trabalho avaliou o desempenho energético da envoltória de uma edificação unifamiliar de steel frame em Curitiba utilizando os parâmetros do Método Prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), do Inmetro. O conjunto de medidas envolvendo alteração de orientação solar e posicionamento de aberturas, aumento da área de ventilação e iluminação e ampliação da capacidade térmica das paredes aumentou a eficiência da casa do conceito C para B. Quando naturalmente ventilada, a casa de steel frame com as adaptações propostas apresentou desempenho equivalente (nível B) a uma casa de mesma planta em sistema construtivo tradicional. No entanto, a eficiência da envoltória quando condicionada artificialmente foi A para a casa de steel frame e E para a casa de bloco cerâmico e telha cerâmica. A casa de steel frame com as melhorias propostas poderia ser construída nas outras zonas bioclimáticas apresentando desempenho satisfatório (nível B) mediante acréscimo de proteção solar externa nas aberturas. Apenas para a zona bioclimática 7, a medida seria insuficiente exigindo outras providências.

Palavras-chave: Eficiência energética. RTQ-R. Steel frame. Construções sustentáveis

ABSTRACT

The present study has evaluated the envelope energy efficiency of a single family steel frame residence at Curitiba (PR – Brazil). The evaluation was done based on a technical regimentation from Inmetro (National Institute of Metrology, Quality and Technology), called RTQ-R. Some suggestions for modifications on solar and opening orientation, increases on ventilation and lighting areas, and wall thermal capacity, provided an increase on efficiency rate from C to B. With natural ventilation, the steel frame dwelling with proposed adaptations presented similar energy efficiency of the same dwelling built according to the Brazilian typical construction system (efficiency rating B). When artificially conditioned, however, envelope efficiency from these buildings was different: rating A for steel frame and rating E for typical system. The steel frame dwelling with proposed improvements and with an exterior solar shading device installed can be built in almost all Brazilian bioclimatic zones with adequate energy efficiency (rating B). Only bioclimatic zone number 7 must have some additional requirements to achieve the same rating.

Keywords: Energy Efficiency. Steel frame buildings. Sustainable buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carta Bioclimática.....	17
Figura 2: Carta Bioclimática para Curitiba.....	20
Figura 3: Mapa das zonas bioclimáticas brasileiras	22
Figura 4: Planta da casa modular em steel frame.....	26
Figura 5: Desenho esquemático da parede externa da casa de steel frame	28
Figura 6: Desenho esquemático da parede interna da casa de steel frame.....	28
Figura 7: Desenho esquemático da cobertura da casa de steel frame.....	29
Figura 8: Estudo de orientação solar da casa.....	37
Figura 9: Desenho esquemático da parede externa da casa de steel frame com proposta de modificação	40
Figura 10: Propriedades térmicas de parede e cobertura.	46
Figura 11: Gráfico do nível de eficiência da envoltória para as zonas bioclimáticas.....	55
Figura 12: Elevações 1 e 3 e Corte AA da casa de steel frame.....	65
Figura 13: Elevações 2 e 4 e Corte BB da casa de steel frame	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Desempenho térmico de paredes e cobertura - NBR 15220	23
Tabela 2: Aberturas para ventilação - NBR 15220	23
Tabela 3: Relação das esquadrias da casa em steel frame	27
Tabela 4: Classificação nível de eficiência de acordo com a pontuação obtida– RTQ-R	30
Tabela 5: Transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das superfícies – RTQ-R	31
Tabela 6: Pré-requisitos da cobertura - RTQ-R	31
Tabela 7: Aberturas mínimas para ventilação - RTQ-R	31
Tabela 8: EqNumEnvAmb _{resf} e EqNumEnvAmb _A para Zona Bioclimática 1	35
Tabela 9: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 1.....	38
Tabela 10: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 2.....	38
Tabela 11: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 3.....	39
Tabela 12: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 4.....	39
Tabela 13: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 5.....	41
Tabela 14: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 6.....	43
Tabela 15: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 7.....	44
Tabela 16: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 8.....	45
Tabela 17: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 9.....	47
Tabela 18: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 10.....	48
Tabela 19: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 11.....	48
Tabela 20: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 12.....	49
Tabela 21: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 13.....	50
Tabela 22: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 14.....	51
Tabela 23: Desempenho da envoltória nas oito zonas bioclimáticas	53
Tabela 24: Desempenho da envoltória nas oito zonas bioclimáticas	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AU: Área útil

c: Calor específico

CA: Consumo relativo para aquecimento

CR: Consumo relativo para refrigeração

CT: Capacidade térmica

Env: Envoltória

EqNumEnv: Equivalente numérico da envoltória

EqNumEnvAmb: Equivalente numérico da envoltória do ambiente

FS: Fator solar

GHR: Indicador de graus-hora para resfriamento

PT: Pontuação total

PBE: Programa brasileiro de etiquetagem

TRY: Ano climático de referência

R_T : Resistência térmica total

U: Transmitância térmica

UH: Unidade habitacional autônoma

Upar - Transmitância térmica das paredes

ZB: Zona bioclimática

α : Absortância solar

λ : Condutividade térmica

ρ : Densidade de massa aparente

ψ : Atraso térmico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivos.....	10
1.2 Justificativa	11
1.3 Estrutura do trabalho	12
2 PROJETO BIOCLIMÁTICO	13
2.1 Variáveis do clima.....	14
2.1.1 Radiação solar.....	14
2.1.2 Temperatura.....	14
2.1.3 Umidade	15
2.1.4 Vento	16
2.2 Estratégias bioclimáticas	16
2.2.1 Zona de conforto	17
2.2.2 Zona de ventilação natural.....	17
2.2.3 Zona de inércia térmica para resfriamento.....	18
2.2.4 Zona de resfriamento evaporativo e zona de umidificação.....	19
2.2.5 Zona de inércia térmica para aquecimento e zona de aquecimento solar.....	19
2.2.6 Zona de resfriamento artificial e zona de aquecimento artificial	20
2.3 Analysis-Bio.....	20
2.4 Zoneamento bioclimático brasileiro.....	21
3 MÉTODO	24
3.1 Objeto de estudo.....	24
3.2 RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais	29
4 RESULTADOS.....	36
4.1 Desempenho térmico da envoltória da casa de steel frame	36
4.1.1 Orientação solar	36
4.1.2 Pré requisito RTQ-R da envoltória.....	40
4.1.3 Pré requisito RTQ-R para iluminação e ventilação.....	41
4.1.4 Absortância da cobertura	43
4.1.5 Vidros duplos	45

4.2 Desempenho térmico da envoltória da casa de bloco cerâmico	45
4.2.1 Orientação solar	46
4.2.2 Pré requisito RTQ-R de iluminação e ventilação	49
4.2.3 Vidros duplos	50
4.3 Desempenho térmico da envoltória da casa de steel frame nas 8 zonas bioclimáticas....	51
5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS	57
GLOSSÁRIO	59
APÊNDICE.....	61
ANEXO.....	65

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética em edificações é um dos temas que requerem atenção dos projetistas empenhados em propor construções mais sustentáveis. É possível, através de ferramentas de projeto, elaborar edificações que proporcionem conforto térmico ao usuário fazendo bom uso de recursos naturais como ventilação e radiação solar, e assim contribuir para a economia de energia.

Essa pesquisa está focada no desempenho térmico da envoltória, isto é, das paredes externas e cobertura da edificação. Em linhas gerais, a eficiência da envoltória depende das características térmicas dos materiais que a compõe, da orientação solar da edificação e das configurações das aberturas. A casa estudada foi projetada para atender a demanda de habitação de interesse social, o que reforça a necessidade de estratégias de conforto passivo uma vez que a edificação não conta com sistema de condicionamento artificial de ar.

A pesquisa faz uso do Método Prescritivo do RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INMETRO, 2012), que define requisitos técnicos para classificar a eficiência energética em níveis de A a E, sendo A o melhor desempenho. Para aplicação do RTQ-R é importante o conhecimento da NBR 15220-3 (ABNT, 2005), norma que se refere especificamente a habitações unifamiliares de interesse social. Nela se estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro que é a divisão do país em oito regiões com características similares de clima para as quais são apresentadas estratégias de obtenção de conforto térmico para as habitações.

1.1 Objetivos

O trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência energética da envoltória de uma edificação residencial unifamiliar de steel frame em Curitiba.

São objetivos específicos da pesquisa:

- Avaliar a eficiência energética da envoltória da residência original em steel frame pelo método RTQ-R;
- Avaliar a eficiência energética da envoltória da residência pelo método RTQ-R a partir de melhorias propostas;

- Avaliar a eficiência energética da envoltória de residência de mesma planta em sistema construtivo tradicional. (alvenaria em bloco cerâmico e argamassa e cobertura em telha cerâmica);
- Avaliar a eficiência energética da envoltória da residência em steel frame pelo método RTQ-R para as oito zonas bioclimáticas.

1.2 Justificativa

A residência avaliada atende as especificações de Habitação de Interesse Social na Faixa 1 de empreendimentos do programa Minha Casa Minha Vida do governo federal. É esperado que as edificações ofereçam conforto térmico ao usuário, principalmente nesses casos, em que dificilmente haverá condicionamento artificial de ar. O RTQ-R contribui nesse sentido, oferecendo requisitos técnicos para a classificação de edificações residenciais quanto à eficiência energética.

O estudo da eficiência energética da envoltória da casa de steel frame será realizado para identificar se os materiais e o sistema construtivo aplicado são capazes de conferir à edificação desempenho térmico satisfatório. São definidos como satisfatórios pelo RTQ-R os níveis de eficiência “A” e “B”.

A variação dos parâmetros que impactam no desempenho térmico da edificação será feita para buscar uma eficiência superior àquela obtida originalmente. Serão testadas alterações na orientação solar e posição das aberturas; área de ventilação e iluminação das janelas; transmitância, capacidade térmica e absorvância da envoltória.

O estudo da eficiência energética de uma casa de mesma planta em sistema construtivo tradicional será realizado para identificar a diferença se comparado à casa de steel frame. Com esse cálculo será possível mensurar qual o ganho em conforto térmico de uma opção para outra.

A simulação da eficiência energética da envoltória da casa de steel frame para as oito zonas bioclimáticas será feita para identificar as alterações no desempenho térmico se a casa fosse construída em outras regiões do país. Esse estudo permite avaliar se essa mesma casa é adequada em termos de eficiência energética para regiões com climas diversos.

1.3 Estrutura do trabalho

No capítulo **“1 Introdução”** foram apresentados os objetivos e justificativa da pesquisa. O capítulo **“2 Projeto Bioclimático”** discute a importância de se projetar a eficiência energética da edificação e o impacto positivo do uso dessas ferramentas para o conforto do usuário e para o bom aproveitamento dos recursos naturais, evitando desperdício de energia. São quatro subitens: **“2.1: Variáveis do clima”**, **“2.2 Estratégias bioclimáticas”**, **“2.3 Analysis-Bio”** e **“2.4 Zoneamento bioclimático brasileiro”**.

Na sequência, o capítulo **“4 Método”** apresenta os procedimentos aplicados para a realização do objetivo proposto. No subitem **“4.1 Objeto de estudo”** é feita a caracterização da casa em steel frame. E no subitem **“4.2 RTQ-R”** são descritas as exigências desse regulamento para o cálculo de eficiência energética da habitação.

O capítulo **“5 Resultados”** tem três subitens. No **“5.1 Desempenho térmico da envoltória da casa modular de steel frame”** são apresentados os dados obtidos nos cálculos da eficiência energética para a casa original e para a casa com proposta de melhorias. No item **“5.2 Desempenho térmico da envoltória da casa de bloco cerâmico”** são apresentados os dados obtidos para o desempenho da casa em sistema construtivo tradicional. E no item **“5.3 Desempenho térmico da envoltória da casa de steel frame nas 8 zonas bioclimáticas”** aparecem os resultados comparativos do desempenho térmico da casa de steel frame para todas as ZBs.

O capítulo **“6 Conclusão”** apresenta a avaliação final da eficiência da envoltória para cada situação estudada e se o resultado foi considerado satisfatório em termos de nível de eficiência energética.

2 PROJETO BIOCLIMÁTICO

Para projetar construções mais confortáveis e eficientes é fundamental o entendimento das condições climáticas locais e a escolha de soluções arquitetônicas que se relacionem adequadamente a esse clima no qual a edificação será implantada.

A tomada de decisões de projeto deve favorecer o conforto térmico do usuário criando um ambiente propício à ocupação e às atividades para que a construção se destina. O estudo do conforto térmico tem sua importância em dois principais aspectos: o bem estar das pessoas que utilizarão o edifício, uma vez que o desconforto por calor ou frio pode prejudicar as atividades humanas naquele local. E também a conservação de energia, através do não desperdício com refrigeração ou calefação nos casos em que o uso desses recursos não são necessários. Em 1973, Olgay usou a expressão Projeto Bioclimático, para se referir à arquitetura que tira partido das condições do clima para obter melhor desempenho térmico. Esse termo faz referência à bioclimatologia, que é a ciência que estuda as relações entre o clima e os seres vivos. Para elaboração de um projeto de arquitetura com essas considerações é preciso, em primeiro lugar conhecer as características climáticas da região de implantação do edifício.

As medições dos parâmetros para caracterização do clima de uma cidade normalmente são feitas em estações meteorológicas. Com as aferições realizadas se obtém as normais climatológicas, que são basicamente uma série de dados gerados a partir de valores médios e extremos mensais de temperatura, umidade, precipitação, horas de sol, etc. As normais são séries de dados padronizados pela Organização Meteorológica Mundial e calculadas para períodos de 30 anos.

De acordo com Lamberts (2014), no Brasil já foram obtidas as normais climatológicas dos períodos de 1901 a 1930, de 1931 a 1960 e de 1961 a 1990 para centenas de cidades. Os dados levantados pelas estações meteorológicas podem ser tratados, por exemplo, contendo informações de um ano específico e compreendendo determinadas variáveis e reunidos nos chamados arquivos climáticos. Os principais arquivos climáticos utilizados no Brasil são o Test Reference Year (TRY), Typical Meteorological Year (TMY), Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) e INMET (dados medidos pela Estação Nacional de Meteorologia).

A classificação das características de clima pode ser feita para diversas escalas de território. O termo macroclima é aplicado para designar o clima de uma região, medido numa estação meteorológica. Já o termo mesoclima é utilizado para características mais locais, de uma cidade, por exemplo, influenciado pela poluição de indústrias e carros, corte de árvores e áreas de solo impermeabilizado. E microclima é o termo mais apropriado à escala da edificação e seu entorno, que é definido pelas características climáticas da região como um todo e por traços específicos do próprio terreno de implantação da construção.

2.1 Variáveis do clima

2.1.1 Radiação solar

A radiação solar é a principal fonte de energia do planeta. Segundo Lamberts (2016), trata-se de uma onda eletromagnética que atinge a superfície terrestre de forma direta ou difusa. A radiação direta é a que chega sem desvios à superfície da Terra. A radiação difusa é a parcela que chega depois de ser dispersa pelas moléculas e partículas presentes na atmosfera. Podemos interpretá-la como a claridade do céu num dia em que o sol está totalmente encoberto por nuvens.

Em locais de clima frio é desejável que as construções permitam a entrada da radiação direta nos ambientes justamente para promover o aquecimento. Já em locais de clima quente, em que o ganho de calor precisa ser evitado, é preferível a entrada apenas de radiação difusa para promover a iluminação natural dos ambientes internos.

2.1.2 Temperatura

A temperatura do ar é consequência de um processo em que a radiação solar atinge o solo, é parcialmente absorvida fazendo-o ganhar calor e, por convecção o solo promove o aquecimento do ar. A temperatura do ar será, portanto, consequência da intensidade da radiação solar incidente, do coeficiente de absorção da superfície receptora, da capacidade de condução de calor dessa superfície e das perdas de calor por evaporação, convecção e radiação.

De acordo com Lamberts (2016), devido a este fenômeno a temperatura do ar começa a se elevar a partir do nascer do sol e chega a seu máximo após a passagem do sol pelo meridiano. A partir desse momento a energia perdida pela superfície, principalmente

por radiação, começa a ser cada vez maior em relação à energia recebida, o que promove a queda de temperatura, que atingirá seu mínimo pouco antes do próximo nascer do sol.

