

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE CÁLCULO PARA AUXÍLIO NO PROCESSO
DE ESCOLHA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES QUANTO AO
DESEMPENHO TÉRMICO

IASMIN FERREIRA NERY

JUIZ DE FORA

2023

DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE CÁLCULO PARA AUXÍLIO NO PROCESSO
DE ESCOLHA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA EDIFICAÇÕES QUANTO AO
DESEMPENHO TÉRMICO.

IASMIN FERREIRA NERY

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz
de Fora, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Construção Civil

Orientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Coorientador(a): -

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2023

DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE CÁLCULO PARA AUXÍLIO NO PROCESSO
DE ESCOLHA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA ATENDIMENTO À NORMA
DE DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

IASMIN FERREIRA NERY

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução N° 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Por:

Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia / UFJF

Prof. Dra. Júlia Righi de Almeida (Examinadora)

Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia / UFJF

Prof. Dr. Antônio Eduardo Polisseni (Examinador)

Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia / UFJF

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus, pela minha vida, por sempre ter guiado meus passos e me permitido chegar até aqui com saúde.

Agradeço aos meus pais, Teresinha e Maximiliano, por estarem ao meu lado em todos os momentos, por confiarem em mim e sempre apoiarem minhas decisões. Obrigada por proporcionarem meios para que eu me mudasse de cidade e corresse atrás dos meus sonhos. Obrigada também por todas as conversas, chamadas de vídeo, abraços, aconchego, segurança e carinho.

Agradeço também à minha irmã, Natacha, que sempre se mostrou orgulhosa e feliz com minhas conquistas. Obrigada por ser sempre essa pessoa carinhosa, animada, empática e disposta a me apoiar em qualquer circunstância. Você sempre foi e será referência de determinação para mim.

Um grande agradecimento aos amigos que tive o privilégio de conhecer durante esses anos, em especial à turma de 2017.1 e aos membros do Programa de Educação tutorial e da Porte Empresa Jr. Obrigada por terem contribuído de alguma maneira para que o percurso fosse ainda mais engrandecedor.

Agradeço ao João, meu namorado, que tive o privilégio de conhecer no final da graduação. Obrigada por ser meu companheiro diário e não medir esforços para me ver feliz e realizada. Seu apoio e compreensão foram fundamentais para que eu completasse esse ciclo de forma tão especial.

Agradeço também ao meu orientador, Pedro Kopschitz, que me guiou com muito cuidado e paciência durante todo o processo, além de ter me ensinado muito sobre Engenharia e sobre a vida.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta até aqui, compartilho com todos essa vitória que não é apenas minha, mas nossa!

RESUMO

O setor da construção civil é um dos mais importantes da economia dos países e, ao mesmo tempo, um dos que mais causam impactos negativos ao meio ambiente. No Brasil, o subsetor de edificações é um dos que mais consome energia elétrica, quadro que contribui bastante para o agravamento de efeitos climáticos causados por emissões de gases do efeito estufa na atmosfera. Sendo assim, o mercado da construção civil tem buscado cada vez mais desenvolver técnicas e estratégias construtivas sustentáveis. O presente trabalho busca contribuir nesse sentido, com o desenvolvimento de uma planilha de cálculos que visa auxiliar engenheiros e arquitetos na escolha de materiais adequados para o atendimento de requisitos da norma ABNT NBR 15220 quanto ao desempenho térmico de edificações. A partir da planilha foram realizadas análises e simulações para diferentes tipos de telhados e paredes comuns do mercado, como alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto maciço e coberturas compostas por lajes maciças, pré-moldadas e nervuradas. Além disso, variou-se também os tipos de revestimentos externos e internos nas paredes, bem como suas espessuras. Para as coberturas, foram variados os tipos de telhados que as compõem. Os resultados de simulações apontam para o pleno funcionamento e agilidade da planilha na verificação de atendimento aos limites de transmitância térmica e capacidade térmica do envelope das edificações para as zonas bioclimáticas brasileiras.

Palavras-chave: Edificação. Conforto térmico. Envelope. Diretrizes construtivas. NBR 15220.

ABSTRACT

The construction business is one of the most important sectors in the economy of countries and, at the same time, one of the most harmful to the environment. In Brazil, building construction is one of the largest consumers of electricity, which contributes significantly to the worsening of climate effects caused by greenhouse gas emissions into the atmosphere. Therefore, the construction market has increasingly sought to develop sustainable construction techniques and strategies. The present work seeks to contribute to this pursuit, with the development of a spreadsheet that aims to assist engineers and architects in choosing suitable materials that meets the requirements of the ABNT NBR 15220 standard - regarding the thermal performance of buildings. Based on the worksheet, analyses and simulations were made for many different types of typical market roof and wall materials, such as masonry walls made of ceramic blocks and solid concrete and roof composed of solid, pre-molded, and ribbed slabs. Besides that, the types of external and internal coatings on the walls were also varied, as well as their thickness. For the roofs, the types of roofs that compose them varied as well. The simulation results point to the full functioning and agility of the spreadsheet in verifying compliance with the limits of thermal transmittance and thermal capacity of the building envelope for the Brazilian bioclimatic zones.

Keywords: Building. Thermal comfort. Envelope. Constructive guidelines. NBR 15220.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produção de energia no Brasil de 1970 até 2010.....	14
Figura 2 - Consumo energético por fonte nas residências.....	15
Figura 3 - Consumo elétrico residencial por uso final.....	18
Figura 4 - Cenário da demanda residencial de eletricidade dos condicionadores de ar do Brasil	18
Figura 5 - Laboratório Casa Sustentável no Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora	20
Figura 6 - Zoneamento Bioclimático brasileiro.....	27
Figura 7 - Exemplos de uso da ferramenta para escolha de paredes	30
Figura 8 - Exemplos de uso da ferramenta para escolha de coberturas.....	31
Figura 9 – Cobertura de índice 19, segundo Anexo II – Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada.	33
Figura 10 – Tipos 1, 2, 3 e 4 de paredes de blocos de concreto 9 x 19 x 39 cm	33
Figura 11 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos de concreto 9 x 19 x 39 cm.....	34
Figura 12 - Tipos 5, 6, 7 e 8 de blocos de concreto 14 x 19 x 39 cm.....	35
Figura 13 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos de concreto 14 x 19 x 39 cm.....	35
Figura 14 - Tipos 9, 10, 11 e 12 para Blocos de concreto 9 x 14 x 24 cm	37
Figura 15 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos de concreto 9 x 14 x 24 cm.....	37
Figura 16 - Tipos 14, 15, 16 e 17 para Blocos cerâmicos de 14 x 19 x 29 cm.....	39
Figura 17 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos cerâmicos de 14 x 19 x 29 cm	39
Figura 18 – Tipos 19 e 20 para Blocos cerâmicos e de concreto sem revestimento e com 10cm de espessura	41
Figura 19 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos cerâmicos e de concreto sem revestimento e com 10cm de espessura	41
Figura 20 - Parede de índice 14, segundo Anexo I – Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0 cm) e revestimentos com 2,5 cm de espessura de argamassa.....	42
Figura 21 - Tipos 1, 4, 9 e 30 de telhados compostos por lajes maciças com 10cm de espessura	43

Figura 22 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Lajes maciças com 10 cm de espessura	43
Figura 23 - Tipos 2, 5, 10 e 31 para lajes pré-moldadas com 12 cm de espessura.....	44
Figura 24 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Lajes pré-moldadas com 12 cm de espessura	45
Figura 25 - Tipos 23, 24 e 25 de lajes nervuradas de 22,5 cm	46
Figura 26 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Lajes nervuradas com 22,5 cm de altura.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de vedações externas para Zonas Bioclimáticas 1 a 8.	26
Tabela 2 – Transmitância térmica admissível para cada tipo de vedação externa.	27
Tabela 3 – Capacidade térmica de referência para paredes externas (CTpar) – $\text{KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$...	28
Tabela 4 – Soluções construtivas propostas para teste do funcionamento da planilha.	32

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEN	Balanco Energético Nacional
CO ₂	Dióxido de Carbono
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
DEE	Desempenho Energético Das Edificações

LISTA DE SÍMBOLOS

U	Transmitância térmica
ρ	Densidade de massa aparente
c	Calor específico
λ	Condutividade Térmica
Ct	Capacidade Térmica
U	Transmitância térmica
R	Resistência Térmica
cm	centímetros

SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Contextualização.....	13
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos.....	16
1.4	Estrutura do trabalho.....	16
2 -	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES.....	17
2.1	Procedimentos para análise do desempenho térmico.....	20
3 -	METODOLOGIA.....	22
3.1	Características que influenciam no desempenho térmico.....	22
3.2	Transmitância térmica.....	23
3.3	Capacidade térmica.....	24
3.4	Zonas bioclimáticas brasileiras.....	25
4 -	PLANILHA ELETRÔNICA DE ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS QUANTO AO CONFORTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES.....	29
5 -	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E RESULTADOS.....	32
5.1	Análise de paredes de bloco de concreto 9 x 19 x 39 cm.....	32
5.2	Análise de paredes de bloco de concreto 14x19x39cm.....	34
5.3	Análise de paredes de blocos cerâmicos 9 x 14 x 24 cm.....	36
5.4	Análise de Blocos cerâmicos 14 x 19 x 29 cm.....	38
5.5	Análise de paredes de blocos cerâmicos e de concreto maciço.....	40
5.6	Análise de coberturas com laje maciça de 10 cm.....	42
5.7	Análise de cobertura com laje pré-moldada de 12 cm.....	44
5.8	Análise de cobertura com laje nervurada de 22,5 cm de altura.....	45
6 -	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
	REFERÊNCIAS.....	47
	ANEXO I.....	49
	ANEXO II.....	55

1 - INTRODUÇÃO

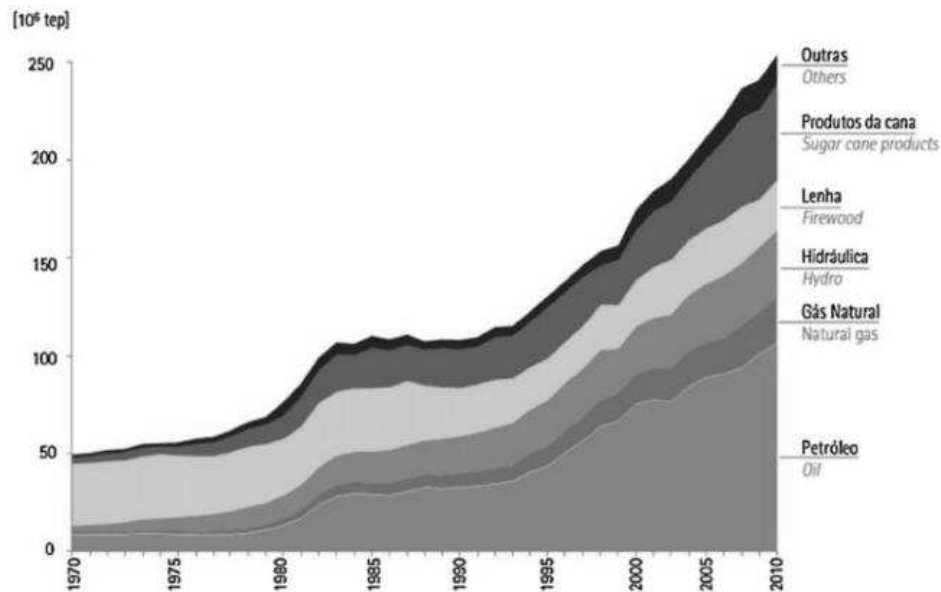
1.1 Contextualização

A preocupação com o conforto das habitações sempre fez parte do cotidiano do ser humano, por mais rústicas que sejam as moradias. Em escavações realizadas no sítio arqueológico de Jericó, a cidade mais antiga da humanidade, datada de 8300 a.C., foram encontradas casas feitas com tijolos de barro secos ao sol (adobe) revestidos por um emplastro de lama (MOQUIN, 1994). Essa técnica é favorável ao conforto térmico no interior da edificação, principalmente em dias muito quentes, proporcionando um ambiente mais fresco. Com o avanço da tecnologia, as soluções construtivas foram evoluindo bastante nesse aspecto.

