



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

RAIMUNDO MIGUEL DA SILVA NETO

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE TÉRMICA EM PAINÉIS DE
VEDAÇÃO**

CARAÚBAS - RN
2018

RAIMUNDO MIGUEL DA SILVA NETO

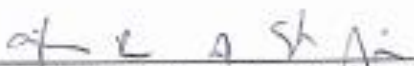
**MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE TÉRMICA EM PAINÉIS DE
VEDAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia civil da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro civil.

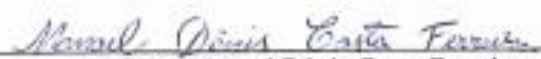
Orientador(a): **GILVAN BEZERRA DOS
SANTOS JUNIOR**

APROVADO EM: 17/04/13

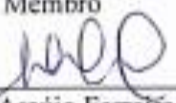
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Gilvan Bezerra dos Santos Junior
Presidente



Prof. Dr. Manoel Denis Costa Ferreira
Primeiro Membro



Profª. Ma. Leonete Cristina de Araújo Ferrelira Medeiros Silva
Segundo Membro

CARAÚBAS - RN
2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N586o NETO, RAIMUNDO MIGUEL DA SILVA.
MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE
TÉRMICA EM PAINÉIS DE VEDAÇÃO /
RAIMUNDO MIGUEL DA SILVA NETO. - 2018.
64 f. : il.

Orientador: GILVAN BEZERRA DOS SANTOS.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2018.

1. Conforto térmico. 2. Transmitância térmica.
3. Desempenho das edificações. I. SANTOS, GILVAN
BEZERRA DOS, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Gessival Miguel e a minha mãe Denigues Targino, por todo apoio durante esses 5 anos de dedicação. Obrigado por todo amor, carinho e inspiração! Amo vocês!

Agora, pois, ó nosso Deus, graças te damos, e louvamos o teu glorioso nome.

1 Crônicas 29:13.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todos os livramentos e todas as bênçãos alcançadas, rendo graças a Ele pela sua justiça. Por Ele e para Ele são todas as coisas.

Agradeço em especial aos meus pais, pois foram as peças-chaves para que esse sonho se tornasse realidade, obrigado por todo cuidado, amor, dedicação, empenho, pelas orações! Amo vocês incondicionalmente.

Agradeço aos meus irmãos Mônica Targino, Rubenick Targino e José Targino, por sempre estarem me apoiando e me ajudando no possível, a vocês meu muito obrigado.

Agradeço a minha noiva Mônica Aline, por ser meu porto seguro nas muitas vezes que pensei em desanimar nessa caminhada, e ela sempre chegava com uma palavra de apoio e incentivo. Agradeço pelas orações e pela paciência que teve comigo. Te amo, amor!

Agradeço ao meu orientador, professor Gilvan Bezerra, muito obrigado pela dedicação que teve comigo e por todo conhecimento repassado.

Aos professores, muito obrigado! Cada um teve seu papel na minha formação.

Aos amigos, que muito contribuiu para que eu chegasse até aqui, nessa vida não somos ninguém sozinhos! E eu tive prazer de encontrar ótimos amigos nessa caminhada. Em especial, agradeço aos amigos Pablo Peterson, Rodolfo Lopes, Jayro Junior, Lucas Lourenço! Irmãos que a universidade me deu.

A galera da vila universitária, vocês são “top’s” muito obrigado pelo apoio nesse tempo de convivência!

Aos amigos/irmãos da UMIC Umarizal, muito obrigado por todo apoio e incentivo!

