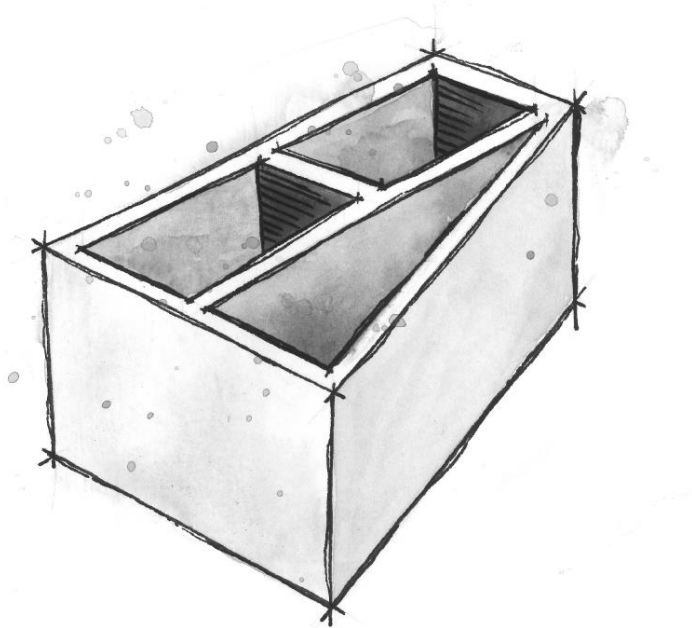


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE ARTES VISUAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E CIDADE**

MARÍLIA GUIMARÃES RODRIGUES



**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
ALVENARIA CONSTRUÍDA COM BLOCOS DE CONCRETO**

**GOIÂNIA – GO
2022**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE ARTES VISUAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese

2. Nome completo do autor

Marília Guimarães Rodrigues

3. Título do trabalho

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ALVENARIA CONSTRUÍDA COM BLOCOS DE CONCRETO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Janes Cleiton Alves De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 09/02/2022, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **MARILIA GUIMARÃES RODRIGUES, Discente**, em 09/02/2022, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do



[Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2683741** e o código CRC **722031C5**.

MARÍLIA GUIMARÃES RODRIGUES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
ALVENARIA CONSTRUÍDA COM BLOCOS DE CONCRETO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidade da Faculdade de Artes Visuais da Universidade Federal de Goiás, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração: Projeto, Teoria, História e Crítica.

Linha de Pesquisa B: Processos e Tecnologias de Projeto e Planejamento

Projeto de Pesquisa: Simulação Numérica do Desempenho Térmico de Alvenaria Construída com Blocos de Concreto

Orientador: Prof. Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira

FICHA CATALOGRÁFICA

Rodrigues, Marília Guimarães.

Simulação numérica do desempenho término de alvenaria construída com blocos de concreto. [manuscrito] / Marília Guimarães Rodrigues. – Goiânia, 2022. 93 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Artes Visuais (FAV), Programa de Pós-Graduação em Projeto e Cidade – Goiânia-Go, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira.

Bibliografia.

Inclui siglas, figuras, quadros, tabelas, gráficos.

1. Desempenho térmico. 2. Simulação térmica. 3. Norma de desempenho. 4. Programa EnergyPlus. I. Rodrigues, Marília Guimarães. II. Universidade Federal de Goiás. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

FACULDADE DE ARTES VISUAIS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 02/2022 da sessão de Defesa de Dissertação de **Marília Guimarães Rodrigues**, que confere o título de Mestre(a) em **Projeto e Cidade**, na área de concentração em **Projeto, Teoria, História e Crítica**.

Ao/s **trinta e um de janeiro de dois mil e vinte e dois**, a partir da(s) **quinze horas**, através de webconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE ALVENARIA CONSTRUÍDA COM BLOCOS DE CONCRETO”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Janes Cleiton Alves De Oliveira (EECA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Luciana Araújo Azevedo (IFG-GO)**, membro titular externo; Professor(a) Doutor(a) **Luana Miranda Esper Kallas (FAV/UFG)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Janes Cleiton Alves De Oliveira**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao(s) **trinta e um de janeiro de dois mil e vinte e dois**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Janes Cleiton Alves De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 09/02/2022, às 12:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciana Araújo Azevedo, Usuário Externo**, em 09/02/2022, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luana Miranda Esper Kallas, Professora do Magistério Superior**, em 14/02/2022, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2648672** e o código CRC **1F31353C**.

Referência: Processo nº 23070.025229/2021-61

SEI nº 2648672

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por permitir-me chegar até aqui depois de um ano tão difícil, ano em que perdi meu pai, mas Deus foi meu principal suporte para que, mesmo assim, eu continuasse minha caminhada.

Agradeço ao meu marido, pelo apoio, pela paciência, por sempre acreditar em mim e por embarcar em todos os meus sonhos. Sem ele, seria impossível realizar mais esta conquista.

Agradeço ao meu filho, que recém chegou a este mundo, porém que já é motivo para que eu procure sempre dar o meu melhor e ser uma pessoa melhor.

Agradeço à minha família, minha mãe, Leila, que sempre me deu suporte emocional para que eu pudesse permanecer no mestrado. Eu também agradeço ao meu avô Abel e à minha avó Luzia, exemplos de pessoas que me ensinaram a ter fé e perseverança para alcançar os meus objetivos. Ainda agradeço à minha prima Nicolle, que foi de extrema importância à finalização da dissertação.

Agradeço ao meu orientador Janes, pois, mediante o seu apoio e o seu conhecimento, possibilitou-me a conclusão deste trabalho. Um professor integro, que se preocupa com o bem-estar do aluno, sendo fundamental para que emocionalmente eu continuasse firme no propósito do mestrado após o falecimento do meu pai.

Agradeço ao Arthur, já que me permitiu a realização dos ensaios em sua empresa, Concrefato, proporcionando todo o suporte necessário.

Muito obrigada a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação.

RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade ambiental aplicada à construção civil, principalmente diante da necessidade de não esgotamento dos recursos naturais e eficiência energética, demonstra a importância do desempenho térmico nas edificações de acordo com as normas de desempenho, que tem por objetivo verificar o atendimento de critérios mínimos referentes às características termofísicas para os sistemas de fechamento. A nova revisão NBR 15575 (ABNT, 2021) estabelece critérios para a avaliação do desempenho térmico da edificação, e os resultados permitem uma adequação no planejamento e elaboração dos projetos, alterando os componentes construtivos ou o modelo arquitetônico da edificação em função de buscar um melhor desempenho térmico para a edificação. O objetivo do trabalho contemplou em aprimorar o bloco de concreto estrutural a partir da unidade padrão da família 39, visando à melhoria do desempenho térmico da edificação através de sua especificação. Após estudos da forma e da função, o protótipo foi nomeado como Bloco DT 39. Como metodologia, foi realizada uma pesquisa exploratória. A avaliação foi realizada pelo cálculo da transmitância térmica e pela capacidade térmica da envoltória da edificação e dos ensaios de compressão da unidade e do prisma. Foram feitas simulações computacionais a partir do programa EnergyPlus, que permitiu ensaiar as condições climáticas sobre a edificação e determinar o seu comportamento térmico perante a inserção do novo Bloco DT 39 em diferentes configurações de utilização na edificação. Os resultados obtidos foram comparados e analisados conforme as exigências da NBR 15575-1 (ABNT, 2021), o que possibilitou gerar gráficos comparativos entre as edificações simuladas com o bloco padrão e com o novo bloco desenvolvido (DT 39). Através dos resultados das simulações, foi possível avaliar que, com a modificação na geometria do bloco de concreto, aperfeiçoou-se o desempenho térmico das edificações simuladas, isto é, com a especificação do novo bloco na edificação, seja ele aplicado em uma parede, seja em todas as paredes da edificação, foi permitido alterar o nível de seu desempenho térmico, saindo do nível mínimo de desempenho térmico para o nível intermediário. Assim, ambas as edificações, quando inseridas o Bloco DT 39, melhoraram o percentual de conforto das edificações simuladas e reduziram a sua carga térmica.

Palavras-chave: desempenho térmico; simulação térmica; norma de desempenho; Programa EnergyPlus.

ABSTRACT

The concern with environmental sustainability applied to civil construction, especially given the need for non-depletion of natural resources and energy efficiency, demonstrates the importance of thermal performance in buildings in accordance with performance standards, which aims to verify compliance with criteria minimums concerning thermophysical characteristics for closure systems. The new revision NBR 15575 (ABNT, 2021) establishes criteria for evaluating the thermal performance of the building and the results allow for an adjustment in the planning and preparation of projects, changing the building components or the architectural model of the building in order to seek better thermal performance for the building. The objective of the work was to improve the structural concrete block from the standard unit of the family 39, aiming at improving the thermal performance of the building through its specification. After studies of form and function, the prototype was named as DT 39 Block. As a methodology, an exploratory research was carried out. The evaluation was performed by calculating the thermal transmittance and thermal capacity of the building envelope and compression tests of the unit and prism. Computational simulations were performed using the EnergyPlus program, which allowed testing the weather conditions on the building and determining its thermal behavior before the insertion of the new DT 39 Block in different design configurations. The results obtained were compared and analyzed according to the requirements of NBR 15575-1 (ABNT, 2021), which made it possible to generate comparative graphs between the buildings simulated with the standard block and with the new developed block (DT 39). Through the results of the simulations, it was possible to evaluate that with the modification in the geometry of the concrete block it was possible to improve the thermal performance of the simulated buildings, that is, with the specification of the new block in the building, whether applied to a wall or to all walls of the building, it was possible to change their thermal performance level, leaving the minimum level of thermal performance, to the intermediate level. In other words, when both buildings were inserted in the DT 39 Block, they improved the comfort percentage of the simulated buildings and reduced their thermal load.

Keyword: thermal performance; thermal simulation; performance standard; EnergyPlus Program.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Croqui sobre os mecanismos de transmissão de calor	23
Figura 2 – Ep-Launch: inicializador do EnergyPlus – dados de entrada e de saída .	29
Figura 3 – Procedimentos da norma NBR 15575-1.....	31
Figura 4 – Procedimentos da norma NBR 15575-1.....	33
Figura 5 – Ilustração esquemática da análise horária dos dados de saída dos modelos com e sem o uso da ventilação natural para o cálculo do $PHFT_{APP}$, da $CgTR_{APP}$ e da $CgTA_{APP}$	36
Figura 6 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro	39
Figura 7 – Pirâmide de Quéops	41
Figura 8 – Catedral de Reims	41
Figura 9 – Igreja do Cristo Obreiro	42
Figura 10 – Hotel Excalibur	43
Figura 11 – Edifício Monadnock	43
Figura 12 – Residencial Solar dos Alcântaras.....	44
Figura 13 – Fit Terra Bonita	44
Figura 14 – Casa Mipibu / Terra e Tuma Arquitetos Associados.	47
Figura 15 – Casa Havaí / Garoa+Chico Barros	47
Figura 16 – Maracanã / Terra e Tuma Arquitetos Associados	47
Figura 17 – Residencial Corruíras / Boldarini Arquitetura e Urbanismo	48
Figura 18 – SEHAB Heliópolis	50
Figura 19 – Via Verde	51
Figura 20 – Bloco termodissipador	52
Figura 21 – Croqui das dimensões do Bloco Padrão Família 39 e do novo bloco (Bloco DT 39)	53
Figura 22 – Forma do bloco	56
Figura 23 – Bloco	57
Figura 24 – Bloco	57
Figura 25 – Assentamento vertical	58
Figura 26 – Assentamento horizontal	58
Figura 27 – Proposta esquemática do projeto 1.....	64
Figura 28 – Proposta esquemática do projeto 2.....	64

Figura 29 – Proposta esquemática do projeto 3.....	65
Figura 30 – Volumetria das células teste	65
Figura 31 – Dados de entrada do arquivo climático	66
Figura 32 – Implantação Concrefato (Aparecida de Goiânia-GO).....	67
Figura 33 – Implantação Concrefato com localização das edificações simuladas ...	67
Figura 34 – Edificações em relação ao Norte	67
Figura 35 – Modelagem da edificação no SketchUp através do plugin Euclid	70
Figura 36 – Configuração da construção do Modelo Referência	70
Figura 37 – Configuração dos materiais do Modelo Referência	71
Figura 38 – Composição dos materiais para a construção dos blocos de concreto .	72
Figura 39 – Configuração da construção para a utilização do Bloco DT 39.....	72
Figura 40 – Configuração dos materiais	72
Figura 41 – Configuração da câmara de ar	73
Figura 42 – Configuração do vidro	74
Figura 43 – Configuração das esquadrias da ventilação natural	74
Figura 44 – Configuração das esquadrias sem ventilação natural com ar-condicionado.....	75
Figura 45 – Configuração do funcionamento do ar-condicionado	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades térmicas dos materiais	24
Quadro 2 – Evolução do protótipo	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades térmicas de paredes e pisos para o Modelo Referência ..	31
Tabela 2 – Propriedades térmicas da cobertura para o Modelo Referência	32
Tabela 3 – Características dos elementos transparentes nas esquadrias para o Modelo Referência	32
Tabela 4 – Diagnóstico de desempenho térmico segundo o procedimento de simulação computacional	37
Tabela 5 – Descritivas partes da norma NBR 15220 (adaptadas por Marília Guimarães Rodrigues)	38
Tabela 6 – Recomendações construtivas para adequação da edificação ao clima local	39
Tabela 7 – Classificação da resistência dos blocos de concreto	45
Tabela 8 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários	68
Tabela 9 – Padrões de ocupação diários dos APP	69
Tabela 10 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura	73
Tabela 11 – Resultado resistência à compressão	76
Tabela 12 – Resultado ensaio prisma	76
Tabela 13 – Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa	77
Tabela 14 – Resultado dos cálculos segundo a norma NBR 15220-3	77
Tabela 15 – Critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior	81
Tabela 16 – Comparação Bloco DT 39 x Referência NBR 15575 (ABNT, 2021)	82
Tabela 17 – Comparação Bloco DT 39 (3 Paredes) x Referência NBR 15575 (ABNT, 2021)	84
Tabela 18 – Comparação Bloco DT 39 (4 Paredes) x Referência NBR 15575 (ABNT, 2021)	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Média mensal de temperatura operativa ventilação natural.....	78
Gráfico 2 – Temperatura máxima da edificação.....	79
Gráfico 3 – Média mensal de carga térmica de refrigeração	80
Gráfico 4 – Carga térmica anual de refrigeração.....	80
Gráfico 5 – Nível de desempenho mínimo	86
Gráfico 6 – Percentual de horas de conforto da unidade	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
CgTA _{APP}	Somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento
CgTR _{APP}	Somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração
CgTTUH	Somatório anual dos valores horários da carga térmica total da Unidade Habitacional
CT	Capacidade Térmica
MPa	Mega Pascal
PHFT	Percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa
Q	Fluxo de Calor
RedCgTT	Redução da Carga Térmica Total
RT	Resistência Térmica
Tomáx	Temperatura Operativa Máxima
Tomín	Temperatura Operativa Mínima
U	Transmitância Térmica
UH	Unidade Habitacional
α	Absortância Solar
λ	Condutividade térmica da camada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização do tema	15
1.2 Problema.....	18
1.3 Hipótese	18
1.4 Objetivos	18
1.5 Estrutura da dissertação	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1 Desempenho térmico em edificação	21
2.1.1 Propriedades térmicas dos materiais construtivos	23
2.1.2 Simulação computacional e desempenho térmico	26
2.2 A plataforma de simulação EnergyPlus	27
2.3 Normas brasileiras de desempenho térmico	30
2.3.1 NBR 15575 (ABNT, 2013).....	30
2.3.2 NBR 15220	38
3. CONCEITO ALVENARIA ESTRUTURAL E A RACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO	40
3.1 Alvenaria estrutural.....	40
3.1.1 Normas e ensaios	45
3.2 Racionalização do sistema e suas vantagens	46
3.3 Alvenaria estrutural e habitação de interesse social	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 A proposta: características físicas e dimensões do protótipo	52
4.1.1 Forma.....	56
4.1.2 Especificações dos materiais.....	57
4.1.3 Possibilidades de assentamento.....	57

4.2 O teste: avaliação do protótipo	58
4.2.1 Ensaio de compressão unidade	58
4.2.2 Ensaio de prisma	59
4.2.3 Resistência térmica e transmitância do bloco	59
4.3 A aplicação: simulação computacional no EnergyPlus.....	63
4.3.1 Projeto.....	63
4.3.2 Arquivo climático e localização	65
4.3.3 Planejamento de ocupação.....	68
4.3.4 Elementos construtivos das superfícies	69
5. PROGRAMA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	76
5.1 Resultados das características físicas.....	76
5.2 Resultados da simulação da edificação.....	77
5.2.1 Comparações das simulações de acordo com a norma	81
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
8. REFERÊNCIAS.....	90

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

A arquitetura tem buscado aprimorar-se ao longo dos séculos, de modo que procura aliar forma, função e estrutura com a implantação de tecnologias que permitam a construção de edifícios mais contemporâneos e funcionais. Essa inquietação vem desde a antiguidade, pois o homem tem sempre se preocupado com a obtenção do conforto ambiental para se proteger das intempéries através dos meios disponíveis no meio ambiente. Mediante essas experiências, o homem passou a transformar a edificação em razão do clima, e novas técnicas construtivas foram surgindo. Sendo assim, a arquitetura tem evoluído na medida em que soluções técnicas e consequências plásticas vêm ao encontro dos anseios da vida diária, adequando o aproveitamento dos recursos naturais de acordo com as técnicas disponíveis em cada época (ZALESKI, 2006).

Conforme Bastos (2015), com a crescente demanda do setor da construção civil, as empresas tendem a buscar novos métodos construtivos que diminuam o custo da obra e o seu tempo de execução, mantendo a qualidade da edificação. Dessa forma, ela se torna mais competitiva no mercado. A propósito, a competitividade é um grande desafio, uma vez que há muito desperdício de material, mão-de-obra e atrasos, característicos da construção civil, sendo esses fatores justificados pela dificuldade em gestão de processos.

Para Lima (2017), além de um projeto bem planejado, o sistema de alvenaria estrutural possui muitas características que devem ser levadas em conta, como técnica e simples execução, redução no uso de concreto, aço e madeira. Ademais, o tempo de execução precisa ser menor, pois a tubulação já é instalada simultaneamente ao erguimento das paredes, o que gera uma economia de 30% em relação ao sistema convencional, evitando desperdício de material.

Estima-se que, entre 2005 e 2017, o consumo de energia elétrica mais que triplicou devido à utilização de aparelhos que promovem a climatização artificial (EPE, 2018). Consequentemente tal aumento no consumo energético exige que as fontes que suprem essa demanda sejam mais requisitadas, ao mesmo tempo em que é lançada maior quantidade de gases poluentes na atmosfera. Davis e Gertler (2015)

obtiveram projeções indicando que 70% dos lares terão refrigeradores de ar até o final do século, o que representa um aumento anual de 23 milhões de toneladas em emissões de gases poluentes. Dessa maneira, é importante especificar materiais que contribuam a um melhor desempenho a fim de se evitar o consumo energético.

Muitos são os sistemas construtivos existentes. Nesse âmbito, esta pesquisa focou-se no sistema de alvenaria estrutural. Para tanto, Camacho (2006) conceitua a alvenaria estrutural como o processo construtivo no qual os elementos que desempenham a função estrutural são de alvenaria, projetados, dimensionados e executados de forma racional em um sistema que alia alta produtividade com economia, quando executados de maneira correta.

Segundo Tauil e Nese (2010), o processo construtivo de alvenaria estrutural proporciona vantagens expressivas no processo de racionalização da construção comparado com outros processos. O potencial de racionalização construtiva de um empreendimento está ligado aos projetos que irão determinar uma maior ou menor eficiência de um determinado sistema construtivo, tudo isso relacionado à eficiência na forma de construir (THOMAZ, 2001).

Em alvenaria estrutural, quando se trata de conforto térmico ao usuário, ou seja, um melhor desempenho térmico para a edificação, a especificação em primeira mão seria o bloco cerâmico, pois é um material que possui um índice de transmitância menor se confrontado ao bloco de concreto, ambos materiais muito utilizados na construção civil. Esse índice explica-se pelo maior número de espaços de ar no interior do bloco, pelo menor nível de condutividade térmica do material e pelo seu peso. Como o bloco cerâmico possui esses valores reduzidos, a proposta foi trabalhar o bloco de concreto com a finalidade de melhorar os valores de transmitância, uma vez que eles são maiores, além de o material ser cada vez mais especificado nos projetos.

Em sua maioria, o bloco de concreto está relacionado à rapidez e à economia, pois quando utilizado reduz o consumo de formas de madeira, aço e concreto e gera maior organização no canteiro de obras, possui custo reduzido em relação ao sistema convencional de vigas, pilares e lajes e maior facilidade no treinamento de mão de obra. Gradativamente as construtoras estão utilizando sistemas que possuem características de padronização, trabalho em escala, redução do desperdício e redução do tempo de execução (BORGES, 2011). Não obstante, é necessário pensar além de custos e redução de tempo, sendo fundamental criar materiais que possam auxiliar a economia da edificação, mas que agreguem bem-estar ao usuário e novas

possibilidades formais à edificação. A partir da escolha do bloco de concreto, o protótipo foi desenvolvido, e o Bloco Padrão da Família 39 foi o escolhido.