A diferença entre temperatura máxima e mínima num período de tempo é chamada de amplitude térmica. Esta amplitude é bastante influenciada pela umidade do ar de cada região. Nos locais de clima úmido a radiação solar é menor devido a maior presença de nebulosidade, além disso, o solo mais úmido promove maior perda de calor por evaporação e um menor aquecimento se comparado a um solo seco. No período da noite a presença de nuvens favorece menor perda de calor por radiação para as camadas mais altas da atmosfera. Já em clima seco esse calor será dispersado mais rapidamente levando a uma queda mais brusca na temperatura do ar.

Nas grandes cidades as temperaturas podem ser afetadas pelos efeitos do fenômeno conhecido como Ilha de calor. Ocorre uma elevação exagerada da temperatura do ar devido à presença de massas de concreto e asfalto que são capazes de absorver muito calor durante o dia e o irradiam na parte da noite comprometendo o resfriamento natural do ambiente. Esse fenômeno faz com que as cidades atinjam temperaturas mais elevadas se comparadas a áreas menos urbanizadas do entorno.

2.1.3 Umidade

A umidade do ar é definida pelo regime de chuvas de uma determinada região, pela presença de corpos d'água, capazes de aumentar a umidade do ar através da evaporação, e pela presença de vegetação, que contribui na regulação da umidade do ar pelo processo da evapotranspiração.

A umidade do ar é diretamente influenciada pela temperatura. A quantidade de vapor d'água que pode estar contido num metro cúbico de ar é maior quanto maior a temperatura do ar. Ambientes internos que conjuguem altas temperaturas com elevados índices de umidade podem causar desconforto nos usuários. Essa situação torna menos eficiente a evaporação que o corpo promove naturalmente através da pele para perder calor e auto regular sua temperatura. Nesses ambientes, a ventilação é fundamental para garantir melhores condições de conforto.

2.1.4 Vento

Os ventos são determinados primeiramente pela diferença de radiação solar nas diferentes latitudes. O ar sofre maior aquecimento nas regiões próximas ao equador e se eleva dando espaço para massas de ar mais frias vindas do norte e do sul. Em regiões próximas ao mar, a formação de ventos se dá pela diferença de capacidade térmica entre a terra e a água. Durante o dia a terra atinge temperaturas maiores e aquece a camada de ar sobre ela. O ar quente se eleva e dá espaço ao ar fresco que estava sobre o mar. Durante a noite a terra perde calor mais rapidamente que a água, o ar quente sobre o mar se eleva e o ar fresco sobre a terra se movimenta em direção ao mar, criando um fluxo no sentido contrário. Os ventos também são influenciados pela altitude, pela topografia e pela rugosidade do terreno.

2.2 Estratégias bioclimáticas

Construções adequadas ao clima da região onde estão implantadas fazem uso de estratégias passivas de aquecimento e resfriamento e assim reduzem o tempo de uso de sistemas artificiais. O projeto de arquitetura deve atender tanto as condições de conforto do usuário como a minimização do consumo de energia. Para isso é necessário conhecer os dados climáticos do local e aplicar corretamente as estratégias bioclimáticas que melhor adaptem a construção ao clima. Na década de 1960, Olgyay criou uma Carta Bioclimática com o objetivo de orientar estratégias a serem adotadas em projeto para determinadas condições de clima. Em 1968, Givoni desenvolveu uma carta que aprimorava o trabalho de Olgyay e, em 1992, criou uma nova versão adaptada à realidade dos países em desenvolvimento, que é a carta adotada hoje no Brasil. Segundo Givoni, pessoas que vivem em locais sem condicionamento artificial se aclimatam e aceitam como normal maiores variações de temperatura e de velocidade do ar. Isso demonstra que a sensação de conforto térmico dentro de um edifício depende da variação da temperatura externa, inerente ao clima, e também da experiência do usuário que vive naquele local. Na sua nova Carta Bioclimática foram expandidos os limites máximos para conforto. A carta conta com nove zonas e para cada uma delas existem sugestões de medidas para proporcionar conforto ao usuário no ambiente construído.

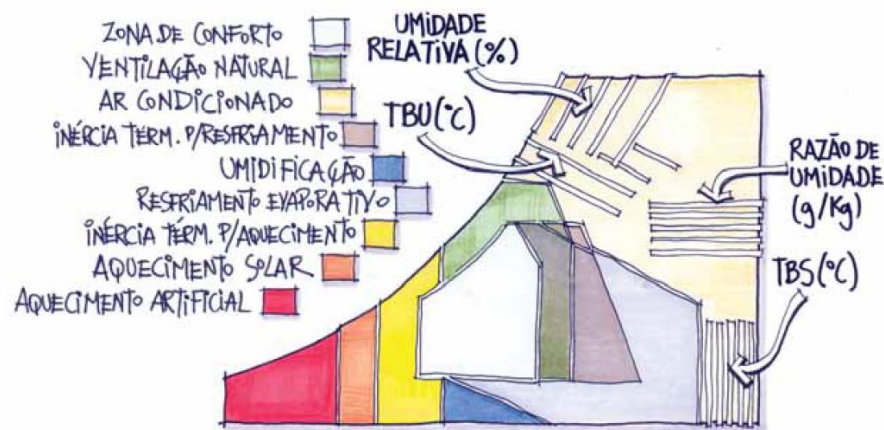


Figura 1: Carta Bioclimática. Fonte: Lamberts, et.al (2014)

2.2.1 Zona de conforto

Configura uma área no gráfico compreendida por temperaturas entre 18 e 29°C e umidade relativa variando entre 20 a 80%. Nessas condições é possível que a maioria das pessoas se sinta em conforto térmico e não seriam necessárias providências para promover resfriamento ou aquecimento.

Quando a temperatura interna da edificação estiver próxima ao limite mínimo da zona de conforto (18°C) não é recomendado o uso de ventilação, que poderá causar desconforto por frio. Para temperaturas acima de 20°C deve-se evitar a radiação direta sobre os usuários, o conforto só é possível se o local estiver sombreado, principalmente nas temperaturas mais altas, próximas aos 29°C.

É conveniente adotar o sombreamento da edificação para temperaturas acima de 20°C, mesmo na área que indica conforto térmico na Carta Bioclimática. A estratégia de proteger a edificação da radiação solar direta é muito importante no Brasil, que tem clima quente na maior parte de seu território e para a maior parte do ano. As principais medidas de projeto para promover o sombreamento são: a correta orientação de implantação da edificação; o uso de brises, marquises, beirais, varandas, sacadas, janelas com venezianas e o uso de vegetação para filtrar a insolação direta.

2.2.2 Zona de ventilação natural

Quando a temperatura dentro do ambiente construído exceder 29°C e a umidade relativa do ar for maior que 80%, a ventilação natural é uma boa estratégia de resfriamento passivo. Trata-se de um mecanismo simples em que o ar interno da construção, que está

mais aquecido é substituído pelo ar externo mais fresco, o que é bastante recomendado para climas quentes e úmidos. A ventilação natural faz com que a temperatura interna acompanhe a externa, portanto, para temperaturas externas acima de 32°C esta estratégia não é ideal porque acaba levando ar quente pra dentro do ambiente e causando mais desconforto.

O resfriamento convectivo também é indicado para locais de clima mais árido, onde a temperatura durante o dia é maior que 29°C e umidade inferior a 60%. Para esses casos é recomendado promover a ventilação durante a noite, quando a temperatura está por volta dos 20°C e é possível trazer ar mais fresco pra dentro do edifício. Em regiões áridas com temperaturas diurnas acima de 36°C é necessário associar outras medidas para o resfriamento do ambiente.

As soluções arquitetônicas mais comuns para promover a ventilação natural são: a ventilação cruzada, quando são utilizadas aberturas em faces diferentes do ambiente favorecendo a criação de fluxo de ar; a ventilação da cobertura, que permite a retirada da massa de ar quente resultante do calor absorvido pelo telhado e a ventilação do piso, quando a edificação está elevada do solo permitindo a passagem de ar.

2.2.3 Zona de inércia térmica para resfriamento

A inércia térmica para resfriamento é uma estratégia que consiste no uso de paredes e cobertura com alta capacidade térmica, para minimizar os efeitos dos picos de temperatura do ambiente externo. Esse recurso pode ser bastante útil em climas quentes e secos, onde as temperaturas são elevadas durante o dia e extremamente baixas durante a noite. Os componentes da envoltória com alta capacidade térmica levam bastante tempo para transmitir calor para o ambiente interno, o que ocorre oportunamente no período da noite quando as temperaturas já estão mais baixas. De forma correlata, as paredes e coberturas que foram resfriadas durante a noite, mantem-se frias durante parte do dia, favorecendo o conforto do ambiente interno.

Além do uso de materiais de vedação com alta capacidade térmica pode-se aproveitar a inércia térmica do próprio solo com construções encostadas em arrimos, por exemplo, além do uso de materiais isolantes na construção para a manutenção da temperatura interna.

2.2.4 Zona de resfriamento evaporativo e zona de umidificação

O resfriamento evaporativo é uma estratégia bioclimática para reduzir a temperatura do ambiente construído e aumentar a umidade relativa do ar através da evaporação de água. Essa medida é indicada para situações de clima quente e seco e pode ser alcançada de forma direta ou indireta.

Consideram-se formas diretas o uso espelhos d'água, fontes, micro aspersores no solo ou na cobertura da edificação e também o uso de vegetação, capaz de promover a evapotranspiração e aumentar a umidade do ar. O resfriamento evaporativo direto é recomendado para temperaturas de bulbo úmido até 24°C e temperatura de bulbo seco até 44°C para evitar o acúmulo de vapor de água nos espaços internos, efeito indesejado que exigiria alta taxa de renovação do ar para dispersar a umidade.

Como forma indireta podemos citar o uso de tanques de água sombreados sobre a laje de cobertura. Neste caso o processo de evaporação consome calor da lâmina de água e consequentemente da própria cobertura, reduzindo a transmissão para a edificação.

Nos casos em que a umidade relativa do ar for muito baixa, a taxas inferiores a 20%, e temperaturas abaixo de 27°C, o ambiente possivelmente será desconfortável devido a secura. A estratégia da umidificação do ar é recomendada mas poderá causar efeito de resfriamento indesejado. Neste caso convém promover ventilação moderada de modo a conservar taxa confortável de umidade e conter a evaporação e consequente resfriamento do ambiente.

2.2.5 Zona de inércia térmica para aquecimento e zona de aquecimento solar

A estratégia da inércia térmica para aquecimento é recomendada para climas frios, com temperaturas entre 14 e 20°C. Nesse caso adotam-se vedações com exposição direta ao sol para proporcionar aquecimento passivo, associado a paredes e coberturas com alta capacidade térmica para que o calor absorvido se mantenha no período da noite.

O aquecimento solar passivo associado ao isolamento térmico é adequado para climas com temperaturas ainda mais baixas, entre 10,5 e 14°C. É recomendada a orientação da edificação de modo a favorecer o recebimento da radiação solar além do uso de cores com maior absorvância nas fachadas. É apropriado o uso de superfícies envidraçadas nas fachadas mais insoladas e mínimo de aberturas nas fachadas que não recebem sol. É muito

importante ter um isolamento rigoroso nas portas, janelas e cobertura para evitar a perda de calor por frestas.

2.2.6 Zona de resfriamento artificial e zona de aquecimento artificial

Nos locais que atingem temperaturas de bulbo úmido acima de 24°C e temperaturas de bulbo seco acima 44°C, os sistemas passivos de refrigeração provavelmente serão insuficientes para promover conforto térmico. Nesses casos recomenda-se o resfriamento artificial com o uso de aparelhos de ar condicionado associado às estratégias passivas de ventilação, resfriamento evaporativo ou inércia térmica para resfriamento.

Da mesma forma, os locais muito frios, com temperaturas abaixo de 10,5°C, precisam de aquecimento artificial complementarmente às estratégias passivas de aquecimento solar. Cabe ressaltar a importância de portas, janelas e coberturas herméticas para que não se perca calor para o ambiente externo e não haja desperdício de energia.

2.3 Analysis-Bio

O programa Analysis-BIO (2006) foi criado por pesquisadores do Laboratório de Eficiência Energética na Universidade Federal de Santa Catarina. Partindo de dados climáticos que podem ser normais climatológicas, arquivos TRY ou dados lançados manualmente pelo usuário, o programa apresenta a Carta Bioclimática da localidade e as estratégias adequadas para obter conforto no ambiente construído.

A figura abaixo mostra a Carta Bioclimática para Curitiba e o relatório produzido pelo Analysis-Bio com as estratégias de projeto mais recomendadas para a cidade.

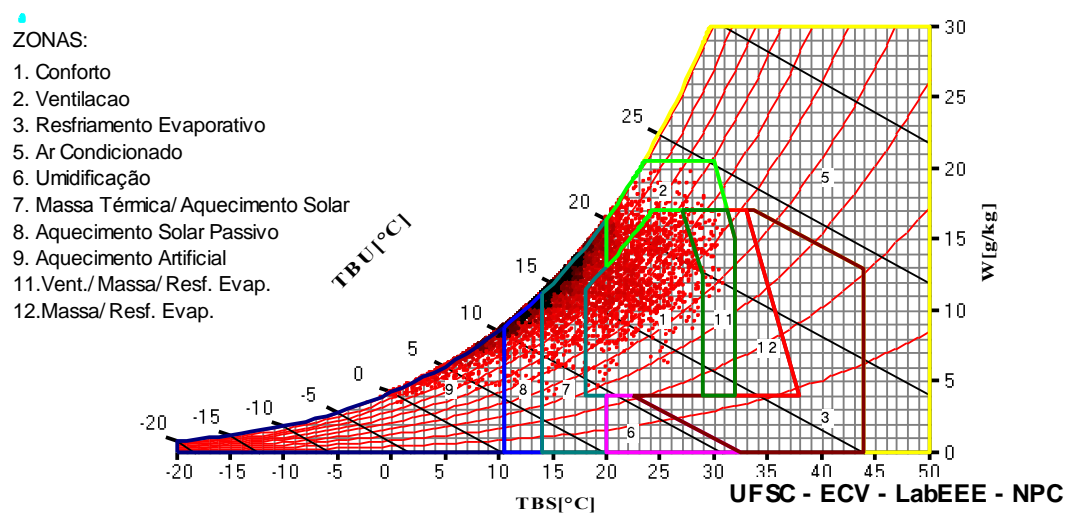


Figura 2: Carta Bioclimática para Curitiba. Fonte: Lamberts, et.al (2016)

A Carta Bioclimática foi baseada no TRY (Temperature Reference Year) da cidade, de 1969, com medição inicial em 01/01 e final em 31/12, somando 8760 horas e pressão de 91.279 KPa. Obteve-se como resultado:

- Geral: Conforto: 20%; desconforto: 80%; frio: 73,2%; calor: 6,84%.
- Calor: Ventilação: 6,84%; massa para resfriamento: 1,02%; resfriamento evaporativo: 1,02%; ar condicionado: 0%.
- Frio: Massa térmica/aquecimento solar: 42,5%; aquecimento solar passivo: 18,9%; aquecimento artificial: 11,8%; umidificação: 0%.
- Sombreamento: 23.2 %.

Curitiba apresenta temperaturas baixas, se comparado ao clima do Brasil de forma geral, e demanda algumas medidas para aquecimento das edificações. A cidade apresenta 20% das horas do ano de situação de conforto térmico. A massa térmica associada ao aquecimento solar é recomendada para 42,5% do ano e aquecimento solar passivo para 18,9% do ano. Ainda assim em 11,8% do tempo só se atinge uma situação de conforto térmico mediante uso de aquecimento artificial. A estratégia de sombreamento é necessária em 23,2% das horas do ano, apenas no verão.