RESUMO

Um dos desafios da construção civil é proporcionar um ambiente confortável, seguro e esteticamente agradável ao usuário, que seja capaz de satisfazer as necessidades do mesmo. E ligado a isso estão os diferentes estudos em busca de métodos e materiais que favoreça o melhor conforto nas edificações. Ao construir, o engenheiro deve atender a diferentes parâmetros legais e parâmetros ligados a qualidade e ao bem-estar dos usuários, atrelado a isso está o conforto térmico, que pode ser definido como sendo uma condição mental que expressa a satisfação com o ambiente que o cerca. Ter conforto térmico significa que o indivíduo em condições de roupas normais não se sente nem com frio nem com calor. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento térmico de diferentes painéis de vedação aplicados em obras de construção civil, através de modelagem numérica utilizando o software ABAQUS/CAE. Para análise, foram escolhidos 3 tipos de painéis de vedação, sendo o painel em concreto maciço de espessura de 10 cm, painel em alvenaria convencional de tijolos de 8 furos com espessura de 14 cm e por último foi analisado o painel de vedação em tijolos maciços aparente com espessura total da parede em 14 cm. Com isso, os resultados obtidos descreveram como o fluxo de calor percorre os painéis em análise. Sendo assim, tem-se que o painel em alvenaria convencional de tijolos de 8 furos foi o modelo que se manteve mais distante do valor limite de transmitância térmica, onde a diferença do valor calculado corresponde a 57,68% do limite da norma, isso se deu devido os vazios no interior da alvenaria (os furos) onde os mesmos estão preenchidos com ar, dessa forma possibilita uma menor passagem de calor. De modo geral, conclui-se que os três modelos analisados nesse trabalho atenderam os parâmetros de aceitação da NBR 15220-3:2005, no qual ao calcular a transmitância térmica de cada painel, obteve-se que todos estão a baixo do limite máximo de aceitação dos valores. E que o painel de concreto maciço da classe C25 está próximo do parâmetro que limita o uso, porém ainda atende a estratégia do zoneamento bioclimático da zona 8, no qual a cidade de Caraúbas/RN está caracterizada.

Palavras-chave: Conforto térmico; Transmitância térmica; Desempenho das edificações.

ABSTRACT

One of the challenges of civil construction is to provide a comfortable environmental, safe and nice aesthetically to user, that being capable of satisfying the necessity of the same. And connected to this, it is the different studies in search of methods and materials that favor the better comfort in the buildings. To build, the Engineer should to attend the different legal parameters and connected parameters to quality and to well-being of the user, attached to this, it is the thermal comfort, that can be defined as being a mental condition that express to satisfaction with the environmental that the close. Being thermal comfort means that the individual in conditions of normal clothes does not feel neither cold nor heat. Thus, this study has as objective to evaluate the thermal behavior of different panels of seal applied in civil construction work, through of numerical modeling using the software ABAQUS/CAE. For analyzing, it were choose 3 types of seal panels, being the panel in massive concrete of thickness of 10 cm, panel in conventional masonry of bricks 8 holes with thickness of 14 cm and for last was analyzed the panel of seal in apparent solid bricks with total thickness of wall in 14 cm. Thus, the results obtained describe as the heat flow go through the panel in analyze. Being thus, it haves that the panel in conventional masonry of bricks of 8 holes was the model that kept more distant of the limit value of thermal transmittance, where the calculated value corresponds to 57,68% of the limit of standard, this it occurred due to empty in the interior of the masonry (the holes) where the same are filled with air, of this form enables a less passage of heat. Altogether, it concludes that three models analyzed in this study attended the parameters of acceptance of NBR 15220-3:2005, where to calculate the thermal transmittance of each panel, it obtain that all are below of maximum limit of acceptance of the values. And that the panel of massive concrete of the class C25 it is next of the parameter that limits the use; however, still attend the strategy of the bioclimatic zoning 8, to which the city of Caraúbas is characterized.