A alvenaria estrutural em bloco de concreto atende desde edificações de pequeno porte como grandes edificações. O sistema tem alta resistência à compressão e é esteticamente atraente quando deixado sem revestimento. Assim, a alvenaria estrutural, relacionada com outras técnicas construtivas, surge como um elemento interessante na construção de obras residenciais contemporâneas no Brasil, vencendo os estigmas – já ultrapassados – de corresponder a edificações inacabadas. Projetos já trabalham com maestria a mistura de técnicas, de modo que compõem edificações interessantes e demonstram as inúmeras possibilidades de aplicação desse método.

Em virtude da potencialidade desse sistema construtivo, cujas qualificações foram mencionadas anteriormente, cabe uma avaliação do desempenho térmico do sistema de alvenaria estrutural para que, além do potencial racional, ele possa atuar como elemento construtivo, colaborando ao desempenho térmico da edificação. Esses quesitos visam a melhoria na edificação, reduzindo, de forma sustentável, o uso de energia no interior das edificações, hoje excessivo, a depender de equipamentos de climatização.

Assim sendo, é importante desenvolver elementos construtivos que favoreçam um melhor desempenho térmico da edificação, dado que gradualmente se utilizam de formas artificiais de refrigeração. Por sinal, o BEN (Balanço Energético Nacional), por meio do anuário estatístico de energia elétrica de 2018, faz ponderações a respeito do consumo de energia.

Em 2017, após dois anos de queda, o consumo de eletricidade no país cresceu 1,2% em relação a 2016, alcançando 467 TWh, mantendo o Brasil entre os dez maiores consumidores do mundo. As regiões Sul e Centro Oeste lideraram o crescimento, com taxas de 3,1% e 2,4%, mas a região Sudeste segue sendo a região de maior participação no consumo do país, representando praticamente 50% do total. O setor industrial segue sendo o maior consumidor, com quase 36% do total, seguido do setor residencial, com cerca de 29%. (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2018, p. 7).

Logo, é imprescindível a utilização de materiais que possam agregar, tanto na redução do consumo de energia, quanto no processo de projeto arquitetônico e sua execução.

Neste estudo, analisou-se o sistema de alvenaria, propondo novas investigações sobre desempenho térmico de edificações construídas com bloco de concreto estrutural. No intuito de analisar o avanço do desempenho térmico do novo bloco, estudou-se o sistema de alvenaria, propondo inovações no desempenho térmico de edificações construídas com bloco de concreto estrutural. Por fim, com o fito de avaliar o desempenho térmico do novo bloco, foi realizada uma pesquisa por intermédio de simulação computacional.

Consoante Gonçalves, Moura & Kuniuchi (2015), a decisão da escolha dos materiais pode ser mais bem avaliada quando se realiza a simulação computacional, dado que ela permite uma análise mais criteriosa com um tempo menor para a seleção de alternativas construtivas, assim como materiais mais assertivos a um melhor desempenho térmico (SANTOS *et al.*, 2017).

Nessa perspectiva, o resultado desta pesquisa poderá orientar as análises de propostas sobre desempenho térmico na edificação que propiciem a redução da temperatura interna do edifício, bem como estimular novas diretrizes à qualidade de projetos relacionados ao conforto térmico. As informações geradas e advindas do produto desta pesquisa poderão servir, tanto para o fundamento da atuação técnica das empresas do setor de construção, quanto para a inovação no mercado da arquitetura e engenharia.

1.2 Problema

A mudança na geometria do bloco concreto pode contribuir para melhorar o desempenho térmico da edificação?

1.3 Hipótese

Com uma nova forma do bloco de concreto, é possível melhorar o desempenho térmico da edificação, uma vez que a mudança na geometria permite a criação de uma nova camada de ar e outra espessura do bloco, aumentando a resistência térmica da parede. Reduzindo desta forma sua transmitância e aumentando a sua resistência térmica e capacidade térmica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

- Adaptar a geometria do bloco de concreto estrutural padrão da família 39, objetivando um melhor desempenho térmico

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico do estado da arte dos blocos/paredes utilizados para os ensaios e as simulações, considerando as suas propriedades e as suas características;
- Propor adaptação da geometria do componente buscando um ganho no desempenho térmico da parede de alvenaria estrutural com bloco de concreto;
- Através da simulação numérica comparar o desempenho térmico do bloco DT39 (com geometria adaptada), com o componente de referência da norma NBR15575 e o bloco de concreto tradicional da família 39.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos:

- i. O primeiro capítulo apresenta a contextualização do tema, o problema, hipótese e objetivos;
- ii. O segundo capítulo desenvolve o referencial teórico e os principais assuntos relacionados ao tema: o desempenho térmico da edificação, as propriedades térmicas dos materiais construtivos, a simulação computacional e o desempenho térmico, a plataforma de simulação: Energy plus e as normas brasileiras de desempenho térmico, isto é, assuntos que estruturam a pesquisa;
- iii. O terceiro capítulo aborda o objeto da pesquisa (bloco de concreto), contextualizando o seu histórico, os seus componentes e as normas;

- iv. O quarto capítulo demonstra a metodologia adotada, de forma que as etapas da pesquisa são detalhadas em sequência de execução a fim de atender o objetivo geral;
- v. O quinto capítulo expõe o programa experimental e a análise dos resultados. Nesse tópico, é apresentado o resultado das características físicas do novo bloco, bem como os resultados comparativos da simulação entre o Bloco Padrão da Família 39 e o novo bloco proposto na pesquisa, visando a melhoria do seu desempenho térmico;
- vi. Finalmente, o sexto capítulo encerra com a conclusão e as sugestões a trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Desempenho térmico em edificação

Uma das principais preocupações para as próximas décadas é o aumento da temperatura em nível global, que decorre principalmente da produção dos gases do efeito estufa pela população humana (WAKE, 2019). Nos últimos anos, com o avanço das tecnologias e da arquitetura, estudos abordam a importância do desempenho térmico dos elementos construtivos, pois eles são uma alternativa para melhorar o conforto térmico, a redução do consumo de energia residencial e a diminuição da transferência de calor da construção, bem como proporcionar benefícios estéticos, ambientais e econômicos.

Segundo Roriz (2013), as principais variáveis que interferem no comportamento térmico de uma estrutura são as características do projeto arquitetônico, ou seja, a sua posição em relação ao sol, o tamanho e o posicionamento das aberturas, além dos materiais utilizados na construção. No caso dos materiais, a variação dependerá das propriedades térmicas, da capacidade térmica, da transmitância térmica e do sol. Essas são as variáveis que vão interferir no comportamento térmico da edificação, gerando desconforto térmico ou conforto aos usuários.

Através da edificação, é possível tirar proveito ou evitar certas condições climáticas, de forma a propiciar um ambiente interno acolhedor aos usuários. A especificação criteriosa de materiais pode garantir boas condições de climatização e um desempenho térmico satisfatório. Carvalho (2014) afirma que, na fase de projeto, é imprescindível ter conhecimento do clima, da geografia e do local onde será construída a edificação projetada.

Frota e Schiffer (2016) também apontam que um desempenho térmico satisfatório da arquitetura com a utilização apenas de recursos naturais pode não ser possível em condições climáticas muito rígidas. Sendo assim, é necessário procurar propostas que maximizem o desempenho térmico natural. Desse modo, pode-se amortizar a imperiosa necessidade dos equipamentos de refrigeração ou aquecimento, visto que a quantidade de calor a ser retirada ou fornecida ao ambiente resultará menor.

A avaliação do desempenho térmico de edificações é um campo relevante para os profissionais de arquitetura e engenharia, porquanto, mediante sua aplicação, é possível desenvolver estratégias destinadas a minimizar o ganho de calor, proporcionar conforto térmico aos usuários e aprimorar desempenho da edificação.

Os meios, como o ambiente construído, concretizam trocas térmicas com o entorno, sendo eles: radiação, condução, convecção, evaporação e condensação. As trocas ocorrem devido à diferença de temperatura entre os corpos, variando o meio em que se propaga e o estado de agregação no qual se encontram os elementos. Os corpos trocam calor quando apresentam temperaturas desiguais, significando que a transmissão ocorre sempre do mais quente para o mais frio. As características climáticas, que afetam o conforto humano, são: temperatura do ar, radiação solar, movimento do ar e umidade.

A edificação torna-se o elemento fundamental para garantir o equilíbrio entre exterior e interior e propiciar a sensação de satisfação e bem-estar ao ser humano. Para que a edificação apresente um desempenho térmico, com ênfase na eficiência energética, é necessário que os elementos e os componentes do edifício desempenhem o papel de condutores das potencialidades climáticas existentes no entorno para o interior construído. A escolha dos elementos construtivos utilizados na edificação são um dos pontos preponderantes, posto que o tipo de elemento de vedação pode definir a resposta térmica da edificação.

Os materiais construtivos possuem influência no desempenho térmico e energético de uma edificação. Nesse âmbito, torna-se essencial conhecer as trocas de energia da edificação com o meio externo, visando a adequação do projeto para atendimento a requisitos de conforto térmico. De acordo com Büneker (2003), o profissional responsável pelo planejamento de uma edificação pode interceder em algumas variáveis, buscando favorecer o conforto térmico do ambiente através de implantação de aberturas para entradas e saídas de ar, bem como utilização de materiais que possam contribuir para essa comodidade.

É preciso entender os conceitos e os mecanismos de trocas térmicas para compreender o comportamento térmico nas edificações. São três os mecanismos de transmissão de calor, e, geralmente, esses fenômenos podem ocorrer ao mesmo tempo (Figura 1):

- a) Convecção: troca de calor entre dois corpos, sendo um deles sólido e o outro um fluido (líquido ou gás);

- b) Radiação: também é um mecanismo de troca entre dois corpos. Tal mecanismo de troca é consequência da natureza eletromagnética da energia, de modo que, ao ser absorvida, provoca efeitos térmicos, permitindo assim a transmissão sem necessidade de meio de propagação. A interface de comunicação entre a radiação solar e os ambientes internos de uma edificação ocorre através da envoltória, composta pela cobertura e vedações externas;
- c) Condução: troca entre dois corpos que se tocam ou mesmo partes do corpo que estejam em temperaturas diferentes.

Figura 1 – Croqui sobre os mecanismos de transmissão de calor



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Para Lamberts *et al.* (2014), quando todos esses fatores supracitados atuam juntos e não são ponderados em projeto, causam desconforto térmico ao usuário da edificação. Assim, o usuário sente a necessidade de buscar conforto térmico em sua casa por intermédio de equipamentos eletrônicos, como um ventilador e um ar-condicionado, o que, consequentemente, aumenta o consumo de energia elétrica, gerando mais custos. Essa situação poderia ter sido evitada se um estudo de desempenho térmico tivesse sido realizado no edifício durante a fase de projeto.

3.1.1 Propriedades térmicas dos materiais construtivos

Por propriedade térmica, deve-se entender a resposta ou a reação do material à aplicação de calor. Como afirmam Frota e Schiffer (2016), o sol, importante fonte de calor, incide sobre o edifício representando sempre um certo ganho de calor, que será função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas dos parâmetros do edifício.

As propriedades térmicas definem o comportamento térmico dos materiais e dos elementos construtivos. As principais propriedades para o entendimento do aspecto térmico dos materiais são a condutividade térmica, a densidade térmica, o calor específico, a difusividade térmica e a efusividade térmica.

Para aferir o desempenho térmico na edificação, é necessário considerar as propriedades de resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator de ganho de calor dos componentes, condutividade térmica e elementos construtivos (Quadro 1).

Quadro 1 – Propriedades térmicas dos materiais

PROPRIEDADE	ESQUEMA	DESCRIÇÃO
CONDUTIVIDADE TÉRMICA		A condutibilidade térmica quantifica a capacidade dos materiais em conduzir calor. De acordo com Lamberts (2012), a condutividade térmica depende do material e representa sua capacidade em conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade e tempo.
FLUXO DE CALOR $Q = q \times A$ ONDE: q = densidade de fluxo de calor (W/m^2); A = área do fechamento em questão (m^2)		O fluxo de calor representa a quantidade de energia térmica em watts que atravessa um fechamento de um ambiente.
RESISTÊNCIA TÉRMICA $R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_{se}$ ONDE: R_{si} = Resistência Térmica Superior Inferior; R_{se} = Resistência Térmica Superficial Exterior; R_1, R_2, R_3, R_n = Resistência Térmica de cada camada.		Segundo a NBR 15220-1/2005, a resistência térmica é a razão entre a variação de temperatura das superfícies externa e interna de um componente ou elemento construtivo pela densidade de fluxo de calor. Assim, a resistência é definida como a dificuldade de transmissão de calor de uma superfície para a outra do elemento.
TRANSMITÂNCIA TÉRMICA $U = \frac{1}{R_t}$ ONDE: U = Transmitância Térmica ($W/m^2.K$) R_t = Resistência Térmica Total do item composto por camadas ($m^2.K/W$)		Fluxo de calor que, na unidade de tempo e por unidade de área, passa através do componente, para uma diferença unitária entre as temperaturas do ar em contato com cada uma das faces desse mesmo componente.
INÉRCIA TÉRMICA E ATRASO (OU GANHO)		propriedades termo físicas, ela depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos. Atraso térmico (Δt) é o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor (ABNT, 2005a)

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (ABNT, 2005^a)

De acordo com Lamberts *et al.* (2014), as camadas de um fechamento têm resistências térmicas distintas, nas quais o inverso da resistência total do fechamento

é a sua transmitância térmica (U). A transmitância térmica é a variável mais importante para a avaliação do desempenho de fechamentos opacos, visto que, através dela, é possível avaliar o comportamento de um fechamento opaco frente à transmissão de calor.

A capacidade térmica é a propriedade que determina se o material retém mais ou menos calor. Um material com alta capacidade térmica necessita de uma grande quantidade de calor para variar um grau de temperatura de seus componentes por unidade de área. A partir da obtenção do valor de capacidade térmica, avalia-se o quanto um determinado material pode contribuir em termos de inércia térmica para um ambiente (LAMBERTS *ET AL*, 2014).

A capacidade térmica é calculada pela Equação 2. (ABNT NBR 15.220-2, 2008)

$$C_T = \sum \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (2)$$

Sendo:

- C_T : a capacidade térmica;
- λ_i : a condutividade térmica da camada;
- R_i : a resistência térmica da camada;
- e_i : a espessura da camada;
- c_i : o calor específico do material da camada;
- ρ_i : a densidade de massa aparente do material da camada.

A densidade térmica ou massa volumétrica (ρ) é o coeficiente entre a quantidade (kg) de massa e o volume unitário (m^3); assim, a sua unidade de medida é kg/m^3 . Por sua vez, o calor específico (c) é a capacidade do material para acumular calor, sendo medido em $J/kg.K$.

A absorvância térmica (α) influencia no comportamento do fechamento opaco da edificação quando exposta à radiação solar. Segundo a NBR15.220-1 (ABNT, 2005a), a absorvância é o quociente da taxa de radiação de ondas longas que é absorvida por uma superfície pela taxa de radiação de ondas longas incidente sobre essa superfície.

Um material escuro absorverá a maior parcela de radiação incidente, enquanto um material claro absorverá uma parcela pequena. O calor absorvido pelo material vai aquecê-lo; ademais, será parcialmente reemitido para o exterior e parcialmente emitido para o ambiente interno (LAMBERTS *ET AL*, 2014).

Conforme visto acima, as propriedades térmicas definem o comportamento térmico dos materiais e dos elementos construtivos, por isso é importante conhecer cada uma delas a fim de especificar os materiais corretos de acordo com cada zona bioclimática, proporcionando assim conforto térmico ao usuário.

3.1.2 Simulação computacional e desempenho térmico

Os programas de simulação termo-energética são utilizados para prever o desempenho e o conforto térmico de uma edificação. Nesse viés, eles são feitos através do cálculo das interações complexas existentes entre a edificação e o ambiente externo. De acordo com Trindade *et al.* (2010), esse cálculo é realizado por intermédio de algoritmos que modelam balanços de energia e transferência de calor entre as superfícies da edificação.

Mendes *et al.* (2005) afirmam que, mediante a simulação, é possível detectar erros de consumo energético na edificação na fase de projeto. Dessa maneira, evita-se correção de falhas, o que garante um melhor desempenho térmico e reduz erros e correções futuras.

Segundo Silva *et al.* (2017), a simulação computacional tem como principal intenção a decisão de estratégias para aperfeiçoar o conforto térmico e diminuir o consumo de energia, permitindo assim a tomada de decisões projetuais que otimizem os diversos sistemas da edificação.

A utilização de softwares de simulação é uma das alternativas de auxílio ao projeto, de forma que vem consolidando-se na determinação de desempenho térmico e energético das edificações (TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010). Ao contrário do teste *in loco*, eles podem ser implementados de maneira mais rápida, com menores custos e testados para diferentes estados em diferentes épocas do ano.

São vários os programas de simulação computacional utilizados nos centros de pesquisa do Brasil e do mundo, alguns dos mais difundidos são: ESP-r, ENERGYPLUS, TRNSYS e DOE (MENDES; LAMBERTS; CUNHA, 2001). O EnergyPlus é um dos mais utilizados por pesquisadores brasileiros. Trata-se de um

software gratuito criado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e desenvolvido para realizar simulações de desempenho térmico de edificações (MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009).

Consoante Silva *et al.* (2017), ao utilizar-se de simulação para o desempenho térmico, muitas variáveis são necessárias à configuração do modelo computacional com o fito de proporcionar resultados eficientes, tais como: o clima; os elementos da própria edificação, como propriedades geométricas, físicas e térmicas dos materiais e dos componentes construtivos; a geometria solar; as cargas internas; os equipamentos; etc.

Nessa perspectiva, é possível obter, através da simulação, as temperaturas de hora em hora ao longo de todo o ano, avaliando temperaturas máximas e mínimas. Mediante as temperaturas máximas, pode-se ter uma média anual delas e então avaliar essa média ao longo de todo o ano. A média diária é obtida por meio da soma das temperaturas registradas no termômetro a cada hora do dia e divisão por 24 (horas). A média mensal é o resultado da soma e da sua divisão pelos números dos dias do mês. Com esses dados, é possível analisar, antes mesmo de a edificação ser construída, em qual mês a edificação terá um melhor desempenho térmico.

Outro dado importante pode ser obtido com o uso da ventilação natural, isto é, o percentual de horas de ocupação do Ambiente de Permanência Prolongada (APP) dentro de uma faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$) e as cargas térmicas de refrigeração, que é quantidade de calor a ser retirada do ar para manter as condições desejadas em um ambiente.

2.2 A plataforma de simulação EnergyPlus

Foi escolhido o EnergyPlus por ser um programa Open Source, facilitando assim o desenvolvimento da pesquisa, pois é acessível a qualquer pessoa de forma gratuita, ele foi desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. Foi desenvolvido a partir dos programas BLAST e DOE-2 e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Seu diferencial, em relação aos programas de origem, é a simulação integrada e simultânea que utiliza um modelo relativamente simples de organização e controle de dados primordiais para simular as muitas combinações de sistema de energia, horários e ambientes (CRAWLEY *et al.*, 2000).