Antes da larga utilização do concreto, os romanos utilizavam frequentemente o tipo de pedra denominada tufa calcária. Por ser uma rocha de origem vulcânica muito porosa e macia, era um ótimo isolante térmico e, uma vez que possui certa fragilidade, era utilizada na maioria das vezes no interior das edificações (MATEUS, 2002; STRICKLAND, 2010).

Hoje, pouco mais de 100 anos depois do descobrimento da energia elétrica, o cenário é outro. Sistemas de refrigeração e de aquecimento são utilizados para equilibrar a temperatura no interior dos ambientes. No entanto, vivemos uma era de mudanças climáticas e o uso da energia elétrica, dependendo da fonte geradora, pode gerar impactos ambientais significativos, como a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, além do descarte de baterias e equipamentos obsoletos ou com vida útil finalizada. Até mesmo as tecnologias sustentáveis não são em sua totalidade limpas, como por exemplo a utilização de placas fotovoltaicas para produção de energia elétrica através da luz solar. Após o fim de sua vida útil, painéis e usinas fotovoltaicas são descartadas no meio ambiente. Atualmente, no Brasil, 10,8% da energia gerada é consumida em residências e, além disso, a emissão de dióxido de carbono equivalente no ano de 2020 foi de 19,4 milhões de toneladas (BRASIL, 2021), o que significa um grande potencial de degradação do meio ambiente. Apesar de, segundo o Balanço Energético Nacional divulgado pelo Ministério de Minas e Energia em 2021 (BRASIL, 2021), o Brasil ter um ambiente limpo de matriz energética (48% renovável) em relação à média mundial (17% renovável), torna-se cada vez mais necessário um olhar crítico para as consequências ambientais das atividades humanas, particularmente aquelas do setor da construção civil, uma vez que o aumento de consumo de energia vem sendo originado cada vez mais de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis. Na Figura 1 observa-se que nas últimas décadas o petróleo vem cada vez mais se tornando a fonte mais consumida no Brasil.

Figura 1 - Produção de energia no Brasil de 1970 até 2010



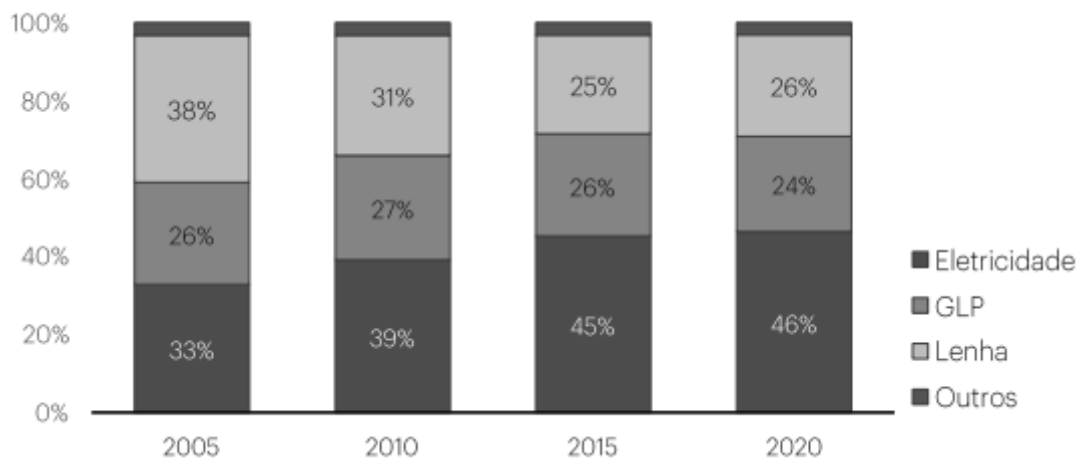
Fonte: Paulsen (2012)

1.2 Justificativa

O mercado da construção civil tem baixo grau de conscientização quanto à importância do desempenho térmico e ambiental das edificações (LOPES, 2007). Nesse sentido, alguns setores têm se movimentado na busca de soluções construtivas mais eficientes, incluindo muitas iniciativas acadêmicas. Ferramentas computacionais que agilizam cálculos de impactos ambientais de edificações já são bastante comuns em outros países, com simulações de desempenho a partir de características construtivas e propriedades térmicas dos materiais. O desenvolvimento de uma planilha para coberturas e paredes no contexto brasileiro insere-se nesse contexto. A planilha visa a análise ágil da combinação de possíveis soluções construtivas que atendam às diretrizes construtivas explicitadas na norma NBR 15575 (ABNT, 2021), para desenvolvimento de projetos mais sustentáveis.

Uma edificação que atenda ao desempenho térmico estabelecido para a região na qual se encontra é capaz de apresentar redução do consumo de energia, visto que o uso de aparelhos de refrigeração ou de aquecimento serão menos requeridos. Entre os anos de 2005 e 2020, o crescimento do consumo de energia elétrica nas residências do Brasil foi de 4,4% ao ano e, além disso, chegando a representar 46 % da energia consumida nos edifícios (BRASIL, 2021), conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Consumo energético por fonte nas residências.



Fonte: BRASIL (2021)

A variabilidade das propriedades físicas e de dimensões dos materiais utilizados no envelope de edificações interfere diretamente na capacidade de troca de calor entre os ambientes internos e o meio externo, representada pela transmitância térmica dos elementos constituintes dos elementos das fachadas e da cobertura. Dependendo do valor dessa propriedade, a edificação pode ou não se enquadrar nos parâmetros de conforto térmico definidos para a zona bioclimática em que está inserida (ABNT, 2022).

Na busca de promover edificações de baixo consumo energético e de alto grau de conforto térmico é preciso pensar nos materiais a serem empregados. Um material eficiente traz benefícios que vão além de economia de energia e conforto térmico, como a redução da emissão de carbono durante sua vida útil (WBCSD, 2021). Em virtude das constantes inovações na indústria da construção civil, envolvendo diferentes tipos de materiais, cada vez mais torna-se necessário um dinamismo no desenvolvimento de soluções construtivas que atendam às normas vigentes. Justamente por isso, o alinhamento de ideias entre arquitetos e engenheiros é cada vez mais importante, uma vez que uma edificação consegue ser energeticamente eficiente quando são feitas boas escolhas de materiais para a envoltória da edificação (SANTOS, 2015). A eficiência passa, também, por estratégias bioclimáticas como a disposição das aberturas para entrada de luz natural e circulação de ar, orientação solar, presença de vegetação no entorno, entre outras.

Diante do cenário exposto, a proposta do presente trabalho visa auxiliar arquitetos e engenheiros, de forma prática, na tomada de decisões para escolha de soluções construtivas, a fim de atender à norma de desempenho térmico de edificações.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver cálculos em uma planilha computacional que combina propriedades térmicas de soluções construtivas do envelope das edificações – paredes e telhados – para verificação de atendimento aos parâmetros de desempenho térmico estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para cada Zona Bioclimática existente no Brasil, na norma NBR 15220 (ABNT, 2022).

Como objetivo secundário, serão feitas simulações utilizando a planilha para tipos de telhados e paredes determinados previamente. Serão feitas análises comparando paredes de blocos cerâmicos e blocos de concreto maciço com dimensões variadas e com diferentes tipos de revestimentos externos e internos nas paredes. Para as coberturas, serão feitas análises comparando lajes maciças, pré-moldadas e nervuradas com variações nos tipos de cobertura.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro se inicia com uma contextualização do tema, trazendo um breve histórico sobre a busca do conforto térmico nas edificações e apresentando as principais preocupações que relacionam a construção civil e o meio ambiente. Em seguida, são apresentados os objetivos do trabalho e a justificativa, evidenciando a importância do estudo do tema. Por fim, ainda no primeiro capítulo, é mostrada a estrutura de abordagem dos assuntos.

O segundo capítulo explana diretrizes para atendimento às normas de desempenho térmico, abordando as principais definições e a importância de seu uso. Nesse capítulo são apresentados os principais pontos da NBR 15220 (ABNT, 2022).

O terceiro capítulo busca apresentar as características construtivas que influenciam no desempenho térmico de uma edificação e apresentar os limites máximos e mínimos de transmitância térmica e de capacidade térmica de telhados e paredes para cada uma das oito Zonas Bioclimáticas (ZB) existentes no Brasil.

No quarto capítulo é abordado o funcionamento da planilha eletrônica desenvolvida a fim de simular combinações de diferentes tipos de telhados e paredes para edificações inseridas nas ZBs. Por fim, o quinto capítulo apresenta simulações feitas por meio da planilha eletrônica e o sexto capítulo traz as considerações finais do trabalho.

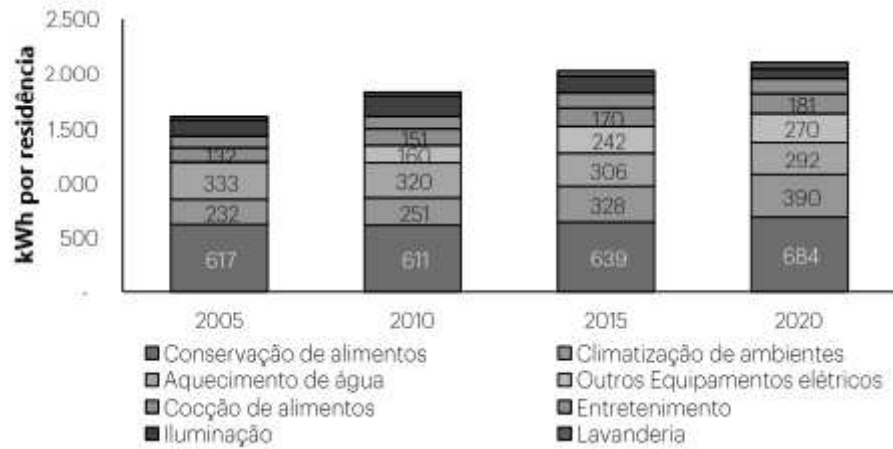
2 - DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

O desempenho térmico de edificações se relaciona diretamente com o conforto dos usuários e com o consumo de energia das construções. Uma edificação sofre influência térmica tanto dos materiais que constituem sua envoltória, como do meio externo e de ambientes contíguos. Portanto, fatores de diversas naturezas exercem influência na análise do desempenho térmico, como a geometria da construção, os dados climáticos da região, o posicionamento da edificação em relação ao sol e as propriedades térmicas dos materiais utilizados (SANTOS *et al.*, 2015).