2.4 Zoneamento bioclimático brasileiro

A NBR 15220-3 Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005), apresenta recomendações sem caráter normativo de desempenho térmico, a serem consideradas na fase de projeto de habitações unifamiliares de interesse social com até três pavimentos. A norma define um Zoneamento Bioclimático Brasileiro estabelecendo áreas com características de clima semelhantes, e para cada uma apresentada recomendações técnico-construtivas para a adequação climática da edificação e a otimização do seu desempenho térmico.

O zoneamento bioclimático brasileiro é composto de oito zonas conforme apresentado na Figura 7. A cidade de Curitiba está na Zona Bioclimática 1.

Para definição das zonas foram marcadas no território nacional 6500 células (de 36Km x 36Km). Cada célula foi caracterizada pela posição geográfica e variáveis climáticas: médias mensais das temperaturas máximas, mínimas e das médias mensais das umidades relativas do ar. Segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005), para 330 células contou-se com dados

das normais climatológicas medidos de 1961 a 1990 em 206 cidades e com dados das normais climatológicas e outras fontes medidos de 1931 a 1960 em 124 cidades. Para as outras células os dados climáticos foram estimados por interpolação.

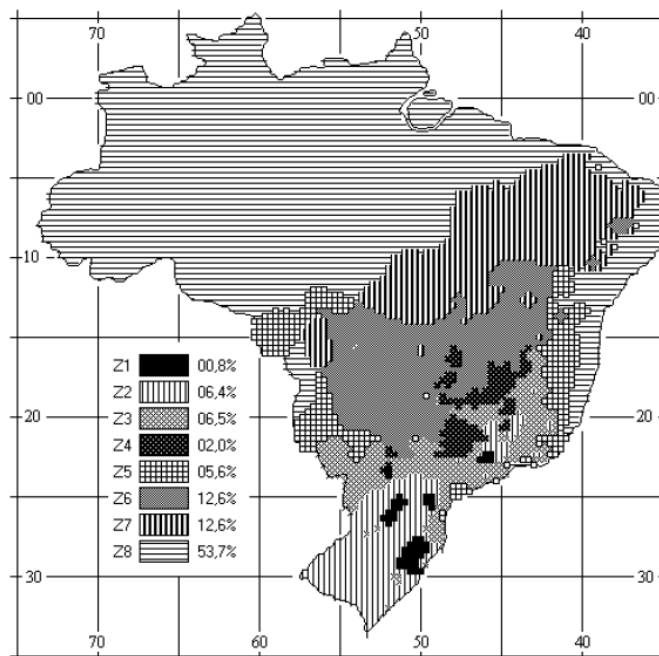


Figura 3: Mapa das zonas bioclimáticas brasileiras. Fonte: ABNT, 2005.

Como método para a definição das áreas utilizou-se a Carta Bioclimática adaptada a partir da elaborada por Givoni (1992). Para cada zona da carta corresponde uma estratégia:

A) Zona de aquecimento artificial (calefação); B) Zona de aquecimento solar da edificação; C) Zona de massa térmica para aquecimento; D) Zona de conforto térmico (baixa umidade); E) Zona de conforto térmico; F) Zona de desumidificação (renovação do ar); G+H) Zona de resfriamento evaporativo; H+I) Zona de massa térmica de refrigeração; I+J) Zona de ventilação; K) Zona de refrigeração artificial e L) Zona de umidificação do ar.

Sobre esta carta são registrados os dados de T_{min}, T_{max} e UR de cada mês. As retas obtidas no gráfico indicam as horas de um dia médio do mês considerado. Calcula-se então a porcentagem dessas horas que corresponde a cada estratégia da carta Bioclimática. Essa operação é repetida para todos os 12 meses e ao final são obtidas as porcentagens de cada estratégia num ano. A combinação dessas estratégias define a qual zona Bioclimática a cidade pertence.

Para Curitiba as estratégias obtidas são A, B, C e F assim descritas na NBR 15220 -3 (ABNT, 2005): A) O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual

sensação de desconforto térmico por frio. B) A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar. C) A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido. F) As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.

A NBR 15220 (ABNT, 2005) faz uma orientação recomendando índices para o desempenho térmico de paredes e cobertura e áreas de aberturas para ventilação para as zonas bioclimáticas de 1 a 8. Os valores foram compilados nas tabelas abaixo:

Tabela 1: Desempenho térmico de paredes e cobertura - NBR 15220

DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES EXTERNAS E COBERTURA									
Zonas bioclimáticas		ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Transmitância térmica (U) (W/m ² .k)	parede	U ≤ 3,0		U ≤ 3,6	U ≤ 2,2	U ≤ 3,6	U ≤ 2,2		U ≤ 3,6
	cobertura	U ≤ 2,0							U ≤ 2,3
Atraso térmico (Ψ) (Horas)	parede	Ψ ≤ 4,3			Ψ ≥ 6,5	Ψ ≤ 4,3	Ψ ≥ 6,5		Ψ ≤ 4,3
	cobertura	Ψ ≤ 3,3					Ψ ≥ 6,5		Ψ ≤ 3,3
Fator solar (FS) (%)	parede	FS ≤ 5,0	FS ≤ 4,0	FS ≤ 3,5	FS ≤ 4,0	FS ≤ 3,5		FS ≤ 4,0	
	cobertura	FS ≤ 6,5							

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005.

Tabela 2: Aberturas para ventilação - NBR 15220

ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO								
Zonas bioclimáticas	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Aberturas para ventilação (A) (% da área de piso)	Médias 15 < A < 25						10 < A < 15	A > 40
Sombreamento das aberturas dos dormitórios	Permitir sol durante o inverno			Sombrear aberturas				

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005.

3 MÉTODO

O trabalho de avaliação do desempenho térmico da envoltória da casa de steel frame passou por cinco etapas:

Na primeira etapa foi estudado qual orientação solar de implantação e posicionamento de aberturas geraria maior desempenho térmico. Chegando a este resultado utilizou-se o melhor resultado para o desenvolvimento da próxima fase.

A segunda etapa consistiu em propor alterações nas paredes externas da casa original de modo a cumprir os pré-requisitos exigidos pelo RTQ-R para a Zona Bioclimática 1, já que estas não atingiam a capacidade térmica mínima prevista de $130\text{kJ/m}^2\text{K}$.

Na terceira etapa foram feitas alterações nas janelas para que fossem alcançados os pré-requisitos de iluminação e ventilação do RTQ-R. Não foram alteradas as dimensões das esquadrias, apenas o tipo de abertura.

Na quarta etapa calculou-se o desempenho da casa com alteração na absorvância da cobertura.

Na quinta etapa testou-se o desempenho da envoltória usando-se vidros duplos nas janelas dos ambientes de permanência prolongada.

Na sequência foi feita a simulação para uma casa de mesmo projeto arquitetônico porém com paredes de bloco cerâmico e argamassa e cobertura com laje e telha cerâmica. Para o estudo da casa em sistema construtivo tradicional foram cumpridas três etapas: variação da orientação solar de implantação e posicionamento de aberturas; alteração dos tipos de abertura das janelas e uso de caixilhos com vidros duplos.

Ao final pesquisou-se como a casa modular em steel frame se comportaria nas outras sete zonas bioclimáticas. Essa fase da pesquisa consistiu em duas etapas: simulação da casa atendendo aos pré-requisitos RTQ-R e simulação com vidros duplos e alteração na absorvância da cobertura.

3.1 Objeto de estudo

A unidade habitacional autônoma objeto do estudo tem $37,11\text{m}^2$ com dois dormitórios, banheiro, sala e cozinha conjugados e área de serviço externa. A planta está apresentada na sequência e as elevações e cortes da edificação encontram-se disponíveis em Anexo. A pesquisa foi baseada nas especificações de projeto para a edificação e existe

um protótipo construído na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba Ecoville. O sistema construtivo é modular e pré-fabricado contando com estrutura metálica e painéis de vedação em steel frame.

A casa foi projetada para atender as especificações de Habitação de Interesse Social dentro da Faixa 1 de empreendimentos do programa Minha Casa Minha Vida.

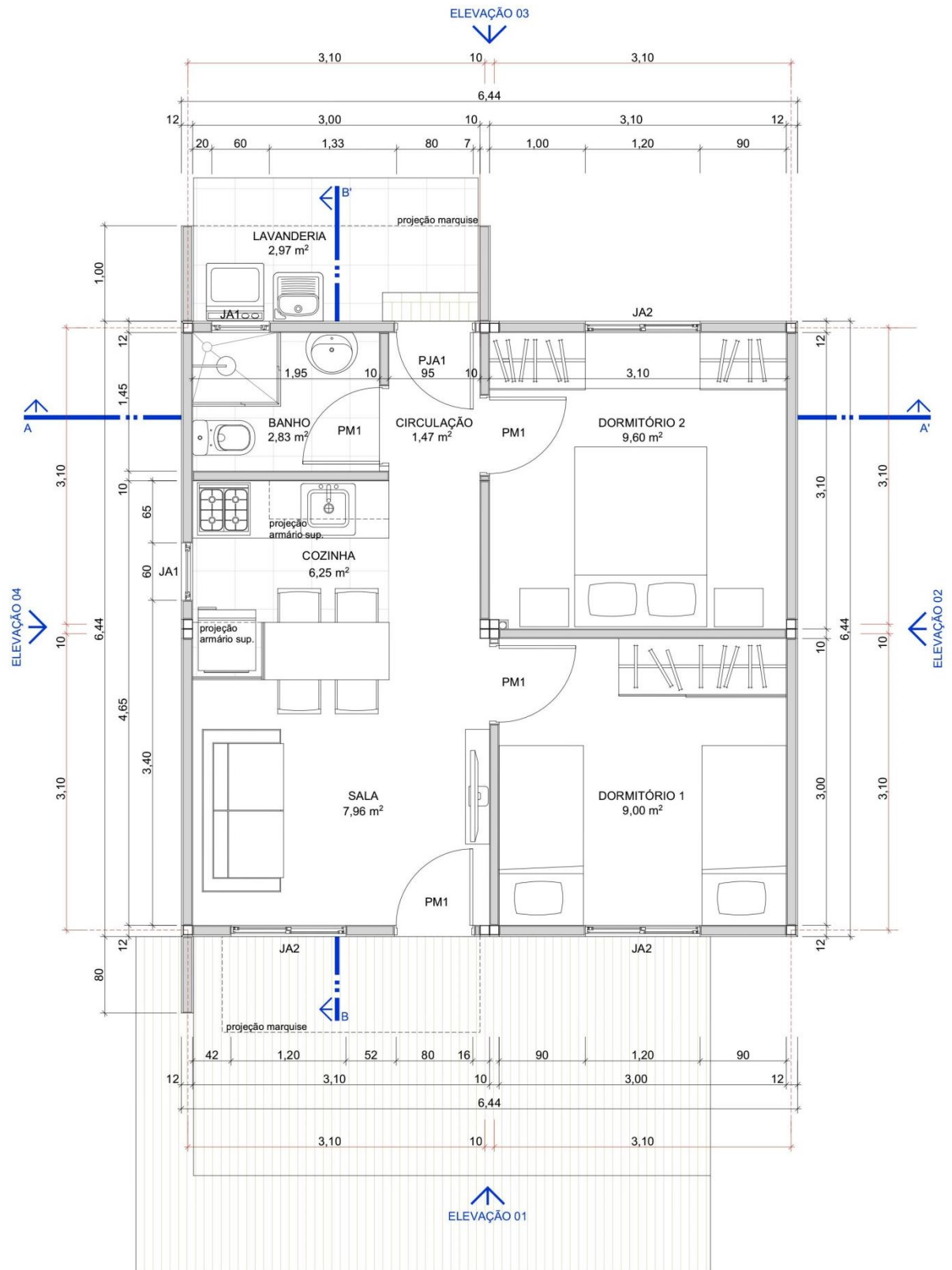


Figura 4: Planta da casa modular em steel frame. Fonte: Modulare Engenharia, 2013.

As esquadrias dos dormitórios 1 e 2 e da sala têm duas folhas de vidro, sendo uma fixa e uma de correr e não possuem veneziana. As janelas da cozinha e banheiro são maxim-ar e a porta PJA1 tem vidros basculantes na parte superior.

Tabela 3: Relação das esquadrias da casa em steel frame

RELAÇÃO DE ESQUADRIAS						
	Largura	Altura	Peitoril	Tipo	Quant.	Ambiente
JA1 (janela de aço)	0,60	0,60	1,60	maxim-ar	2	cozinha, banheiro
JA2 (janela de aço)	1,20	1,20	1,00	correr/fixo	3	sala, dormitórios
PJA1 (porta/jan. de aço)	0,80	2,20	-	abrir/basc.	1	circulação
PM1 (porta de madeira)	0,80	2,10	-	abrir	4	Sala, dormitórios, banheiro

A partir das características dos materiais que compõem as paredes e cobertura da casa calculou-se a transmitância térmica e capacidade térmica de cada sistema. Para realização dos cálculos foi utilizado o procedimento previsto na NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (ABNT, 2005).

Foram obtidos nos catálogos técnicos dos fabricantes as dimensões e peso por placa ou por m² dos materiais que compõem as paredes e cobertura e assim, calculou-se a densidade de massa aparente (ρ) de cada elemento.

Já a condutividade térmica (λ) e calor específico (c) foram obtidos na tabela B.3 da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Os memoriais de cálculo para a obtenção da transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) das paredes e coberturas estão em Apêndice.

As paredes externas da casa obtiveram $U= 0,44W/m^2K$ e $CT= 37,31kJ/m^2K$. Os painéis de vedação em steel frame são compostos pelas seguintes camadas:

- **Placa de liga cimentícia;** 1,20m x 2,40m x 12mm; 13,20 kg/m²; $\rho = 1099,96 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,35 \text{ W/m.K}$; $c = 1 \text{ kJ/Kg.K}$
- **Chapa de partículas de madeira orientadas (OSB);** 1,20m x 3,00m x 11,1mm; 25,6kg/painel; $\rho = 640 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,14 \text{ W/m.K}$; $c = 2,30 \text{ kJ/Kg.K}$.
- **Feltro de lã de vidro aglomerado com resina sintética;** 0,60m x 12,50m x 75mm; $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,042 \text{ W/m.K}$ (fornecido pelo fabricante); $c = 0,70 \text{ kJ/Kg.K}$.

- **Placa de gesso acartonado standard**, 1,20m x 2,60m x 12,5mm; $8,5\text{Kg/m}^2$; $\rho = 680\text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,14\text{ W/m.K}$ (fornecido pelo fabricante); $c = 2,30\text{ kJ/Kg.K}$.

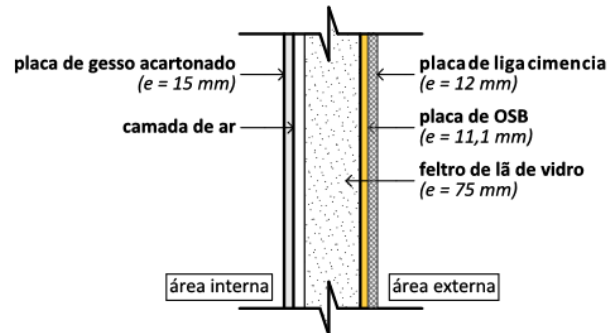


Figura 5: Desenho esquemático da parede externa da casa de steel frame

As paredes internas da casa obtiveram $U = 0,46\text{W/m}^2\text{K}$ e $CT = 14,91\text{kJ/m}^2\text{K}$. Os painéis de vedação em steel frame das paredes internas da casa são compostos pelas seguintes camadas:

- **Feltro de lã de vidro aglomerado com resina sintética**; 0,60m x 12,50m x 75mm; $\rho = 12\text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,042\text{ W/m.K}$ (fornecido pelo fabricante); $c = 0,70\text{ kJ/Kg.K}$.
- **Placa de gesso acartonado standard**; 1,20m x 2,60m x 12,5mm; $8,5\text{Kg/m}^2$; $\rho = 680\text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,25\text{ W/m.K}$ (fornecido pelo fabricante); $c = 0,84\text{ kJ/Kg.K}$.