O programa EnergyPlus apresenta algumas características que o colocam à frente de diversos programas de simulações termo-energéticas (ENERGYPLUS VERSION 8.6 DOCUMENTATION, 2016), tais como:

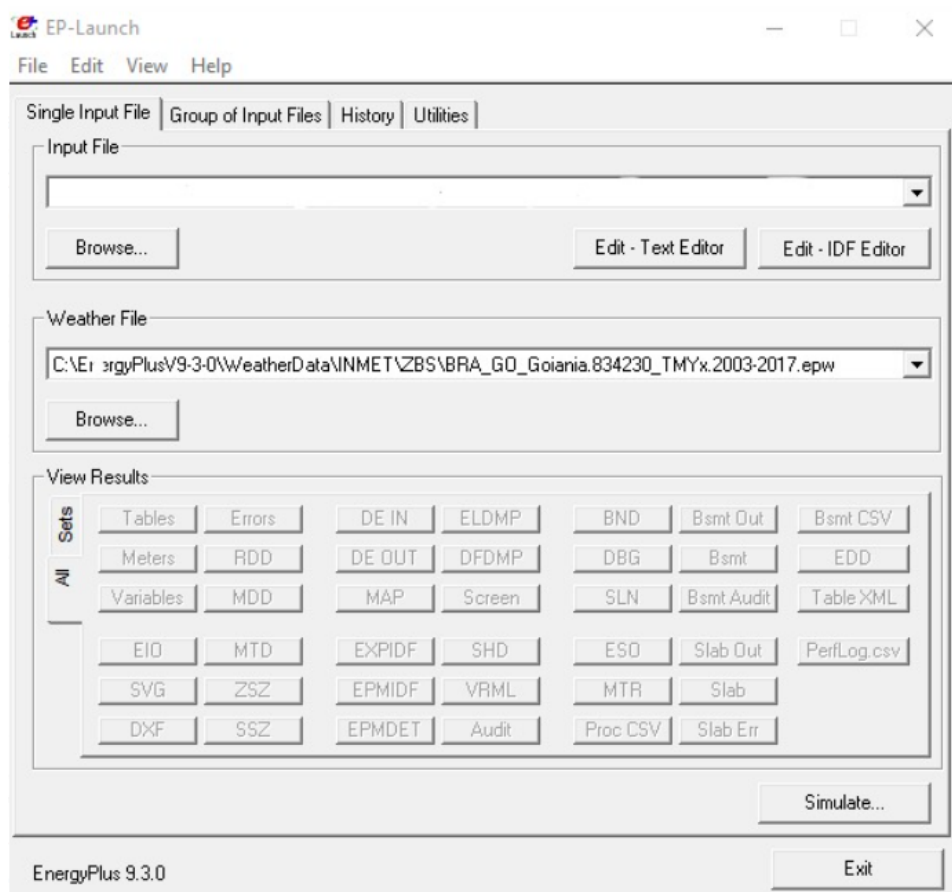
- Solução simultânea e integrada para obtenção da resposta da edificação analisada;
- Intervalos de tempos definidos pelo usuário, com fração de hora, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente, e intervalos de tempo variáveis para interação entre a zona térmica e o sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC);
- Arquivos de entrada, de saída e dados climáticos que incluem condições ambientais horárias ou sub-horárias (até um quarto de hora) e relatórios padrões reajustáveis pelo usuário;
- Técnica de solução baseada no balanço de energia para as cargas térmicas prediais, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiantes e convectivos nas superfícies interior e exterior durante cada intervalo de tempo;
- Condução de calor transiente através dos elementos de fechamento da edificação, usando funções de transferência e um modelo de conforto térmico baseado na atividade, temperatura de bulbo seco interna e umidade relativa;
- Modelo de cobertura do céu anisotrópico para cálculos mais complexos da radiação difusa sobre superfícies inclinadas;
- Cálculo de balanço de calor de janelas que permite o controle eletrônico de persianas, balanço térmico camada por camada, o que permite a identificação do comprimento de onda da energia solar absorvida pelo vidro da janela;
- Biblioteca versátil com diversos modelos comerciais de janela, controle da luz do dia, incluindo cálculos da iluminância interior, controle dos brilhos das luminárias e do efeito da iluminação artificial;
- Sistemas de condicionamento de ar configuráveis, que permitem ao usuário simular sistemas típicos comuns e sistemas poucos modificados, sem ter que recompilar o código fonte do programa

Dessa forma, habitualmente se utiliza o programa EnergyPlus mediante o plugin Euclid para realizar o desenho da edificação e posteriormente dados da construção que são inseridos no próprio programa. O Ep-Launch é o inicializador do

EnergyPlus, ao passo que o Euclid é um plugin do SketchUp que faz a conexão com o EnergyPlus.

No inicializador, são especificados os materiais que compõem a construção, sendo nele lançadas as propriedades que influenciam no cálculo térmico, como espessura da camada, calor específico, absorvância, condutividade térmica, emissividade e densidade de massa aparente do elemento. Também são especificados o padrão de ocupação e as zonas térmicas que compõem a edificação, além das variáveis de entrada e de saída que se deseja obter (Figura 2).

Figura 2 – Ep-Launch: inicializador do EnergyPlus – dados de entrada e de saída



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

O Input File é um ficheiro para entrada de dados (Inputs) e é designado de IDF. O Weather File é um ficheiro do tipo EPW que contém informações climáticas sobre o local onde se encontra a edificação. Nesse grupo, é possível apresentar os dados de saída (Outputs) em ficheiro do tipo Texto (Bloco de Notas), clicando em Text Output Files. Esses ficheiros contêm informações sobre a simulação.

Para iniciar Inputs, é necessário abrir um ficheiro base. Este, denominado por Minimal.idf, é um ficheiro com o mínimo de dados possíveis a fim de poder correr uma simulação, estando incluído na pasta ExampleFiles do programa EnergyPlus. As etapas de inserção serão descritas na metodologia.

2.3 Normas brasileiras de desempenho térmico

3.3.1 NBR 15575 (ABNT, 2013)

A norma foi publicada em diário oficial em fevereiro de 2013, e sua aplicação passou a ser obrigatória em julho desse mesmo ano. Para ajustar algumas limitações da norma dentro dos requisitos de desempenho térmico, foram feitas revisões e atualizações. Em 2020, o novo texto foi recebido pela comissão de estudos da ABNT e ficou disponível em consulta nacional no período de 17 de novembro até 16 de dezembro. No dia 30 de março de 2021, foram publicadas as seguintes emendas com o objetivo de complementar a NBR 15575-4 de 2013:

- Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais.
- Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE.
- Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 5: Requisitos para os sistemas de cobertura.

O restante permanece inalterado (LABEEE, 2020).

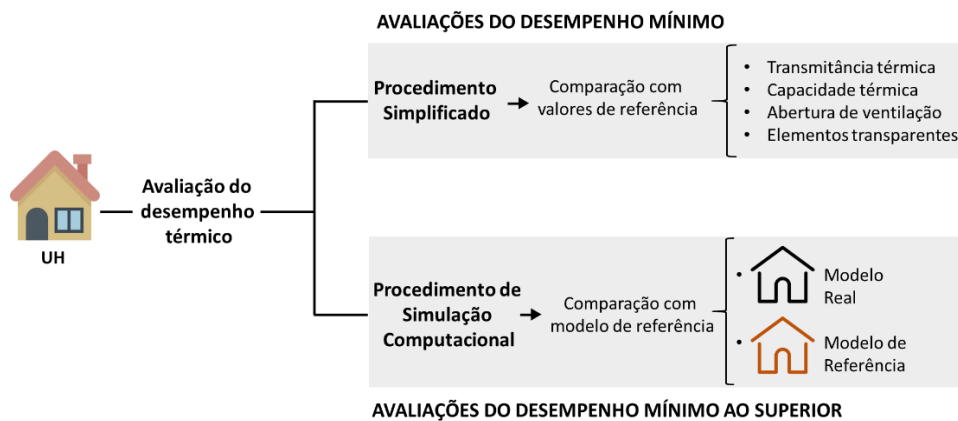
A NBR 15575 (ABNT, 2021) é a norma que define os requisitos mínimos de desempenho obrigatórios para sistemas construtivos, levando em consideração as necessidades de seus usuários e as condições que ficam expostas em uma edificação ao longo de sua vida útil. Portanto, o desempenho térmico é um dos requisitos de qualidade, sendo os critérios de avaliação da temperatura interna no verão os valores máximos e, no inverno, os valores mínimos. Essa norma trata do desempenho térmico dos edifícios.

A avaliação do desempenho térmico pode ser realizada por meio de dois procedimentos simplificados (Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações

internas e externas – SVVIE e Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas) ou de simulação computacional (Parte 1: Requisitos gerais).

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021) determina que, para o procedimento de avaliação computacional, seja realizado o Modelo Real, dado que conserva as características geométricas da unidade, as propriedades térmicas e as composições dos elementos transparentes, as paredes e a cobertura, além do Modelo Referência que representa a edificação avaliada (Figura 3).

Figura 3 – Procedimentos da norma NBR 15575-1



Fonte: LABEEE (2020)

Para a Modelo Referência, a norma apresenta propriedades térmicas que devem ser utilizadas como padrão. As tabelas da norma estão apresentadas nas imagens abaixo e foram utilizadas para a configuração da simulação deste trabalho (Tabelas 1, 2 e 3).

Tabela 1 – Propriedades térmicas de paredes e pisos para o Modelo Referência

Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m³
Paredes externas	1,75	1 000	0,58	0,90	2 200
Paredes internas	1,75	1 000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2 200
Pisos	1,75	1 000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2 200

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2021)

Tabela 2 – Propriedades térmicas da cobertura para o Modelo Referência

Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Densidade kg/m ³
Telha com 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	0,90	1 700
Laje com 100 mm de espessura	1,75	1 000	Adotar valor do modelo real	Adotar valor do modelo real	2 200

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2021)

Tabela 3 – Características dos elementos transparentes nas esquadrias para o Modelo Referência

Elemento	Fator solar (FS)	Transmitância térmica (U_t) W/(m ² .K)	Percentual de elementos transparentes ($P_{L,APP}$) %
Elementos transparentes	0,87	5,70	17,00

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2021)

O procedimento simplificado avalia o desempenho térmico mínimo da unidade habitacional (UH). Na revisão, uma importante mudança foi a implementação do critério elementos transparentes na Parte 4 da normativa. Outra modificação foi a recomendação de que seja considerada a degradação da absortância à radiação solar, recomendando procedimentos de medição ou valores obtidos em estudos de campo (LABEEE, 2020).

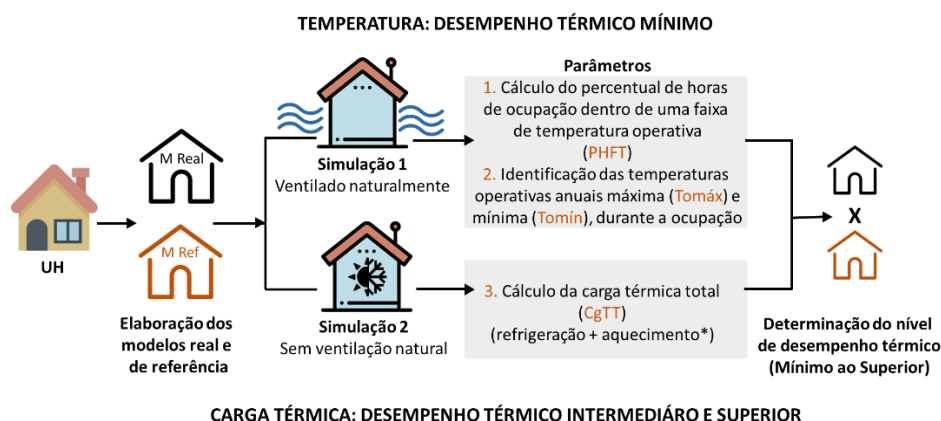
Segundo LABEEE (2020), a simulação computacional concebe a maneira mais assertiva de análise do desempenho térmico para a norma NBR 15575, permitindo avaliações para a obtenção de todos os níveis de desempenho (mínimo, intermediário e superior). As principais atualizações propostas para o procedimento de simulação computacional são:

- Adoção de simulações anuais;
- Consideração da edificação na fase de uso e operação;
- Avaliação da edificação em duas condições de uso: com ventilação natural e sem ventilação natural. São consideradas estratégias de ventilação natural, associadas à quantificação da carga térmica a ser removida, quando a ventilação for insuficiente para a obtenção de condições térmicas adequadas nos ambientes;

- Modelagem de janelas operáveis;
- Consideração do cálculo da carga térmica de forma a avaliar o desempenho térmico da edificação frente ao uso de sistemas de ar-condicionado;
- Análise ao considerar a comparação entre um modelo do edifício projetado e um modelo de referência (mesmo edifício com características de referência);
- Estabelecimento de novos indicadores para a avaliação do desempenho térmico: percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), temperatura operativa anual máxima e mínima da UH (Tomáx e Tomín) e carga térmica total (CgTT).

Para avaliar o desempenho mínimo, a norma aceita a simulação apenas com ventilação natural dentro do Ambiente de Permanência Prolongada (APP). Não obstante, para obter os níveis de desempenho intermediário e superior, devem ser simulados com ventilação natural e sem o uso da ventilação natural, conforme esquema demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Procedimentos da norma NBR 15575-1



Fonte: LABEEE (2020)

A norma NBR 15.575-1 (ABNT, 2021) afirma que, para a simulação com ventilação natural, é preciso determinar:

- O percentual de horas de ocupação dos Ambientes de Permanência Prolongada (APP) dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT_{APP}). A

faixa de temperatura operativa é considerada variável com o clima local, sendo possíveis três intervalos: de 18 °C a 26 °C, até 28 °C e até 30 °C;

- A temperatura operativa anual máxima ($T_{\text{omáxAPP}}$) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP. Quando a edificação estiver localizada nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4 (ver ABNT NBR 15220-3), também deve ser determinada a temperatura operativa anual mínima ($T_{\text{omínAPP}}$) de cada APP, considerando apenas os períodos de ocupação do APP.

Para a simulação sem ventilação natural, é estritamente necessário o somatório anual dos valores horários da carga térmica de refrigeração (C_{gTRAPP}) e o somatório anual dos valores horários da carga térmica de aquecimento (C_{gTAAPP}). A consideração da carga térmica de aquecimento somente é vital para zonas bioclimáticas 1,2,3 e 4.

Após a simulação computacional, é possível determinar edificação em níveis de desempenho térmico:

- Nível Mínimo;
- Nível Intermediário;
- Nível Superior.

Para atender a cada nível, a norma determina os seguintes critérios:

- Mínimo – avalia o PHFTUH e a temperatura operativa anual máxima ($T_{\text{omáxUH}}$) da UH do Modelo Real em relação ao Modelo Referência. Para edificações localizadas nas zonas bioclimáticas 1, 2, 3 ou 4, também deve ser avaliada a temperatura operativa anual mínima ($T_{\text{omínUH}}$);
- Intermediário – avalia o Modelo Real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do PHFTUH e à redução da carga térmica total (C_{gTTUH}) do Modelo Real em relação ao Modelo Referência;
- Superior – avalia o Modelo Real no atendimento dos critérios do nível mínimo, assim como quanto ao incremento do PHFTUH e à redução da carga térmica total (C_{gTTUH}) do Modelo Real em relação ao Modelo Referência. Em comparação ao nível intermediário, o atendimento ao nível superior diferencia-

se na obtenção de reduções mais elevadas da carga térmica total (CgTTUH) (ABNT 15575-1 2021).

Os dados de saída da simulação devem ser solicitados a cada hora para todos os modelos analisados, apresentando um total de 8 760 valores para cada variável. A norma contempla especificações que devem ser seguidas.

O modelo com o uso da ventilação natural deve solicitar, como variável de saída, a temperatura operativa horária de cada APP da edificação. A partir dessa variável, deve-se calcular, para cada APP, o $PHFT_{APP}$, conforme a seguinte equação:

$$PHFT_{APP} = Nh_{FT} / Nh_{Ocup} . 100$$

Sendo:

- $PHFT_{APP}$: o percentual de horas de ocupação do APP, dentro da faixa de temperatura operativa, expresso em porcentagem (%);
- Nh_{FT} : o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa, estabelecida na Tabela 3, ao longo do ano;
- Nh_{Ocup} : o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2 920 h para salas e 3 650 h para dormitórios.

O $PHFT_{APP}$ deve ser calculado, separadamente, para todos os APP do Modelo Real e do Modelo Referência. O modelo com o uso da ventilação natural deve identificar o valor de temperatura operativa máxima de cada APP ($Tomáx_{APP}$) durante o seu respectivo período de ocupação.

O modelo sem ventilação natural deve solicitar, como variável de saída horária, as cargas térmicas de refrigeração para cada APP da edificação. Deve ser realizado o somatório anual dos valores de carga térmica de refrigeração ($CgTR_{APP}$), do modelo sem ventilação natural, para os horários que atenderem às seguintes condições:

- a) O APP encontra-se com ocupação;
- b) A temperatura operativa do APP.

A Figura 5 demonstra a análise horária a ser desenvolvida conforme a norma recomenda, a partir dos dados de saída dos modelos com e sem ventilação natural, para o cálculo do PHFT_{APP}, da CgTR_{APP} e da CgTA_{APP}. Esse processo deve ser adotado para todos os APP da UH.

Figura 5 – Ilustração esquemática da análise horária dos dados de saída dos modelos com e sem o uso da ventilação natural para o cálculo do PHFT_{APP}, da CgTR_{APP} e da CgTA_{APP}

Hora do ano	Horário	Ocupação do APP	Modelo com o uso da ventilação natural		Modelo sem o uso da ventilação natural	
			To APP	PHFT _{APP}	CgTR _{APP}	CgTA _{APP}
1	00:00 – 00:59	Sim	18°C < To < 26°C	Sim	Não	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6	05:00 – 05:59	Sim	To ≥ 26°C	Não	Sim	Não
7	06:00 – 06:59	Sim	To ≥ 26°C	Não	Sim	Não
8	07:00 – 07:59	Não	To ≥ 26°C	Não	Não	Não
9	08:00 – 08:59	Não	To ≥ 26°C	Não	Não	Não
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4345	00:00 – 00:59	Sim	To ≤ 18°C	Não	Não	Sim
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8760	23:00 – 23:59	Sim	18°C < To < 26°C	Sim	Não	Não

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2021)

Ao final, a norma disponibiliza uma tabela de diagnóstico a ser preenchida para validar o nível de desempenho atingido pela edificação (Tabela 4).

Tabela 4 – Diagnóstico de desempenho térmico segundo o procedimento de simulação computacional

Características da unidade habitacional (UH)			
Tipologia	Identificação da UH	Número de APP	Superfícies expostas
() Unifamiliar () Multifamiliar	Pavimento	$A_{p,UH}$ m ²	() Fachada Norte () Fachada Oeste () Fachada Leste () Cobertura () Fachada Sul () Piso

Características dos ambientes de permanência prolongada (APP)			
Número do APP	1	2	3
Tipo de uso	() Sala () Dormitório	() Sala () Dormitório	() Sala () Dormitório
$A_{p,APP}$ (m ²)			

Diagnóstico de desempenho térmico dos APP			
Modelo real			
Número do APP	1	2	3
PHFT _{APP} (%)			
Tomáx _{APP} (°C)			
Tomin _{APP} (°C)			
CgTR _{APP} (kWh/ano)			
CgTA _{APP} (kWh/ano)			
CgTT _{APP} (kWh/ano)			

Modelo de referência			
Número do APP	1	2	3
PHFT _{APP} (%)			
Tomáx _{APP} (°C)			
Tomin _{APP} (°C)			
CgTR _{APP} (kWh/ano)			
CgTA _{APP} (kWh/ano)			
CgTT _{APP} (kWh/ano)			

Diagnóstico de desempenho térmico da UH			
	Modelo real	Modelo de referência	Atendimento do nível mínimo
PHFT _{UH} (%)			() Sim () Não
Tomáx _{UH} (°C)			() Sim () Não
Tomin _{UH} (°C)			() Sim () Não
CgTR _{UH} (kWh/ano)			Não se aplica
CgTA _{UH} (kWh/ano)			Não se aplica
CgTT _{UH} (kWh/ano)			Não se aplica
$CgTT_{UH}/A_{p,UH}$ (kWh/(ano.m ²))			Não se aplica

Diagnóstico do nível de desempenho térmico da UH			
Nível Intermediário			
Critério: $\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$	$\Delta PHFT$ (%)	$\Delta PHFT_{min}$ (%)	Atendimento
			() Sim () Não
Critério: $RedCgTT \geq RedCgTT_{min}$	RedCgTT (%)	RedCgTT _{min} (%)	Atendimento
			() Sim () Não
Nível Superior			
Critério: $\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$	$\Delta PHFT$ (%)	$\Delta PHFT_{min}$ (%)	Atendimento
			() Sim () Não
Critério: $RedCgTT \geq RedCgTT_{min}$	RedCgTT (%)	RedCgTT _{min} (%)	Atendimento
			() Sim () Não
Nível de desempenho térmico obtido pela UH			() Mínimo () Intermediário () Superior

Parâmetros informativos do desempenho térmico dos APP			
Modelo real			
Número do APP	1	2	3
PHsFT _{APP} (%)			
PHIFT _{APP} (%)			
Modelo de referência			
Número do APP	1	2	3

PHsFT _{APP} (%)			
PHIFT _{APP} (%)			

Parâmetros informativos do desempenho térmico da UH		
	Modelo real	Modelo de referência
PHsFT _{UH} (%)		
PHIFT _{UH} (%)		

Fonte: ABNT NBR 15575-1 (2021)

Sendo assim, as alterações realizadas nas normas são importantes para o trabalho, uma vez que ele realiza simulação computacional para a avaliação do desempenho térmico. Apesar de o programa gerar e exportar os dados, é preciso domínio para analisá-los.

2.3.2 NBR 15220

A norma aborda o desempenho térmico e agrupa recomendações técnico-construtivas que propendem para a otimização do desempenho das edificações através de sua melhor adequação climática. A norma NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) é composta por cinco partes (Tabela 5).

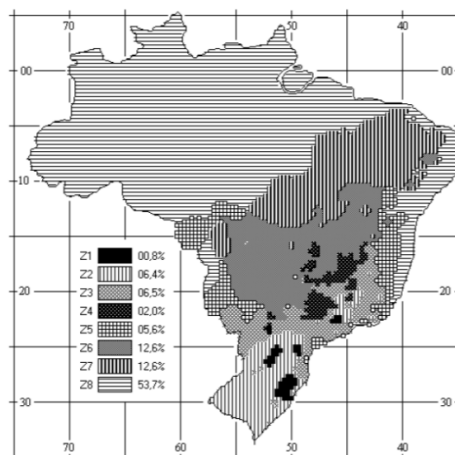
Tabela 5 – Descritivas partes da norma NBR 15220 (adaptadas por Marília Guimarães Rodrigues)

NBR 15220/2005: Desempenho térmico de edificações	
Parte 1	Definições, símbolos e unidades
Parte 2	Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos
Parte 3	Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
Parte 4	Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
Parte 5	Medição da resistência e da condutividade térmica pelo método do fluximétrico.