Key words: Thermal comfort; Thermal transmittance; Performance of buildings.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MAPA DAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS DO BRASIL.	18
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO DA TÉCNICA CONSTRUTIVA ADOTADA.	20
FIGURA 3: ABERTURA (H) EM BEIRAIS, PARA VENTILAÇÃO DO ÁTICO	22
FIGURA 4: VEDAÇÃO VERTICAL EM PAINÉIS DE CONCRETO MOLDADOS IN LOCO.	24
FIGURA 5: VEDAÇÃO VERTICAL EM BLOCO DE CONCRETO.....	25
FIGURA 6: VEDAÇÃO VERTICAL EM BLOCO CERÂMICO CONVENCIONAL.	26
FIGURA 7: PAINÉIS EM GESSO ACARTONADO – DRYWALL. A) PROCESSO DE INSTALAÇÃO DE PLACAS DE GESSO ACARTONADO – DRYWALL; B) PAREDES EM GESSO ACARTONADO – DRYWALL EM UMA RESIDÊNCIA.	27
FIGURA 8: PAINÉIS DE VEDAÇÃO EM PLACAS ISOTÉRMICAS. A) PLACAS DE PAINÉIS ISOTÉRMICOS; B) CONSTRUÇÃO EM PAINEL ISOTÉRMICOS.	28
FIGURA 9: MALHA DE ELEMENTOS FINITOS PARA PROBLEMA PLANO.....	29
FIGURA 10: DIFERENTES TIPOS DE REPRESENTAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS ELEMENTOS FINITOS.	29
FIGURA 11: GRAUS DE LIBERDADE. A) GRAUS DE LIBERDADE DE UM PONTO; B) GRAUS DE LIBERDADE DE UM CORPO RÍGIDO.....	30
FIGURA 12: CORPO BIDIMENSIONAL COM DOMÍNIO Ω E CONTORNO Γ , COM REFERÊNCIA A UM SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANAS (x, y).	31
FIGURA 13: ELEMENTO DIFERENCIAL COM FLUXO DE CALOR ATRAVESSANDO O CONTORNO DO ELEMENTO.....	32
FIGURA 14: PAINEL DE VEDAÇÃO EM CONCRETO MACIÇO	37
FIGURA 15: PAINEL DE VEDAÇÃO EM ALVENARIA CONVENCIONAL COM TIJOLOS DE 8 FUROS QUADRADOS	37
FIGURA 16: PAINEL DE VEDAÇÃO EM ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTES.....	38
FIGURA 17: CRIAÇÃO DO MODELO EM ESTUDO.	39
FIGURA 18: PAINEL DE CONCRETO MACIÇO COM ESPESSURA DE 10CM.	39
FIGURA 19: PROPRIEDADES TÉRMICA DO MATERIAL.....	40
FIGURA 20: CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DO MATERIAL	40
FIGURA 21: CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DO MATERIAL	41
FIGURA 22: CRIANDO OS PASSOS PARA ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	42
FIGURA 23: APLICANDO A TEMPERATURA INTERNA PARA ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	42
FIGURA 24: CRIANDO UM FLUXO DE CALOR APLICADO NA FACE EXTERNA DO PAINEL	43

FIGURA 25: APLICANDO O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA O CONCRETO	44
FIGURA 26: CRIAÇÃO DA MALHA EM ELEMENTOS FINITOS PARA TRANSFERÊNCIA DE CALOR. ...	45
FIGURA 27: FATOR DE ESCALA DOS ELEMENTOS FINITOS NO PAINEL.	45
FIGURA 28: FINALIZANDO O MODELO – CRIANDO O JOBS	46
FIGURA 29: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS FLUXOS DAS REAÇÕES – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 20° E 40° C, RESPECTIVAMENTE.	47
FIGURA 30: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NODAIS – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 20° E 40° C, RESPECTIVAMENTE.	48
FIGURA 31: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE CALOR POR UNIDADE DE ÁREA – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 20° E 40° C, RESPECTIVAMENTE.	48
FIGURA 32: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS FLUXOS DAS REAÇÕES (RFL) – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 26° E 36° C, RESPECTIVAMENTE.	49
FIGURA 33: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS FLUXOS DAS REAÇÕES – PAINEL DE ALVENARIA CONVENCIONAL COM TIJOLOS DE 8 FUROS.....	51
FIGURA 34: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NODAIS – PAINEL DE ALVENARIA CONVENCIONAL.....	52
FIGURA 35: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE CALOR POR UNIDADE DE ÁREA – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 20° E 40° C, RESPECTIVAMENTE.	52
FIGURA 36: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DOS FLUXOS DAS REAÇÕES – PAINEL DE ALVENARIA CONVENCIONAL DE TIJOLOS DE 8 FUROS, COM TEMPERATURAS INTERNAS E EXTERNAS DE 26° E 36° C.....	53
FIGURA 37: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DAS REAÇÕES – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 20° E 40° C, RESPECTIVAMENTE.	55
FIGURA 38: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA NODAIS – PAINEL DE ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTES.	55
FIGURA 39: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE CALOR POR UNIDADE DE ÁREA – PAINEL DE ALVENARIA DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTES.....	56
FIGURA 40: DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DAS REAÇÕES – PAINEL COM TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA DE 26° E 36° C, RESPECTIVAMENTE.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Cidades do Rio Grande do Norte e os suas estratégias construtivas.	19
Quadro 2: Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 8.	21
Quadro 3: Aberturas para ventilação.	21
Quadro 4: Tipos de vedação externas para a zona bioclimática 8.	21
Quadro 5: Parâmetros de classificação das vedações Externas.	22
Quadro 6: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 8.....	23
Quadro 7: Temperaturas da cidade de Caraúbas para o dia 19 de março de 2018.	36
Quadro 8: Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico.	38
Quadro 9: Valores de transmitância térmica calculada versus transmitância térmica fornecida pela NBR 15220-3:2005.	58