O envelope de um edifício é composto pelas paredes externas e suas aberturas, e pela cobertura, sendo o principal meio de trocas de calor entre o ambiente interno e o externo das construções. Sendo assim, o envelope é um dos principais determinantes da temperatura interna dos cômodos e, portanto, uma combinação estratégica de materiais é de suma importância para se alcançar o conforto térmico desejado sem depender da utilização de fontes mecânicas. Vale ressaltar a importância dessa escolha ser realizada ainda na etapa de projeto da edificação, uma vez que mudanças em fases avançadas da obra podem gerar custos elevados devido à necessidade de adaptações tecnicamente complexas.

Uma maneira bastante utilizada para manter o controle da temperatura dos ambientes internos de uma edificação são equipamentos de refrigeração ou de aquecimento, em ambientes de finalidades diversas, tanto comerciais quanto residenciais. A Figura 3 mostra o consumo elétrico residencial de acordo com seu uso final.

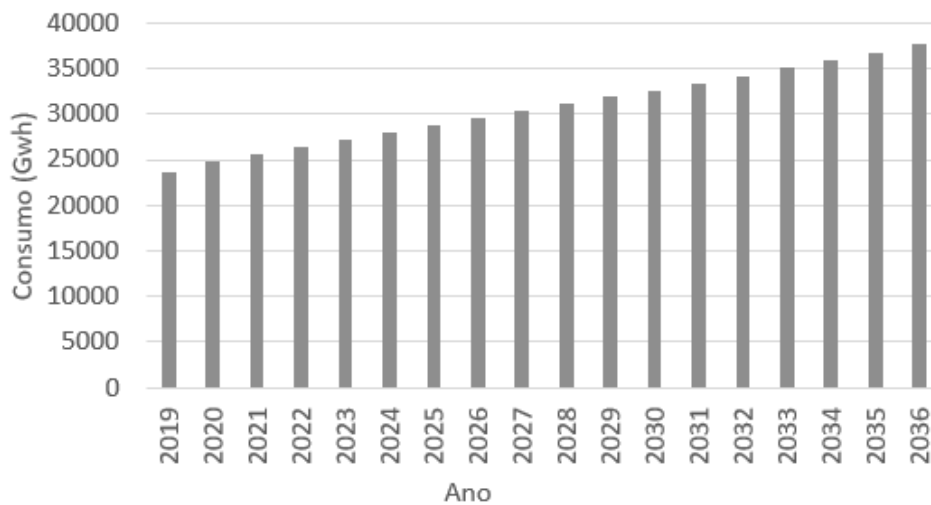
Figura 3 - Consumo elétrico residencial por uso final



Fonte: Adaptado de EPE (2021)

Pode-se observar que o consumo de eletricidade para a conservação de alimentos é o mais elevado, seguido pelo consumo para climatização de ambientes em anos mais recentes (2015 e 2020). Observa-se ainda que, entre os anos 2005 e 2020, houve um crescimento significativo para esse último tipo de consumo. Portanto, vê-se uma necessidade de mudança nesse cenário, que só tende a se acentuar, considerando o agravamento dos efeitos das mudanças climáticas no planeta. A Figura 4 mostra uma projeção de consumo de condicionadores de ar no Brasil até 2036.

Figura 4 - Cenário da demanda residencial de eletricidade dos condicionadores de ar do Brasil



Fonte: Adaptado de BRASIL (2021)

Sendo assim, conclui-se que a utilização de técnicas construtivas favoráveis ao conforto térmico nas edificações torna-se cada vez mais necessária, como estratégia para redução da necessidade do uso de energia com climatização de ambientes.

A vasta diversidade de materiais de construção gera uma infinidade de combinações que formam soluções construtivas. Além disso, com o avanço da tecnologia, mais novos elementos construtivos vêm sendo criados com o intuito de contribuir com a redução da emissão de CO₂ da cadeia construtiva de uma edificação.

Segundo Sousa (2002), a alvenaria é definida como um “conjunto de elementos naturais ou artificiais, interpostos com ou sem argamassa de assentamento”. Consideram-se como elementos naturais as pedras (regulares ou irregulares) e como elementos artificiais os blocos de concreto, blocos cerâmicos, blocos de vidro, entre outros. Além disso, as alvenarias podem ou não ter função estrutural, sendo assim caracterizadas como alvenarias de vedação ou estrutural.

A transferência de calor se dá de maneira diferente ao longo da espessura das paredes de alvenaria. Na região sólida, a transmissão de calor acontece por meio da condução, enquanto nos vazios e faces da parede, a transmissão ocorre por convecção e radiação (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2009). Percebe-se que cada configuração possui valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (Ct) diferentes, propriedades térmicas determinantes das trocas de calor, por dependerem da espessura dos blocos e do revestimento, além de propriedades dos materiais constituintes dessas camadas, como a condutividade térmica (λ).

Os 42 tipos de paredes apresentadas no Anexo I foram dispostos no catálogo do INMETRO (INMETRO, 2013), sendo formados por combinações de diferentes tipos e dimensões de blocos – cerâmicos e de concreto - e de paredes de concreto maciço, revestidas por diferentes camadas de espessuras variáveis.

As coberturas são estruturas definidas pelo formato característico, compondo características funcionais e o estilo arquitetônico das edificações. A principal função das coberturas se dá pela proteção dos edifícios contra a ação das intempéries (FERRAZ, 2012). Normalmente as coberturas são compostas por algum tipo de laje de concreto como por exemplo lajes maciças, pré-moldadas e nervuradas. Além disso, a composição torna-se mais completa e eficiente com a presença de telhamento, como cerâmica, fibrocimento ou vegetação. Segundo Mascaró (1992), a cobertura é a parte das edificações que está sujeita às maiores flutuações térmicas. Devido à exposição direta ao sol, as temperaturas superficiais atingem um

grau elevado no período diurno e se reduzem durante o período noturno, uma vez que o calor se dissipa rapidamente por radiação. Os 31 tipos de coberturas apresentadas no Anexo II são compostos por diversos tipos de lajes e telhados apresentados no catálogo do INMETRO (INMETRO, 2013).

Para se obter um bom desempenho térmico, a troca de calor menos intensa com outro ambiente é desejável. Sendo assim, é importante que o conjunto da parede e da cobertura possua uma boa resistência térmica e, conseqüentemente, uma baixa transmitância térmica. Um exemplo de edificação construída com intuito de mostrar características construtivas relacionadas ao desempenho térmico é o Laboratório Casa Sustentável, localiado no Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora (Figura 5).

Figura 5 - Laboratório Casa Sustentável no Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora



Fonte: <https://www.ufjf.br/ecos/projetos-vinculados/laboratorio-casa-sustentavel/>

2.1 Procedimentos para análise do desempenho térmico

Para a realização de avaliações de desempenho térmico de edificações, sejam elas já construídas ou a construir, existem dois tipos principais de procedimento. O primeiro consiste em uma metodologia de cálculo com base nas características dos materiais construtivos de paredes externas e cobertura. O segundo procedimento é realizado por meio de simulações computacionais que, além de considerarem as características dos materiais construtivos de

paredes externas e cobertura, fazem também uma análise mais detalhada da geometria da edificação e das características climáticas da região. Existem diversos programas para se realizar essas simulações. Um exemplo é o EnergyPlus¹, que analisa o consumo de energia de um edifício com aquecimento, resfriamento, iluminação e uso de água. No presente trabalho foi utilizado o primeiro procedimento, que utiliza a metodologia de cálculo com base nas características dos materiais.

¹ <https://energyplus.net/>

3 - METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho consiste na elaboração de uma planilha eletrônica que sintetiza informações referentes a propriedades térmicas de soluções construtivas do envelope das edificações – paredes e telhado. Os valores dessas propriedades foram compilados a partir do catálogo do INMETRO (INMETRO, 2013) e apresentadas nos anexos I e II deste trabalho. Esses dados serão utilizados como base para a verificação das soluções construtivas quanto ao atendimento dos parâmetros de desempenho térmico estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003) para cada Zona Bioclimática brasileira. De posse dos valores de Capacidade Térmica e Transmitância Térmica de diversos tipos de paredes e coberturas, foi possível identificar quais soluções atendem aos critérios da norma NBR 15220 (ABNT, 2003). Além disso, a planilha possui uma apresentação didática que possibilita ao usuário perceber facilmente se a sua solução construtiva atende os limites de forma completa ou parcial quanto a essas duas partes do envelope do edifício, ou seja, apenas para a cobertura ou apenas para o telhado. Sendo assim, a utilização torna-se mais eficiente, proporcionando identificar onde podem ser feitas melhorias de forma direcionada às melhores soluções quanto ao quesito conforto térmico.

3.1 Características que influenciam no desempenho térmico

O domínio acerca do comportamento térmico da envoltória possibilita aos projetistas a elaboração de propostas mais eficientes que se enquadrem dentro das variáveis climáticas e atendam as condições mínimas de desempenho da edificação (SANTOS, 2015). Neste contexto, a norma NBR 15575 (ABNT, 2022) estabelece parâmetros para a avaliação do desempenho térmico.

As propriedades termofísicas dos materiais mais relevantes incluem a transmitância térmica (U), o atraso térmico, a absorvância ou refletância à radiação solar, a emissividade das superfícies, a capacidade térmica (C_t), a condutividade térmica (λ), o calor específico e a densidade de massa aparente dos materiais. Todas elas influenciam diretamente na análise do desempenho térmico da envoltória de uma edificação. Sendo assim, uma combinação estratégica de materiais que atendam determinados limites é capaz de proporcionar conforto térmico adequado à utilização do ambiente.

Ainda na fase da concepção do projeto da edificação, é importante que o projetista se atente também para fatores externos aos materiais que serão utilizados, pois cada material reage de forma independente de acordo com o meio e com as condições climáticas do ambiente em

que está inserido. Fatores climáticos como a temperatura do ar, a umidade relativa, a velocidade do ar, a direção dos ventos e a radiação solar devem ser levados em conta. Além disso, informações como latitude, longitude, orientação em relação ao sol, uso e ocupação também devem ser consideradas.

A NBR 15220 (ABNT, 2022) estabelece equações para cálculos e estimativas de parâmetros térmicos dos sistemas construtivos. O presente trabalho visa analisar e enquadrar os parâmetros de Transmitância térmica (U) e de Capacidade térmica (C_t) de soluções construtivas nos limites determinados para climas diferentes do Brasil.