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

Seu objetivo consiste em subsidiar o desenvolvimento de avaliação de desempenho térmico na fase de projeto das habitações de interesse social. A norma repartiu o país em regiões nas quais há uma relativa semelhança climática. Para cada zona bioclimática, há um conjunto de recomendações técnicas e construtivas para otimizar o desempenho térmico das edificações, por meio de uma boa adequação climática (ABNT, 2005) (Figura 6).

Figura 6 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro



Fonte: NBR 15.220-3 (ABNT, 2005)

De acordo com cada zona bioclimática, a norma apresenta recomendações de tamanho das aberturas para ventilação, proteção das aberturas, vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura) e estratégias de condicionamento térmico passivo. A sua aplicação é para edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, independente dos materiais e dos sistemas construtivos empregados. Para o presente trabalho, foi estudada a zona bioclimática 6, zona em que o município de simulação está inserido (Tabela 6).

Tabela 6 – Recomendações construtivas para adequação da edificação ao clima local

DIRETRIZES CONSTRUTIVAS PARA GOIÂNIA (ZONA BIOCLIMÁTICA 6)			
ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO			Área (% da área de piso)
Médias			15% < A < 25%
VEDAÇÕES EXTERNAS	Transmitância Térmica – U (W/m².K)	Atraso Térmico – ϕ (horas)	Fator Solar – FSo (%)
Paredes Pesadas	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FSo \leq 3,5$
Coberturas Leves Isoladas	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,30$	$FSo \leq 6,5$

Fonte: ABNT NBR 15220-3 (adaptado por Paulse)

As diretrizes construtivas para o clima local recomendam o uso de vedações de paredes pesadas e coberturas leves e isoladas, enquanto as aberturas para ventilação devem ser médias. A propósito, as aberturas devem ser sempre sombreadas.

3. CONCEITO ALVENARIA ESTRUTURAL E A RACIONALIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO

O bloco projetado neste trabalho foi alvenaria de blocos de concreto. Por sua vez, os fatores estudados neste capítulo foram eficazes para o entendimento do sistema como um todo e serviram de base teórica para a definição dos parâmetros utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Alvenaria estrutural

A alvenaria estrutural tem origem pré-histórica, sendo um dos sistemas de construção mais antigos da humanidade. Nesse viés, determinadas obras datam de mais de 10 mil anos. Durante séculos, a prática dos construtores era primordial para construir com alvenaria, o que prevaleceu até o início do século XX (PARSEKIAN *et al.*, 2012).

A alvenaria estrutural é o sistema que melhor se adapta às condições da cultura construtiva, tanto do ponto de vista da absorção, quanto da adequação de mão de obra e da redução de gastos. Parsekian *et al.* (2012) afirmam que é comum o uso de alvenaria estrutural em empreendimentos para moradia de larga escala, sendo imprescindíveis rapidez de execução, economia, controle, planejamento, qualidade, segurança e custo.

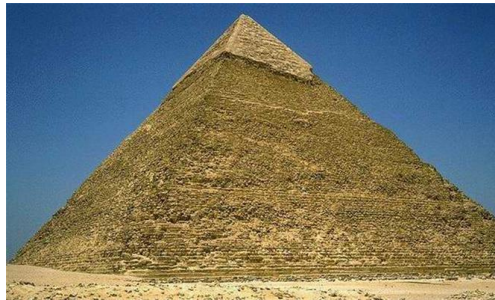
No que diz respeito à modulação, esta é uma das principais características do sistema. O módulo deve ser adotado na fase de projeto e definirá as dimensões das paredes em planta e cortes. A modulação é decidida na escolha do bloco, o que garante a padronização da construção, a fim de reduzir os custos de material a ser utilizado. Sua escolha é uma etapa de projeto importante, pois auxiliará na definição de características dos ambientes, como desempenho térmico e acústico.

As dimensões da edificação devem ser múltiplas das dimensões do bloco que será usado, ou seja, moduladas. A escolha da dimensão modular deve ser concretizada por um profissional que tenha conhecimentos técnicos e conheça bem o sistema aqui estudado, visto que a modulação é fundamental para que a construção seja econômica e racional (PRONTOMIX, 2018).

Para Salvador Filho (2007), a modulação está ligada à parte técnica do projeto, sendo fortemente inerente à técnica construtiva e à estrutura. A forma, a simples repetição de um bloco deu origem a grandes obras. Em maior escala, algumas obras são destacadas na história e servem como exemplo, auxiliando na compreensão do desenvolvimento do sistema de alvenaria estrutural. São elas:

- Pirâmide de Quéops → situada no Egito, faz parte da composição das três pirâmides: Quéfren, Quéops e Miquerinos. Quanto à estrutura, não foram inovadoras; o protagonismo foi a construção delas por meio de blocos sobrepostos. Abaixo, a Figura 7 remete à imensidão da obra.

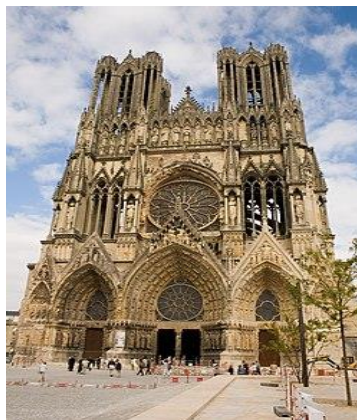
Figura 7 – Pirâmide de Quéops



Fonte: santaportal.com.br

- Catedral de Reims → uma catedral gótica, com arcos e abóbadas ogivais, edificada entre 1211 e 1300 d.C. Arquitetada a partir de técnicas peculiares e aprimorado os detalhes, tem os vãos grandes e as estruturas comprimidas (RAMALHO; CORRÊA, 2003) (Figura 8).

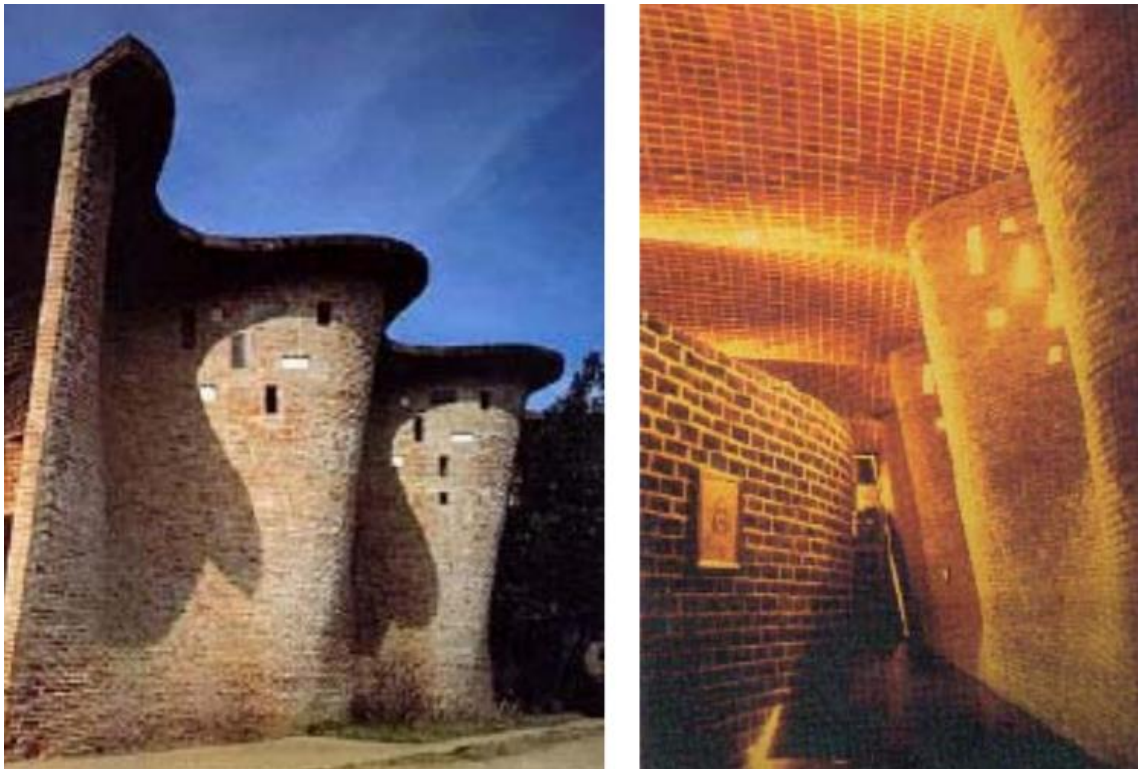
Figura 8 – Catedral de Reims



Fonte: Wikipédia

- Igreja do Cristo Obreiro de Atlântida → localizada em uma pequena localidade a 40 km da capital Montevideu, a igreja mede, em planta, 16 × 33 m, tendo sido projetada como um único grande espaço. A construção foi feita inteiramente em tijolo. As obras do arquiteto Eladio Dieste mostram a potencialidade do sistema de alvenaria estrutural quando são agregados o conhecimento e a inventividade (Figura 9).

Figura 9 – Igreja do Cristo Obreiro



Fonte: Wikipédia

- Hotel Excalibur → em alvenaria estrutural, o edifício mais alto é o hotel Excalibur, em Las Vegas, nos Estados Unidos, e possui 30 andares (PARSEKIAN, 2016). Ele foi inaugurado em 1990 e é composto por 4 (quatro) torres principais com 28 (vinte e oito) pavimentos. Suas paredes estruturais são de alvenaria armada com blocos de concreto (Figura 10).

Figura 10 – Hotel Excalibur



Fonte: Wikipédia

- Edifício Monadnock → construído nos anos de 1889 a 1891, na cidade de Chicago, nos Estados Unidos, é um simbólico edifício de alvenaria estrutural (Figura 11).

Figura 11 – Edifício Monadnock



Fonte: segredosdeviagem.com.br

- Residencial Solar dos Alcântaras → localizado em São Paulo, arquitetado no bairro da Penha, o edifício possui 21 andares. Tem suas paredes de carga construídas com blocos de 14 cm de espessura, do 1º ao 21º pavimento (Figura 12).

Figura 12 – Residencial Solar dos Alcântaras



Fonte: comunidade-da-construcao.com.br

- Fit Terra Bonita → referência em alvenaria estrutural, com 19 andares, a obra possui quatro torres, construídas dispensando o emprego de grua. Uma das grandes vantagens desse processo, em função da racionalidade e rapidez, é a possibilidade de eliminar equipamentos caros, como a grua, sem perder desempenho e diminuindo o custo (Figura 13).

Figura 13 – Fit Terra Bonita



Fit Terra Bonita em Londrina

Fonte: projetomaringa.blogspot.com/

3.1.1 Normas e ensaios

Os blocos estruturais de concreto são subdivididos em classes conforme o uso para determinada função, determinados pela norma NBR 6136 (ABNT, 2016), que define os componentes específicos e os requisitos gerais para cada bloco com sua respectiva classe.

A norma classifica em quatro classes o uso dos blocos de concreto para alvenaria estrutural. Elas são normatizadas e possibilitam validar os materiais para que cada classe atenda à função e a certa resistência característica dos blocos empregados (ABNT NBR 6136, 2007).

A família da Classe A, que é o caso do bloco em estudo, tem por finalidade resistir no mínimo 8 Mpa, como pode ser visto na tabela abaixo:

Tabela 7 – Classificação da resistência dos blocos de concreto

RESISTÊNCIA DOS BLOCOS DE CONCRETO		
CLASSIFICAÇÃO	CLASSE	RESISTÊNCIA
COM FUNÇÃO ESTRUTURAL	A	$F_{bk} \geq 8 \text{ MPa}$
	B	$4 \leq F_{bk} < 8 \text{ MPa}$
COM OU SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL	C	$F_{bk} \geq 3 \text{ MPa}$
SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL	D	$F_{bk} < 3 \text{ MPa}$

Fonte: ABNT NBR 6136, 2016

A norma NBR 15961-2 (ABNT, 2011) estabelece que a alvenaria estrutural deve ter a resistência à compressão controlada pelo ensaio de prisma, que pode ser padrão ou otimizado. Para a determinação da resistência à compressão dos prismas de bloco de concreto, serão seguidos os procedimentos preconizados pela norma brasileira ABNT NBR 8215 de 1983. Os ensaios de prisma apresentam a vantagem de serem mais rápidos e econômicos do que os ensaios de parede, além de não exigirem uma estrutura laboratorial tão grande quanto aos de parede.

A resistência à compressão do bloco é a principal característica da resistência dos prismas e das paredes, sendo que essa característica é válida principalmente quando eles não são grauteados.

O teste de compressão, segundo a norma ABNT NBR 12118 de 2013, é a “relação de carga e área bruta do corpo de prova quando submetido ao ensaio de compressão axial” (ABNT, 2013). O teste afere a resistência da capacidade que a

parede possui de suportar cargas e ações mecânicas da estrutura, vento, choques e deformações.

Após o ensaio de compressão, a norma recomenda o ensaio de prisma. Os ensaios com prismas são a base para o projeto estrutural, uma vez que ensaios das unidades componentes da alvenaria não apresentam boa correlação com aqueles sob condições de utilização das estruturas.

A norma ABNT NBR 8215 de 1983 cita dois métodos de preparo dos prismas. No Método A, os prismas são moldados em laboratório; já no Método B, os prismas são moldados em obra, com os mesmos materiais e mão de obra em uso na estrutura. No presente estudo, os ensaios foram realizados pelo Método A.

3.2. Racionalização do sistema e suas vantagens

A alvenaria estrutural é um processo de construção cuja principal estrutura de suporte do edifício são as paredes, dimensionadas através de cálculo racional. Nesse processo, a parede desempenha o papel de vedação vertical e suporte estrutural. Está situada ainda entre os sistemas industrializados, porque o componente basilar de seu elemento estrutural, seja o bloco ou o tijolo, são os modulares, produzidos em usinas ou indústrias, o que faz o sistema construtivo ser racionalizado (CAVALHEIRO, 1998).

O sistema construtivo em alvenaria estrutural pode ser considerado como racionalizado. Isso porque os seus princípios buscam deixar o processo de trabalho mais eficiente e organizado. O processo em alvenaria estrutural permite uma construção rápida e com custos menores se comparado aos processos mais utilizados, como o popular concreto armado. Segundo Ramalho & Corrêa (2003), a principal vantagem na utilização da alvenaria estrutural é sua simplicidade construtiva. O sistema pode ser utilizado de pequenas a grandes edificações (Figuras 14, 15, 16 e 17).

Figura 14 – Casa Mipibu / Terra e Tuma Arquitetos Associados



Fonte: Nelson Kon / Archdaily

Figura 15 – Casa Havaí / Garoa+Chico Barros



Fonte: Pedro Napolitano Prata / Archdaily

Figura 16 – Maracanã / Terra e Tuma Arquitetos Associados



Fonte: Pedro Kok / Archdaily

Figura 17 – Residencial Corruíras / Boldarini Arquitetura e Urbanismo



Fonte: Daniel Ducci / Archdaily

Melo (2006), assim como Ramalho & Corrêa (2003), apontam que, no processo, tem-se a economia de formas, as quais se utilizam, se for o caso, na concretagem das lajes. Os autores ainda pontuam a diminuição de material gasto no revestimento, visto que há o controle de qualidade dos blocos e da execução das paredes, assim como a redução do número de especialidades da mão de obra, já que o número de armadores e carpinteiros é limitado. Ressaltam também a flexibilidade no ritmo da execução da obra, no caso de as lajes serem pré-moldadas.

Essas reduções significativas de mão de obra e desperdícios, bem como o controle de qualidade de blocos e de obra, resultam em uma obra menos dispendiosa, além de eliminar retrabalhos. Desse modo, temos uma construção racionalizada.

A qualidade do trabalho dos profissionais diretamente ligados à produção da alvenaria estrutural aliada ao conhecimento de quem fiscaliza a execução desse sistema construtivo são fundamentais para se obter uma parede de boa qualidade. Fatores tais como prumo, verticalidade, uniformidade de espessura de juntas e resistência são dependentes da habilidade dos pedreiros. O engenheiro e os demais profissionais envolvidos no processo não devem descuidar da fiscalização na construção das paredes.

Segundo Ramalho & Corrêa (2003), outro ponto relevante na construção, utilizando a alvenaria estrutural, é a necessidade de mão de obra qualificada, treinada previamente para a execução das paredes com o fito de manter a qualidade da construção e a segurança da edificação.

Nesse contexto, Lanna (2010) reconhece a alvenaria estrutural como tecnologia segura, durável e econômica para obras industriais, comerciais e habitacionais de múltiplos pavimentos. Dessa forma, destaca-se que a habitação popular está entre os aspectos positivos da alvenaria estrutural e soma muitos benefícios a esse sistema, principalmente em habitações populares, já que o principal requisito para o investimento no imóvel é o baixo custo, atraindo a atenção da população e de investidores.

3.3 Alvenaria estrutural e habitação de interesse social

As habitações de interesse social entraram na pauta do cenário arquitetônico e construtivo nacional, principalmente em virtude de investimentos federais para o financiamento. Um dos principais pontos de discussão acerca dessas habitações é como oferecer construções sustentáveis e de qualidade.

O Brasil tem apresentado um déficit habitacional elevado, em torno de 6,18 milhões de moradias (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2018). Em 2009, o governo federal efetivou o Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), com o intuito de apresentar edificações de baixo e médio custo, buscando amortizar o déficit habitacional do país (MORORÓ *et al.*, 2016). As habitações são construídas em larga escala e de forma genérica sem analisar as características climáticas, sociais e tecnológicas de cada região, tampouco as desejáveis medidas que promovam a eficiência energética (BODACH; HAMHABER, 2010).

Oliveira *et al.* (2014) & Rotta (2009) destacam a produção seriada de uma mesma tipologia construtiva sendo construída em todo o Brasil, com baixa qualidade construtiva e desconsiderando as diferentes condições climáticas, tecnológicas, culturais e socioeconômicas do território. Isso ocorre devido às limitações orçamentárias disponíveis para o número significativo de unidades a serem construídas (TUBELO *et al.*, 2018).

Para ser sustentável, uma habitação não necessita de tecnologias inovadoras. Nesse âmbito, uma correta escolha de materiais adequados, pertinentes para a região, já a torna racionalizada e economicamente viável (MORORÓ *et al.*, 2016). Sendo assim, é fulcral verificar uma lacuna de conhecimento que leve à proposição de soluções para a melhoria do desempenho térmico, levando em consideração a

especificação de materiais mais sustentáveis para esse tipo de empreendimento (SANTESSO *et al.*, 2017).

Nesse sentido, um dos fatores a ser considerado refere-se à etapa de seleção dos materiais a serem empregados nas vedações, pois eles exercem grande influência sobre as condições de conforto interno e sobre o consumo energético da edificação.

O sistema construtivo de paredes de concreto tem sido amplamente utilizado na construção de habitações de interesse social (HIS). Além de proporcionar um desempenho térmico satisfatório, se bem utilizado, também pode trazer soluções arquitetônicas arrojadas, de modo a aliar o sistema de alvenaria estrutural com habitações de interesses sociais ou fornecer conforto ao usuário que nelas habitam (Figuras 18 e 19).

O SEHAB Heliópolis é uma habitação de interesse social que abriga 420 famílias, fazendo parte do Programa de Reurbanização de Favelas da Prefeitura do Município de São Paulo. O projeto prioriza um conjunto de passarelas-pontes que conectam os blocos e deixam o aproveitamento máximo dos coeficientes de construção. O sistema construtivo é de alvenaria estrutural de bloco de concreto, ao passo que, nos pórticos de entrada e no pátio interno, é de concreto armado (Figura 18).

Figura 18 – SEHAB Heliópolis



Fonte: archdaily.com.br/

Por sua vez, o residencial Via Verde fica localizado em Nova York, possuindo 222 apartamentos. O projeto é vencedor do concurso internacional *New Housing New York Legacy Competition*. O projeto é de alvenaria estrutural e faz parte um compromisso público para criar uma geração de habitação social, de forma a proporcionar uma vida sustentável saudável (ARCHDAILY, 2021) (Figura 19).

Figura 19 – Via Verde



Fonte: archdaily.com.br/

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da proposta e a metodologia da pesquisa. São apresentados os princípios que nortearam a concepção do bloco de concreto e que foram utilizados para a simulação computacional, assim como a metodologia para a concepção de ambos.

4.1 A proposta: características físicas e dimensões do protótipo

A proposta teve início através do bloco cerâmico com função termodissipadora e sem função estrutural, desenvolvido por Miguel Niño e Johanna Navarro, por intermédio do escritório Sumart Diseño y Arquitectura SAS. O bloco de vedação proposto pelo escritório possui uma secção transversal irregular que permite que a ventilação passe entre os blocos, dissipando rapidamente a temperatura acumulada e reduzindo a quantidade de calor emitido no interior do edifício (FRANCO, 2016) (Figura 20).