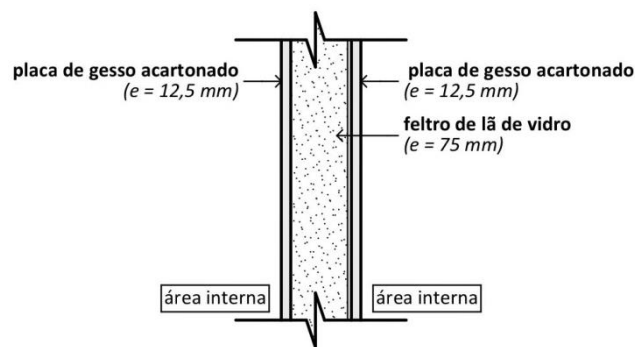


Figura 6: Desenho esquemático da parede interna da casa de steel frame

A cobertura atingiu $U = 0,22\text{W/m}^2\text{K}$ e $CT = 55,95\text{kJ/m}^2\text{K}$ sendo composta pelos seguintes materiais:

- **Telha de aço termo acústica trapezoidal**; 0,98m x 2,80m x 0,43mm; preenchimento em poliuretano 30 mm; pós-pintada de branco; $\lambda_{\text{telha}} = 0,018\text{ W/m.K}$ (fornecido pelo

fabricante); $\rho_{\text{aço}} = 7800 \text{ kg/m}^3$; $c_{\text{aço}} = 0,46 \text{ kJ/Kg.K}$; $e_{\text{aço}} = 0,013\text{m}$; $\rho_{\text{pu}} = 35 \text{ kg/m}^3$; $c_{\text{pu}} = 1,67 \text{ kJ/Kg.K}$; $e_{\text{pu}} = 0,03\text{m}$.

- **Placa de gesso acartonado standard**; $1,20\text{m} \times 2,60\text{m} \times 12,5\text{mm}$; $8,5\text{Kg/m}^2$; $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,25 \text{ W/m.K}$ (fornecido pelo fabricante); $c = 0,84 \text{ kJ/Kg.K}$.
- **Feltro de lã de vidro aglomerado com resina sintética**; $0,60\text{m} \times 12,50\text{m} \times 50\text{mm}$; 12kg/m^3 ; $\rho = 12 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 0,042 \text{ W/m.K}$ (fornecido pelo fabricante); $c = 0,70 \text{ kJ/Kg.K}$.

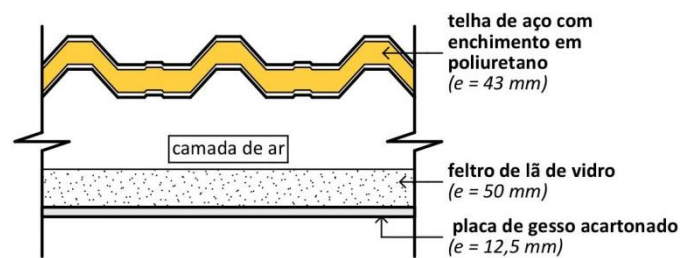


Figura 7: Desenho esquemático da cobertura da casa de steel frame

A absorvância (α) da radiação solar da parede utilizada para determinação da eficiência da envoltória pelo método prescritivo da RTQ-R, foi de 0,30, obtida na Tabela B.2 da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). A absorvância da cobertura, para telha de aço pintada com tinta acrílica fosca cor branco, foi de 0,158, prevista em pesquisa de Dornelles (2008).

3.2 RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, teve sua última revisão publicada em janeiro de 2012. O documento tem como objetivo estabelecer requisitos técnicos e métodos para a etiquetagem do nível de eficiência energética de edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares (INMETRO, 2012).

Para a determinação da eficiência de unidades habitacionais autônomas, apartamentos ou casas, consideram-se os requisitos relacionados ao desempenho térmico da envoltória, à eficiência do sistema de aquecimento de água e eventuais bonificações. Para edificações unifamiliares devem ser aplicados os requisitos da unidade habitacional autônoma. Para edificações multifamiliares devem ser ponderados os resultados da avaliação de cada unidade habitacional autônoma que compõe o conjunto. Já para áreas de

uso comum de edificações multifamiliares, são avaliados os requisitos de eficiência do sistema de iluminação artificial, de aquecimento de água, de elevadores, de bombas centrífugas, de equipamentos e eventuais bonificações (INMETRO,2012).

Cada requisito avaliado recebe uma pontuação que ao final é somada e determina uma classificação que varia do conceito A, que é o mais eficiente, ao conceito E que é o menos eficiente.

Tabela 1: Classificação nível de eficiência de acordo com a pontuação obtida– RTQ-R

NÍVEL DE EFICIÊNCIA RTQ-R	
NÍVEL DE EFICIÊNCIA	PONTUAÇÃO
A	$PT \geq 4,5$
B	$3,5 \leq PT < 4,5$
C	$2,5 \leq PT < 3,5$
D	$1,5 \leq PT < 2,5$
E	$PT < 1,5$

Fonte: INMETRO, 2012.

A pontuação total do nível de eficiência da unidade habitacional autônoma é obtida através da equação abaixo que determina diferentes pesos às variáveis de acordo com a região geográfica que a edificação está localizada:

$$PT_{UH} = a \times EqNumEnv + 1 - a \times EqNumAA + Bonificações$$

O coeficiente “a” varia de acordo com a região: para o Norte o coeficiente a ser adotado é de 0,95; para a região Nordeste, 0,90 e para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul o coeficiente é de 0,65. O “EqNumEnv” é o equivalente numérico do desempenho térmico da envoltória da unidade habitacional autônoma quando ventilada naturalmente. O “EqNumAA” trata-se do equivalente numérico do sistema de aquecimento de água. As bonificações são pontuações atribuídas pela adoção de medidas que aumentem a eficiência da edificação.

Pré-requisitos da envoltória

O RTQ-R estabelece pré-requisitos da envoltória, que são condições mínimas a serem atendidas para as paredes externas e coberturas dos ambientes de permanência prolongada das unidades habitacionais autônomas. São considerados ambientes de permanência

prolongada aqueles de ocupação contínua por uma ou mais pessoas como sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, escritório, sala de tv ou ambientes de usos similares.

Os pré-requisitos determinados pelo RTQ-R são para transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das superfícies, ventilação natural e iluminação natural. Esses parâmetros variam de acordo com a Zona Bioclimática em que a edificação se localiza

Tabela 2: Transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das superfícies – RTQ-R

PRÉ-REQUISITOS PARA ENVOLTÓRIA: PAREDES								
Zonas bioclimáticas	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Transmitância térmica (U) ($W/m^2 K$)	$U \leq 2,5$		$U \leq 3,7$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,5$ se $\alpha > 0,6$					
Capacidade térmica (CT) ($KJ/m^2 K$)	$CT \geq 130$							Sem exigência

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

Tabela 3: Pré-requisitos da cobertura - RTQ-R

PRÉ-REQUISITOS PARA ENVOLTÓRIA: COBERTURA								
Zonas bioclimáticas	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
Transmitância térmica (U) ($W/m^2 K$)	$U \leq 2,3$		$U \leq 2,3$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 1,5$ se $\alpha > 0,6$				$U \leq 2,3$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 1,5$ se $\alpha > 0,6$	

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

O não cumprimento dos pré-requisitos indicados nas tabelas acima implica na obtenção de no máximo nível C (EqNum=3) para os equivalentes numéricos da envoltória do ambiente para resfriamento (EqNumEnvAmbresf), para aquecimento (EqNumEnvAmbA) e para refrigeração (EqNumEnvrefrig).

O RTQ-R exige percentual mínimo de abertura para ventilação conforme tabela abaixo. O não cumprimento desse pré-requisito faz com que o equivalente numérico da envoltória do ambiente para resfriamento atinja no máximo nível C (EqNum=3).

Tabela 4: Aberturas mínimas para ventilação - RTQ-R

PERCENTUAL DE ABERTURA PARA VENTILAÇÃO EM RELAÇÃO A ÁREA DE PISO (A)			
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	ZB1 a 6	ZB7	ZB8
A para ambientes de permanência prolongada	$A \geq 8\%$	$A \geq 5\%$	$A \geq 10\%$

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

O tamanho das aberturas exigido pelo RTQ-R para iluminação é igual para todas as Zonas Bioclimáticas. Para os ambientes de permanência prolongada, a soma das áreas de abertura de cada ambiente deve ser de no mínimo 12,5% da área útil. O não atendimento desse pré-requisito faz com que se atinja no máximo nível C (EqNum=3) para os equivalentes numéricos da envoltória do ambiente para resfriamento (EqNumEnvAmbresf), para aquecimento (EqNumEnvAmbA) e para refrigeração (EqNumEnvrefrig).

A casa objeto de estudo foi avaliada inicialmente de forma a identificar se estavam sendo cumpridos os pré-requisitos do RTQ-R. Para isso foi necessário identificar quais eram os ambientes de permanência prolongada e a área de cada um. Para o caso estudado são ambientes de permanência prolongada o dormitório 1 (9,00 m²), o dormitório 2 (9,60 m²) e a sala (7,96 m²). De acordo com o RTQ-R (INMETRO, 2012), varandas fechadas com vidro, cozinhas ou outros ambientes que não possuam separação através de parede ou divisória até o forro com ambientes de permanência prolongada são considerados extensão dos ambientes contíguos a eles. Portanto, deve-se somar a área da sala com as áreas contíguas compreendidas por cozinha (6,25 m²) e circulação (1,47 m²), obtendo uma área de 15,68 m² (7,96 m² + 6,25 m² + 1,47 m²).

Para verificar se a casa cumpre os pré-requisitos de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) da envoltória foram realizados os cálculos seguindo o método descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e o memorial de cálculo está apresentado em Apêndice. Foram obtidos como resultado para as paredes externas: $U = 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$, $CT = 37,31 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e $\alpha = 0,30$. O pré-requisito RTQ-R exige, para paredes externas na ZB1, $U \leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, portanto este quesito está atendido. Já para capacidade térmica, o RTQ-R exige valores $\geq 130 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, quesito não atendido pelas paredes externas da casa estudada.

Para cobertura obteve-se: $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$, $CT = 55,95 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ e $\alpha = 0,25$. O RTQ-R não faz exigências quanto à capacidade térmica da cobertura e exige $U \leq 2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, portanto este quesito está atendido.

Para o pré-requisito de ventilação o RTQ-R estabelece o percentual que pode ser considerado como área efetiva de ventilação de uma janela de acordo com o tipo de abertura que ela apresenta. As janelas de giro de 1 ou 2 folhas têm 90% de abertura para ventilação natural; as janelas de correr têm 45%; janelas basculante têm 70% e janelas maxim-ar (abertura 90°) têm 80%.

Na casa estudada os dormitórios e sala têm janela de correr, a cozinha e o banheiro têm janela maxim-ar e a porta da lavanderia tem uma janela basculante. Considerando a dimensão das esquadrias e o percentual efetivo de ventilação para cada tipo de abertura foram calculadas as áreas de ventilação efetiva dos ambientes de permanência prolongada.

Conforme indicado pelo RTQ-R (INMETRO, 2012): A - percentual de abertura para ventilação em relação à área útil do ambiente (%); AV - área de abertura para ventilação (m²) e AUamb - área útil do ambiente (m²).

Dormitório 1:

$$A = 100 \cdot \frac{A_v}{A_{U_{amb}}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,45}{9} = 7,2$$

Dormitório 2:

$$A = 100 \cdot \frac{A_v}{A_{U_{amb}}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,45}{9,6} = 6,8$$

Sala/Cozinha/Circulação:

$$A = 100 \cdot \frac{A_v}{A_{U_{amb}}} = 100 \cdot \frac{(1,2 \times 1,2 \times 0,45) + (0,6 \times 0,6 \times 0,8) + (1 \times 0,8 \times 0,9)}{15,68} = 10,6$$

Banheiro: (não é área de permanência mas deve atingir no mínimo 8% de ventilação de acordo com RTQ-R)

$$A = 100 \cdot \frac{A_v}{A_{U_{amb}}} = 100 \cdot \frac{0,6 \times 0,6 \times 0,8}{2,83} = 10,2$$

Obteve-se: dormitório 1 com 7,2%; dormitório 2 com 6,8% e sala/cozinha/circulação com 10,6%. Os dois dormitórios não atenderam ao pré-requisito de 8%.

Para calcular a área efetiva de iluminação o procedimento é correlato. As janelas de giro de 1 ou 2 folhas têm 90% de abertura para iluminação natural; as janelas de correr têm 80%; janelas basculante têm 65% e janelas maxim-ar (abertura 90°) têm 80%. Foi calculada a área de iluminação para os três ambientes de permanência prolongada conforme segue:

Dormitório 1:

$$A = 100 \cdot \frac{A_i}{A_{U_{amb}}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,8}{9} = 12,8$$

Dormitório 2:

$$A = 100 \cdot \frac{A_i}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,8}{9,60} = 12$$

Sala/Cozinha/Circulação:

$$A = 100 \cdot \frac{A_i}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{(1,2 \times 1,2 \times 0,8) + (0,6 \times 0,6 \times 0,8) + (1 \times 0,8 \times 0,65)}{15,68} = 12,5$$

Obteve-se abertura de 12,8% para iluminação para o dormitório 1, 12% para o dormitório 2 e 12,5% para sala/cozinha/circulação. O dormitório 2 teve iluminação natural abaixo do exigido pelo RTQ-R.

Depois de verificados os pré-requisitos, o RTQ-R apresenta duas possibilidades de procedimentos para determinação da eficiência da envoltória: o método prescritivo, que foi utilizado nesta pesquisa e o método de simulação. Neste último o desempenho da envoltória é obtido através da modelagem virtual da geometria da edificação. É exigida a simulação computacional para a UH naturalmente ventilada e com condicionamento artificial.

Quando aplicado o método prescritivo, o equivalente numérico (EqNumEnv) do desempenho térmico da envoltória deve ser referente à eficiência da UH naturalmente ventilada e seguindo as exigências referentes à Zona Bioclimática em que a edificação está localizada. O nível de eficiência de envoltória quando utilizado condicionamento artificial é apenas informativo e não faz parte da contabilização da pontuação. No entanto é necessário desempenho nível A nesse item caso se deseje obter bonificação por condicionamento artificial de ar.

Para calcular a eficiência da envoltória da UH naturalmente ventilada primeiramente calcula-se o indicador de graus-hora para resfriamento (GH_R). De acordo com RTQ-R, o GH_R é o somatório anual de graus-hora para resfriamento, calculado através da temperatura operativa do ambiente para a temperatura de base de 26°C. O indicador de graus-hora para resfriamento é calculado para cada ambiente de permanência prolongada através de equações que variam de acordo com a ZB que a edificação está localizada.

Na sequência, calcula-se o consumo relativo para aquecimento (C_A) da envoltória que é o consumo de energia para o aquecimento de um metro quadrado do ambiente durante o período das 21h às 8h, mantendo a temperatura em 22°C, num período de um ano. (INMETRO, 2012). O C_A é calculado apenas para as Zonas Bioclimáticas de 1 a 4, que são as

mais frias. Trata-se de um indicador para avaliação do desempenho da envoltória e não corresponde ao consumo de energia efetivo do ambiente. As equações utilizadas para o cálculo do C_A também variam de acordo com a Zona Bioclimática em que a edificação está localizada.

O próximo passo é a determinação dos equivalentes numéricos da envoltória dos ambientes para resfriamento e aquecimento. Os equivalentes numéricos são pontuações de 1 a 5 de acordo com faixas estabelecidas para cada Zona Bioclimática. Abaixo está a tabela referente à Zona Bioclimática 1, onde está localizada a casa objeto de estudo.