3.2 Transmitância térmica

Antes de definir o conceito de transmitância térmica, é importante definir resistência térmica de elementos e componentes: “Quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário.” (ABNT, 2003).

A resistência térmica Total é o “somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.” (ABNT, 2003).

A transmitância térmica é o inverso da Resistência térmica total, sendo, portanto, determinada pela equação 1.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

U é a transmitância térmica;

R_T é a resistência térmica total.

O cálculo da resistência térmica de materiais sólidos é feito em função da espessura da sua camada (e) e condutividade térmica (λ) e é determinado pela equação 2.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

R é a resistência térmica;

e é a espessura da camada;

λ é a condutividade térmica.

A resistência térmica de um material constituído de camadas homogêneas e não homogêneas pode ser determinada pela equação 3.

$$R_T = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{Ra} + \frac{Ab}{Rb} + \dots + \frac{An}{Rn}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Ra, Rb, \dots, Rn são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção (a, b, ..., n);

Aa, Ab, \dots, An são as áreas de cada seção.

A resistência térmica de ambiente a ambiente é determinada pela equação 4.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

R_T é a resistência térmica de superfície a superfície, determinada pela equação 3;

R_{se} e R_{si} são as resistências superficiais externa e interna.

3.3 Capacidade térmica

A capacidade térmica é definida como a “quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.” (ABNT, 2003), enquanto a capacidade térmica de componentes é definida como o “Quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área.” (ABNT, 2003).

Portanto, a capacidade térmica de componentes (C_t) pode ser determinada pela equação 5.

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

e_i é a espessura da camada;

c_i é o calor específico do material da camada;

ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada.

A capacidade térmica (C_T) de um material constituído de camadas homogêneas e não homogêneas pode ser determinada pela equação 6.

$$C_T = \frac{Aa + Ab + \dots + An}{\frac{Aa}{C_T a} + \frac{Ab}{C_T b} + \dots + \frac{An}{C_T n}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$C_T a, C_T b, \dots, C_T n$ são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela equação 5.

Aa, Ab, \dots, An são as áreas de cada seção.

3.4 Zonas bioclimáticas brasileiras

A fim de facilitar a avaliação do desempenho térmico e construtivo, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) estabeleceu parâmetros mensuráveis por meio do método simplificado para o sistema de vedação vertical e horizontal. Esse método leva em consideração características climáticas da região em que o edifício está inserido e o tipo de vedação, conforme mostra Tabela 1. A título de complemento de informação, a norma recomenda que ambientes de permanência prolongada, como salas e quartos, apresentem aberturas com dimensões específicas para proporcionar a ventilação adequada e o conforto térmico para o usuário.

Além disso, a NBR 15220 (ABNT, 2003) estabelece parâmetros que adequam o desempenho térmico das habitações ao seu uso específico e ao clima local. Para facilitar essa adequação, foram estabelecidas oito regiões, denominadas zonas bioclimáticas. O resultado é a

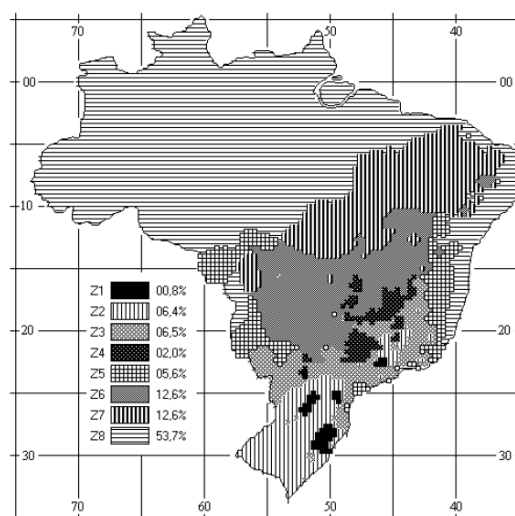
divisão territorial brasileira (Figura 6) de acordo com a posição geográfica e condições climáticas como, as médias de temperaturas mínimas e máximas, além da umidade relativa do ar.

Tabela 1 – Tipos de vedações externas para Zonas Bioclimáticas 1 a 8.

Zona	Vedação	Tipo
1	Parede	Leve
	Cobertura	Leve isolada
2	Parede	Leve
	Cobertura	Leve isolada
3	Parede	Leve refletora
	Cobertura	Leve isolada
4	Parede	Pesada
	Cobertura	Leve isolada
5	Parede	Leve refletora
	Cobertura	Leve isolada
6	Parede	Pesada
	Cobertura	Leve isolada
7	Parede	Pesada
	Cobertura	Pesada
8	Parede	Leve refletora
	Cobertura	Leve refletora

Fonte: Adaptado de ABNT (2022)

Figura 6 - Zoneamento Bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT (2003)

Para cada tipo de parede e cobertura especificados na Tabela 1 existe um valor correspondente ao limite máximo de transmitância térmica (U) especificado em norma conforme mostra Tabela 2.

Tabela 2 – Transmitância térmica admissível para cada tipo de vedação externa.

Vedações externas		Transmitância térmica – U ($W/m^2 \cdot K$)
Paredes	Leve isolada	$U \leq 3,00$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$
	Pesada	$U \leq 2,20$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$
	Leve refletora	$U \leq 2,30 \cdot FT$
	Pesada	$U \leq 2,00$

Fonte: Adaptado de ABNT (2003)

A NBR 15220 (ABNT, 2003) informa que para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, deve-se considerar $FT = 1$, onde FT corresponde ao fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona 8 (adimensional). Portanto, como não serão utilizados modelos com forro ou com áticos não ventilados na planilha, o valor de FT considerado será 1. Para paredes, a norma estabelece os limites de Capacidade térmica a serem seguidos conforme mostra Tabela 3.

Tabela 3 – Capacidade térmica de referência para paredes externas (CT_{par}) – $\text{KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Zonas bioclimáticas 1 a 7	Zonas bioclimática 8
$CT_{par} \geq 130$	Sem requisito

Fonte: Adaptado de ABNT (2003)

Para coberturas, a norma não estabelece limites de Capacidade térmica a serem seguidos. Portanto, as coberturas são avaliadas somente de acordo com os valores de transmitância térmica da combinação dos materiais que a compõem.

4 - PLANILHA ELETRÔNICA DE ANÁLISE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS QUANTO AO CONFORTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A planilha eletrônica de avaliação de soluções construtivas foi desenvolvida de modo a fornecer respostas ágeis no processo de escolhas de paredes e telhados para edificações, verificando o atendimento a prescrições de normas técnicas de desempenho térmico. A lógica de funcionamento da planilha foi construída usando-se a combinação da função condicional e da função de validação de dados. Os limites estabelecidos e inseridos nas funções são baseados na NBR 15220 e foram mostradas na Tabela 2 e na Tabela 3.

A primeira tarefa do usuário consiste no preenchimento da célula de fundo amarelo, como mostra a Figura 7, que oferece a escolha entre 42 tipos de paredes já disponibilizados de forma automática na planilha.

Figura 7 - Exemplos de uso da ferramenta para escolha de paredes

	Solução construtiva	U	Ct	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	14	1,85	161	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	2				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Selecionar um tipo de parede
 Selecionar o número (de 1 a 42) que corresponde ao tipo de parede desejado na aba "Parede".

	Solução construtiva	U	Ct	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	1	2,78	209	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Cobertura					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Selecionar um tipo de parede
 Selecionar o número (de 1 a 42) que corresponde ao tipo de parede desejado na aba "Parede".

Fonte: Autor (2022)

Da mesma forma, como mostra a Figura 8, o segundo campo (cor verde) a ser preenchido pelo projetista consiste na escolha entre 31 tipos de coberturas já disponibilizadas de forma automática na planilha.

Figura 8 - Exemplos de uso da ferramenta para escolha de coberturas

	Solução construtiva	U	Ct	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	1	2,78	209	✘	✘	✓	✘	✓	✘	✘	✓
Cobertura	25	1,31	238	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Selecionar um tipo de telhado
 Selecionar o número (de 1 a 31) que corresponde ao tipo de telhado desejado na aba "Telhado".

	Solução construtiva	U	Ct	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	1	2,78	209	✘	✘	✓	✘	✓	✘	✘	✓
Cobertura	25	1,31	238	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31

Selecionar um tipo de telhado
 Selecionar o número (de 1 a 31) que corresponde ao tipo de telhado desejado na aba "Telhado".

Fonte: Autor (2022)

Após terem sido escolhidos os tipos de parede e de cobertura, a ferramenta identifica os respectivos valores de transmitância térmica (U) e de capacidade térmica (Ct) das soluções e os compara com os limites indicados para cada uma das oito Zonas Bioclimáticas, já configurados na planilha. Sendo assim, quando a parede ou a cobertura atendem aos limites estabelecidos para a ZB desejada pelo projetista, aparece na coluna correspondente um sinal verde (✓). Quando a parede ou a cobertura não atendem aos limites estabelecidos para a ZB desejada pelo projetista, o símbolo que irá aparecer na coluna correspondente será um sinal vermelho (✘).

5 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E RESULTADOS

Com o propósito de fazer algumas análises de soluções construtivas quanto à adequação aos parâmetros normativos de desempenho térmico e, ao mesmo tempo, testar o as funcionalidades da planilha, foram propostas oito soluções construtivas mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Soluções construtivas propostas para teste do funcionamento da planilha.

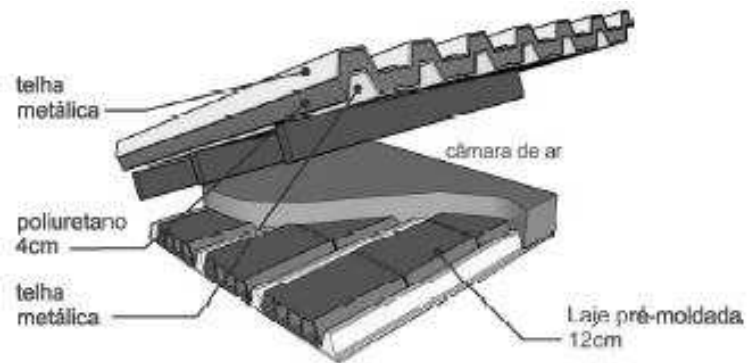
Solução construtiva	Características das paredes	Características da cobertura (telhado + laje)	Variável estudada
1	Blocos de concreto 9 x 19 x 39 (cm)	Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada	Tipo de revestimento das paredes
2	Blocos de concreto 14 x 19 x 39 (cm)	Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada	Tipo de revestimento das paredes
3	Blocos cerâmicos 9 x 14 x 24 (cm)	Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada	Tipo de revestimento das paredes
4	Blocos cerâmicos 14 x 19 x 29 (cm)	Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada	Tipo de revestimento das paredes
5	Blocos cerâmicos ou de concreto maciço sem revestimento	Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada	Tipo de bloco das paredes
6	Blocos cerâmicos 14 x 19 x 29 cm	Laje maciça de 10 cm	Tipos de telhados
7	Blocos cerâmicos 14 x 19 x 29 cm	Laje pré-moldada de 12 cm de altura	Tipos de telhados
8	Blocos cerâmicos 14 x 19 x 29 cm	Laje nervurada de 22,5 cm de altura	Tipos de telhados

Fonte: Autor (2022)

5.1 Análise de paredes de bloco de concreto 9 x 19 x 39 cm

Na primeira análise será padronizado o uso de apenas uma cobertura que atenda a todos os limites estabelecidos em norma para as oito ZBs brasileiras. A cobertura escolhida foi a de menor valor de transmitância térmica dentro das soluções construtivas fornecidas no Anexo II (índice 19) mostrada na Figura 9.