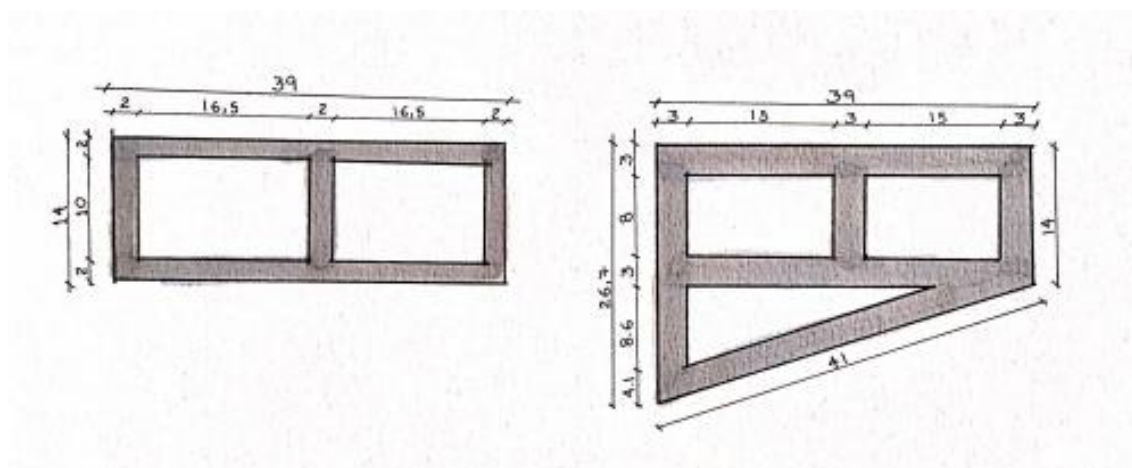
Figura 20 – Bloco termodissipador



Fonte: archdaily.com.br

Para a criação do novo bloco, foi proposta uma nova camada de ar e a adição de mais uma espessura no bloco, formando um triângulo escaleno para que o bloco continuasse com sua função estrutural, porém possibilitando outras formas de assentamento, além de viabilizar novas possibilidades de forma à edificação, alinhando, assim, forma e função. Com essa nova geometria, espera-se que o bloco proporcione uma resistência térmica maior, reduzindo sua transmitância e aumentando a sua capacidade térmica. O bloco em questão é tratado ao longo do trabalho como Bloco DT 39 (Figura 21).

Figura 21 – Croqui das dimensões do Bloco Padrão Família 39 e do novo bloco (Bloco DT 39)

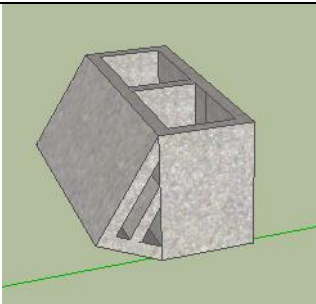
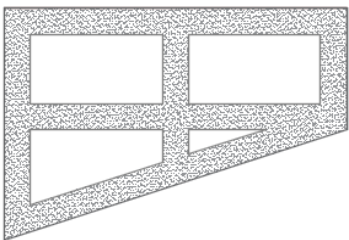


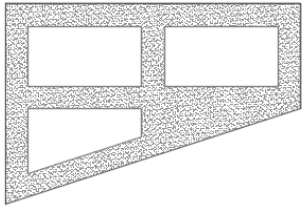
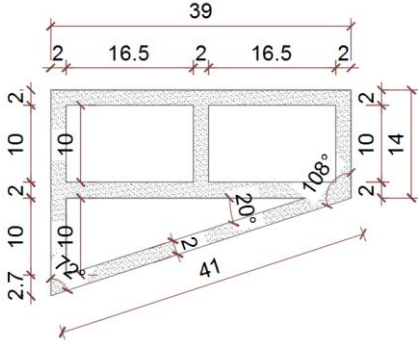
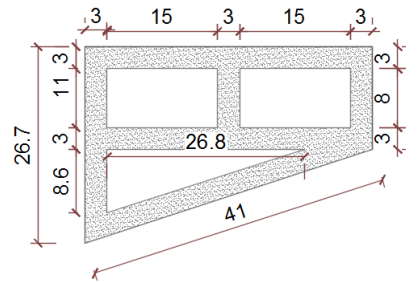
Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

A geometria das unidades de alvenaria estrutural é um aspecto importante para a eficácia do sistema. Para a concepção inicial, foi primordial pensar na modulação do bloco e manter suas características estruturais com o intuito de melhorar o desempenho térmico sem perder a função estrutural. Nesse sentido, estudos foram feitos para concluir a melhor forma a esse processo evolutivo (Quadro 2).

Quadro 2 – Evolução do protótipo

Geometria	Observações
	Origem da proposta. Bloco cerâmico desenvolvido por Miguel Niño e Johanna Navarro. A escolha foi efetuada pelas potencialidades que a proposta oferecia em relação ao conforto térmico da edificação.
	Foi escolhido o bloco de concreto para estudo por possuir um valor de transmitância menor e ser muito especificado nos

	projetos, principalmente em habitação de interesse social. Assim sendo, sua melhoria pode contribuir efetivamente para a arquitetura. Para os estudos, foi utilizado o Bloco Padrão da Família 39.
	1ª Proposta: a proposta inicial foi manter o formato inicial do bloco idealizado por Miguel Niño e Johanna Navarro, alterando o material com a intenção de priorizar os benefícios da proposta geométrica citada por eles. Porém não foi possível devido à fabricação da forma manual do bloco, ficando inviável a sua execução.
	2ª Proposta: em razão da inviabilidade de sua fabricação (da forma), foi necessário deixar suas seções alinhadas, modificando a direção do triângulo escaleno, de modo a priorizar sempre a relação estética e funcional do bloco para a sua inserção no projeto. No entanto, a fabricação da forma de chapa de aço não seria possível com esse triângulo menor.

	3ª Proposta: mediante a não possibilidade e execução da proposta pela sua forma, mas mantendo a potencialidade térmica oferecida, foi retirado o triângulo menor, de maneira a viabilizar a forma manual do bloco. Não obstante, nesta proposta, o bloco ficaria muito pesado.
	4ª Proposta: pensando na logística do assentamento do bloco, bem como em sua forma e no desempenho térmico, foi proposta uma nova geometria a qual deixaria o bloco mais leve.
	1º Teste: com a proposta concretizada, alinhando geometria à função estrutural e térmica, foi fabricada a forma de aço do bloco manual. O protótipo foi testado, entretanto ele se desfazia em virtude da forma do triângulo e de sua espessura.
	5ª Proposta: depois do estudo e das avaliações, foi concretizado que a espessura de 2 cm, alinhada com o triângulo, não seria viável (uma vez que o bloco

	quebrava quando retirado da forma). Então, foi proposto aumentar a espessura para 3 cm.
	2º Teste: uma nova forma de aço foi viabilizada, e a proposta foi concretizada.

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

4.1.1 Forma

A forma, como relatado no item anterior, foi concretizada através de estudos da forma do bloco, priorizando a sua função estrutural, a sua função térmica e a estética, de modo a agregá-la na arquitetura quando especificada. O material utilizado para a sua produção foi chapa de aço, conforme consta na supracitada Figura 21. Depois da forma viabilizada, foi realizada a execução das unidades do Bloco DT 39 (Figuras 22, 23 e 24).

Figura 22 – Forma do bloco



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 23 – Bloco



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 24 – Bloco



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

4.1.2 Especificações dos materiais

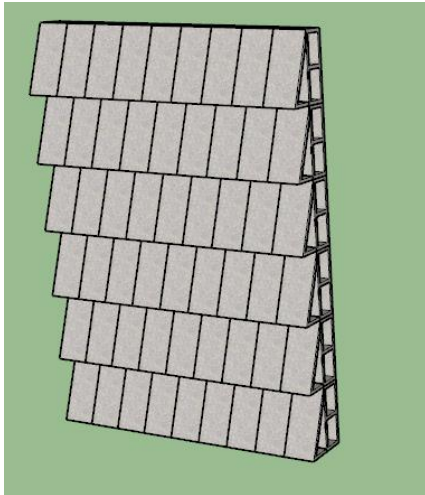
O traço do concreto é a proporção dos materiais água, areia, cimento e brita necessária para fazer o concreto da obra. Neste trabalho, o traço utilizado foi o comercial (utilizado no mercado): dez latas de agregados (30% de pó de pedra com 30% de areia e 40% de pedrisco) mais um saco de cimento de 50 Kg.

4.1.3 Possibilidades de assentamento

É necessário pensar na arquitetura como um todo, de tal forma que o projeto ou material desenvolvido atenda à função para qual foi objetivado, sem esquecer as possibilidades formais. A proposta do presente estudo foi testar o Bloco DT 39 em sua função estrutural a fim de possibilitar outras formas de assentamento, dando nova função ao bloco. Sendo assim, o Bloco DT 39 pode funcionar como uma fachada

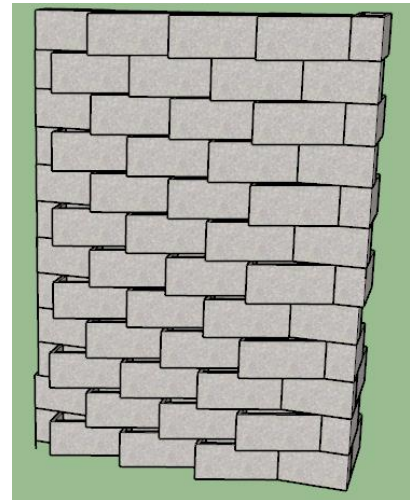
ventilada quando instalado na vertical (Figura 25). Em ambas as possibilidades, o bloco proporciona movimento à fachada (Figuras 25 e 26). Logo, além da proposição de cumprir sua função estrutural e térmica, pode possibilitar composições formais diferentes ao projeto arquitetônico.

Figura 25 – Assentamento vertical



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2020)

Figura 26 – Assentamento horizontal



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2020)

4.2 O teste: avaliação do protótipo

Os ensaios do protótipo foram realizados na empresa Concrefato, empresa que possui laboratório preparado para os ensaios. Para a execução dos ensaios, foi recebido um lote de 50 blocos de concreto DT39, como especifica a norma NBR 6136 (ABNT, 1994), com o mesmo tamanho e traço de concreto.

4.2.1 Ensaio de compressão unidade

Para a realização dos ensaios à compressão, aplicou-se as cargas nos blocos, observando a sua tensão de ruptura e as suas dimensões. As seguintes etapas foram realizadas para o teste:

- A primeira etapa do processo de testes e ensaios foi analisar os blocos que foram testados e deveriam atender à norma vigente.

- A segunda etapa contemplou a regularização dos corpos de prova em que, consoante a norma NBR 12118, “todos os corpos de prova devem ser ensaiados de modo que a carga seja aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar” (ABNT, 2013). A prensa hidráulica foi utilizada como equipamento de ensaio.
- Aplicou-se as forças em direção ao eixo do bloco para rompê-lo. Verificou-se, assim, a carga máxima de ruptura suportada.

4.2.2 Ensaio de prisma

O ensaio à compressão do prisma foi efetuado de acordo com a norma NBR 15961-2 (ABNT, 2011). Para tanto, utilizou-se prensa com altura mínima útil superior ao dobro da altura dos blocos, espessura da argamassa de assentamento e o capeamento dos dois lados acrescido de 1 cm.

Para a organização dos prismas, foi usado nível, prumo e colher de pedreiro. Foi realizado sobre uma base plana, limpa e sem deformações. O capeamento foi feito com argamassa possuindo resistência superior à resistência dos blocos na área líquida.

Sobre os procedimentos do ensaio, a carga foi aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego na alvenaria. O centro de gravidade do prisma estava no eixo de carga dos pratos da prensa.

4.2.3 Resistência térmica e transmitância do bloco

Os cálculos dos valores de transmitância, resistência e capacidade térmica foram efetuados através das fórmulas contidas na norma NBR 15220 (ABNT, 2005), que apresenta os valores para um bloco de concreto de 9x19x39. Os valores das fórmulas foram substituídos para as dimensões do Bloco Padrão da Família 39 e o novo Bloco DT 39.

a) Cálculos do bloco de concreto padrão da família 39

Resistência térmica da parede

Seção A (concreto)

$$A_a = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,14}{1,75} = 0,08 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/w}$$

Seção B (concreto + câmara de ar + concreto)

$$A_b = 0,17 \times 0,19 = 0,03123 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,02}{1,75} + 0,17 + \frac{0,02}{1,75} = 0,1928 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/w}$$

Resistência da parede:

$$R_T = \frac{\frac{3x A_a}{R_a} + \frac{2x A_b}{R_b}}{\frac{3x 0,0038}{0,08} + \frac{2x 0,03123}{0,1928}} = \frac{0,074}{0,467} = 0,158 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/w}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,158 + 0,04 = 0,328 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/W}$$

Transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,328} = 3,04 \text{ w/(m}^2 \cdot \text{k)}$$

Capacidade térmica da parede:

Seção A (concreto)

$$A_a = 0,02 \times 0,19 = 0,0038 \text{ m}^2$$

$$C_{Ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}} = 0,14 \times 1,00 \times 2400 = 336 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$$

Seção B (concreto + câmara de ar + concreto)

$$A_b = 0,17 \times 0,19 = 0,0323 \text{ m}^2$$

$$C_T = \sum_{i=1}^3 (e_i \cdot C_i \cdot \rho_i) = (e \cdot C \cdot \rho)_{\text{concreto}} + (e \cdot C \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot C \cdot \rho)_{\text{concreto}}$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$C_{Tb} = 0,02 \times 1,00 \times 2400 + 0 + 0,02 \times 1,00 \times 2400 = 96 \text{ KJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Tem-se, então, a capacidade térmica da parede:

$$C_T = \frac{3xAa + 2xAb}{\frac{3xAa}{C_{ta}} + \frac{2xAb}{C_{tb}}} = \frac{0,0114 + 0,0646}{\frac{0,0114}{336} + \frac{0,0646}{96}} = \frac{0,076}{0,00067} = 113,43 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/w}$$

b) Cálculos bloco de concreto DT 39

Resistência térmica da parede

Seção A (concreto)

$$A_a = 0,03 \times 0,19 = 0,0057 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,2035}{1,75} = 0,1162 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/w}$$

Seção B (concreto + câmara de ar + concreto + câmara de ar + concreto)

$$A_b = 0,15 \times 0,19 = 0,0285 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} R_b &= \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} \\ &= \frac{0,03}{1,75} + 0,17 + \frac{0,03}{1,75} + 0,17 + \frac{0,03}{1,75} = 0,3914 \text{ (m}^2 \cdot \text{k)/w} \end{aligned}$$

Resistência da parede:

$$R_T = \frac{3x A_a + 2x A_b}{\frac{3x A_a}{R_a} + \frac{2x A_b}{R_b}} = \frac{3x 0,0057 + 2x 0,0285}{\frac{3x 0,0057}{0,1162} + \frac{2x 0,0285}{0,3914}} = \frac{0,0741}{0,2965} = 0,2927 (m^2 \cdot k)/w$$

$$R_T = \frac{3x A_a + 2x A_b}{\frac{3x A_a}{R_a} + \frac{2x A_b}{R_b}} = \frac{0,0171 + 0,057}{\frac{0,0171}{0,1162} + \frac{0,057}{0,3914}} = \frac{0,0741}{0,2965} = 0,2927 (m^2 \cdot k)/w$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,2927 + 0,04 = 0,4627 (m^2 \cdot k)/W$$

Transmitância térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,4627} = 2,16 w/(m^2 \cdot k)$$

Capacidade térmica da parede:

Seção A (concreto)

$$A_a = 0,03 \times 0,19 = 0,0057 m^2$$

$$C_{Ta} = (e.c.p)_{concreto} = 0,205 \times 1,00 \times 2400 = 492 kJ/m^2.K$$

Seção B (concreto + câmara de ar + concreto)

$$A_b = 0,15 \times 0,19 = 0,0285 m^2$$

$$C_T = \sum_{i=1}^3 (e_i \cdot C_i \cdot \rho_i) = (e.c.p)_{concreto} + (e.c.p)_{ar} + (e.c.p)_{concreto} + (e.c.p)_{ar} + (e.c.p)_{concreto}$$

Desprezando a capacidade térmica da câmara de ar, tem-se:

$$C_{Tb} = 0,03 \times 1,00 \times 2400 + 0 + 0,03 \times 1,00 \times 2400 + 0 + 0,03 \times 1,00 \times 2400 = 216 KJ/ (m^2.K)$$

Tem-se, então, a capacidade térmica da parede:

$$C_T = \frac{3xAa + 2xA b}{\frac{3xAa}{C_{ta}} + \frac{2xA b}{C_{tb}}} = \frac{0,0171 + 0,057}{\frac{0,0171}{492} + \frac{0,057}{216}} = \frac{0,0741}{0,000294} = 252,04 (m^2.k)/w$$

Pode-se concluir, por meio dos cálculos, que, mediante o aumento da espessura do bloco e adição de uma camada de ar, a resistência térmica total aumentou em 37,2%, resultando na redução de sua transmitância térmica (38%) e aumentando também a sua capacidade térmica em 122%. Os dados obtidos nas fórmulas foram aplicados e conferidos para a simulação computacional realizada.

4.3 A aplicação: simulação computacional no EnergyPlus

Neste trabalho, foi adotado o método de análise de desempenho térmico por meio de simulação computacional. Utilizou-se o software EnergyPlus (versão 9.3.0) e a edificação modelada por meio do SketchUp Pro (versão 2016) através do plug-in Euclid (versão 9.4.3) que faz a conexão com o EnergyPlus. A pesquisa objetivou avaliar o comportamento térmico da edificação com a variação do componente bloco de concreto em determinadas paredes da edificação e analisou o desempenho do novo bloco desenvolvido neste estudo.

Para viabilizar a coleta de dados, como a temperatura, foram realizadas simulações computacionais aplicando diferentes configurações do emprego do bloco na edificação.

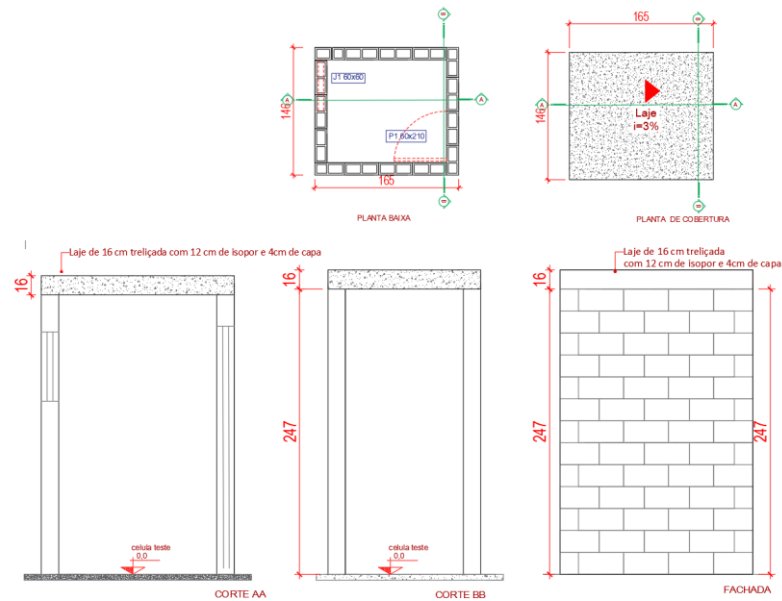
4.3.1 Projeto

Para a simulação, três projetos foram desenvolvidos. Os projetos possuem as mesmas dimensões, apenas com configurações de paredes diferentes (Figuras 27, 28, 29 e 30).

- Projeto 1 – Edificação com as 4 (quatro) paredes compostas pelo Bloco Padrão da Família 39 concreto convencional;

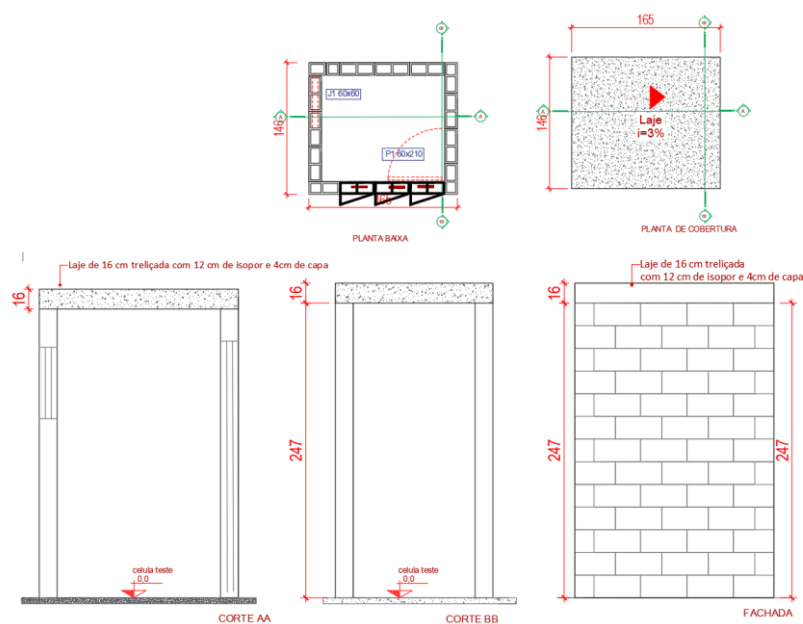
- Projeto 2 – Edificação com as 3 (três) paredes compostas pelo Bloco Padrão da Família 39 concreto convencional e 1 (uma) parede composta pelo Bloco DT39 concreto convencional;
- Projeto 3 – Edificação com as 4 (quatro) paredes compostas pelo Bloco DT39 concreto convencional.