LISTA DE SIGLAS

CAU/BR – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

MEF – Método dos elementos finitos

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivos Gerais	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
2.REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES	15
2.2 CONFORTO TÉRMICO	16
2.3 DIRETRIZES BIOCLIMÁTICAS PARA PROJETOS DE ENGENHARIA CIVIL	17
2.4 SISTEMAS DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL ...	24
2.4.1 Painéis de concreto moldados <i>in loco</i>	24
2.4.2 Painéis de alvenaria com bloco de concreto.....	25
2.4.3 Painéis de alvenaria cerâmica	26
2.4.4 Painéis de gesso acartonado – <i>Drywall</i>	26
2.4.5 Painéis isotérmicos	27
2.5 ANÁLISE TÉRMICA EM ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR	28
2.5.1 Método dos elementos finitos – MEF	28
2.5.2 Grau de liberdade no MEF	30
2.5.3 Equações governantes do problema - Condução de calor	31
3.METODOLOGIA.....	35
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	35
3.2 ETAPAS OPERACIONAIS DO ESTUDO	35
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS ADOTADOS.....	36
3.4 ELABORAÇÃO DO MODELO	39
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 ANÁLISE DE FLUXO DE CALOR EM PAINÉIS DE CONCRETO COM ESPESSURA DE 10CM.	46
4.1.1 Transmitância Térmica calculada (U_c) – painel de concreto com espessura de 10 cm.	50
4.2 ANÁLISE DE FLUXO DE CALOR EM PAINÉIS DE ALVENARIA CONVENCIONAL COM ESPESSURA DE 14CM	50
4.2.1 Transmitância Térmica calculada (U_c) – painel de alvenaria convencional de tijolos de 8 furos com espessura de 14 cm.	54
4.3 ANÁLISE DE FLUXO DE CALOR EM PAINÉIS DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTES, COM ESPESSURAS TOTAL DA PAREDE DE 10 CM.	54
4.3.1 Transmitância Térmica calculada (U_c) – Painel de tijolos maciços aparentes, com espessura total da parede de 10cm.	57
4.4 COMPARANDO OS RESULTADOS OBTIDOS	58
5.CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS	60
ANEXOS	63

1. INTRODUÇÃO

Um dos desafios da construção civil é proporcionar um ambiente confortável, seguro e esteticamente agradável ao usuário, que seja capaz de satisfazer as necessidades do mesmo. E atrelado a isso, estão os diferentes estudos em busca de métodos e materiais que favoreça no melhor conforto ambiental.

Sendo assim, o estudo térmico nas edificações tem se tornado uma área de importantes pesquisas na engenharia civil, essas impulsionadas pela necessidade de qualidade, conforto e bem-estar dos usuários (CAU/BR, 2013). A garantia de comodidade e conforto nas edificações está ligado ao ato de projetar de forma que atenda os desejos do contratante, e que cumpra aos parâmetros das normas técnicas brasileiras (ABNT, 2013).

As normatizações relativas ao desempenho térmico no Brasil são recentes, a NBR 15.220:2005 trata sobre desempenho térmico de edificações, como também traz diretrizes a respeito de parâmetros mínimos das habitações de interesse social referente ao conforto térmico. Em 2013, entrou em vigor a NBR 15.575:2013 (ABNT) que unifica os parâmetros habitacionais de edifícios, sendo respeitados critérios de segurança, habitabilidade, higiene e saúde, durabilidade e adequação ambiental.

Desse modo, o conforto térmico pode ser definido como sendo uma condição mental que expressa a satisfação com o ambiente que o cerca. Ter conforto térmico significa que o indivíduo em condições de roupas normais não se sente nem com frio nem com calor (DUARTE, 2016).

Como nas outras áreas da engenharia, no conforto térmico também existem diversos softwares que podem modelar problemas e fornecer resultados que contribuem para a melhoria dos projetos, e conseqüentemente para a melhor qualidade das edificações.

Dessa forma, a modelagem numérica para análise térmica em painéis de vedação, através de um programa em elementos finitos, busca promover soluções e alternativas construtivas e de projetos, que facilitem a realização de edificações com maior conforto térmico atendendo os parâmetros de desempenho descritos na Norma de Desempenho, a NBR 15.575:2013.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como finalidade analisar o comportamento térmico de diferentes painéis de vedação aplicados em obras de construção civil, através de modelagem numérica utilizando o software ABAQUS/CAE.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os diferentes tipos de painéis de vedação em edificações;
- Modelar uma estrutura utilizando um programa em elementos finitos, com a ação da temperatura;
- Analisar o comportamento térmico dos painéis de vedação;
- Identificar se os parâmetros de conforto térmico da Norma de Desempenho (NBR 15.575:2013) são atendidos nos modelos em estudos;

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES

Segundo o Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil – CAU/BR (2013), a indústria da construção civil vem mudando seus parâmetros de qualidade, impulsionada pela revolução conceitual sobre os requisitos mínimos de segurança e conforto para casas e edifícios residenciais.