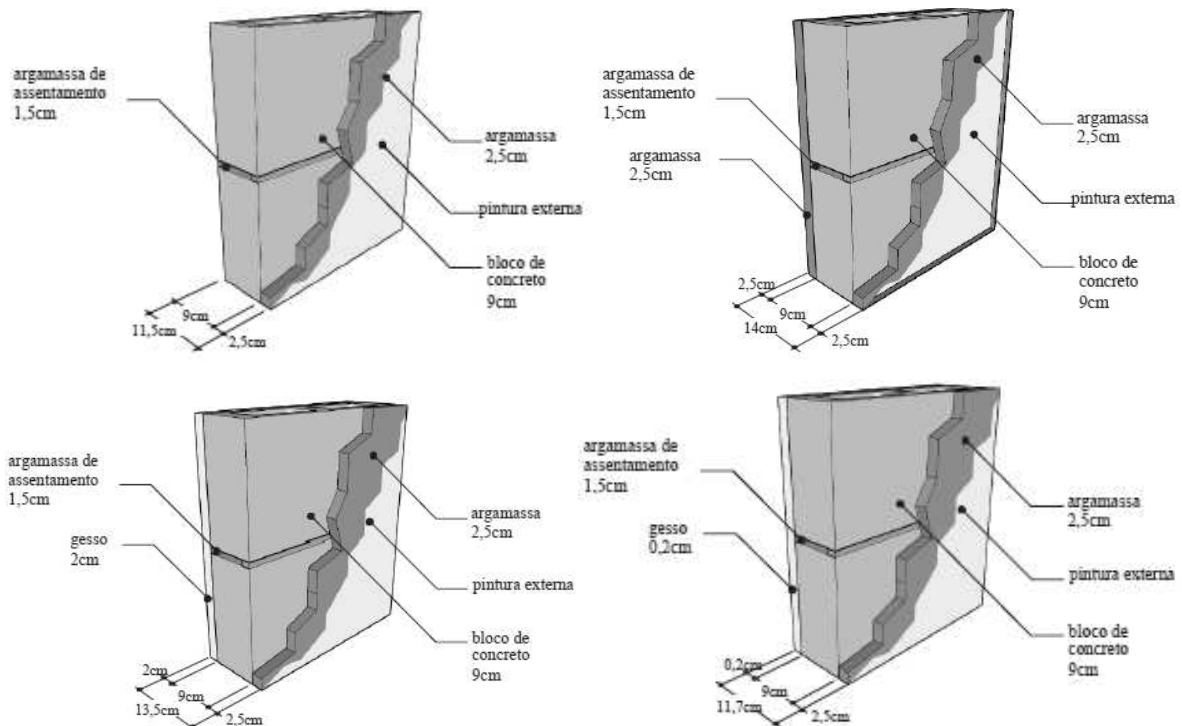
Figura 9 – Cobertura de índice 19, segundo Anexo II – Telha metálica com camada isolante e laje pré-moldada.



Fonte: INMETRO (2013)

Com o tipo de cobertura padronizado, foi feita a comparação entre quatro tipos de blocos de concreto com as mesmas dimensões (9 x 19 x 39 cm) e com a mesma espessura de argamassa de revestimento externa (2,5 cm), alterando somente o tipo e a espessura do revestimento interno. Todos os quatro tipos possuem pintura externa. A Figura 10 mostra as soluções de paredes analisadas e a Figura 11 reúne os resultados obtidos pela planilha de análise.

Figura 10 – Tipos 1, 2, 3 e 4 de paredes de blocos de concreto 9 x 19 x 39 cm



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 11 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos de concreto 9 x 19 x 39 cm

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m ² .K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m ² .K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	1	2,78	209	✘	✘	✔	✘	✔	✘	✘	✔
Parede	2	2,72	178	✘	✘	✔	✘	✔	✘	✘	✔
Parede	3	2,97	159	✘	✘	✔	✘	✔	✘	✘	✔
Parede	4	3	157	✘	✘	✔	✘	✔	✘	✘	✔
Cobertura	19	0,53	176	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que os quatro tipos de paredes atendem aos limites de Transmitância térmica e Capacidade térmica estabelecidos pela norma nas zonas bioclimáticas 3, 5 e 8. Nas zonas bioclimáticas 1, 2, 4, 6 e 7 não seria possível utilizar esses tipos de solução construtiva nas paredes externas das edificações, bastante comuns no mercado. Pelos resultados da análise conclui-se que a escolha do tipo de revestimento de paredes pode ser determinante para o atendimento à norma.

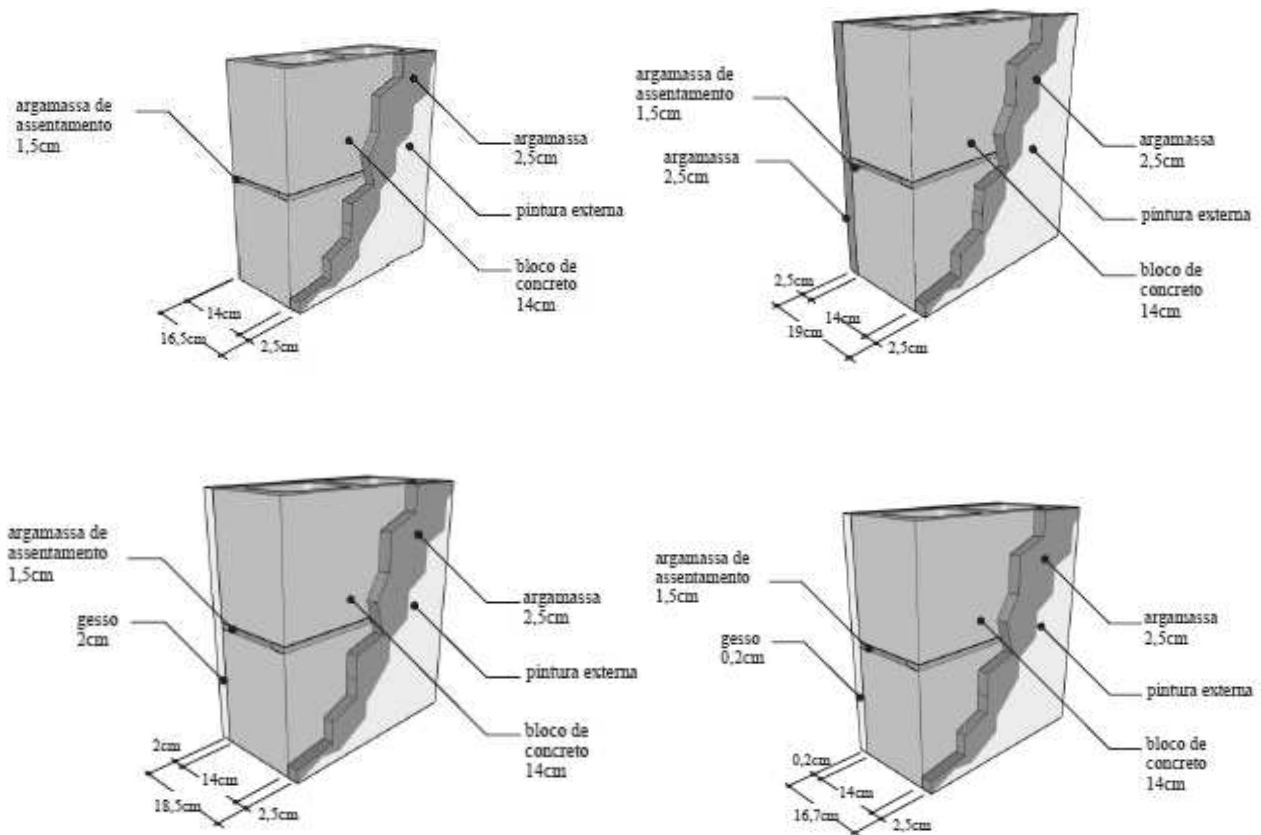
5.2 Análise de paredes de bloco de concreto 14x19x39cm

A segunda análise é semelhante à anterior, alterando-se a espessura do bloco de concreto das paredes para 14 cm. Também foi padronizado o uso da cobertura de índice 19, apresentada na Figura 9, que atende a todos os limites estabelecidos em norma para as oito ZB existentes no Brasil.

Com o tipo de cobertura padronizado, foi feita a comparação entre quatro tipos de blocos de concreto com as mesmas dimensões (14 x 19 x 39 cm) e com a mesma espessura de argamassa de revestimento externa (2,5 cm), alterando somente o tipo e a espessura do revestimento interno. Todos os quatro tipos possuem pintura externa.

A Figura 12 mostra as soluções de paredes analisadas e a Figura 13 reúne os resultados obtidos pela planilha de análise.

Figura 12 - Tipos 5, 6, 7 e 8 de blocos de concreto 14 x 19 x 39 cm



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 13 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos de concreto 14 x 19 x 39 cm

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m².K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m².K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	5	2,69	272	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Parede	6	2,64	241	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Parede	7	2,86	222	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Parede	8	2,87	221	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Cobertura	19	0,53	176	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que as paredes 5 e 6 que utilizam, respectivamente, argamassa interna de 2,5 cm e gesso interno de 2 cm, atendem aos limites de Transmitância térmica e Capacidade térmica estabelecidos pela norma nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3, 5 e 8. Nas zonas bioclimáticas 4, 6 e 7 não seria possível utilizar esses tipos de soluções construtivas. As paredes de número 7 e 8, que utilizam, respectivamente, gesso interno de 0,2 cm e nenhum revestimento interno, atendem somente as Zonas 3, 5 e 8.

Portanto, conclui-se que para blocos de dimensões 14 x 19 x 39 cm, uma camada mais espessa de revestimento interno, seja de gesso ou argamassa, contribui para o atendimento de mais Zonas bioclimáticas.