Tabela 5: $EqNumEnvAmb_{resf}$ e $EqNumEnvAmb_A$ para Zona Bioclimática 1

EQUIVALENTE NUMÉRICO DA ENVOLTÓRIA PARA RESFRIAMENTO E AQUECIMENTO – ZB1			
EFICIÊNCIA	EQUIVALENTE NUMÉRICO	CONDIÇÃO $EqNumEnvAmb_{resf}$	CONDIÇÃO $EqNumEnvAmb_A$
A	5	$GH_R \leq 143$	$C_A \leq 16,700$
B	4	$143 < GH_R \leq 287$	$16,700 < C_A \leq 33,400$
C	3	$287 < GH_R \leq 430$	$33,400 < C_A \leq 57,099$
D	2	$430 < GH_R \leq 574$	$50,099 < C_A \leq 66,799$
E	1	$GH_R > 574$	$C_A > 66,799$

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2012

Na sequência, determina-se o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma para resfriamento e para aquecimento. Estes equivalentes numéricos são obtidos pela ponderação dos $EqNumEnvAmb_{resf}$ e $EqNumEnvAmb_A$ pelas áreas úteis dos ambientes avaliados. Ao final, calcula-se o equivalente numérico da envoltória da unidade habitacional autônoma. A equação para obter a $EqNumEnv$ varia de acordo com a Zona Bioclimática. Quanto mais fria a região maior o peso do $EqNumEnvAmb_A$ enquanto que para regiões mais quentes o peso maior é para o $EqNumEnvAmb_{resf}$ conforme segue:

- Para ZB1: $EqNumEnv = 0,08 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,92 \times EqNumEnv_A$
- Para ZB2: $EqNumEnv = 0,44 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,56 \times EqNumEnv_A$
- Para ZB3: $EqNumEnv = 0,64 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,36 \times EqNumEnv_A$
- Para ZB4: $EqNumEnv = 0,68 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,32 \times EqNumEnv_A$
- Para ZB5 a ZB8: $EqNumEnv = EqNumEnv_{resfr}$

4 RESULTADOS

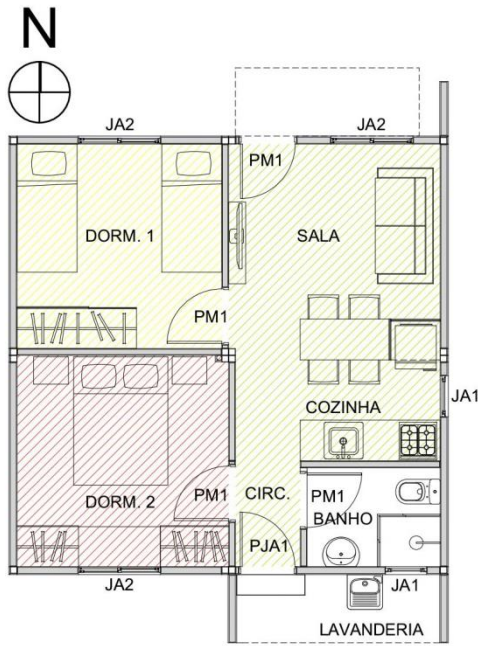
4.1 Desempenho térmico da envoltória da casa de steel frame

Seguindo o procedimento descrito pelo RTQ-R (INMETRO, 2012), foi medido o desempenho térmico da casa de steel frame. Através do mesmo método mediu-se o desempenho térmico de uma casa similar em sistema construtivo tradicional para estabelecer um comparativo entre a eficiência da envoltória de ambas. Ao final foi feito o estudo de como a casa de steel frame se comportaria nas demais zonas bioclimáticas para avaliar sua eficiência se construída em outras regiões.

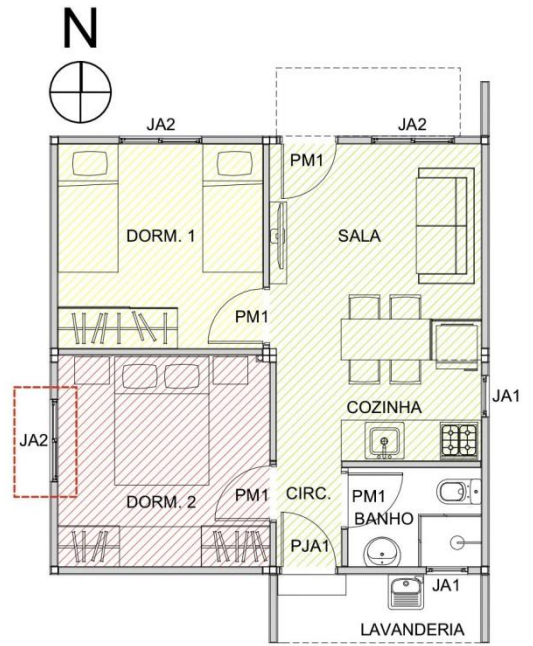
4.1.1 Orientação solar

A primeira medida na busca de uma melhor eficiência energética de envoltória foi estudar a orientação solar mais adequada para a implantação da casa e melhor posicionamento das aberturas.

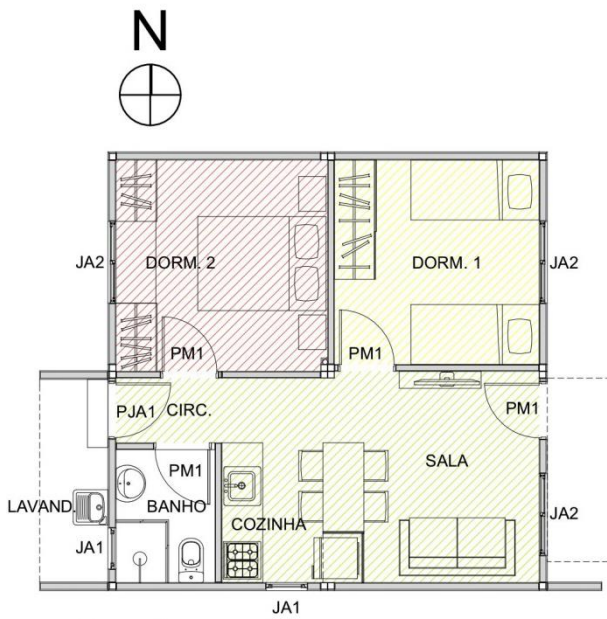
Nesse estudo são apresentadas as duas orientações que conseguiram os melhores resultados: leste e norte. Para ambos os casos foi estudada a possibilidade de mudar as janelas dos dormitórios de posição para tirar melhor proveito da luz e calor do sol. A Figura 9 mostra as orientações e posicionamento das janelas nos casos propostos.



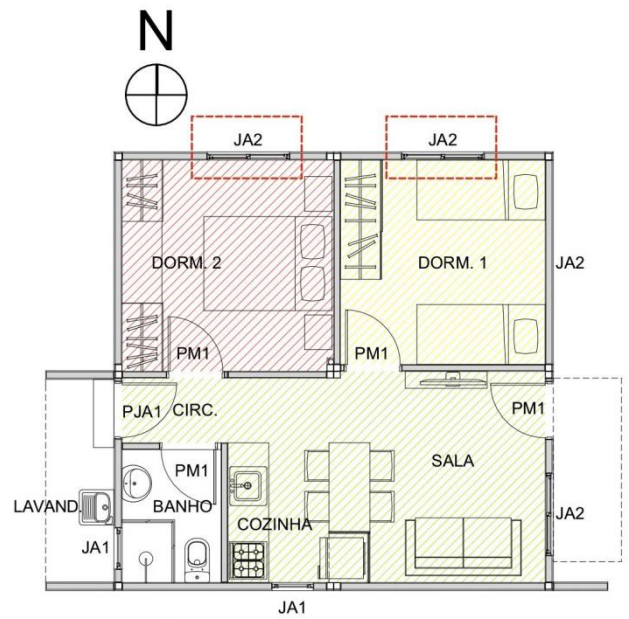
IMPLANTAÇÃO - CASO 1
ESCALA 1:100



IMPLANTAÇÃO - CASO 2
ESCALA 1:100



IMPLANTAÇÃO - CASO 3
ESCALA 1:100



IMPLANTAÇÃO - CASO 4
ESCALA 1:100

Figura 3: Estudo de orientação solar da casa

No primeiro caso as janelas da sala e do dormitório 1 ficam voltados para norte, o que favorece o recebimento de luz e calor ao longo do dia. Já o dormitório 2 tem uma parede externa para oeste, que recebe o sol da tarde, e uma parede externa com janela para sul, que não recebe sol no inverno.

Os resultados obtidos para Graus horas de resfriamento (GHR) são satisfatórios, atingindo nível de eficiência B. Já o Consumo Relativo para Aquecimento (CA) atinge apenas nível C para os dois dormitórios, sendo que para o dormitório 2 o CA é maior, portanto é o ambiente em situação mais desfavorável.

Tabela 6: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 1

CASA MODULAR EM STEEL FRAME - ORIENTAÇÃO NORTE			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)	278 (B)	256 (B)	228 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	41,21 (C)	44,82 (C)	31,83 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	-1,39 (A)	-1,47 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,00 (C)		

Buscando atingir um melhor desempenho da envoltória, testou-se a alteração da janela do dormitório 2 da fachada sul para a fachada oeste, mantendo a casa na mesma posição, orientada para norte. O resultado obtido mostrou que, como previsto, o CA do dormitório 2 teve uma queda, de 44,82 para 40,94. Porém a janela do quarto passou a receber o sol da tarde o que prejudicou o GHR, que caiu para nível C para esse ambiente. A solução testada não apresentou resultado satisfatório.

Tabela 7: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 2

CASA MODULAR EM STEEL FRAME – ORIENTAÇÃO NORTE E MUDANÇA NA POSIÇÃO DA JANELA DO DORMITÓRIO 2			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)	278 (B)	303 (C)	228 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	41,21 (C)	40,94 (C)	31,83 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	-1,39 (A)	0,03 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,00 (C)		

No caso 3 optou-se por orientar a casa para leste. Desta forma os dois dormitórios, que estavam com menor desempenho, teriam uma parede externa voltada para norte, o que proporcionaria o recebimento de calor de forma mais distribuída ao longo do dia. Já a parede externa da sala com janela ficaria para leste e receberia o sol da manhã. O resultado da simulação mostrou a sala não sofreu prejuízo e manteve o nível B. Já os dormitórios não tiveram bons resultados, pois o GHR aumentou em relação à casa orientada para norte.

Tabela 8: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 3

CASA MODULAR EM STEEL FRAME - ORIENTAÇÃO LESTE			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}\text{C.h}$)	297 (C)	325 (C)	256 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	43,21 (C)	39,46 (C)	32,65 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	-0,93 (A)	-0,07 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,00 (C)		

Para melhorar o conforto dos dormitórios ficou mantida a orientação leste da casa e as janelas dos quartos foram deslocadas para a fachada norte. A simulação desta configuração é apresentada na tabela 12. Apesar de o CA continuar no nível C de eficiência, o resultado numérico superou os testes anteriores e mostrou-se a melhor opção. Além disso, nessa configuração os ambientes de permanência prolongada atingiram resultados mais próximos indicando que o conforto ficou mais equilibrado entre os ambientes.

Tabela 9: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 4

CASA MODULAR EM STEEL FRAME - ORIENTAÇÃO LESTE E MUDANÇA NA POSIÇÃO DAS JANELAS DOS DORMITÓRIOS 1 E 2			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}\text{C.h}$)	278 (B)	274 (B)	256 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	41,37 (C)	39,90 (C)	32,65 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	-1,44 (A)	-1,44 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,00 (C)		

4.1.2 Pré requisito RTQ-R da envoltória

Para atender aos pré-requisitos do RTQ-R para envoltória foi necessário alterar apenas as paredes externas. O sistema de cobertura foi mantido de acordo com projeto original com $U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 55,95 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. As paredes internas não compõem a envoltória e também foram mantidas com $U = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 14,91 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.

As paredes externas da casa tinham originalmente $U = 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT = 37,31 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. De acordo com o RTQ-R precisariam atingir $U \leq 2,50 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $CT \geq 130 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. Com as alterações propostas foi possível obter transmitância térmica **(U)= 0,42W/m²K** e capacidade térmica **(CT)= 131,31 kJ/m²K**.

Os painéis de vedação em steel frame da envoltória da casa proposta são compostos pelas seguintes camadas:

- **Placa de gesso acartonado:** $e_{ges} = 0,015 \text{ m}$; $\rho_{ges} = 766,67 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{ges} = 0,25 \text{ W/m.K}$; $c_{ges} = 0,84 \text{ kJ/kg.K}$
- **Placa de tiras de madeira orientadas (OSB):** $e_{osb} = 0,0151 \text{ m}$; $\rho_{osb} = 646,5 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{osb} = 0,14 \text{ W/m.K}$; $c_{osb} = 2,30 \text{ kJ/kg.K}$
- **Feltro de lã de rocha:** $e_{lã} = 0,075 \text{ m}$; $\rho_{lã} = 150 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{lã} = 0,045 \text{ W/m.K}$; $c_{lã} = 0,75 \text{ kJ/kg.K}$
- **Placa cimento madeira:** $e_{cim} = 0,022 \text{ m}$; $\rho_{cim} = 1350 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{cim} = 0,20 \text{ W/m.K}$; $c_{cim} = 2,30 \text{ kJ/kg.K}$

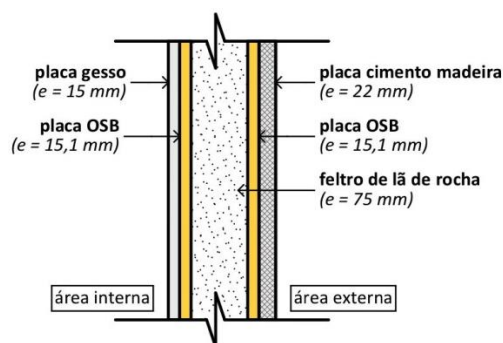


Figura 4: Desenho esquemático da parede externa da casa de steel frame com proposta de modificação

A partir dessa alteração a casa teve seu desempenho térmico novamente testado obtendo os resultados apresentados na Tabela 13. O GHR alcançou valores muito satisfatórios, sofreu queda para os três ambientes de permanência prolongada e a sala

chegou a atingir nível A. O C_A também sofreu redução para os três ambientes embora não tenha havido mudança de nível na classificação. O C_R manteve-se ótimo.

Para esta simulação ainda não tinha sido atendido o pré-requisito de ventilação e iluminação do RTQ-R, o que fez com que as notas dos dormitórios para envoltória de verão e para refrigeração artificial no dormitório 2 fossem reduzidas para C.

Tabela 10: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 5

CASA MODULAR EM STEEL FRAME ATENDENDO AO PRÉ-REQUISITO DE PAREDE				
		DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)		151 (B)	147 (B)	129 (A)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)		34,51 (C)	33,45 (C)	28,58 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)		-0,89 (A)	-0,93 (A)	Não se aplica
	Ponderação da nota			
Envoltória para Verão	3,91 (B)	3 (C)	3 (C)	5 (A)
Envoltória para Inverno	3,46 (C)	3 (C)	3 (C)	4 (B)
Refrig. Artificialmente	3,97 (B)	5 (A)	3 (C)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)		3,49 (C)		

Para a Zona Bioclimática 1 o Equivalente Numérico da Envoltória é composto apenas 8% pelo Equivalente Numérico da Envoltória para Resfriamento e 92% pelo Equivalente Numérico da Envoltória para Aquecimento, porque esta zona apresenta mais desconforto por frio do que por calor. O $EqNumEnv_{resfr}$ aparece na planilha como a nota da envoltória para verão e o $EqNumEnv_A$ é a nota da envoltória para inverno.

Portanto temos: $EqNumEnv = 0,08 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,92 \times EqNumEnv_A$

$$EqNumEnv = 0,08 \times 3,91 + 0,92 \times 3,46 = 3,49$$

A pontuação do desempenho térmico da casa foi de 3,49 correspondendo ao conceito C, ainda não satisfatório.

4.1.3 Pré requisito RTQ-R para iluminação e ventilação

Para aumentar as áreas de iluminação e ventilação da casa de modo a atender o pré-requisito RTQ-R propõe-se a substituição das janelas de correr por janelas de giro de mesma dimensão tanto para a sala quanto para os dormitórios. Dessa forma foi possível melhorar os índices sem grandes alterações no projeto original.

Seguem abaixo os cálculos de ventilação e iluminação com a alteração do tipo de abertura das janelas para os ambientes de permanência prolongada. As dimensões das janelas previstas em projeto e os coeficientes de ventilação e iluminação para cada tipo de abertura estão conforme apresentado no capítulo Método.

Considerar: A - percentual de abertura para ventilação em relação à área útil do ambiente (%); AV - área de abertura para ventilação (m²) e AUamb - área útil do ambiente (m²).