Em julho de 2013, entrou em vigor a norma de desempenho das edificações que gerou uma adequação no modo de construir, devido aos parâmetros preestabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece exigências de conforto e segurança nos imóveis (CAU/BR, 2013). A NBR 15.575:2013 da ABNT é a primeira norma brasileira que associa a qualidade de produtos ao resultado que o consumidor espera.

Segundo a Norma de Desempenho da ABNT, NBR 15.575:2013, as edificações são divididas em 5 sistemas diferentes, sendo eles:

- Estrutura: Define quais os critérios de estabilidade e resistência da edificação, inclusive com métodos para medir que tipos de impactos a estrutura pode suportar sem apresentar fissuras, falhas ou rachaduras;
- Sistemas hidrossanitários: Estabelece que todas as edificações estejam ligadas a rede de esgoto ou possuir alternativas individuais para o tratamento do próprio esgoto, como também estabelece que pressão e peso as tubulações d'água devem suportar.
- Pisos: Devem suportar a certos impactos, quando solicitados, e manter os níveis seguros contra escorregamento, para evitar acidentes domésticos.
- Coberturas: Estabelece que o pé-direito mínimo de um imóvel é 2,5 metros, podendo haver variações em banheiros e corredores. A NBR ainda define qual o peso que a cobertura deve suportar como também quantas horas deve resistir ao fogo sem ceder.
- Vedação: As paredes externas e internas devem garantir estanqueidade, proteção acústica contra sons externos e devem garantir o **conforto térmico**. A norma traz os níveis internos de variação de temperatura obrigatórios de acordo com cada região do país.

Sendo assim, o conforto térmico é um dos parâmetros da norma de desempenho que contribuem para a qualidade e confortabilidade das edificações.

2.2 CONFORTO TÉRMICO

Segundo Duarte (2016), o conceito de conforto térmico está diretamente ligado ao estado mental, que expressa a satisfação do indivíduo com o ambiente térmico no qual está inserido. A insatisfação pode ser causada pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, quando há um desequilíbrio térmico, ou seja, quando ocorrem diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente.

As análises em conforto térmico buscam principalmente descrever e estabelecer as condições necessárias para a concepção de um ambiente térmico adequado às necessidades e ocupação humanas, de modo a estabelecer métodos e princípios para uma detalhada análise térmica do sistema (DUARTE, 2016).

Basicamente a importância do estudo de conforto térmico está pautado em 3 fatores, segundo Duarte (2016) esses são:

A satisfação do ser humano ou seu bem-estar em se sentir termicamente confortável;

A produtividade do ser humano, muito embora os resultados de inúmeras investigações não sejam conclusivos a esse respeito, e a despeito dessa inconclusividade, os estudos mostram uma clara tendência de que o desconforto causado por calor ou frio reduz a produtividade. As atividades intelectuais, manuais e perceptivas, geralmente apresentam um melhor rendimento quando realizadas em conforto térmico.

A conservação de energia, pois devido à crescente mecanização e industrialização da sociedade, as pessoas passam grande parte de suas vidas em ambientes condicionados artificialmente. Ao conhecer as condições e os parâmetros relativos ao conforto térmico dos ocupantes em seus ambientes, evitam-se desperdícios com calefação e refrigeração, muitas vezes desnecessários.

Dessa forma, a sensação de conforto térmico pode ser descrita como o esforço realizado pelo organismo para manter o balanço térmico e o bem-estar dos indivíduos no ambiente que estão inseridos (DUARTE, 2016).

São muitas as aplicações construtivas e técnicas nas edificações que contribuem para um ambiente agradável, tais como as coberturas que desempenham importante função na condição do conforto térmico das construções, tendo uma vasta gama de coberturas, entre elas temos as metálicas, de concreto, barro, cobertura verde e outras (BOGO, 2003).