Figura 27 – Proposta esquemática do projeto 1



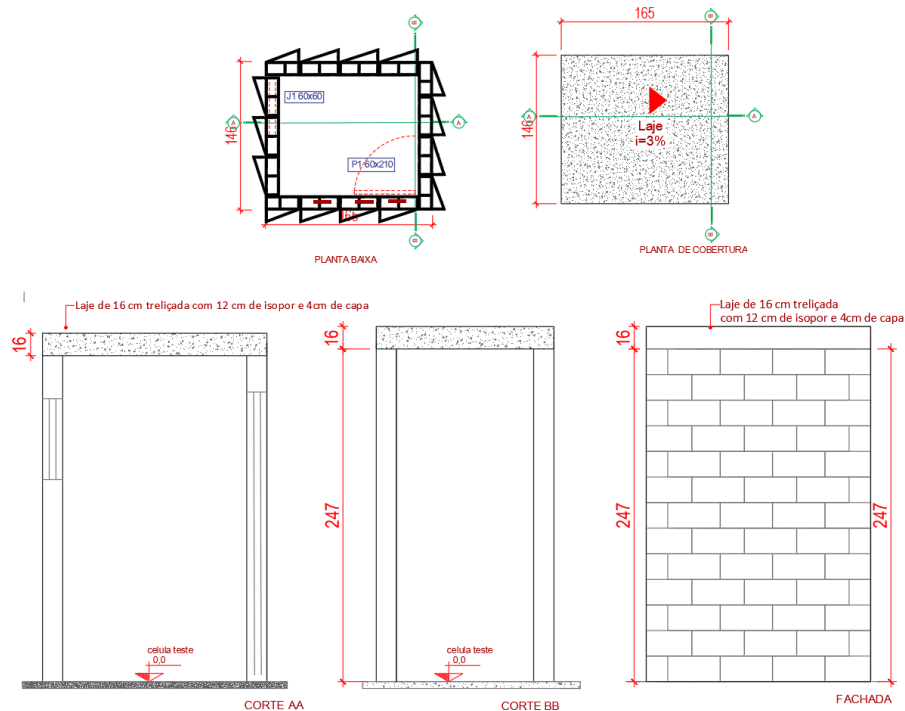
Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 28 – Proposta esquemática do projeto 2



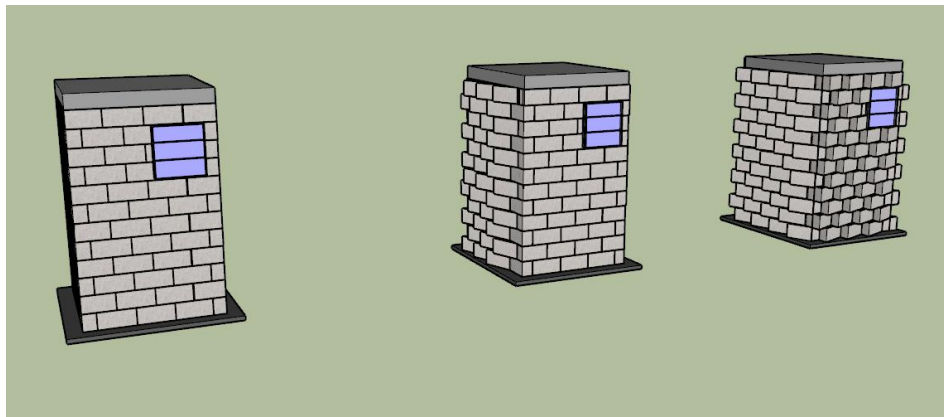
Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 29 – Proposta esquemática do projeto 3



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 30 – Volumetria das células teste



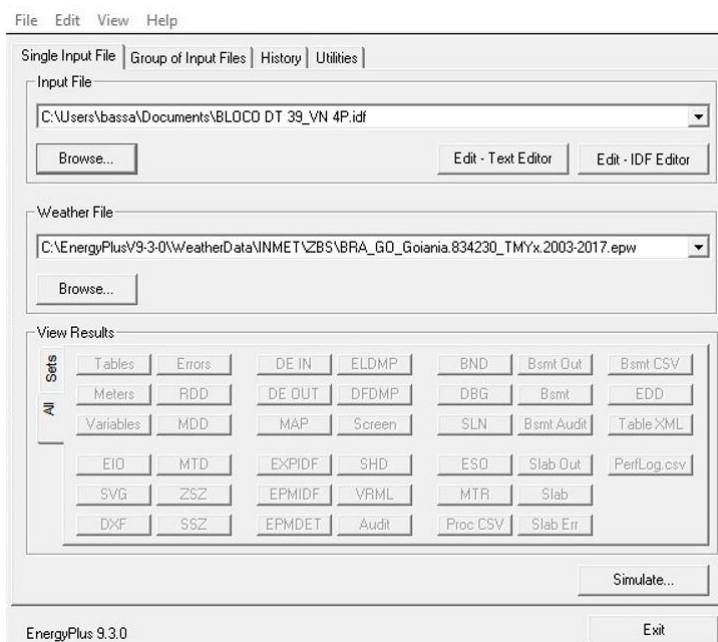
Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

4.3.2 Arquivo climático e localização

A simulação foi realizada como se a edificação fosse construída na fábrica da Concrefato, localizada em Aparecida de Goiânia-GO, município situado no estado de Goiás, Brasil. Na referida empresa foram realizados os ensaios dos blocos. Como a cidade não possui arquivo climático, a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021) afirma que

deve ser utilizado o arquivo climático de uma cidade próxima com clima semelhante. Destarte, para a simulação, foi utilizado o arquivo climático de Goiânia (Figura 31).

Figura 31 – Dados de entrada do arquivo climático



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (Programa EnergyPlus, 2021)

O clima de Aparecida de Goiânia, de acordo com a classificação de Koëppen, é do tipo tropical, possui um regime de chuvas bem definido, com estação quente-seca (maio a outubro) e estação quente-úmida (novembro a janeiro). Nos meses de fevereiro, março e abril, as chuvas são moderadas e marcam uma transição entre os períodos quente-seco e quente úmido. No mês de setembro, o mês mais quente do ano, a temperatura média é de 25.9°C. A temperatura mais baixa de todo o ano é em junho, sendo a temperatura média de 19,9°C. (CLIMA-DATE, 2019).

A orientação geográfica da edificação foi adotada para sua condição crítica, com as paredes com o bloco desenvolvido voltadas para o oeste, ou seja, as edificações modeladas recebem a mesma intensidade de radiação solar e ventos para que possuam as mesmas condições climáticas (Figuras 32, 33 e 34).

Figura 32 – Implantação Concrefato (Aparecida de Goiânia-GO)



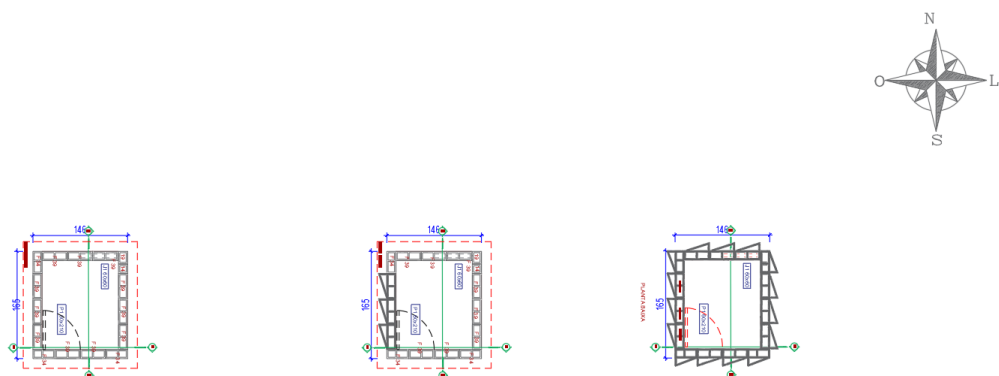
Fonte: Google Earth (2021)

Figura 33 – Implantação Concrefato com localização das edificações simuladas



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 34 – Edificações em relação ao Norte



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

4.3.3 Planejamento de ocupação

De acordo com a norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021), o padrão de ocupação é o número de horas em que determinado ambiente é ocupado, levando em consideração a dinâmica do imóvel para dias e finais de semana. A correta configuração desse item no EnergyPlus é de extrema importância e interfere diretamente nas cargas térmicas oriundas de pessoas, iluminação e equipamentos elétricos.

Para a simulação, a edificação foi considerada como dormitório, ou seja, o seu período de uso segue a taxa metabólica e padrões de ocupação diários dos Ambientes de Permanência Prolongada (APP) presentes na norma (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por área de superfície corporal W/m²	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal W	Fração radiante
Dormitório	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
Sala	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30
Uso misto	00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2021)

Tabela 9 – Padrões de ocupação diários dos APP

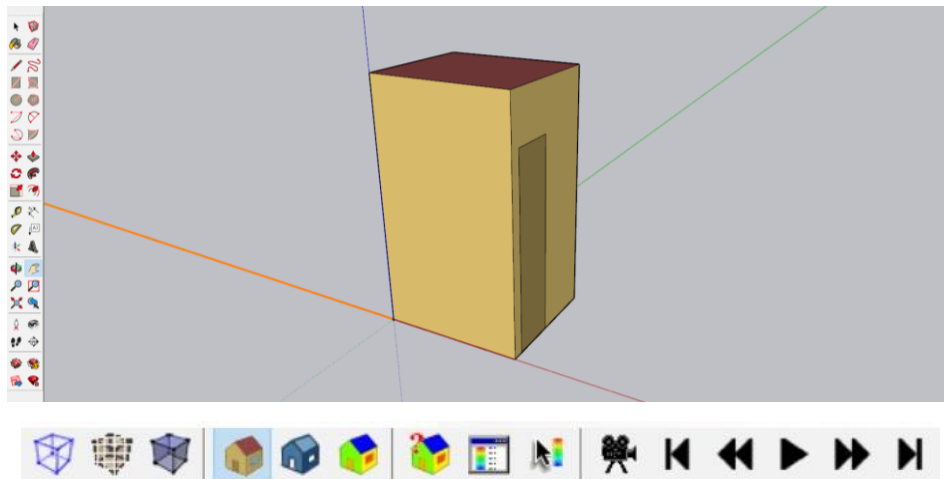
Horário	Ocupação		
	Dormitório %	Sala %	Uso misto %
00:00 – 00:59	100	0	100
01:00 – 01:59	100	0	100
02:00 – 02:59	100	0	100
03:00 – 03:59	100	0	100
04:00 – 04:59	100	0	100
05:00 – 05:59	100	0	100
06:00 – 06:59	100	0	100
07:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 08:59	0	0	0
09:00 – 09:59	0	0	0
10:00 – 10:59	0	0	0
11:00 – 11:59	0	0	0
12:00 – 12:59	0	0	0
13:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 14:59	0	50	50
15:00 – 15:59	0	50	50
16:00 – 16:59	0	50	50
17:00 – 17:59	0	50	50
18:00 – 18:59	0	100	100
19:00 – 19:59	0	100	100
20:00 – 20:59	0	100	100
21:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 22:59	100	0	100
23:00 – 23:59	100	0	100
NOTA 1 Considerar a quantidade de dois ocupantes (100 % da ocupação) por dormitório existente na edificação, excluindo-se as dependências de empregados. NOTA 2 O valor total (100 %) de ocupantes da sala é determinado em função do número de dormitórios. Para cada dormitório, considerar dois ocupantes na sala, respeitando o limite máximo de quatro ocupantes. Na ocorrência de maior número de ocupantes, estes são desconsiderados no período de ocupação da sala, respeitando-se o limite de quatro ocupantes. NOTA 3 Na condição de uso misto, o valor de ocupação igual a 100 % é equivalente a dois ocupantes no APP.			

Fonte: ABNT NBR 15.575-1 (2021)

4.3.4 Elementos construtivos das superfícies

As modelagens das edificações foram realizadas por meio do software SketchUp e modelagem executada através do plugin Euclid, que faz a conexão com o EnergyPlus, como já mencionado anteriormente (Figura 35).

Figura 35 – Modelagem da edificação no SketchUp através do plugin Euclid



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Primeiramente foi configurado o Modelo Referência conforme exigência da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2021) (Figura 36). No programa, é necessário configurar cada material específico e inserir as suas propriedades, sendo elas:

- Espessura
- Condutividade
- Densidade
- Calor específico
- Absorção térmica
- Absorção solar
- Absorção visível

Figura 36 – Configuração da construção do Modelo Referência

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Floor	Wall	Wall2	Roof	Door	Window
Outside Layer		Concreto (10cm)	Concreto (10cm)	Concreto (10cm)	Fibrocimento_6mm	Aco_ferro_fundido	Clear_3mm
Layer 2							
Layer 3							

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Para a modelagem do Modelo Referência, os seguintes materiais foram configurados (Figura 37):

- Objeto 1 – Piso: concreto 10 cm
- Objeto 2 – Parede concreto 10 cm

- Objeto 3 – Parede concreto 10 cm
- Objeto 4 – Cobertura: fibrocimento 6mm
- Objeto 5 – Porta de ferro: porta de ferro (2,10x0,60)
- Objeto 6 – Janela de vidro: (0,60x0,60)

Figura 37 – Configuração dos materiais do Modelo Referência

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Aco_ferro_fundido	Concreto (10cm)	Fibrocimento_6mm
Roughness		Smooth	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0,03	0,1	0,006
Conductivity	W/m-K	55	1,75	0,65
Density	kg/m3	7800	2200	1700
Specific Heat	J/kg-K	460	1000	840
Thermal Absorptance		0,25	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,25	0,58	0,65
Visible Absorptance		0,25	0,58	0,65

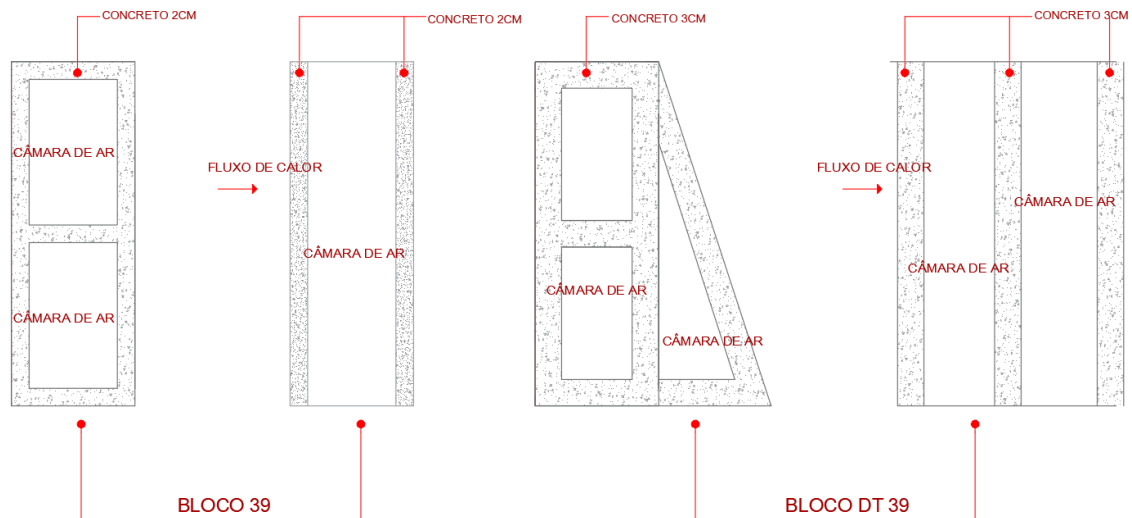
Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Após a inserção dos dados do Modelo Referência, foi ajustada a modelagem do Modelo Real:

- Objeto 1 – Piso: solo radier 5 cm
- Objeto 2 – Parede bloco de concreto da família 39 (19x39x14)
- Objeto 3 – Bloco de concreto DT39
- Objeto 4 – Cobertura: laje de 16 cm treliçada com 12 cm de isopor e 4 cm de capa
- Objeto 5 – Porta de ferro: porta de ferro (2,10x0,60)
- Objeto 6 – Janela de vidro: (0,60x0,60)

Como o programa utilizado reconhece apenas camadas homogêneas dispostas transversalmente ao sentido do fluxo de calor, não reconhecendo blocos devido à sua geometria vazada, é necessário realizar, na aba *construction* (na qual são definidos os componentes construtivos), a composição dos materiais para a construção dos blocos de concreto, construindo-o por camada. Para os blocos de concretos, foram configuradas camadas (Figura 38) que podem ser analisadas pela imagem do EnergyPlus através dos objetos 2 e 3 (Figura 39).

Figura 38 – Composição dos materiais para a construção dos blocos de concreto



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 39 – Configuração da construção para a utilização do Bloco DT 39

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Floor	Wall	Wall2	Roof	Door	Window
Outside Layer		Radier (15cm)	Concreto (2cm)	Concreto (3cm)	Laje_capa (4cm)	Aco_ferro_fundido (3cm)	Clear_3mm
Layer 2			Camada ar H > 5 cm	Camada ar H > 5 cm	Laje_isopor (12cm)		
Layer 3			Concreto (2cm)	Concreto (3cm)			
Layer 4				Camada ar H 2-5 cm			
Layer 5				Concreto (3cm)			
Layer 6							
Layer 7							

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Porém, antes dessa configuração de camadas, foi preciso colocar as propriedades térmicas de cada material. Todos os valores foram retirados da norma NBR 15220-2 (ABNT, 2003) (Figura 40).

Figura 40 – Configuração dos materiais

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Concreto (2cm)	Concreto (3cm)	Laje_capa (4cm)	Laje_isopor (12cm)	Aco_ferro_fundido (3cm)	Radier (15cm)
Roughness		MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	Smooth	MediumRough
Thickness	m	0,02	0,03	0,04	0,12	0,03	0,15
Conductivity	W/m-K	1,75	1,75	1,75	0,035	55	1,75
Density	kg/m3	2000	2000	2400	35	7800	2400
Specific Heat	J/kg-K	1000	1000	1000	142	460	1000
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,2	0,25	0,9
Solar Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,2	0,25	0,5
Visible Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,2	0,25	0,5

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Para a concepção da câmara de ar, foi necessário também consultar os valores recomendados pela norma (Tabela 10), tanto para o bloco de concreto convencional da família 39, como para no novo Bloco DT39. O concreto é uma superfície de alta

emissividade, por isso se utiliza os valores da primeira linha e coluna; no caso do bloco de concreto, o seu fluxo de calor é na horizontal. Para isso, foi configurado uma câmara de ar de 2,0 a 5,0 de espessura e outra para câmara de ar maior que 5 cm (Figura 41).

Tabela 10 – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} $m^2 \cdot K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		$\left \rightleftharpoons \right $	$\overleftarrow{\uparrow}$	$\overrightarrow{\downarrow}$
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Notas:
 1 ε é a emissividade hemisférica total.
 2 Os valores para câmaras de ar com uma superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.
 3 Para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas (exemplo C.6 do anexo C); desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies - a inferior - continuará limpa, sem poeira.
 4 Caso, no processo de cálculo, existam câmaras de ar com espessura inferior a 1,0 cm, pode-se utilizar o valor mínimo fornecido por esta tabela.

Fonte: NBR 15220-2 (2003)

Figura 41 – Configuração da câmara de ar

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Camada ar H 2-5 cm	Camada ar H > 5 cm
Thermal Resistance	$m^2 \cdot K/W$	0,16	0,17

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

O vidro foi um elemento importante a ser configurado, pois, no novo texto, a principal inovação foi a implementação do critério elementos transparentes na Parte 4 da normativa. Isso limitou a área de superfície de elementos transparentes nos Ambientes de Permanência Prolongada (APP), salas e dormitórios, em proporção à área de piso. No caso da simulação em questão, a janela é de 60x60, o que não compromete estes fatores. No entanto, a nova revisão exige a configuração de todas as suas propriedades, o que foi realizada como pode ser observado na configuração utilizada (Figura 42).

Figura 42 – Configuração do vidro

Field	Units	Obj1
Name		Clear_3mm
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0,003
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,09
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,14
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,32
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,16
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,25
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,26
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,39
Conductivity	W/m-K	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		1
Solar Diffusing		No
Young's modulus	Pa	72000000000
Poisson's ratio		0,22
Window Glass Spectral and Incident Angle Transmittance Data Set Table Name		
Window Glass Spectral and Incident Angle Front Reflectance Data Set Table Name		
Window Glass Spectral and Incident Angle Back Reflectance Data Set Table Name		

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Foi concretizada a simulação em duas condições de uso: com ventilação natural e sem ventilação natural (Figuras 43, 44 e 45). Na simulação em questão, foram modeladas janelas operáveis, com trocas de ar obtidas a partir da velocidade e da direção do vento fornecidas pelo arquivo climático, ao invés de uma taxa de renovação de ar fixa sem abertura das janelas, como era realizado anteriormente e com controle de aberturas por horas de ventilação. Foi ajustado também o ar-condicionado com portas e janelas sem passagens de ventilação, com o ar em funcionamento nas horas de uso da edificação.