Cálculo da ventilação a partir das alterações no tipo de abertura das janelas:

Dormitório 1:

$$A = 100 \cdot \frac{Av}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,9}{9} = 14,4\%$$

Dormitório 2:

$$A = 100 \cdot \frac{Av}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,9}{9,6} = 13,5\%$$

Sala/Cozinha/Circulação:

$$A = 100 \cdot \frac{Av}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{(1,2 \times 1,2 \times 0,9) + (0,6 \times 0,6 \times 0,8) + (1 \times 0,8 \times 0,9)}{15,68} = 14,7\%$$

Cálculo da iluminação a partir das alterações no tipo de abertura das janelas:

Dormitório 1:

$$A = 100 \cdot \frac{Ai}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,9}{9} = 14,4\%$$

Dormitório 2:

$$A = 100 \cdot \frac{Ai}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{1,2 \times 1,2 \times 0,9}{9,60} = 13,5\%$$

Sala/Cozinha/Circulação:

$$A = 100 \cdot \frac{Ai}{AU_{amb}} = 100 \cdot \frac{(1,2 \times 1,2 \times 0,9) + (0,6 \times 0,6 \times 0,8) + (1 \times 0,8 \times 0,65)}{15,68} = 13,4\%$$

Realizadas as alterações nas janelas e atendidos os pré-requisitos de ventilação e iluminação do RTQ-R, simulou-se novamente o desempenho térmico da envoltória da casa. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 14.

O GHR apresentou queda considerável para os três ambientes de permanência prolongada devido ao incremento na ventilação e todos obtiveram eficiência A. O C_A manteve-se praticamente igual à situação anterior, sofreu apenas um pequeno aumento que não gerou mudança de nível na classificação dos ambientes. O C_R manteve-se ótimo (A).

Tabela 11: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 6

CASA MODULAR EM STEEL FRAME ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS DE PAREDE, ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO				
		DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)		134 (A)	131 (A)	122 (A)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)		35,37 (C)	34,24 (C)	27,73 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)		-1,56 (A)	-1,55 (A)	Não se aplica
	Ponderação da nota			
Envoltória para Verão	5,00 (A)	5 (A)	5 (A)	5 (A)
Envoltória para Inverno	3,46 (C)	3 (C)	3 (C)	4 (B)
Refrig. Artificialmente	5,00 (A)	5 (A)	5 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)		3,58 (B)		

A envoltória para verão passou de pontuação 4 (B) para 5 (A) e a envoltória de inverno permaneceu com a mesma pontuação, 3,46 (C).

Portanto temos: $EqNumEnv = 0,08 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,92 \times EqNumEnv_A$

$$EqNumEnv = 0,08 \times 5,00 + 0,92 \times 3,46 = 3,58$$

A pontuação do desempenho térmico da casa foi de 3,49 (C), na situação anterior, para 3,58, que corresponde ao conceito de eficiência B.

4.1.4 Absortância da cobertura

Para tentar reduzir o Consumo Relativo para Aquecimento da casa optou-se por uma alteração na cobertura que promovesse maior ganho de calor. Para isso propõe-se uma medida simples de mudança na cor da telha de aço galvanizado para aumentar a absortância (α) da cobertura. A casa original teve a telha pintada de branco, o que de acordo com DORNELLES (2008) atribui a essa cobertura um $\alpha=0,158$ (tinta acrílica fosca cor branco). Para chapa de aço galvanizada nova e brilhante, sem pintura, a NBR 15220-2 especifica $\alpha=0,25$.

Foi proposta a telha sem pintura aumentando a absorvência da cobertura de 0,158 para 0,25. Feita a alteração simulou-se o desempenho térmico da envoltória da casa novamente. O resultado está apresentado na Tabela 15.

O GHR subiu para os três ambientes de permanência prolongada mas permaneceu dentro dos parâmetros considerados de eficiência A. O objetivo inicial de reduzir o C_A foi atingido para os três ambientes sendo que o dormitório 2 passou de eficiência C para B. O C_R manteve-se ótimo (A).

Tabela 12: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 7

CASA MODULAR EM STEEL FRAME ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS DE PAREDE, ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO E ALTERAÇÃO NA COR DA COBERTURA				
		DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)		140 (A)	136 (A)	128 (A)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)		33,97 (C)	32,93 (B)	26,92 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)		-0,84 (A)	-0,88 (A)	Não se aplica
	Ponderação da nota			
Envoltória para Verão	5,00 (A)	5 (A)	5 (A)	5 (A)
Envoltória para Inverno	3,74 (B)	3 (C)	4 (C)	4 (B)
Refrig. Artificialmente	5,00 (A)	5 (A)	5 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)		3,84 (B)		

A envoltória para verão permaneceu classificada como A e a envoltória de inverno melhorou sua classificação de 3,46 (C), na situação anterior, para 3,74(B) para a situação de maior absorvência da cobertura.

Portanto temos: $EqNumEnv = 0,08 \times EqNumEnv_{resfr} + 0,92 \times EqNumEnv_A$

$$EqNumEnv = 0,08 \times 5,00 + 0,92 \times 3,74 = 3,84$$

A pontuação do desempenho térmico da casa foi de 3,58 (B) para 3,84 (B). É importante destacar que apesar de não haver mudança na avaliação de eficiência, que foi B para as duas situações, houve uma melhora no EqNumEnv. Uma mudança na casa bastante simples e que gera economia de recurso e mão de obra, pois dispensa a pintura da telha, foi capaz de promover um melhor desempenho da envoltória de inverno para a ZB1.

4.1.5 Vidros duplos

Para reduzir o Consumo Relativo para Aquecimento da casa testou-se o desempenho com o uso de vidros duplos para proporcionar menor perda de calor do ambiente interno para o externo. O vidro utilizado nas simulações anteriores tinha $U=5,7 \text{ W/m}^2$. Para esse caso foram aplicados caixilhos com dois vidros, cada um com transmitância de $5,7 \text{ W/m}^2$.

Com vidros duplos o GHR caiu para os três ambientes pois nesse caso há menor aquecimento da edificação. O C_A sofreu pequena redução para os três ambientes, mas suficiente para o dormitório 1 passar de eficiência B para A. O CR manteve-se no nível A de eficiência como nos casos anteriores.

Tabela 13: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 8

CASA MODULAR EM STEEL FRAME ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS DE PAREDE, ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO, ALTERAÇÃO NA COR DA COBERTURA E ESQUADRIAS COM VIDROS DUPLOS			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}\text{C.h}$)	124 (A)	120 (A)	112 (A)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) ($\text{KWh./m}^2\text{.ano}$)	32,82 (B)	31,86 (B)	25,33 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) ($\text{KWh./m}^2\text{.ano}$)	-0,96 (A)	-0,99 (A)	Não se aplica
	Ponderação da nota		
Envoltória para Verão	5,00 (A)	5 (A)	5 (A)
Envoltória para Inverno	4,00 (B)	4 (B)	4 (B)
Refrig. Artificialmente	5,00 (A)	5 (A)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	4,08 (B)		

A envoltória para verão permaneceu classificada como A e a envoltória de inverno permaneceu B, mas melhorou sua pontuação de 3,74 para 4,00.

Portanto temos: $\text{EqNumEnv} = 0,08 \times \text{EqNumEnv}_{\text{resfr}} + 0,92 \times \text{EqNumEnv}_A$

$$\text{EqNumEnv} = 0,08 \times 5,00 + 0,92 \times 4,00 = 4,08$$

A pontuação do desempenho térmico da casa foi de 3,84 para 4,08. Houve uma melhora no EqNumEnv mas a eficiência se manteve classificada como B.

4.2 Desempenho térmico da envoltória da casa de bloco cerâmico

O Inmetro (2015) disponibilizou uma revisão do Anexo Geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros, que se trata de um material auxiliar para a aplicação do Relatório Técnico de Qualidade - RTQ. Neste catálogo estão disponíveis

as propriedades térmicas de algumas das envoltórias mais comumente usadas na construção civil no Brasil.

Para a simulação do desempenho térmico da envoltória de uma casa em sistema construtivo tradicional optou-se por parede de bloco cerâmico com 9cm de espessura e com argamassa interna e externa de 2,5cm. Este tipo de parede aparece no catálogo supracitado com $U=2,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ e C_T de $150 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. Para a cobertura optou-se por laje pré-moldada com total de 12cm de espessura, com lajota cerâmica de 7cm, camada de concreto de 4cm e argamassa de 1cm, conforme desenho esquemático abaixo. Este sistema de cobertura, de acordo com Inmetro (2015), tem $U=1,79 \text{ W/m}^2\text{K}$ e C_T de $185 \text{ kJ/m}^2\text{K}$.

Tanto a parede como a cobertura utilizadas na simulação se enquadram nas especificações mínimas exigidas pelo programa Minha Casa Minha Vida publicadas na Portaria N° 146 de 26 de abril de 2016.

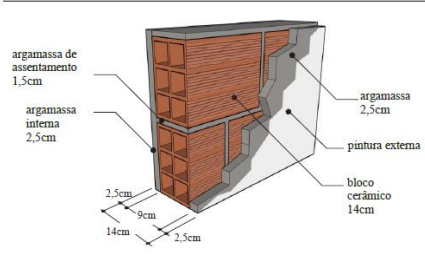
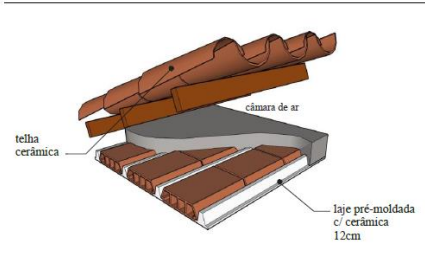
	<p>Descrição: 9</p> <p>Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Pintura externa (α)</p> <table border="1" data-bbox="895 1153 1050 1256"> <thead> <tr> <th>U [W/(m²K)]</th> <th>C_T [kJ/m²K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,46</td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>	U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]	2,46	150
U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]				
2,46	150				
	<p>Descrição: 5</p> <p>Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica</p> <table border="1" data-bbox="895 1480 1050 1572"> <thead> <tr> <th>U [W/(m²K)]</th> <th>C_T [kJ/m²K]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,79</td> <td>185</td> </tr> </tbody> </table>	U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]	1,79	185
U [W/(m ² K)]	C _T [kJ/m ² K]				
1,79	185				

Figura 5: Propriedades térmicas de parede e cobertura. Fonte: INMETRO, 2015.

4.2.1 Orientação solar

Neste primeiro caso a sala tem sua maior parede para leste e janela na parede voltada para norte, o dormitório 1 tem uma parede oeste e janela também na parede voltada para norte. O dormitório 2 tem uma parede externa para oeste e janela na parede voltada para o sul. (Ver Figura 9).

Os resultados obtidos para Graus horas de resfriamento (GHR) são satisfatórios, atingindo valores inferiores a casa de steel frame, mas permanecem no mesmo nível B de

eficiência para os três ambientes. O Consumo Relativo para Aquecimento (CA) também chegou a valores menores que os da casa de steel frame, mas permaneceu nos mesmos níveis de eficiência, C para os dormitórios e B para a sala. A maior diferença pode ser notada no Consumo Relativo para Refrigeração (C_R) que passou de nível A na casa de steel frame para nível E na casa de alvenaria convencional.

O Equivalente Numérico da Envoltória não contabiliza o C_R para a composição final da nota, que inclui apenas os resultados para resfriamento e aquecimento passivo. A casa em steel frame obteve EqNumEnv de 3,00, que corresponde ao nível de eficiência C e a casa de alvenaria obteve EqNumEnv de 3,46, também eficiência C.

Tabela 14: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 9

CASA EM BLOCO CERÂMICO - ORIENTAÇÃO NORTE			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)	211 (B)	193 (B)	182 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	37,87 (C)	41,52 (C)	29,53 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	5,68 (E)	5,13 (E)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,46 (C)		

O próximo teste mantém a casa orientada para norte e altera a posição da janela do dormitório 2 da fachada sul para a fachada oeste buscando reduzir o CA desse ambiente.

O resultado obtido mostrou que, como previsto, o CA do dormitório 2 sofreu uma queda porém não houve alteração no nível de eficiência, que permaneceu C. A janela do dormitório 2 passou a receber o sol da tarde o que levou a um aumento do GHR, mas o nível de eficiência manteve-se B.

Em comparação com o resultado obtido pela casa de steel frame para a mesma orientação nota-se que o desempenho para resfriamento do dormitório 2 subiu de C para B. Já o Consumo Relativo para Refrigeração atingiu desempenho A na casa de steel frame e E para a casa de bloco cerâmico.

Tabela 15: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 10

CASA EM BLOCO CERÂMICO - ORIENTAÇÃO NORTE E MUDANÇA NA POSIÇÃO DA JANELA DO DORMITÓRIO 2			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)	211 (B)	242 (B)	182(B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	37,87 (C)	38,33(C)	29,53 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	5,68 (E)	6,58 (E)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,46 (C)		

Na próxima situação de implantação a casa foi orientada para leste. Os dois dormitórios ficaram com uma das paredes voltadas para norte, o dormitório 1 ficou com a abertura para leste e o dormitório 2 com a abertura para oeste. A sala teve sua maior parede orientada para sul e a principal abertura para leste (Ver figura 9). O resultado da simulação mostrou-se insatisfatório já que o GHR aumentou em relação à casa orientada para norte e o CA caiu apenas para o dormitório 2.

Para a mesma orientação solar o GHR do dormitório 1 e 2 passou de C, na casa de steel frame, para B na casa de bloco cerâmico . O CA manteve-se C para os dormitórios e B para a sala. Já para CR a casa de steel frame apresentou resultado bem superior com eficiência A enquanto a casa de alvenaria obteve E.

Tabela 16: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 11

CASA EM BLOCO CERÂMICO - ORIENTAÇÃO LESTE			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}C.h$)	230 (B)	261 (B)	216 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	40,66 (C)	37,17 (C)	31,98 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	6,07 (E)	6,50 (E)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,46 (C)		

A tabela 20 apresenta os resultados da simulação da casa orientada para leste com as janelas dos quartos deslocadas para a fachada norte. Neste caso notou-se uma melhora no desempenho da envoltória. Tanto o GHR como o CA apresentaram redução nos valores para

os dois dormitórios, contudo os níveis de eficiência mantiveram-se os mesmos para ambos os casos (B para GHR e C para CA) .

Em comparação à casa de steel frame para a mesma orientação, obtivemos desempenho semelhante para GHR (B para os três ambientes) e para CA (C para dormitórios e B para sala). Já para CR a casa de steel frame apresentou eficiência A enquanto a casa de bloco cerâmico obteve E.

Tabela 17: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 12

CASA EM BLOCO CERÂMICO - ORIENTAÇÃO LESTE E MUDANÇA NA POSIÇÃO DAS JANELAS DOS DORMITÓRIOS 1 E 2			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}\text{C.h}$)	210 (B)	209 (B)	216(B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) ($\text{KWh./m}^2\text{.ano}$)	38,03 (C)	36,87 (C)	31,98 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) ($\text{KWh./m}^2\text{.ano}$)	5,61 (E)	5,19 (E)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,46 (C)		

Tanto para a casa em steel frame como para a casa em bloco cerâmico o melhor desempenho térmico da envoltória foi obtido para a orientação leste e com as janelas dos dormitórios na face norte. Essa configuração foi adotada nas simulações apresentadas na sequência.

4.2.2 Pré requisito RTQ-R de iluminação e ventilação

Para a casa de bloco cerâmico, assim como para a casa de steel frame, alterou-se o tipo de abertura das janelas de modo a atender os pré-requisitos de ventilação e iluminação do RTQ-R. A partir dessa mudança, simulou-se o desempenho térmico da envoltória e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 21.

Os três ambientes de permanência prolongada tiveram o GHR reduzido devido a melhora nas condições de ventilação, mas mantiveram-se no nível B de eficiência. O C_A permaneceu praticamente igual à situação anterior, com nível C para dormitórios e B para sala e o C_R manteve-se ruim (E). A pontuação do desempenho térmico da casa passou de 3,46 (C), na situação anterior, para 3,50 que corresponde ao conceito de eficiência B.