Outro sistema que desempenha uma função primordial são as paredes, que assim como as coberturas podem trazer inúmeras sensações de conforto térmico para o ambiente, sendo um fator muito importante para as análises, de forma que os estudos contribuem como uma ferramenta que pode mensurar o quanto a temperatura é aceitável no ambiente (BOGO, 2003).

2.3 DIRETRIZES BIOCLIMÁTICAS PARA PROJETOS DE ENGENHARIA CIVIL

A NBR 15220:2005 determina diretrizes construtivas aplicadas às habitações com características unifamiliares de interesse social. Para cada zona climática a norma determina valores aceitáveis de elementos construtivos, tais como atraso térmico (ϕ), transmitância térmica (U) e fator solar (Fs).

Segundo a NBR 15220:2005, Atraso Térmico (ϕ) corresponde “ao tempo transcorrido entre a variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor”. Sendo assim, o atraso térmico é dado em horas (h).

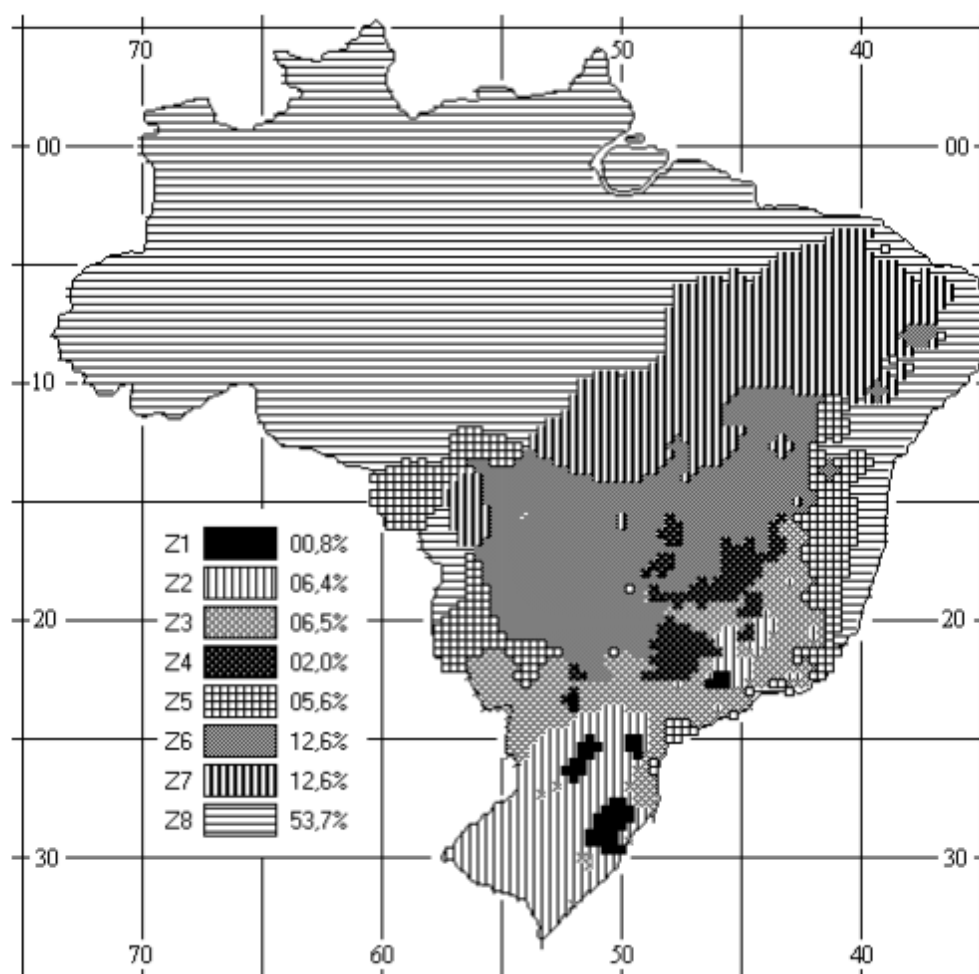
A Transmitância Térmica (U), é o inverso da resistência térmica total (R_t) de um componente construtivo (painel, cobertura, etc.), é definida como o fluxo de calor, dado em unidades de tempo e área, que transcorre pelo componente, para uma diferença unitária entre as temperaturas do ar em contato com cada uma das faces desse mesmo componente (RORIZ, 2008). Sendo, portanto, um indicador de desempenho térmico das edificações em regime térmico permanente (RORIZ, 2008). A NBR 15220:2005 estabelece limites de transmitância térmica aceitáveis para diversos tipos de painéis de vedação vertical.