Figura 43 – Configuração das esquadrias da ventilação natural

Field	Units	Obj1	Obj2
Surface Name		PORTA	JANELA
Leakage Component Name		abertura_porta	abertura_janela
External Node Name			
Window/Door Opening Factor, or Crack Factor	dimensionless	1	1
Ventilation Control Mode		NoVent	Temperature
Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule			sch_vn_tempcontrole_janela
Minimum Venting Open Factor	dimensionless	0	0
Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit	deltaC		
Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit	deltaC		
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit for Venting	deltaJ/kg		
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for Venting	deltaJ/kg		
Venting Availability Schedule Name			sch_vn_dorm
Occupant Ventilation Control Name			
Equivalent Rectangle Method			
Equivalent Rectangle Aspect Ratio	dimensionless		

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 44 – Configuração das esquadrias sem ventilação natural com ar-condicionado

Field	Units	Obj1	Obj2
Surface Name		PORTA	JANELA
Leakage Component Name		abertura_porta	abertura_janela
External Node Name			
Window/Door Opening Factor, or Crack Factor	dimensionless	1	1
Ventilation Control Mode		NoVent	NoVent
Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule			
Minimum Venting Open Factor	dimensionless	0	0
Indoor and Outdoor Temperature Difference Lower Limit	deltaC		
Indoor and Outdoor Temperature Difference Upper Limit	deltaC		
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Lower Limit For	deltaJ/kg		
Indoor and Outdoor Enthalpy Difference Upper Limit for	deltaJ/kg		
Venting Availability Schedule Name			
Occupant Ventilation Control Name			
Equivalent Rectangle Method			
Equivalent Rectangle Aspect Ratio	dimensionless		

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Figura 45 – Configuração do funcionamento do ar-condicionado

[0006] Schedule:Compact		Explanation of Object and Current Field					
[0004] Material		Object Description: Irregular object. Does not follow the usual definition for fields. Fields A3... are: Through: Date For: Applicable days (ref: Schedule:Week:Compact) Interpolate: Average/Linear/No (ref: Schedule:Day:Interval) -- optional, if not used will be "No" Until: <Time> (ref: Schedule:Day:Interval)					
[0001] WindowMaterial:Glazing							
[0007] Construction							
[0001] GlobalGeometryRules							
[0001] Zone							
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		sch_illum_dorm	sch_ativ_dorm	sch_ocup_dorm	sch_vn_tempcontrol_janela	sch_vn_dorm	
Schedule Type Limits Name		on_off	atividade	ocupacao	faixa_temp	on_off	
Field 1	varies	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	
Field 2	varies	For: AllDays	For:AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	
Field 3	varies	Until: 06:00	Until: 24:00	Until: 08:00	Until: 24:00	Until: 8:00	
Field 4	varies	0	81	1	19	1	
Field 5	varies	Until: 08:00		Until: 22:00		Until: 22:00	
Field 6	varies	1		0		0	
Field 7	varies	Until: 22:00		Until: 24:00		Until: 24:00	
Field 8	varies	0		1		1	
Field 9	varies	Until: 24:00					
Field 10	varies	1					
Field 11	varies						

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Após a inserção de todos esses dados, a simulação foi rodada e concluída com sucesso. Os arquivos, então, foram exportados em forma de texto e exportados para o Excel, sendo apresentados no próximo capítulo.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os ensaios realizados nos blocos, os valores alcançados nas fórmulas e os dados de exportação gerados de hora em hora ao longo de todo o ano.

Os elementos exportados possibilitaram obter dados que geraram os valores para o percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFT), para a temperatura operativa anual máxima e mínima da Unidade Operacional (UH) (Tomáx e Tomín) e para a carga térmica total (CgTT). Esses dados foram transformados em gráficos para a apresentação do resultado.

5.1 Resultados das características físicas

Após o valor em Mega Pascal (Mpa) dos blocos ensaiados, concluiu-se que esses elementos obedeciam às condições mínimas que a norma NBR 6136 (ABNT, 2016) exige para o uso de blocos de concreto classe “A” (Tabelas 11 e 12). O bloco DT 39 apresentou maior resistência devido a sua área ser maior, e no ensaio de prisma sua porcentagem também foi maior, ou seja o bloco adaptado se mostrou mais eficiente.

Tabela 11 – Resultado resistência à compressão

fbk – bloco tradicional (MPa)	fbk – bloco adaptado (MPa)
3,6	5,3
3,8	6,1
3,6	6,2
3,8	6,3
3,9	5,8
Média= 3,7 MPa	Média= 94 Mpa

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Tabela 12 – Resultado ensaio prisma

fpk – bloco tradicional (MPa)	fpk – bloco adaptado (MPa)
2,5	4,9
2,8	5,1
2,7	5,2
2,8	5,5
2,6	4,5
Média= 2,68 Mpa (71,7%)	Média= ,04 Mpa (84,8%)

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Outro ponto positivo do bloco é sua esbelteza, o índice limite sobe de 24 para 48, ou seja o bloco tradicional permite um pé direito de 336cm não armado e 420 cm com armação, o bloco DT 39, com adaptação da seção, permite dobrar o pé direito, o que gera um impacto direto na ventilação natural e na temperatura do ambiente.

Através dos cálculos realizados, pode-se concluir que, para os parâmetros da ABNT NBR 15.220-3 (2003), o novo bloco demonstrou uma significativa melhora no critério resistência térmica (37,2%) e capacidade térmica (122%). O bloco convencional apresenta sua transmitância acima do que a norma recomenda; por sua vez, o novo bloco (DT 39) apresenta o valor de transmitância exigido em norma (paredes pesadas U menor ou igual a 2,20) (Tabela 13). Sendo assim, as melhorias realizadas na geometria favorecem o desempenho térmico do bloco (Tabela 14).

Tabela 13 – Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação externa

Vedações externas		Transmitância térmica - U $W/m^2.K$	Atraso térmico - φ Horas	Fator solar - FS_o %
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\varphi \leq 4,3$	$FS_o \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\varphi \leq 4,3$	$FS_o \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \geq 6,5$	$FS_o \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\varphi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\varphi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\varphi \geq 6,5$	$FS_o \leq 6,5$

NOTAS
 1 Transmitância térmica, atraso térmico e fator solar (ver 02:135.07-001/2)
 2 as aberturas efetivas para ventilação são dadas em percentagem da área de piso em ambientes de longa permanência (cozinha, dormitório, sala de estar).
 3 No caso de coberturas (este termo deve ser entendido como o conjunto telhado maisático mais forro), a transmitância térmica deve ser verificada para fluxo descendente.
 4 O termo "ático" refere-se à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.

Fonte: NBR 15220-3 (2003)

Tabela 14 – Resultado dos cálculos segundo a norma NBR 15220-3

Especificação Bloco	Resistência Térmica Total $(m^2.k)/W$	Transmitância Térmica $w/(m^2.k)$	Capacidade Térmica Total da parede $(m^2.k)/w$
Bloco Convencional	0,328	3,04	113,43
Bloco DT 39	0,455	2,20	252,04

Percentual de melhoria em relação ao bloco existente	37,2%	38%	122%
--	-------	-----	------

Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

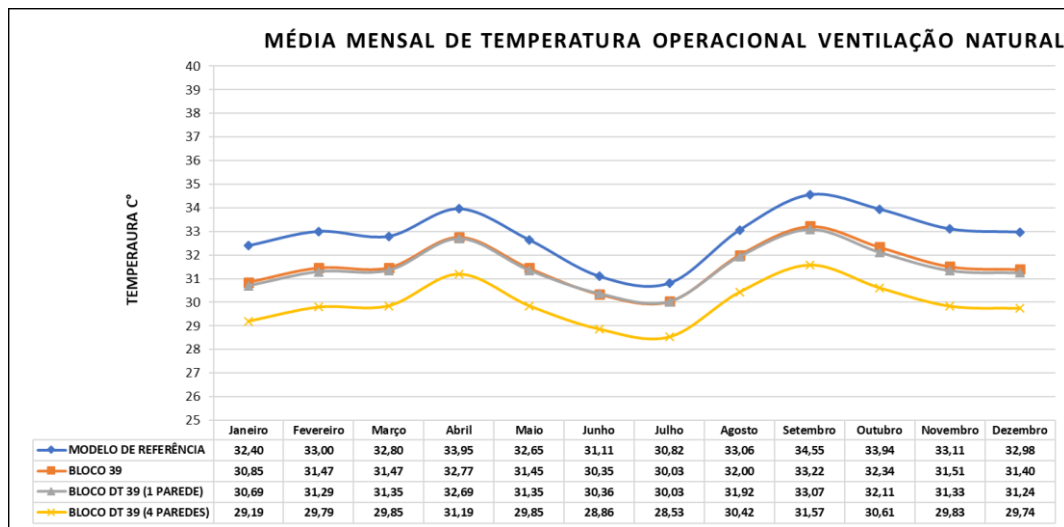
5.2 Resultados da simulação da edificação

Os resultados das simulações são mostrados sempre em comparação:

- **Modelo Referência:** com materiais específicos em normas como descrito na metodologia (parede de concreto 10 cm);
- **Bloco 39:** edificação com as 4 (quatro) paredes compostas pelo Bloco Padrão da Família 39 concreto convencional;
- **Bloco DT 39 (1 parede):** edificação com as 3 (três) paredes compostas pelo Bloco Padrão da Família 39 concreto convencional e 1 (uma) parede composta pelo Bloco DT39 concreto convencional;
- **Bloco DT 39 (4 paredes):** edificação com as 4 (quatro) paredes compostas pelo Bloco DT39 concreto convencional.

Como a simulação possibilita a exportação das temperaturas de hora em hora ao longo do ano, foi possível gerar os dados da média mensal das temperaturas. Sendo assim, pode-se visualizar que, ao longo do ano, a utilização do Bloco DT 39 proporciona temperaturas mais baixas, o que melhora o desempenho térmico da edificação. Quando utilizada apenas uma parede do novo bloco, as temperaturas diminuem ao longo de todo o ano, mas de uma forma menos expressiva. Quando a simulação é realizada com todas as paredes do Bloco DT39, há uma média mensal de temperatura menor ao longo de todos os meses do ano bem expressiva (Gráfico 1).

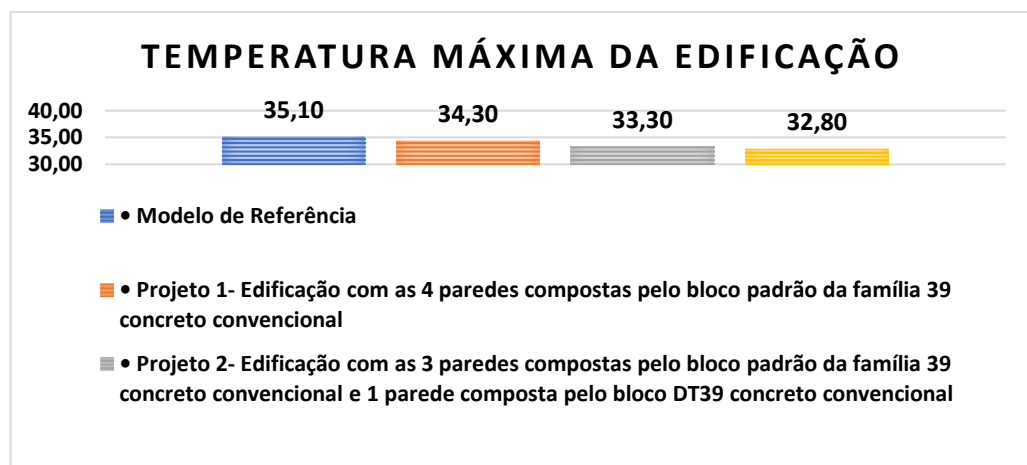
Gráfico 1 – Média mensal de temperatura operativa ventilação natural



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

No gráfico 2, é plausível observar a temperatura máxima de cada edificação, de modo que as temperaturas máximas aconteceram em setembro, ou seja, no mês mais quente do ano. Com a utilização do novo bloco, pode-se possível reduzir apenas 1 (um) grau dentro da edificação; por outro lado, com a utilização do Bloco DT39 em todas as paredes, consegue-se um ganho maior, o que possibilita uma temperatura máxima com diferença de 2 (dois) graus. É importante ressaltar que, nas edificações, foi utilizada apenas a laje, sem nenhum tipo de cobertura que pudesse potencializar, juntamente com o bloco, o desempenho da edificação. Tal decisão foi tomada a fim de que a edificação pudesse ser analisada em uma situação crítica.

Gráfico 2 – Temperatura máxima da edificação

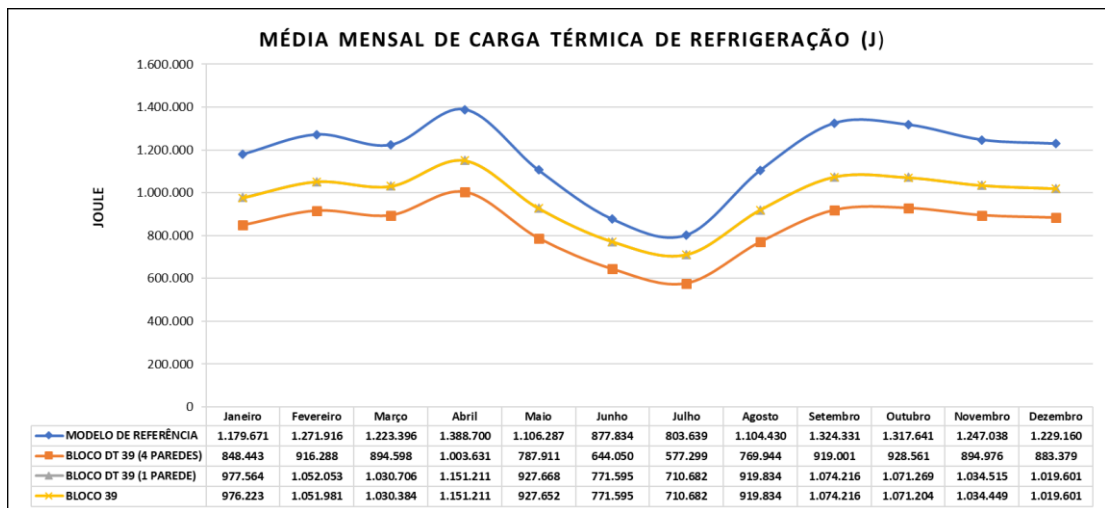


Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Como foi usado o arquivo climático de Goiânia, e esta apresenta uma temperatura média de 25,9, ela se enquadra no intervalo 1 (um) da norma, sendo necessário simular a carga térmica de refrigeração total do Ambiente de Permanência Prolongada. A simulação gera os dados de carga térmica da unidade habitacional de hora em hora, sem o uso da ventilação natural, e com temperaturas operativas dentro dos limites determinados pela norma.

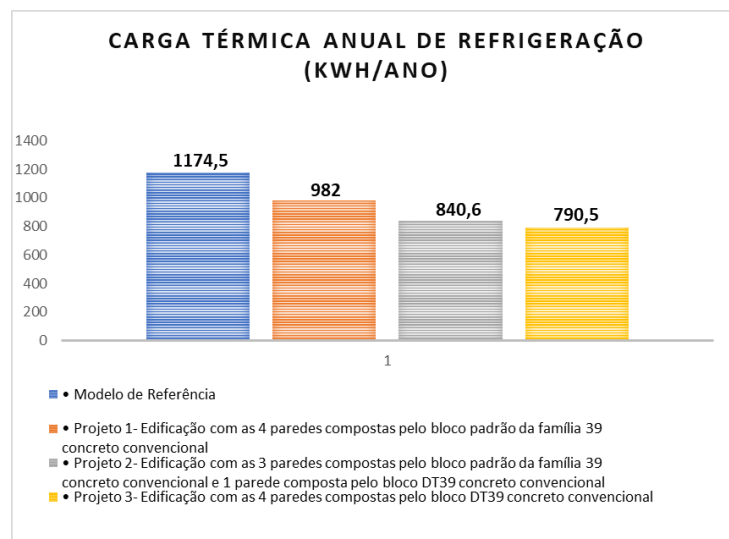
No gráfico da média mensal de carga de refrigeração (Gráfico 3) e no gráfico de valores da carga térmica anual (Gráfico 4), é permitido avaliar que, quando se utiliza o bloco de concreto nas quatro paredes na edificação, tem-se uma redução de carga térmica relevante.

Gráfico 3 – Média mensal de carga térmica de refrigeração



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Gráfico 4 – Carga térmica anual de refrigeração



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Comparando os gráficos das médias mensais de temperatura operacional com ventilação natural e o gráfico de média mensal de carga térmica, observa-se o impacto que os padrões de ocupação associados a fatores como ventilação, especificações de materiais e localização geográfica exercem na temperatura interna dos ambientes.

Os resultados indicam que o novo bloco contribui para um melhor desempenho térmico das edificações simuladas.

5.2.1 Comparações das simulações de acordo com a norma

A partir dos resultados gerados pela simulação e dos cálculos alcançados por meio de planilhas automatizadas, foi feito o diagnóstico de desempenho térmico da unidade habitacional de acordo com o procedimento de simulação computacional.

Essa tabela de diagnóstico é disponibilizada pela norma NBR 15575-1(ABNT, 2021), de maneira que é sempre recomendado preencher os valores de referência, que são aqueles realizados na simulação através do Modelo Referência e ao lado dos valores do Modelo Real.

Para atendimento dos níveis intermediário e superior, foram seguidos o critério da Tabela 15 presente na norma NBR 15575-1(ABNT, 2021), em que a avaliação desse nível se baseia no percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFTUH) e de redução da carga térmica total (RedCgTT) do Modelo Real em relação ao Modelo Referência. Ambos são analisados em comparação aos valores mínimos estabelecidos.

Tabela 15 – Critérios para o atendimento dos níveis de desempenho térmico intermediário e superior

Nível de desempenho	Critérios
Intermediário (I)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}^a$, $TomáX_{UH,real} \leq TomáX_{UH,ref} + \Delta Tomáx$, $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$ e $RedCgTT \geq RedCgTT_{min}^b$
Superior (S)	$\Delta PHFT \geq \Delta PHFT_{min}$, $TomáX_{UH,real} \leq TomáX_{UH,ref} + \Delta Tomáx$, $Tomín_{UH,real} \geq Tomín_{UH,ref} - \Delta Tomín$ e $RedCgTT \geq RedCgTT_{min}$
^a $\Delta PHFT_{min}$ é obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior. ^b $RedCgTT_{min}$ é obtido pela Tabela 20, para o nível intermediário, e pela Tabela 21, para o nível superior. Deve-se adotar $\Delta Tomáx$ igual a 2 °C para as UH unifamiliares e UH em edificações multifamiliares localizadas no pavimento de cobertura. Para as UH em edificações multifamiliares localizadas nos pavimentos térreo ou tipo, deve-se adotar $\Delta Tomáx$ igual a 1 °C. Deve-se adotar $\Delta Tomín$ igual a 1 °C para todas as UH avaliadas.	

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2021)

- Projeto 1 – Edificação com as 4 (quatro) paredes compostas pelo Bloco Padrão da Família 39 concreto convencional (Tabela 16)

Tabela 16 – Comparação Bloco DT 39 x Referência NBR 15575 (ABNT, 2021)

Características da Unidade Habitacional (UH)			
Tipologia	Identificação da UH	Quantidade de APPs	Superfícies expostas
(X) Unifamiliar	100	1	(X) Piso (X) Fachadas Sul, Norte, Leste e Oeste
() Multifamiliar	Pavimento	Ap,UH (m²)	
	1	1,6164	
Características dos Ambientes de Permanência Prolongada (APPs)			
Identificação do APP	1		
Tipo de uso	() Sala (X) Dormitório		
Ap,UH (m²)	1,6164		
Diagnóstico de Desempenho Térmico dos APPs			
Parâmetros	BLOCO 39	REFERÊNCIA	
Identificação do APP	1	1	
PHFTAPP(%)	48,1	45,7	
TomáxAPP (°C)	34,3	35,1	
TominAPP (°C)	21,5	21,3	
CgTRAPP (kWh/ano)	982,0	1174,5	
CgTAAPP (kWh/ano)	0,0	0,0	
CgTTAPP (kWh/ano)	982,0	0,0	
Diagnóstico de Desempenho Térmico da UH			
Parâmetros	BLOCO 39	REFERÊNCIA	Atendimento ao Nível Mínimo
PHFTUH(%)	48,1	45,7	Atende
TomáxUH (°C)	34,3	35,1	Atende
TominUH (°C)	21,5	21,3	Não se aplica
CgTRUH (kWh/ano)	982,0	1174,5	Não se aplica
CgTAUH (kWh/ano)	0,0	0,0	Não se aplica
CgTTUH (kWh/ano)	982,0	1174,5	Não se aplica
CgTTUH/Ap,UH (kWh/ano.m²)	607,5	726,6	Não se aplica
Diagnóstico do Nível de Desempenho Térmico da UH			
Nível Intermediário			
Critério	ΔPHFT (%)	ΔPHFTmín (%)	Atendimento
ΔPHFT ≥ΔPHFTmín	2,4	18,5	Não atende
Critério	RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%)	Atendimento
RedCgTT ≥RedCgTTmín	16,4	0	Atende
Nível Superior			
Critério	ΔPHFT (%)	ΔPHFTmín (%)	Atendimento
ΔPHFT ≥ΔPHFTmín	2,4	18,5	Não atende
Critério	RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%)	Atendimento
RedCgTT ≥RedCgTTmín	16,4	55	Não atende
Nível de desempenho térmico obtido pela UH:		Mínimo	

O Bloco 39 atende ao nível mínimo de desempenho em todos os parâmetros. Apesar de os seus valores estarem melhor do que os do Modelo Referência, ele não obedece ao critério de horas de conforto necessário para satisfazer o indicador do nível intermediário, ou seja, o seu percentual de conforto é menor do que o mínimo exigido, sendo 2,4 %, sabendo-se que, para adequar-se a esse percentual, deveria ser maior do que 18,5 %, que é a porcentagem de referência.