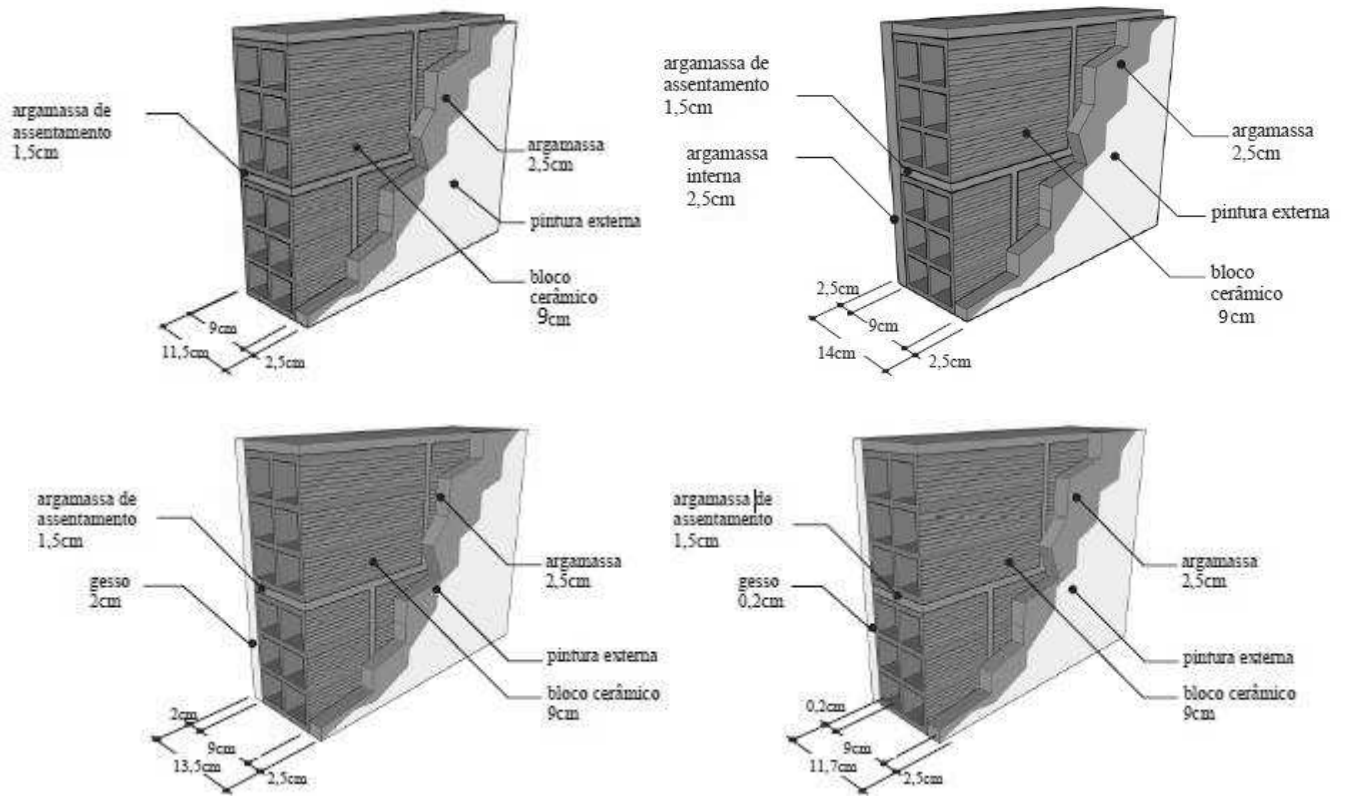
5.3 Análise de paredes de blocos cerâmicos 9 x 14 x 24 cm

Na terceira análise também será padronizado o uso da cobertura de índice 19, apresentada na Figura 9, que atende a todos os limites estabelecidos em norma para as oito Zonas Bioclimáticas existentes no Brasil.

Com o tipo de cobertura padronizado, será feita a comparação entre quatro tipos de blocos cerâmicos com as mesmas dimensões (9 x 14 x 24 cm) e com a mesma espessura de argamassa de revestimento externa (2,5 cm), alterando somente o tipo e a espessura do revestimento interno. Todos os quatro tipos possuem pintura externa.

A Figura 14 mostra as soluções de paredes analisadas e a Figura 15 reúne os resultados obtidos pela planilha de análise.

Figura 14 - Tipos 9, 10, 11 e 12 para Blocos de concreto 9 x 14 x 24 cm



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 15 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos de concreto 9 x 14 x 24 cm

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m².K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m².K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	9	2,46	150	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Parede	10	2,37	120	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Parede	11	2,59	100	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Parede	12	2,61	98	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Cobertura	19	0,53	176	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que a parede 9, com argamassa interna e externa, ambas de 2,5 cm, atende aos limites de transmitância térmica e capacidade térmica estabelecidos pela norma nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3, 5 e 8. Nas zonas bioclimáticas 4, 6 e 7 não seria possível utilizar esse tipo de solução construtiva. As paredes de número 10, 11 e 12 atendem somente a Zona Bioclimática 8.

Portanto, conclui-se que para blocos de dimensões 9 x 14 x 24 cm, uma camada de revestimento interno de argamassa, com 2,5 cm de espessura, contribui para o atendimento de mais Zonas bioclimáticas.

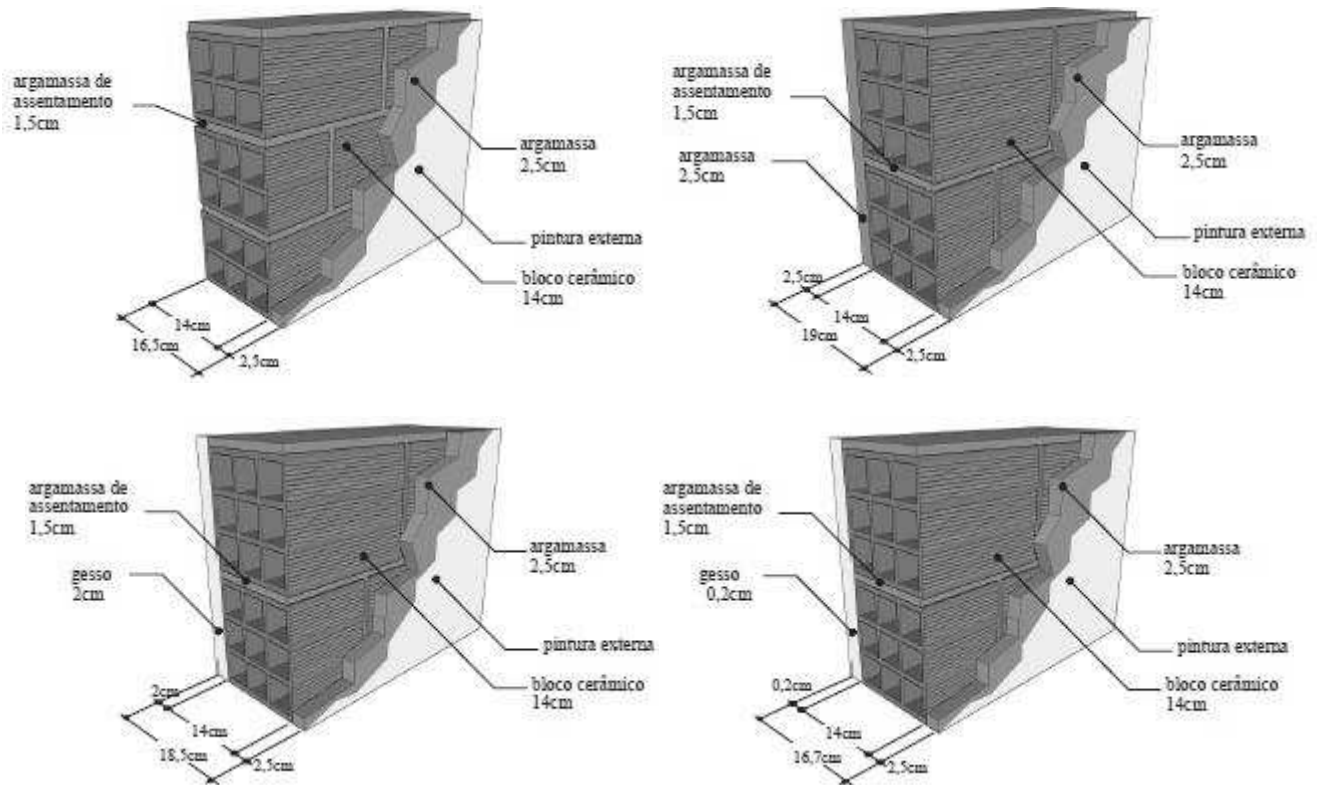
5.4 Análise de Blocos cerâmicos 14 x 19 x 29 cm

Na quarta análise também será padronizado o uso da cobertura de índice 19, apresentada na Figura 9, que atende a todos os limites estabelecidos em norma para as oito Zonas Bioclimáticas existentes no Brasil.

Com o tipo de cobertura padronizado, será feita a comparação entre quatro tipos de blocos cerâmicos com as mesmas dimensões (14 x 19 x 29 cm) e com a mesma espessura de argamassa de revestimento externa (2,5 cm), alterando somente o tipo e a espessura do revestimento interno. Todos os quatro tipos possuem pintura externa.

A Figura 16 mostra as soluções de paredes analisadas e a Figura 17 reúne os resultados obtidos pela planilha de análise.

Figura 16 - Tipos 14, 15, 16 e 17 para Blocos cerâmicos de 14 x 19 x 29 cm



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 17 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos cerâmicos de 14 x 19 x 29 cm

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m ² .K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m ² .K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	14	1,85	161	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Parede	15	1,74	125	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Parede	16	1,85	105	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Parede	17	1,96	106	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Cobertura	19	0,53	176	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que a parede 14, que utiliza argamassa interna de 2,5 cm, atende aos limites de transmitância térmica e capacidade térmica estabelecidos pela norma para todas as oito zonas bioclimáticas. As paredes de número 15 e 16 utilizam, respectivamente, gesso interno com placa de 2 cm e uma camada de 0,2 cm de gesso interno, enquanto a parede de número 17 não possui revestimento interno. Os três últimos tipos citados atendem somente à Zona Bioclimática 8.

Portanto, conclui-se que para blocos de dimensões 14 x 19 x 29 cm, uma camada de revestimento interno de argamassa, com 2,5 cm de espessura, contribui de maneira importante para o atendimento aos requisitos de mais Zonas bioclimáticas.

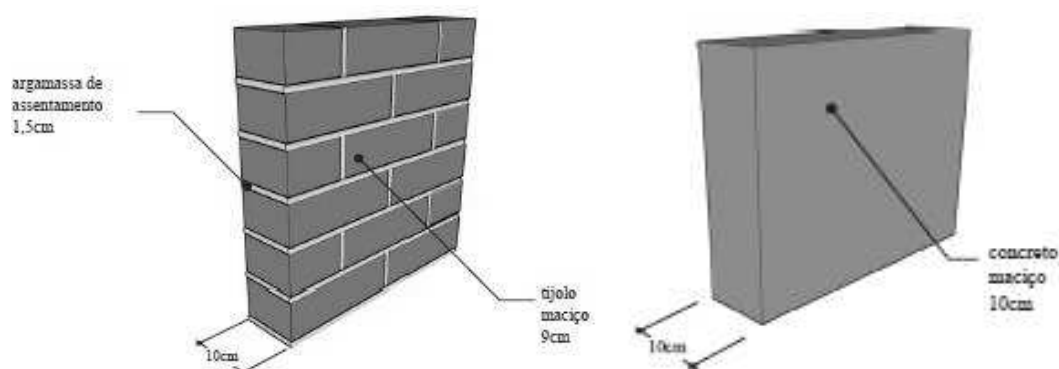
5.5 Análise de paredes de blocos cerâmicos e de concreto maciço

Na quinta análise também será padronizado o uso da cobertura de índice 19, apresentada na Figura 9, que atende a todos os limites estabelecidos em norma para as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Com o tipo de cobertura padronizado, será feita a comparação entre dois tipos de paredes, uma constituída por blocos cerâmicos e, a outra, por de concreto maciço, ambas com a espessura de 10 cm. Os dois tipos serão considerados sem qualquer revestimento interno ou externo e sem pintura externa.