O Fator Solar (Fs), também conhecido como fator solar de elementos opacos, é denominado como o quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo (ABNT, 2005).

Dessa forma, o zoneamento bioclimático é definido como a região geográfica homogênea quanto aos elementos climáticos que interferem nas relações entre ambiente construído e conforto humano, de acordo com a NBR 15220:2005 – Parte 3.

O zoneamento bioclimático brasileiro é dividido em oito zonas diferentes, onde a NBR 15220:2005 apresenta uma relação de 330 cidades cujo o clima foi determinado de acordo com o zoneamento. A seguir a figura 1 mostra as divisões das zonas (ABNT, 2005).

Figura 1: Mapa das zonas bioclimáticas do Brasil.



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005).

As 8 zonas distintas, estão distribuídas no mapa, sendo que cada uma possui uma área de aplicação, a Z8 é a que possui maior percentual de aplicação no território brasileiro, correspondendo a 53,7% de todo o país.

No Rio Grande do Norte 9 cidades das 330 está apresentadas no anexo da norma, sendo dispostas as estratégias construtivas que melhor atende as condições de clima dessas cidades. O quadro 1 mostra quais as cidades do Rio Grande do Norte que dispõe de estratégias e direcionamentos técnicos que promovem o melhor conforto térmico das edificações, e consequentemente favorece a qualidade das habitações.

Quadro 1: Cidades do Rio Grande do Norte e os suas estratégias construtivas.

Cidade	Estratégia	Zona
Apodi	FIJK	8
Ceará Mirim	FIJ	8
Cruzeta	FHIJK	7
Florânia	FHIJ	7
Macaíba	FIJ	8
Macau	FIJ	8
Mossoró	FHIJK	7
Natal	FIJ	8
Nova Cruz	FIJ	8

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Adaptado pelo autor.

A cidade de Caraúbas/RN não possui uma estratégia construtiva disponível na norma, porém a cidade de Apodi/RN está localizada a cerca de 40 km e a mesma dispõe de uma estratégia construtiva. Segundo a NBR 15220:2005 é possível descrever a estratégia da cidade de Apodi/RN.

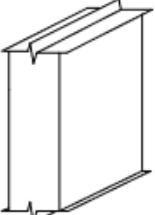
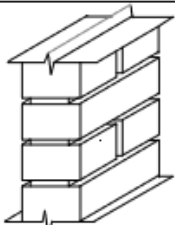
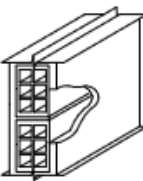
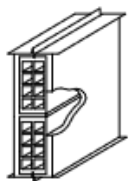
A norma destaca a estratégia **FIJK** para a cidade de Apodi/RN.

- **F**: As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
- **H e I**: Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
- **I e J**: A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.
- **K**: O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.

Diante da maioria das cidades destacadas estarem na zona 8 do mapa, a norma prevê os parâmetros para auxiliar na melhor escolha da técnica construtiva, como também quais os valores limites relativos a conforto térmico. Esses dados estão dispostos nos anexos da norma, como também a ilustração de como deve ser executada a técnica adotada (ABNT, 2005).

A Figura 2 demonstra como devem ser executada a técnica construtiva adotada, e também traz os parâmetros de Transmitância térmica (U), capacidade térmica (Ct) e atraso térmico (ϕ) respectivamente.

Figura 2: Representação da técnica construtiva adotada.

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	ϕ [horas]
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 5,0 cm	5,04	120	1,3
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 10,0 cm	4,40	240	2,7
	Parede de tijolos maciços aparentes Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura total da parede: 10,0 cm	3,70	149	2,4
	Parede de tijolos 6 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 9,0x14,0x19,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,0 cm	2,48	159	3,3
	Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 14,0 cm	2,49	158	3,3

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

Nessa zona bioclimática, devem ser atendidas as especificações das tabelas 22, 23, 24 e 25 da norma, de forma que as estratégias possam contribuir para uma melhor condição térmica das habitações.

A tabela 22 da norma dispõe sobre as aberturas para ventilação e sombreamento das entradas do ar para a Zona Bioclimática 8, como mostra o quadro 2.

Quadro 2: Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 8

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Grandes	Sombrear aberturas

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005).

Os parâmetros que classificam as aberturas de ventilações estão descritos no quadro 3 a seguir.

Quadro 3: Aberturas para ventilação.

Abertura para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$
Médias	$10\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005).