Tabela 18: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 13

CASA EM BLOCO CERÂMICO ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO				
		DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}\text{C.h}$)		194 (B)	193 (B)	209 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)		38,88(C)	37,67 (C)	31,13(B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)		4,95 (E)	4,57(E)	Não se aplica
	Ponderação da nota			
Envoltória para Verão	4,00 (B)	4 (B)	4 (B)	4 (B)
Envoltória para Inverno	3,46 (C)	3 (C)	3 (C)	4 (B)
Refrig. Artificialmente	1,00 (E)	1 (E)	1 (E)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)		3,50 (B)		

A casa de steel frame nessas mesmas circunstâncias apresentou melhor desempenho para o GHR, sendo A para os três ambientes. O CA foi menor na casa de steel frame também para os três ambientes, porém neste caso, a classificação de eficiência manteve-se igual a da casa de bloco cerâmico (C para dormitórios e B para a sala). O CR obteve A na casa de steel frame e E para a casa de bloco cerâmico. O EqNumEnv foi superior para a casa de steel frame (3,58, eficiência B).

4.2.3 Vidros duplos

Com a aplicação de vidros duplos para a casa de bloco cerâmico obteve-se redução do GHR para os três ambientes, mas todos mantiveram-se classificados como B. O C_A teve uma pequena redução também para os três ambientes e a classificação de eficiência manteve-se C para dormitórios e B para sala. O CR manteve-se no nível E como nos casos anteriores.

A casa de steel frame com vidros duplos apresentou GHR com eficiência A para os três ambientes e CA com eficiência B para os três ambientes, superando nos dois casos o desempenho da casa em bloco cerâmico. O EqNumEnv obtido para a casa de steel frame foi de 4,08 (B) e a o da casa de bloco de cerâmico foi inferior, de 3,50, mas também classificado na faixa B de eficiência.

Tabela 19: Desempenho da envoltória da habitação - Caso 14

CASA EM BLOCO CERÂMICO ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS DE ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO E ESQUADRIAS COM VIDROS DUPLOS			
	DORM. 1	DORM. 2	SALA
Indicador de Graus-hora para Resfriamento (GHR) ($^{\circ}\text{C.h}$)	178 (B)	177(B)	193 (B)
Consumo Relativo para Aquecimento (CA) (KWh./m ² .ano)	37,73 (C)	36,59 (C)	29,54 (B)
Consumo Relativo para Refrigeração (CR) (KWh./m ² .ano)	4,83 (E)	4,46(E)	Não se aplica
	Ponderação da nota		
Envoltória para Verão	4,00 (B)	4 (B)	4 (B)
Envoltória para Inverno	3,46 (C)	3 (C)	4 (B)
Refrig. Artificialmente	1,00 (E)	1 (E)	Não se aplica
Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv)	3,50 (B)		

4.3 Desempenho térmico da envoltória da casa de steel frame nas 8 zonas bioclimáticas

Nesse capítulo avaliou-se a eficiência energética da envoltória da casa modular em steel frame para as oito zonas bioclimáticas brasileiras. O objetivo dessa investigação consiste em avaliar se a casa teria desempenho térmico satisfatório em outras ZBs e se as melhorias propostas para a ZB1 incrementariam a eficiência da envoltória para outras regiões.

Num primeiro teste a casa em steel frame foi simulada na melhor condição de orientação solar obtida na pesquisa: elevação principal voltada para leste e janelas dos dormitórios 1 e 2 deslocadas para a fachada norte. Além disso, foram atendidos os pré-requisitos propostos pelo RTQ-R para envoltória, iluminação e ventilação.

Num segundo teste simulou-se a casa nas mesmas condições descritas anteriormente, mas com o acréscimo de vidros duplos nas janelas dos ambientes de permanência prolongada e com o aumento da absorvância da cobertura. Essas medidas, quando adotadas para a zona bioclimática 1 foram capazes de ampliar a eficiência térmica da envoltória.

Na Tabela 23 podemos ver os resultados obtidos para o primeiro teste. São apresentados o desempenho da envoltória para verão e para inverno para os três ambientes (dormitório 1, dormitório 2 e sala) e o Equivalente Numérico da Envoltória (EqNumEnv), que é a ponderação da nota dos ambientes pela área.

Podemos observar que a casa obteve o melhor desempenho (eficiência B), na zona bioclimática 1, para qual ela foi projetada. Para as outras zonas bioclimáticas obteve-se eficiência C ou D. Em linhas gerais, o desempenho da edificação foi menor em zonas caracterizadas por temperaturas mais elevadas.

A casa apresentou um bom resultado de envoltória para inverno para as zonas bioclimáticas 2, 3 e 4 tendo classificações A e B. A combinação das propriedades de transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das paredes e cobertura contribuem para que a envoltória seja capaz de ganhar calor lentamente durante o dia e mantenha o ambiente confortável durante a noite. Nas zonas bioclimáticas de 5 a 8 o desempenho da envoltória para inverno nem é considerado uma vez que esses locais possuem temperaturas bastante elevadas e não se considera desconforto por frio. Nesses casos o EqNumEnv é determinado apenas pela nota do desempenho da envoltória para verão.

Para a envoltória de verão podemos notar um desempenho ruim para as zonas bioclimáticas de 2 a 7, que obtiveram classificações C e D. Isso ocorre porque a casa objeto de estudo tem janelas com vidro e nenhum dispositivo de proteção solar externo as aberturas como venezianas, por exemplo. Essa característica não traz nenhum prejuízo ao desempenho térmico na casa para a zona bioclimática 1, que tem as temperaturas mais baixas e maior necessidade de ganho de calor. Para a ZB1 obteve-se nível A para envoltória de verão. No entanto, as outras zonas necessitam de dispositivos de proteção solar das aberturas para evitar ganho de calor excessivo através dos vidros. Nesses casos é recomendado o uso de veneziana nas janelas para cobrir 100% da abertura quando fechada.

Se fosse utilizado algum dispositivo de proteção solar externo às aberturas nos ambientes de permanência prolongada teríamos como resultado: ZB2: EqNumEnv= 3,76 (B); ZB3 a ZB6 e ZB8: EqNumEnv= 4,00 (B) e ZB7: EqNumEnv= 3,26 (C). O desempenho da envoltória seria satisfatório para todas as zonas bioclimáticas atingindo nível B exceto para a ZB7 que ainda precisaria de medidas para reduzir o indicador de graus-hora para resfriamento.

Tabela 20: Desempenho da envoltória nas oito zonas bioclimáticas

CASA MODULAR EM STEEL FRAME - ORIENTAÇÃO LESTE, JANELAS DOS DORMITÓRIOS 1 E 2 PARA NORTE E ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS RTQ-R							
	DORM.1	DORM.2	SALA		DORM.1	DORM.2	SALA
ZB1				ZB5			
Envoltória Verão	A	A	A	Envoltória Verão	C	C	C
Envoltória Inverno	C	C	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	B (3,58)			EqNumEnv	C (3,00)		
ZB2				ZB6			
Envoltória Verão	D	D	C	Envoltória Verão	C	D	C
Envoltória Inverno	B	B	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	C (3,32)			EqNumEnv	C (2,72)		
ZB3				ZB7			
Envoltória Verão	C	C	C	Envoltória Verão	C	D	D
Envoltória Inverno	B	B	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	C (3,36)			EqNumEnv	D (2,26)		
ZB4				ZB8			
Envoltória Verão	C	C	C	Envoltória Verão	C	C	C
Envoltória Inverno	A	A	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	C (3,49)			EqNumEnv	C (3,00)		

Para o segundo teste foram utilizados vidros duplos nas janelas dos ambientes de permanência prolongada e aumentou-se a absorvância da cobertura de 0,16 (telha pintada de branco) para 0,25 (telha de aço galvanizado sem pintura). Essas medidas, aplicadas para a zona bioclimática 1 melhoraram o desempenho da envoltória de inverno de “C” para “B” nos dois dormitórios. A EqNumEnv da casa passou de 3,58 (“B”), na situação anterior, para 4,08 (“B”). Os resultados obtidos para as oito zonas bioclimáticas podem ver vistos na Tabela 24.

Para as ZBs 2, 3, 4, 5 e 8 as medidas não provocaram alteração no desempenho da envoltória e os níveis de eficiência permaneceram os mesmos. Já para as ZBs 6 e 7 houve piora no desempenho da envoltória justificado pelo aquecimento indesejado do ambiente interno provocado pelo maior absorção de calor pela cobertura.

Tabela 21: Desempenho da envoltória nas oito zonas bioclimáticas

CASA MODULAR EM STEEL FRAME - ORIENTAÇÃO LESTE, JANELAS DOS DORMITÓRIOS 1 E 2 PARA NORTE, ATENDENDO AOS PRÉ-REQUISITOS RTQ-R, ALTERAÇÃO NA ABSORTÂNCIA DA COBERTURA E VIDROS DUPLOS							
	DORM.1	DORM.2	SALA		DORM.1	DORM.2	SALA
ZB1				ZB5			
Envoltória Verão	A	A	A	Envoltória Verão	C	C	C
Envoltória Inverno	B	B	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	B (4,08)			EqNumEnv	C (3,00)		
ZB2				ZB6			
Envoltória Verão	D	D	C	Envoltória Verão	D	D	C
Envoltória Inverno	B	B	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	C (3,32)			EqNumEnv	D (2,46)		
ZB3				ZB7			
Envoltória Verão	C	C	C	Envoltória Verão	D	D	D
Envoltória Inverno	B	B	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	C (3,36)			EqNumEnv	D (2,00)		
ZB4				ZB8			
Envoltória Verão	C	C	C	Envoltória Verão	C	C	C
Envoltória Inverno	A	A	B	Envoltória Inverno	-	-	-
EqNumEnv	C (3,49)			EqNumEnv	C (3,00)		

O gráfico apresentado na sequência mostra os níveis de eficiência energética obtidos pela envoltória da residência modular em steel frame para as oito zonas bioclimáticas. O gráfico revela a classificação obtida para três situações:

- casa do projeto original, orientado para norte;
- casa na implantação que proporcionou melhor desempenho térmico, orientada para leste e janelas dos dormitórios deslocadas para a fachada norte, com alterações nas paredes externas para cumprir o pré-requisito de envoltória e alteração nas janelas para cumprir os pré-requisitos de iluminação e ventilação.
- Casa com as mesmas características da descrição anterior e com o uso de vidros duplos nas janelas dos ambientes de permanência prolongada e cobertura com maior absorvância.

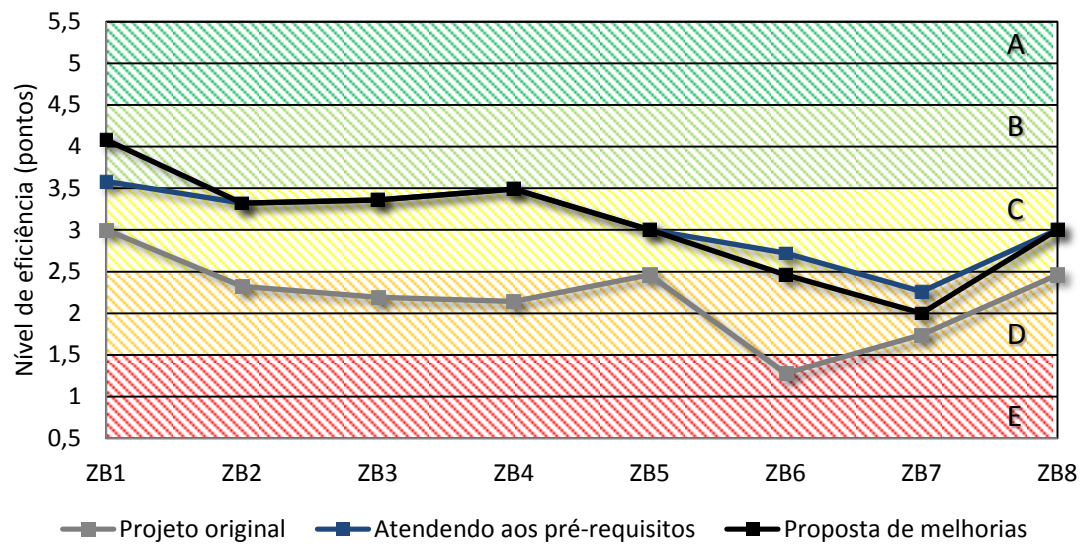


Figura 11: Gráfico do nível de eficiência da envoltória para as zonas bioclimáticas

5 CONCLUSÃO

A residência modular em steel frame, da forma como foi concebida originalmente, possui desempenho térmico insatisfatório (nível C) para a Zona Bioclimática 1, onde está localizada Curitiba. Isso se deve a três fatores principais: orientação solar e posição das janelas, baixa capacidade térmica das paredes externas, área de ventilação e iluminação insuficiente. A residência apresentou comportamento satisfatório (nível B) para a capacidade de resfriamento.

A partir de melhorias propostas nos três fatores supracitados o desempenho térmico atingiu níveis satisfatórios de conforto para o usuário (eficiência B). As medidas propostas foram: casa orientada para leste e janelas dos dormitórios deslocadas para norte; paredes externas mais pesadas, com capacidade térmica superior a $130\text{kJ/m}^2\text{K}$ e janelas de correr substituídas por janelas de giro, o que aumentou a capacidade de iluminação e ventilação das aberturas. Outras duas medidas também foram capazes de incrementar o desempenho da envoltória, mas na mesma faixa B de eficiência: aumento da absorvância da cobertura, substituindo telha de aço galvanizada pintada de branco por telha sem pintura e uso de vidros duplos nas esquadrias dos ambientes de permanência prolongada.

Este mesmo projeto, se construído em bloco cerâmico e cobertura de laje de concreto e telha cerâmica, obteria desempenho térmico nível C para envoltória. Com as mesmas mudanças propostas no caso anterior (alteração na implantação, na posição das janelas e no tipo de abertura) a eficiência chegaria a nível B. Os resultados foram parecidos aos obtidos para a casa de steel frame para a habitação naturalmente ventilada porém, o consumo relativo para refrigeração foi A para a casa de steel frame e E para a casa de bloco cerâmico.

A casa em steel frame, se construída nas oito zonas bioclimáticas, precisaria obrigatoriamente de sombreamento das aberturas para evitar aquecimento excessivo pela exposição ao sol. Atendido esse critério seriam obtidos resultados satisfatórios (nível B) para todas as zonas bioclimáticas exceto para a ZB7 que precisaria de outras medidas para melhorar sua capacidade de resfriamento.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.
- 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. Rio de Janeiro, 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, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**. Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**. Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5**. Edificações Habitacionais — Desempenho. Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2013.
- DORNELLES, K.A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2008.
- FROTA, A. B., SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo**. 5 ed. – São Paulo, Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. Confort, Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, Lausanne, v.18, p. 11-23, July 1992.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. **Diário Oficial da União**.

LAMBERTS, R.; DUARTE, V. C. P. **Desempenho Térmico de Edificações**. 7ª ed. Florianópolis: LabEEE 2016. Apostila.

LAMBERTS, R.; et al. **Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE; 2010.

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

LAMBERTS, R.; TRIANA, M. A.; FOSSATI, M. et al. **Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área**. Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/pesquisa/sustentabilidade>>. Acesso em 20 ago. 2016.

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

OLGYAY, V. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism**. 4ª ed., Princeton University Press. Princeton, EUA, 1973.

RORIZ, M; CHVATAL, K.; CAVALCANTI, F.S. **Sistemas construtivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto**. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 10, Natal, 2009. Anais eletrônicos. Natal: ENCAC,2009.

SORGATO, M.J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Dissertação (Mestrado – Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

GLOSSÁRIO

Absortância: Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. A absortância é utilizada apenas para elementos opacos, com ou sem revestimento externo de vidro (exclui-se a absortância das parcelas envidraçadas das aberturas).

Ambiente: Espaço interno de uma edificação, fechado por superfícies sólidas, tais como paredes ou divisórias piso-teto, teto, piso e dispositivos operáveis tais como janelas e portas.