A Figura 18 mostra as soluções de paredes analisadas e a Figura 19 reúne os resultados obtidos pela planilha de análise.

Figura 18 – Tipos 19 e 20 para Blocos cerâmicos e de concreto sem revestimento e com 10cm de espessura



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 19 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Blocos cerâmicos e de concreto sem revestimento e com 10cm de espessura

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - $W/(m^2.K)$	Capacidade térmica (Ct) - $KJ/(m^2.K)$	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	19	3,65	158	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Parede	20	4,4	240	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Cobertura	19	0,53	176	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

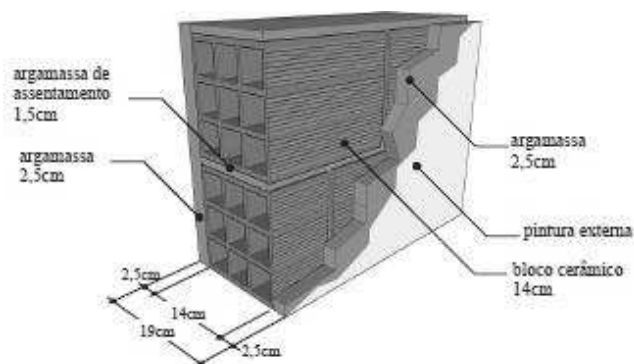
Observa-se que nenhum dos dois tipos de paredes atendem aos limites de transmitância térmica e de capacidade térmica estabelecidos pela norma para nenhuma das oito zonas bioclimáticas.

Portanto, conclui-se que paredes compostas somente por blocos cerâmicos maciços sem qualquer tipo de revestimento, ou por concreto maciço de espessura 10 cm, não atendem à norma de desempenho térmico para nenhuma ZB brasileira. Sendo assim, seu uso não é recomendado como solução construtiva adequada de edificações em termos de conforto térmico.

5.6 Análise de coberturas com laje maciça de 10 cm

Na sexta análise será padronizado o uso de apenas uma parede que atenda a todos os limites estabelecidos em norma para as oito Zonas Bioclimáticas existentes no Brasil. A parede escolhida foi a de índice 14, mostrada na Figura 20.

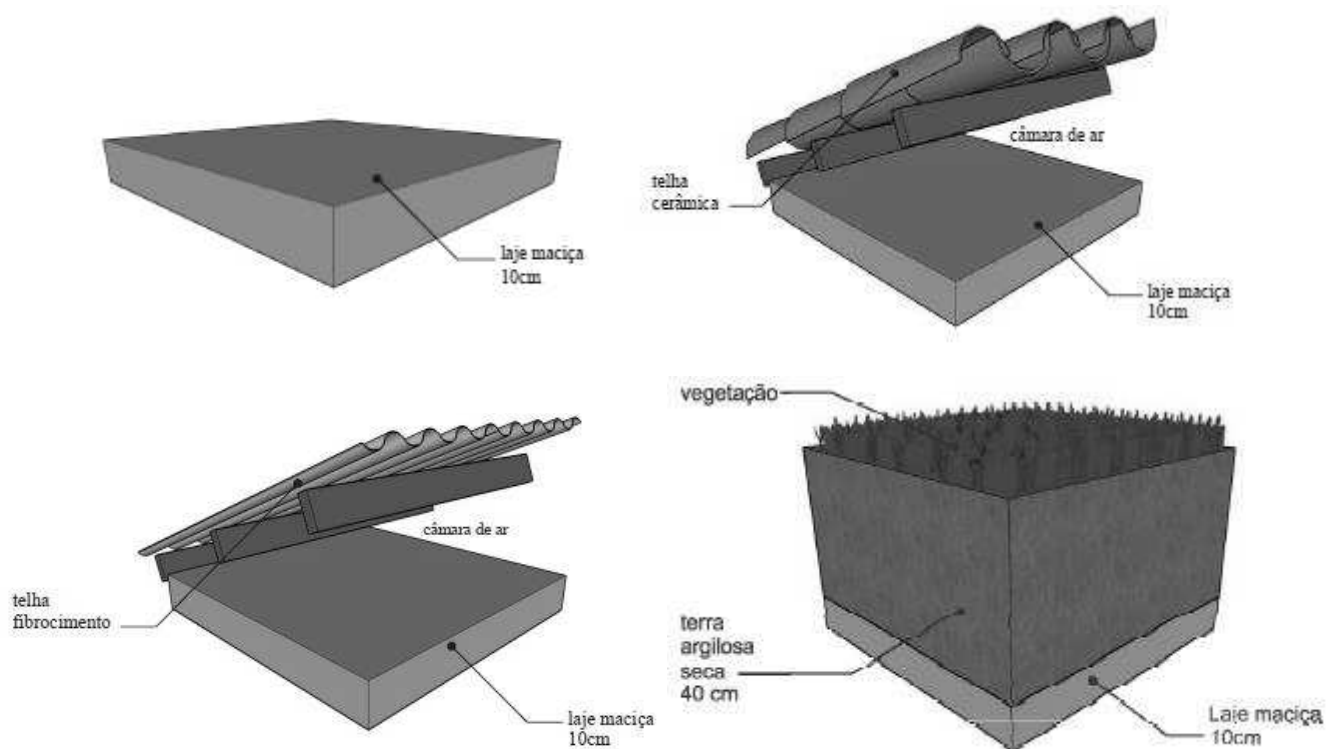
Figura 20 - Parede de índice 14, segundo Anexo I – Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0 cm) e revestimentos com 2,5 cm de espessura de argamassa



Fonte: INMETRO (2013)

Com o tipo de parede padronizado, será feita a comparação entre quatro tipos de coberturas compostas por lajes maciças de 10 cm de espessura, conforme mostra Figura 21. Os resultados da análise podem ser observados na Figura 22.

Figura 21 - Tipos 1, 4, 9 e 30 de telhados compostos por lajes maciças com 10cm de espessura



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 22 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Lajes maciças com 10 cm de espessura

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m ² .K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m ² .K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	14	1,85	161	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	1	3,73	220	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Cobertura	4	2,05	238	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Cobertura	9	2,06	233	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Cobertura	30	0,96	791	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que a cobertura 1, composta somente pela laje maciça, não atende aos limites de transmitância térmica e de capacidade térmica estabelecidos pela norma para nenhuma das oito zonas bioclimáticas. As coberturas de número 4 e 9, que utilizam, respectivamente, telhamento de cerâmica e de fibrocimento, além da câmara de ar, atendem apenas aos limites estabelecidos para a zona bioclimática 8. Por último, a cobertura de número 30, composta por telhado verde, atende a todas as oito ZB.

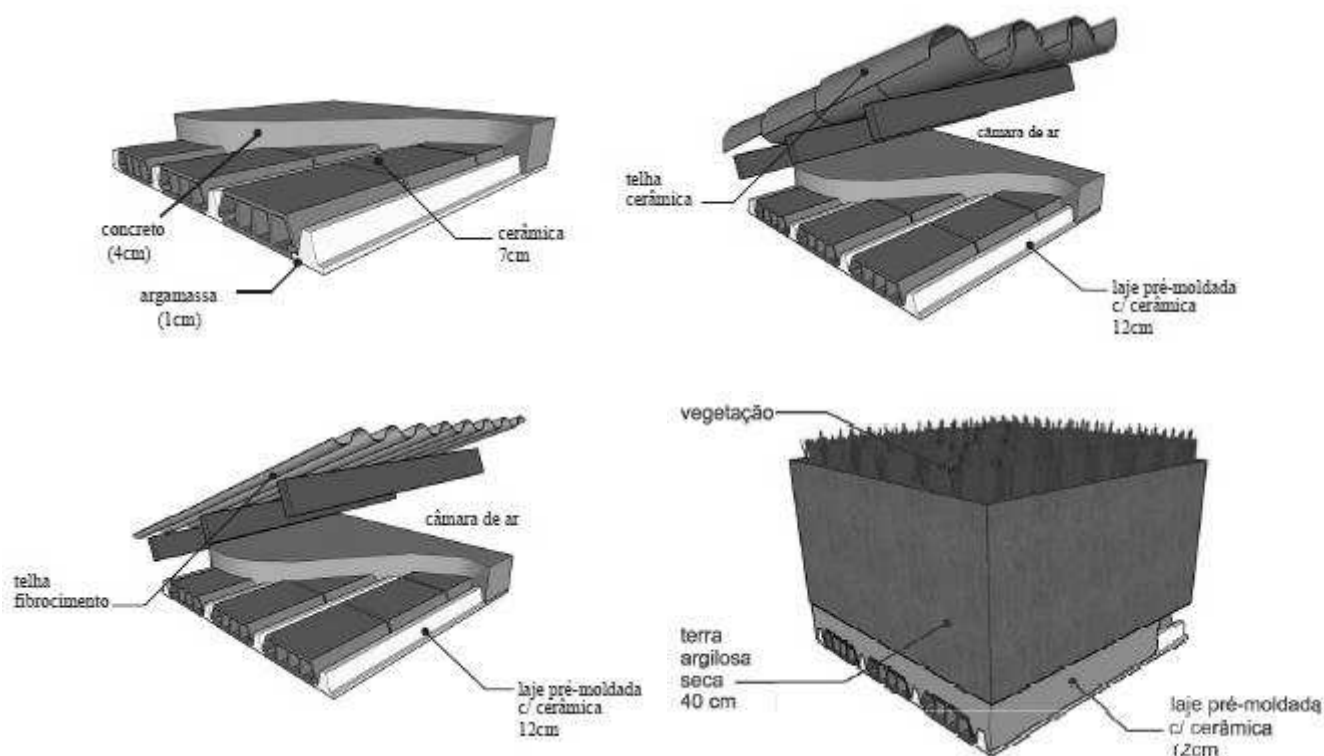
Portanto, conclui-se que para coberturas compostas por lajes maciças de 10 cm de espessura, é necessário um estudo mais minucioso em relação ao tipo de telhamento utilizado por cima da laje.

5.7 Análise de cobertura com laje pré-moldada de 12 cm

Na sétima análise também será padronizado o uso da parede de índice 14, apresentada na Figura 20, que atende a todos os limites estabelecidos em norma para as oito ZB brasileiras.

Com o tipo de parede padronizado, será feita a comparação entre quatro tipos de coberturas compostas por lajes pré-moldadas de 12 cm de espessura, conforme mostra Figura 23. Os resultados da análise podem ser observados na Figura 24.