- Projeto 2 – Edificação com as 3 (três) paredes compostas pelo Bloco Padrão da Família 39 concreto convencional e 1 (uma) parede composta pelo Bloco DT39 concreto convencional (Tabela 17)

Tabela 17 – Comparação Bloco DT 39 (3 Paredes) x Referência NBR 15575 (ABNT, 2021)

Características da Unidade Habitacional (UH)			
Tipologia	Identificação da UH	Quantidade de APPs	Superfícies expostas
(X) Unifamiliar () Multifamiliar	100	1	(X) Piso
	Pavimento	Ap,UH (m²)	(X) Fachadas Sul, Norte, Leste e Oeste
	1	1,6164	
Características dos Ambientes de Permanência Prolongada (APPs)			
Identificação do APP	1		
Tipo de uso	() Sala (X) Dormitório		
Ap,UH (m²)	1,6164		
Diagnóstico de Desempenho Térmico dos APPs			
Parâmetros	BLOCO DT 39 1P	REFERÊNCIA	
Identificação do APP	1	1	
PHFTAPP(%)	67,3	45,7	
TomáxAPP (°C)	33,3	35,1	
TominAPP (°C)	20,3	21,3	
CgTRAPP (kWh/ano)	840,6	1174,5	
CgTAAPP (kWh/ano)	0,0	0,0	
CgTTAPP (kWh/ano)	840,6	0,0	
Diagnóstico de Desempenho Térmico da UH			
Parâmetros	BLOCO DT 39 1P	REFERÊNCIA	Atendimento ao Nível Mínimo
PHFTUH(%)	67,3	45,7	Atende
TomáxUH (°C)	33,3	35,1	Atende
TominUH (°C)	20,3	21,3	Não se aplica
CgTRUH (kWh/ano)	840,6	1174,5	Não se aplica
CgTAUH (kWh/ano)	0,0	0,0	Não se aplica
CgTTUH (kWh/ano)	840,6	1174,5	Não se aplica
CgTTUH/Ap,UH (kWh/ano.m²)	520,0	726,6	Não se aplica
Diagnóstico do Nível de Desempenho Térmico da UH			
Nível Intermediário			
Critério	ΔPHFT (%)	ΔPHFTmín (%)	Atendimento
ΔPHFT ≥ΔPHFTmín	21,5	18,5	Atende
Critério	RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%)	Atendimento
RedCgTT ≥RedCgTTmín	28,4	0	Atende
Nível Superior			
Critério	ΔPHFT (%)	ΔPHFTmín (%)	Atendimento
ΔPHFT ≥ΔPHFTmín	21,5	18,5	Atende
Critério	RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%)	Atendimento
RedCgTT ≥RedCgTTmín	28,4	55	Não atende
Nível de desempenho térmico obtido pela UH:		Intermediário	

O projeto 2 obtém o nível intermediário de desempenho térmico pela unidade habitacional, tanto em relação ao percentual de horas de ocupação dentro de uma faixa de temperatura operativa (PHFTUH), quanto à redução da carga térmica total

(RedCgTT), indo para a análise de atendimento ao nível superior que só não atende devido à redução de carga térmica ser menor do que 55 %, apresentando um valor de 28,4%.

- Projeto 3 – Edificação com as 4 (quatro) paredes compostas pelo Bloco DT39 concreto convencional (Tabela 18)

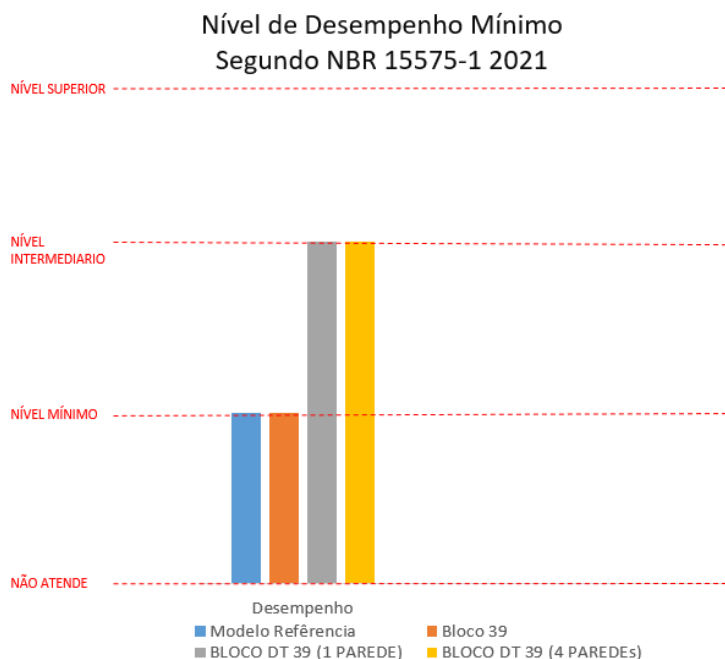
Tabela 18 – Comparação Bloco DT 39 (4 Paredes) x Referência NBR 15575 (ABNT, 2021)

Características da Unidade Habitacional (UH)			
Tipologia	Identificação da UH	Quantidade de APPs	Superfícies expostas
(X) Unifamiliar () Multifamiliar	100	1	(X) Piso
	Pavimento	Ap,UH (m²)	(X) Fachadas Sul, Norte, Leste e Oeste
	1	1,6164	
Características dos Ambientes de Permanência Prolongada (APPs)			
Identificação do APP	1		
Tipo de uso	() Sala (X) Dormitório		
Ap,UH (m²)	1,6164		
Diagnóstico de Desempenho Térmico dos APPs			
Parâmetros	BLOCO DT 39 4P		REFERÊNCIA
Identificação do APP	1		1
PHFTAPP(%)	77,4		45,7
TomáxAPP (°C)	32,8		35,1
TominAPP (°C)	20,0		21,3
CgTRAPP (kWh/ano)	790,5		1174,5
CgTAAPP (kWh/ano)	0,0		0,0
CgTTAPP (kWh/ano)	790,5		0,0
Diagnóstico de Desempenho Térmico da UH			
Parâmetros	BLOCO DT 39 4P	REFERÊNCIA	Atendimento ao Nível Mínimo
PHFTUH(%)	77,4	45,7	Atende
TomáxUH (°C)	32,8	35,1	Atende
TominUH (°C)	20,0	21,3	Não se aplica
CgTRUH (kWh/ano)	790,5	1174,5	Não se aplica
CgTAUH (kWh/ano)	0,0	0,0	Não se aplica
CgTTUH (kWh/ano)	790,5	1174,5	Não se aplica
CgTTUH/Ap,UH (kWh/ano.m²)	489,0	726,6	Não se aplica
Diagnóstico do Nível de Desempenho Térmico da UH			
Nível Intermediário			
Critério	ΔPHFT (%)	ΔPHFTmín (%)	Atendimento
ΔPHFT ≥ΔPHFTmín	31,7	18,5	Atende
Critério	RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%)	Atendimento
RedCgTT ≥RedCgTTmín	32,7	0	Atende
Nível Superior			
Critério	ΔPHFT (%)	ΔPHFTmín (%)	Atendimento
ΔPHFT ≥ΔPHFTmín	31,7	18,5	Atende
Critério	RedCgTT (%)	RedCgTTmín (%)	Atendimento
RedCgTT ≥RedCgTTmín	32,7	55	Não atende
Nível de desempenho térmico obtido pela UH:		Intermediário	

Isso também acontece com o Projeto 3, dado que atende ao nível de desempenho intermediário. Só não cumpre o nível de desempenho superior por conta de a porcentagem de redução de carga térmica ser menor. Mesmo apresentando valores melhores do que o Projeto 2, ele ainda mostra uma porcentagem de 32,7%, o que é menor do que o exigido para satisfazer o nível superior. Para que a edificação atendesse ao nível superior, sua porcentagem deveria ser maior que 55%.

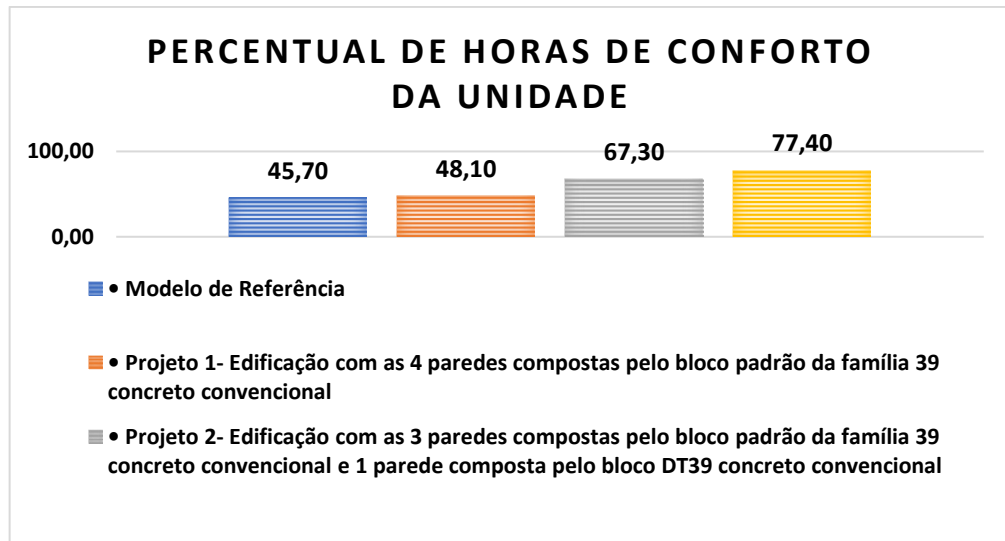
Sendo assim, é possível verificar que, ao alterar o elemento construtivo da parede, seja ela em uma parede (Projeto 2) ou nas quatro paredes da edificação (Projeto 3), foi possível modificar o seu nível de desempenho, saindo do nível mínimo para o nível intermediário. Isso quer dizer que as edificações, quando inseridas, melhoraram o percentual de conforto das edificações simuladas. Quando se utiliza apenas uma parede com o bloco de concreto, é possível ver um ganho de 39,9% de conforto se confrontado ao bloco de concreto 39. Por sua vez, do projeto que usa todas as paredes com o novo bloco comparado ao bloco 39 (Projeto 3), houve um aumento de 60% de conforto (Gráficos 5 e 6).

Gráfico 5 – Nível de desempenho mínimo



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

Gráfico 6 – Percentual de horas de conforto da unidade



Fonte: Marília Guimarães Rodrigues (2021)

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto, mostra-se indiscutível a necessidade do cumprimento dos requisitos prescritos nas normas ABNT NBR 15.220 (2003) e ABNT NBR 15.575 (2021), que conduziram a pesquisa. Suas diretrizes construtivas, determinação de propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos, além das novas mudanças na normativa 15575 (2021), tornaram possíveis a elaboração de simulações e análises térmicas em todo o território brasileiro de forma eficaz.

A alvenaria estrutural de bloco de concreto é um sistema construtivo racionalizado, o que permite uma construção rápida e com custos menores se comparado aos processos mais utilizados, entretanto apresenta como uma de suas principais desvantagens um desempenho térmico não satisfatório, principalmente quando comparado ao bloco cerâmico, sendo assim, ao adaptar a geometria do bloco de concreto percebeu-se um ganho significativo na transmitância térmica, capacidade térmica e resistência térmica o que representa um ganho no desempenho térmico quando aplicado na edificação, ou seja um ganho significativo para o sistema.

Dessa forma, o presente trabalho atingiu os objetivos a que se propôs, avaliando e analisando o desempenho térmico da alvenaria estrutural em bloco de concreto adaptado. A pesquisa esboçou a importância de se realizar simulação numérica não apenas para comparar diferentes componentes construtivos do sistema de alvenaria, mas também para analisar o desempenho térmico da edificação habitacional mediante as suas alterações.

O conhecimento a respeito de software computacionais, estes capazes de gerar perspectivas da edificação ainda na fase de projeto, traz inúmeras vantagens para a fase inicial do estudo, o que gera subsídios para a construção de protótipos e programas experimentais. Desse modo, é factível adequar as possibilidades construtivas da região com o propósito de atender ao nível desejado de desempenho térmico para a edificação.

Esperava-se um resultado mais expressivo no desempenho térmico da edificação com a nova geometria, todavia mesmo com o pouco ganho é possível modificar o nível de desempenho de mínimo para intermediário, o que torna o bloco DT 39 um elemento construtivo muito relevante para ser especificado nas edificações, principalmente em habitação de interesse social. Pois como apresentado na pesquisa,

com a utilização do bloco em apenas uma parede da edificação foi possível melhorar o percentual de conforto dentro da unidade e mudar seu nível de desempenho. Sendo assim, o novo bloco pode ser especificado nas habitações de interesse social com a função de melhorar o nível de desempenho da mesma, onde não é possível na maioria das vezes se ter o ar condicionado como estratégia de resfriamento da edificação.

Além de proporcionar melhorias no quesito desempenho térmico, o bloco apresenta novas possibilidades formais para a edificação, através de suas diferentes possibilidades de assentamento, o mesmo pode funcionar como uma fachada ventilada quando instalado na vertical e independente da posição do assentamento, o bloco proporciona movimento à fachada. Sendo assim, além da proposição de cumprir sua função estrutural e térmica, ele proporciona composições formais diferentes ao projeto arquitetônico.

Outra grande vantagem é sua esbeltez (o índice limite sobe de 24 para 48) que permite que o pé direito possa ser o dobro do sistema com o bloco convencional da família 39 (o bloco tradicional permite um pé direito de 336cm não armado e 420 cm com armação), o que gera um impacto direto na ventilação natural e na temperatura do ambiente. Logo, gera mais uma possibilidade de estratégia de resfriamento natural para o projeto. O bloco DT 39 também apresentou maior resistência devido a sua área ser maior, e no ensaio de prisma sua porcentagem também foi maior, ou seja o bloco adaptado se mostrou mais eficiente no ensaio de resistência a compressão.

No entanto, muitas outras possibilidades estão disponíveis e ainda podem ser estudadas, pois, apesar de o bloco de concreto DT 39 ter atingido o objetivo proposto, ele ainda ficou pesado. Enquanto o bloco de concreto convencional pesa 11kg, o novo bloco pesa 13,6kg, sendo uma desvantagem ao objeto de estudo, desvantagem que pode ser aprimorada.

Para trabalhos futuros, o Bloco DT 39 pode ser avaliado com outros materiais, utilizando-se, assim, a mesma geometria, entretanto com materiais diferentes, como o concreto celular, posto que, além de possuir um peso menor, ainda traz índices de condutividade abaixo do concreto convencional. Portanto, pode gerar resultados ainda melhores no quesito desempenho térmico.

Nessa perspectiva, outro componente com alto índice de sucesso para estudos futuros seria o bloco cerâmico, devido o mesmo possuir uma transmitância menor e um peso menor em relação ao bloco de concreto, sendo assim, com a adaptação da

geometria pode melhorar suas variáveis, apresentando um desempenho térmico ainda melhor.

Por fim, como sugestão final pode ser realizado o programa experimental com a construção das edificações simuladas para confirmação dos resultados obtidos na pesquisa e o mesmo pode ser simulado ou testado in loco em diferentes zonas bioclimáticas para ver em quais regiões o bloco tem potencial para ser utilizado, ressalta-se que a edificação física seria construída e serviria como afirmativa para os resultados aqui gerados. Não obstante, em razão da pandemia da Covid-19, a sua construção não foi realizada.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8215**: prismas de blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural: preparo e ensaio à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: desempenho térmico de edificações: Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

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: ABNT, 2005b.

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: ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15961-2**: execução e controle de obras – alvenaria estrutural – blocos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria – métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136**: blocos vazados de concreto simples para alvenaria — requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BASTOS, L. W. **Análise de custos dos desperdícios na construção civil**. 2015. 26 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BODACH, S.; HAMHABER, J. Energy efficiency in social housing: opportunities and barriers from a case study in Brazil. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7898–7910, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510006890>. Acesso em: 02 abr. 2021.

BORGES, F. M. **Sistema construtivo de habitação com parede de concreto**. 2011. 98 p. Projeto Final, Publicação n. 137-2011 (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis-GO, 2011.

BÜNEKER, A. de O. B. **Ventilação natural**. 2003. Monografia (Especialização em Arquitetura) – Centro Universitário Univates, Lajeado, 2003.

CAMACHO, J. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Ilha Solteira, SP: Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – NEPAE, 2006.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. 4 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CAVALHEIRO, O. P. Alvenaria estrutural: tão antiga e tão atual. **Jornal da ANICER**, Porto Alegre, p. 5, 31 jul. 1998.

CLIMA-DATE. **Clima Goiânia**. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/goias/goiania-2191/>. Acesso em: 14 out. 2021.

CRAWLEY, D. B. *et al.* EnergyPlus: energy simulation program. **ASHRAE Journal**, Atlanta, v. 42, p. 49-56, 2000.

DAVIS, L. W.; GERTLER, Paul J. Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. **PNAS**, v. 112, n. 19, p. 5962-5967, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1423558112>. Acesso em: 15 fev. 2021.

DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Ground Heat Transfer in EnergyPlus**. Documentation, EnergyPlusTM Version 8.6, Auxiliary Programs, p. 103-142, 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2015-2025)**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. p. 1-5.

FRANCO, J. T. Em detalhe: bloco cerâmico dissipador de calor. Tradução de Gabriel Pedrotti. **ArchDaily Brasil**, 14 jan. 2016. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/780208/em-detalhe-bloco-ceramico-termo-dissipador-desenvolvido-na-colombia>. Acesso em: 15 jun. 2018.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 8. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2016.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2015**: resultados preliminares. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/direi-2018/856-6-serieestatistica-e-informacoes-deficit-habitacional-no-brasil-20151810/file>. Acesso em: 22 out. 2021.

GONÇALVES, J. C. S.; MOURA, N. C. S.; KUNIOCHI, E. M. U. Avaliação de desempenho, simulação computacional e o projeto arquitetônico. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

LABEEE, 2020. **LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/NBR15575-2020>. Acesso em: 01 dez. 2021.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Florianópolis: UFSC/Departamento de Engenharia civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2014.

LANNA, C. A. F. Painel de normas, conheça a nova norma de alvenaria estrutural. **Revista Construção Mercado**, edição 106, maio 2010.

LIMA, T. **Vale a pena utilizar a alvenaria estrutural?** 2017. Disponível em: <https://www.sience.com.br/blog/alvenaria-estrutural/>. Acesso em: 24 out. 2018.

MELO, A. P.; WESTPHAL F. S.; MATOS, M. **Apostila do curso básico do programa Energyplus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, 2009.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MENDES, N.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. da. Building simulation in Brazil. In: **Seventh International IBPSA Conference**, 2001, Rio de Janeiro. Building Simulation. Florianópolis: Organizing Committee of Building Simulation 01, v.1 p. 3-14, 2001.

MORORÓ, M. S.; M.; ROMCY, N. M. S.; CARDOSO, D. R.; NETO, J. P. B. Proposta paramétrica para projetos sustentáveis de habitação de interesse social em ambiente BIM. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 27-44, out./dez. 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212016000400027&script=sci_abstract&lng=pt. Acesso em: 08 out. 2020.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. São Carlos, EdUFSCar, 2012.

PRONTOMIX. **Pavimentos e blocos de concreto**. Disponível em: <http://www.prantomix.com.br>. Acesso em: 24 de fev. 2020.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2003.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro**. 2012a. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/projetos/proposta-derevisao-do-zoneamento-bioclimatico-brasileiro>. Acesso em: 20 maio 2020.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Blocos de concreto para alvenaria em construções industrializadas**. 2007. 246 p. (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SANTESSO C. A.; MORAES, C. S. B.; SANTARINE, G. A.; GONÇALVES, J. C. Economia de energia através de estratégias passivas e ativas: um estudo para habitação de interesse social. **Espacios**, v. 38, n. 4, p. 23-38, 2017. Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a17v38n23/a17v38n23p23.pdf>. Acesso em: 25 set. 2020.

SANTOS, M. D. F. dos. **Técnicas construtivas em alvenaria estrutural**: contribuição ao uso. 1998. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 1998.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 289-303, jan./mar. 2017.

TAUIL, C. A.; NESE, F. J. M. **Alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2010.

THOMAZ, E. **Tecnologia, gerenciamento e qualidade na construção**. São Paulo: Pini, 2001.

TRINDADE, S. C.; PEDRINI, A.; DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37-58, out./dez. 2010.

TUBELO, R.; RODRIGUES, L.; GILLOTT, M.; SOARES, J. C. G. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**, v. 133, p. 213-227, abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318300507>. Acesso em: 14 out. 2021.

WAKE, B. Climate research for the twenty-first century. **Nature Climate Change**, v. 9, p. 183–185, 2019.

ZALESKI, C. B. **Materiais e conforto**: um estudo sobre a preferência por alguns materiais de acabamento e sua relação com o conforto percebido em interiores residenciais da classe média de Curitiba. 2006. 125 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.