Ambiente de permanência prolongada: Ambientes de ocupação contínua por um ou mais indivíduos, incluindo sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, escritório, sala de TV ou ambientes de usos similares aos citados. Não são considerados ambientes de permanência prolongada: cozinha, lavanderia ou área de serviço, banheiro, circulação, varanda aberta ou fechada com vidro, solarium, garagem, dentre outros que sejam de ocupação transitória.

Área Útil: Área disponível para ocupação, medida entre os limites internos das paredes que delimitam o ambiente, excluindo garagens.

Capacidade térmica [kJ/(m²K)]: Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.

Consumo relativo para aquecimento (kWh/m²): Consumo anual de energia (em kWh) por metro quadrado necessário para aquecimento do ambiente durante o período de 21 h às 8 h, todos os dias do ano, com manutenção da temperatura em 22°C.

Consumo relativo para refrigeração (kWh/m²): Consumo anual de energia (em kWh) por metro quadrado necessário para refrigeração do ambiente durante o período de 21 h às 8 h, todos os dias do ano, com manutenção da temperatura em 24°C.

Edificação Unifamiliar: Edificação que possui uma única unidade habitacional autônoma (UH) no lote.

Envoltória: Conjunto de planos que separam o ambiente interno do ambiente externo, tais como fachadas, empenas, cobertura, aberturas, assim como quaisquer elementos que os compõem. Não estão incluídos pisos, estejam eles ou não em contato com o solo.

Equivalente numérico da envoltória (EqNumEnv): Número representativo do desempenho térmico da envoltória da unidade habitacional autônoma. Pode ser desempenho para resfriamento ($\text{EqNumEnv}_{\text{Resfr}}$), para aquecimento (EqNumEnv_A) ou para ambientes condicionados artificialmente ($\text{EqNumEnv}_{\text{Refrig}}$).

Indicador de graus-hora para resfriamento (GH_R): Indicador de desempenho térmico da envoltória da edificação naturalmente ventilada, baseado no método dos graus-hora, que utiliza uma temperatura base, independente de temperaturas de conforto, consistindo em uma temperatura de referência para comparações. No RTQ, o indicador representa o somatório anual de graus-hora, calculado para a temperatura de base de 26°C para resfriamento. O cálculo é realizado através da temperatura operativa do ambiente.

Transmitância térmica (U) [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]: Transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo; neste caso, dos vidros e dos componentes opacos das paredes externas e coberturas, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes.

Unidade Habitacional Autônoma (UH): Bem imóvel destinado à moradia e dotado de acesso independente, sendo constituído por, no mínimo, banheiro, dormitório, cozinha e sala, podendo estes três últimos ser conjugados. Corresponde a uma unidade de uma edificação multifamiliar (apartamento) ou a uma edificação unifamiliar (casa).

Zona Bioclimática (ZB): Região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano de acordo com a NBR 15220-3.

APÊNDICE

Memorial de cálculo de transmitância térmica e capacidade térmica da envoltória da casa de steel frame

No primeiro item deste memorial são apresentados os cálculos da transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C_T) das paredes externas, paredes internas e cobertura da casa modular em steel frame original. No item dois estão os cálculos do U e C_T das paredes externas com proposta de melhorias a fim de atender ao pré-requisito RTQ-R, que exige $C_T \geq 130 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ para a zona bioclimática 1. Todos os cálculos foram feitos seguindo o método proposto pela NBR 15220-2, 2005: “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.”

Casa modular em steel frame original:

Paredes externas

Componentes da parede:

- Placa de gesso acartonado:

$$e_{\text{ges}} = 0,0125 \text{ m}; \rho_{\text{ges}} = 680 \text{ kg/m}^3; \lambda_{\text{ges}} = 0,25 \text{ W/m.K}; c_{\text{ges}} = 0,84 \text{ kJ/Kg.K}$$

- Feltro de lã de vidro aglomerado com resina sintética:

$$e_{\text{lã}} = 0,075 \text{ m}; \rho_{\text{lã}} = 12 \text{ kg/m}^3; \lambda_{\text{lã}} = 0,042 \text{ W/m.K}; c_{\text{lã}} = 0,70 \text{ kJ/Kg.K}$$

- Placa de tiras de madeira orientadas (OSB):

$$e_{\text{osb}} = 0,0111 \text{ m}; \rho_{\text{osb}} = 640 \text{ kg/m}^3; \lambda_{\text{osb}} = 0,14 \text{ W/m.K}; c_{\text{osb}} = 2,30 \text{ kJ/Kg.K}$$

- Placa de liga cimentícia:

$$e_{\text{cim}} = 0,012 \text{ m}; \rho_{\text{ges}} = 1100 \text{ kg/m}^3; \lambda_{\text{ges}} = 0,35 \text{ W/m.K}; c_{\text{ges}} = 1 \text{ kJ/Kg.K}$$

Resistência térmica (R_t):

$$R_t = \frac{e_{\text{ges}}}{\lambda_{\text{ges}}} + \frac{e_{\text{lã}}}{\lambda_{\text{lã}}} + \frac{e_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{ar}}} + \frac{e_{\text{osb}}}{\lambda_{\text{osb}}} + \frac{e_{\text{cim}}}{\lambda_{\text{cim}}} = \frac{0,0125}{0,25} + \frac{0,075}{0,042} + 0,14 + \frac{0,0111}{0,14} + \frac{0,012}{0,35} = 2,08 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Resistência térmica total (R_T):

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} = 0,13 + 2,08 + 0,04 = 2,25 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{2,25} = 0,44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica (C_T):

$$C_T = (e. c. \rho)_{\text{ges}} + (e. c. \rho)_{\text{lã}} + (e. c. \rho)_{\text{ar}} + (e. c. \rho)_{\text{osb}} + (e. c. \rho)_{\text{cim}}$$

$$C_T = (0,0125 \cdot 0,84 \cdot 680) + (0,075 \cdot 0,7 \cdot 12) + 0 + (0,0111 \cdot 2,3 \cdot 640) + (0,012 \cdot 1 \cdot 1100) = 37,31 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Paredes internas

Componentes da parede:

- Placa de gesso acartonado:

$$e_{\text{ges}} = 0,0125 \text{ m}; \rho_{\text{ges}} = 680 \text{ kg}/\text{m}^3; \lambda_{\text{ges}} = 0,25 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}; c_{\text{ges}} = 0,84 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$$

- Feltro de lã de vidro aglomerado com resina sintética:

$$e_{\text{lã}} = 0,075 \text{ m}; \rho_{\text{lã}} = 12 \text{ kg}/\text{m}^3; \lambda_{\text{lã}} = 0,042 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}; c_{\text{lã}} = 0,70 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$$

Resistência térmica (R_t):

$$R_t = 2 \cdot \frac{e_{\text{ges}}}{\lambda_{\text{ges}}} + \frac{e_{\text{lã}}}{\lambda_{\text{lã}}} + \frac{e_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{ar}}} = 2 \cdot \frac{0,0125}{0,25} + \frac{0,075}{0,042} + 0,14 = 2,02 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$$

Resistência térmica total (R_T):

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} = 0,13 + 2,02 + 0,04 = 2,19 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)}/\text{W}$$

Transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{2,19} = 0,46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica (C_T):

$$C_T = 2 \cdot (e. c. \rho)_{\text{ges}} + 2 \cdot (e. c. \rho)_{\text{lã}} + (e. c. \rho)_{\text{ar}}$$

$$C_T = 2 \cdot (0,0125 \cdot 0,84 \cdot 680) + (0,075 \cdot 0,7 \cdot 12) + 0 = 14,91 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Cobertura

Componentes da cobertura:

- Telha de aço termo acústica trapezoidal com preenchimento em poliuretano

$$e_{\text{tel}} = 0,043 \text{ m}; \lambda_{\text{tel}} = 0,018 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$$

$e_{aço} = 0,013 \text{ m}$; $\rho_{tel} = 7800 \text{ kg/m}^3$; $c_{aço} = 0,46 \text{ kJ/kg.K}$

$e_{pu} = 0,03 \text{ m}$; $\rho_{pu} = 35 \text{ kg/m}^3$; $c_{pu} = 1,67 \text{ kJ/kg.K}$

- Filtro de lã de vidro aglomerado com resina sintética

$e_{lã} = 0,05 \text{ m}$; $\rho_{lã} = 12 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{lã} = 0,042 \text{ W/m.K}$; $c_{lã} = 0,70 \text{ kJ/kg.K}$

- Placa de gesso acartonado

$e_{ges} = 0,0125 \text{ m}$; $\rho_{ges} = 680 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{ges} = 0,25 \text{ W/m.K}$; $c_{ges} = 0,84 \text{ kJ/kg.K}$

Resistência térmica (R_t):

$$R_t = \frac{e_{tel}}{\lambda_{tel}} + \frac{e_{ar}}{\lambda_{ar}} + \frac{e_{lã}}{\lambda_{lã}} + \frac{e_{ges}}{\lambda_{ges}} = \frac{0,043}{0,018} + 0,61 + \frac{0,05}{0,042} + \frac{0,0125}{0,25} = 4,24 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Resistência térmica total (R_T):

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,17 + 4,24 + 0,04 = 4,45 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{4,45} = 0,22 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Capacidade térmica (C_T):

$$C_T = (e \cdot c \cdot \rho)_{aço} + (e \cdot c \cdot \rho)_{pu} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{lã} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ges}$$

$$C_T = (0,013 \cdot 0,46 \cdot 7800) + (0,03 \cdot 1,67 \cdot 35) + 0 + (0,05 \cdot 0,70 \cdot 12) + (0,0125 \cdot 0,84 \cdot 680) = 55,95 \text{ kJ/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Casa modular em steel frame - proposta de melhoria:

Paredes externas

Componentes da parede:

- Placa de gesso acartonado:

$e_{ges} = 0,015 \text{ m}$; $\rho_{ges} = 766,67 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{ges} = 0,25 \text{ W/m.K}$; $c_{ges} = 0,84 \text{ kJ/kg.K}$

- Placa de tiras de madeira orientadas (OSB):

$e_{osb} = 0,0151 \text{ m}$; $\rho_{osb} = 646,5 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{osb} = 0,14 \text{ W/m.K}$; $c_{osb} = 2,30 \text{ kJ/kg.K}$

- Filtro de lã de rocha:

$e_{lã} = 0,075 \text{ m}$; $\rho_{lã} = 150 \text{ kg/m}^3$; $\lambda_{lã} = 0,045 \text{ W/m.K}$; $c_{lã} = 0,75 \text{ kJ/kg.K}$

- Placa cimento madeira:

$$e_{\text{cim}} = 0,022 \text{ m}; \rho_{\text{cim}} = 1350 \text{ kg/m}^3; \lambda_{\text{cim}} = 0,20 \text{ W/m.K}; c_{\text{cim}} = 2,30 \text{ kJ/kg.K}$$

Resistência térmica (R_t):

$$R_t = \frac{e_{\text{ges}}}{\lambda_{\text{ges}}} + 2 \cdot \frac{e_{\text{osb}}}{\lambda_{\text{osb}}} + \frac{e_{\text{lã}}}{\lambda_{\text{lã}}} + \frac{e_{\text{ar}}}{\lambda_{\text{ar}}} + \frac{e_{\text{cim}}}{\lambda_{\text{cim}}}$$

$$R_t = \frac{0,015}{0,25} + 2 \cdot \left(\frac{0,0151}{0,14} \right) + \frac{0,075}{0,045} + 0,14 + \left(\frac{0,022}{0,20} \right) = 2,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Resistência térmica total (R_T):

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} = 0,13 + 2,20 + 0,04 = 2,37 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

Transmitância térmica (U):

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{2,37} = 0,42 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Capacidade térmica (C_T):

$$C_T = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ges}} + 2 \cdot (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{osb}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{lã de rocha}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cim}}$$

$$C_T = 0,015 \cdot 0,84 \cdot 766,67 + 2 \cdot (0,0151 \cdot 2,30 \cdot 646,5) + 0,075 \cdot 0,75 \cdot 150 + 0 + (0,022 \cdot 2,30 \cdot 1350)$$

$$= 131,31 \frac{\text{kJ}}{\text{(m}^2 \cdot \text{K)}}$$

ANEXO



Figura 6: Elevações 1 e 3 e Corte AA da casa de steel frame. Fonte: Modulare Engenharia, 2013.

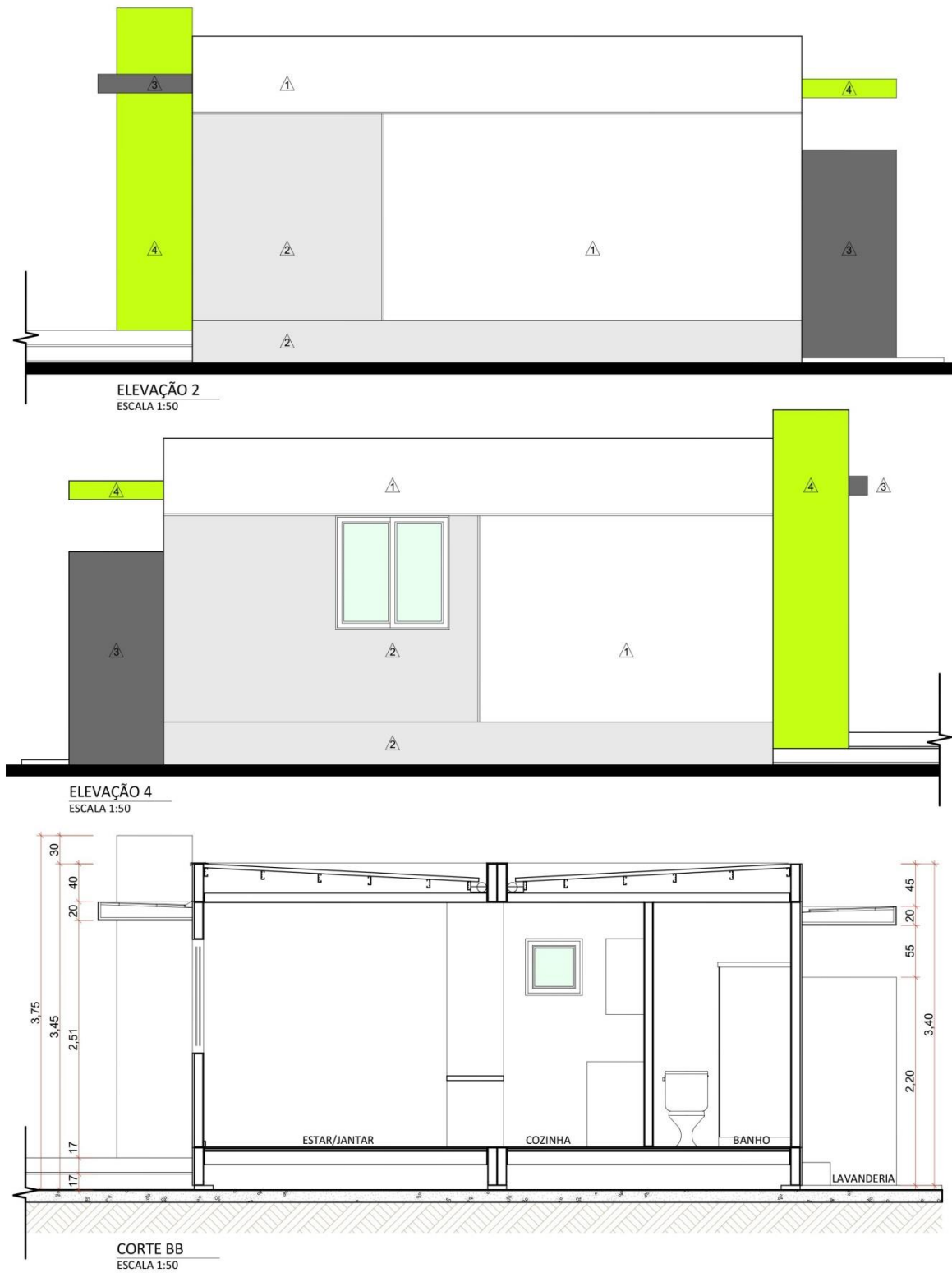


Figura 7: Elevações 2 e 4 e Corte BB da casa de steel frame. Fonte: Modulare Engenharia, 2013.