Figura 23 - Tipos 2, 5, 10 e 31 para lajes pré-moldadas com 12 cm de espessura



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 24 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Lajes pré-moldadas com 12 cm de espessura

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m ² .K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m ² .K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	14	1,85	161	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	2	2,95	1,67	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Cobertura	5	1,79	185	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	10	1,79	1,8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	31	0,9	738	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que a cobertura 2, composta somente pela laje pré-moldada sem telhamento, não atende aos limites de transmitância e de capacidade térmica estabelecidos pela norma para nenhuma das oito zonas bioclimáticas. As coberturas de número 5, 10 e 31, que utilizam, respectivamente, telhamento de cerâmica e câmara de ar, telhamento de fibrocimento e câmara de ar, e telhamento de vegetação, atendem aos limites de Transmitância térmica estabelecidos para todas as oito Zonas Bioclimáticas.

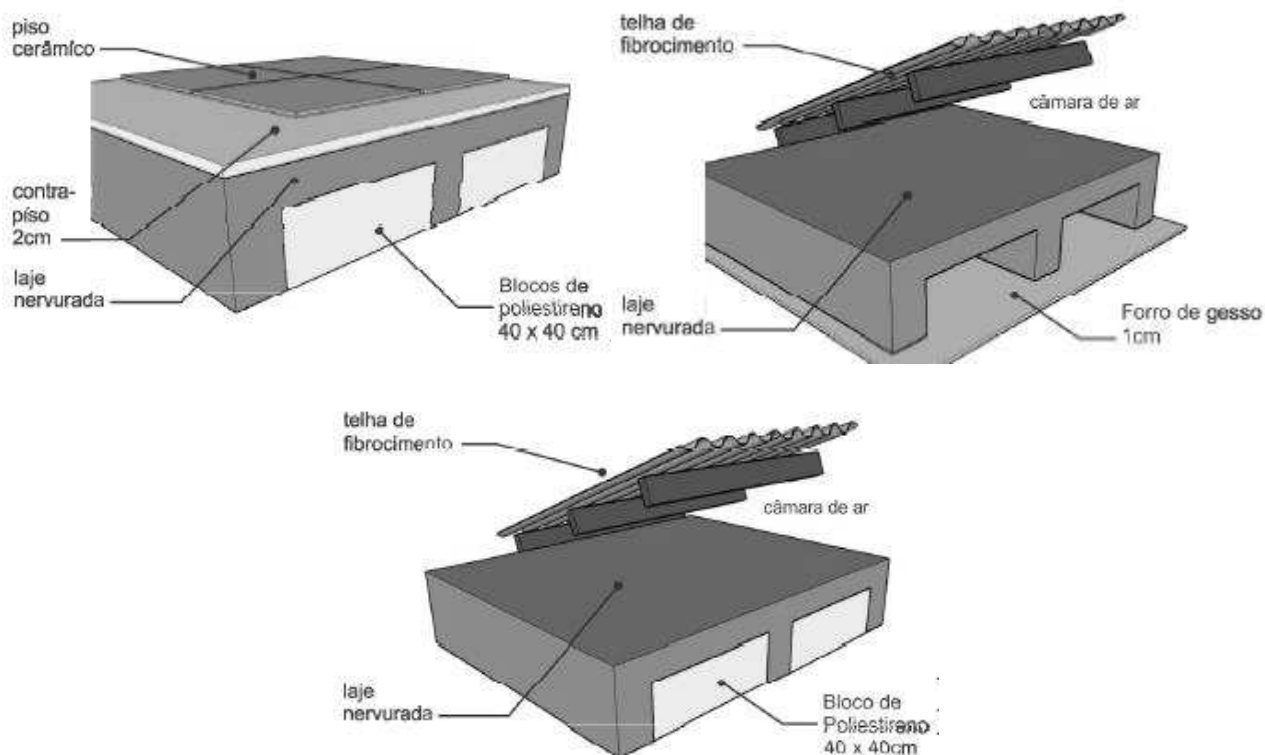
Portanto, conclui-se que para coberturas compostas por lajes pré-moldadas de 12cm de espessura, é necessário algum tipo de telhamento, seja ele de cerâmica, fibrocimento ou vegetação a fim de atender aos parâmetros de norma para uma das zonas blioclimáticas onde se encontra a edificação a ser analisada pelo projetista.

5.8 Análise de cobertura com laje nervurada de 22,5 cm de altura

Na oitava e última análise deste trabalho, também será padronizado o uso da parede de índice 14, apresentada na Figura 20, que atende a todos os limites estabelecidos em norma para as oito ZB brasileiras.

Com o tipo de parede padronizado, será feita a comparação entre três tipos de coberturas compostas por lajes nervuradas de 22,5 cm de espessura, conforme mostra Figura 25. Os resultados da análise podem ser observados na Figura 26.

Figura 25 - Tipos 23, 24 e 25 de lajes nervuradas de 22,5 cm



Fonte: INMETRO (2013)

Figura 26 - Tabela de verificação de atendimento de soluções construtivas aos limites ZB brasileiras - Lajes nervuradas com 22,5 cm de altura

	Solução construtiva	Transmitância térmica (U) - W/(m ² .K)	Capacidade térmica (Ct) - KJ/(m ² .K)	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
Parede	14	1,85	161	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	23	1,75	279	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	24	1,55	237	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cobertura	25	1,31	238	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2022)

Observa-se que os três tipos de cobertura analisados atendem aos limites de de transmitância e de capacidade térmica estabelecidos pela norma para todas as oito zonas bioclimáticas.

Portanto, conclui-se que para coberturas compostas por lajes nervuradas, o tipo de telhamento não tem interferência tão significativa quanto em lajes maciças ou pré-moldadas. Sendo assim, o fato de a cobertura ser composta por laje nervurada já é um aspecto favorável do ponto de vista de comportamento térmico.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma planilha computacional que combina as propriedades térmicas de soluções construtivas do envelope das edificações – paredes e telhados – para verificação quanto ao atendimento dos parâmetros de desempenho térmico de normas técnicas em vigor. Além disso, o segundo objetivo foi a realização de análises e simulações para tipos de telhados e paredes determinados previamente. Limitou-se essas análises à alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto maciço e a coberturas compostas por lajes maciças, pré-moldadas e nervuradas. Além disso, variou-se os tipos de revestimentos externos e internos nas paredes, bem como suas espessuras. Para as coberturas, foram variados os tipos de telhas, em combinação com lajes. Todas as simulações foram realizadas na planilha desenvolvida para todas as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

Os exemplos de aplicação da planilha dão uma mostra das inúmeras possibilidades de combinações de soluções construtivas de paredes e coberturas, no sentido de se fazer escolhas adequadas quanto ao comportamento térmico do envelope de edificações. Com a planilha proposta, projetistas têm à disposição uma ferramenta ágil para especificações dessas partes das obras, uma vez que várias delas podem ser equivalentes em termos de custo, mas não necessariamente as melhores para o quesito conforto térmico. Assim agrega-se esse importante aspecto às edificações, fundamental não só para o conforto dos usuários, como para a redução do consumo de energia com aparelhos de ar condicionado durante a vida dos edifícios. A longo prazo, essa contribuição pode se tornar bastante significativa para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, em termos de redução de emissão de gases do efeito estufa relacionados ao consumo de energia.

Para trabalhos futuros na mesma temática, sugere-se a inclusão de mais funcionalidades na planilha, como o cálculo do CO₂ embutido nos materiais componentes das soluções construtivas, no sentido de se avaliar, conjuntamente, mais de um quesito envolvido nas especificações de projeto. Outro exemplo de nova funcionalidade é o cálculo do custo do metro quadrado de construção de cada solução.

Finalmente, com o espírito de compartilhar a planilha desenvolvida com estudantes e profissionais do setor de construção civil, informa-se o seu endereço de acesso:

[Planilha de verificação de soluções construtivas quanto ao desempenho térmico.](#)

REFERÊNCIAS

- AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. **Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia**. Applied Thermal Engineering, v. 29, p. 1123–1130, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações – parte 1**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações – parte 2**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional**, 2021. Rio de Janeiro: EPE 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>> Acesso em 12/11/2022
- FERRAZ, Iara Lima. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. S. Manual do conforto térmico. São Paulo: Studio Nobel, 2003. 248 p.
- INMETRO. **ANEXO DA PORTARIA INMETRO Nº 50**. Rio de Janeiro, 2013. 28 p.
- LOPES, D. A. R. **Avaliação do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Leves (CVLs) Aplicadas aos Climas Tropicais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2007.
- MASCARÓ, J. L.; MASCARO, L. E. R.; STORCHI, C.; CAMARGO, E. G.; MACIEL, Â.; GUTERRES, H. E.; BRENTANO, A. K.; FRANARIN, A. C. **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**. Rio Grande do Sul: 1992, 134 p
- MATEUS, J. M. **Técnicas tradicionais de construção de alvenarias: a literatura técnica de 1750 a 1900 e o seu contributo para a conservação de edifícios históricos**. Livros Horizonte. Lisboa, Portugal: 2002.
- MOQUIN, M. **Ancient Solutions for Future Sustainability: Building With Adobe, Rammed Earth, and Mud**. In: CIB TG, 16., Sustainable Construction, p.543–552, 1994, Tampa, Florida, USA. Anais... Gainesville, Flórida: Center for Construction and Environment, M.E. Rinker Sr. School of Building Construction, College of Architecture, University of Florida, 1994.
- Paulsen, J. S. **A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”**. Elsevier, Brasília, 2012.
- Quispe, Alana Paula da Costa et al. **Análise comparativa numérica da transferência de calor em prismas de alvenaria em situação de incêndio**. Ambiente Construído [online]. 2023, v. 23, n. 1 [Acessado 20 novembro 2022], pp. 113-129. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000100652>>. Epub 14 Nov 2022. ISSN 1678-8621. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000100652>.
- SANTOS, J. C. P., KOTHE, K. K., MOHAMAD, G., et al., **“Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira”**, Revista Matéria, v.20, n.2, pp 1019-1036, 2015.

SOUSA, H. **Construções em alvenaria**. Porto: FEUP, 2002. cap 3. 15p.
SOUZA, L. P. de.; BAVARESCO, M. V.; VAZ, C. E. V.; LAMBERTS, R. Inserção de simulações de desempenho térmico no processo de projeto. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 12, n. 00, p. e021011, 2021. DOI: 10.20396/parc.v12i00.8657346. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8657346>. Acesso em: 9 dez. 2022.

STRICKLAND, M. **Roman building materials, construction methods, and architecture: the identity of an empire**. All Theses, Paper 909, 2010.

SOARES, Raquel Gomes; DE OLIVEIRA, Patrícia Lima; SANTOS, Sílvio Xavier. **Desempenho térmico das edificações: estudo comparativo entre o telhado verde e outros tipos de coberturas**. *Revista Petra*, v. 2, n. 1, 2016.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Decarbonizing construction: Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Transforming-the-Built-Environment/Decarbonization/Resources/Decarbonizing-construction-Guidance-for-investors-and-developers-to-reduce-embodied-carbon>. Acesso em: 23 nov. 2021.