A NBR 15220:2005, destaca na tabela 23 os tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 8, como segue abaixo no quadro 4:

Quadro 4: Tipos de vedação externas para a zona bioclimática 8.

Vedações externas
Parede: Leve refletora
Cobertura: Leve refletora
Notas: 1 - Coberturas com telha de barro sem forro, embora não atendam aos critérios das tabelas 23 e C.2, poderão ser aceitas na Zona 8, desde que as telhas não sejam pintadas ou esmaltadas. 2 - Na Zona 8, também serão aceitas coberturas com transmitâncias térmicas acima dos valores tabelados, desde que atendam às seguintes exigências: a) contenham aberturas para ventilação em, no mínimo, dois beirais opostos; e

b) as aberturas para ventilação ocupem toda a extensão das fachadas respectivas. Nestes casos, em função da altura total para ventilação (ver figura 2), os limites aceitáveis da transmitância térmica poderão ser multiplicados pelo fator (FT) indicado pela expressão 1.

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

As vedações externas são classificadas em paredes leves, leves refletoras e pesadas, de acordo com o quadro 5 a seguir, que apresenta os limites de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar.

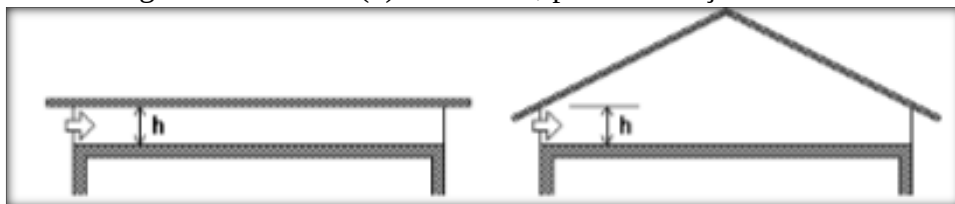
Quadro 5: Parâmetros de classificação das vedações Externas

Vedações Externas		Transmitância Térmica – U. W/m ² .k.	Atraso Térmico – ϕ . Horas.	Fator Solar – FS. %
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 5,0$
	Leve Refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \leq 6,5$	$FS \leq 3,5$
Coberturas	Leve Isolada	$U \leq 2,20$	$\phi \leq 3,3$	$FS \leq 6,5$
	Leve Refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\phi \leq 3,3$	$FS \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 6,5$	$FS \leq 6,5$

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

Ainda segundo a norma 15220:2005 na parte 3, são aplicadas as edificações na zona climática 8, aberturas (h) em beirais, de modo que possam contribuir para uma maior ventilação dos cômodos, e com isso favorecer o conforto térmico e sensação de bem-estar dos usuários dessas edificações, a figura 3 exemplifica essas aberturas. Já a Eq. 1 demonstra como deve ser feito o cálculo do fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona 8.

Figura 3: Abertura (h) em beirais, para ventilação do ático



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

$$FT = 1,17 - 1,17.h^{-1,04} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

FT é igual ao fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona 8 (adimensional);

h é igual à altura da abertura em dois beirais opostos, em centímetros.

Segunda a NBR 15.220:2005 para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, FT = 1.

Já a tabela 24 evidencia as estratégias de condicionamento térmico passivo, que segundo Vettorazzi *et al.* (2010) refere-se ao ato de proporcionar aos usuários condições agradáveis de temperatura (contribuindo para o conforto térmico) e luz dentro de determinado ambiente explorando apenas recursos naturais e estratégias arquitetônicas de projeto, ligados a uma prática sustentável. No quadro 6....

Quadro 6: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 8.

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	J) Ventilação cruzada permanente Nota: O condicionamento passivo será insuficiente durante as horas mais quentes. O código J é o mesmo adotado na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (ver quadro 1).

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

Segundo Possebom *et al.* (2016), a ventilação cruzada pode ser definida pela passagem do ar no interior das edificações sem que haja a indução de sistema mecânicos, trazendo diversas vantagens para os edifícios, contribuindo para uma melhor qualidade do ar e assim criando ambientes salubres e confortáveis.

Este método é utilizado em diferentes vãos de abertura em um ambiente, seja em elementos opostos ou adjacentes, pois então, este fenômeno ocorre pela presença de diferentes pressões de ar, ou seja, por influência dos ventos ou por temperaturas distintas de densidades diferentes (POSSEBOM *et al.*, 2016)

A NBR 15.220:2005 destaca o detalhamento das estratégias construtivas relacionadas ao condicionamento térmico, dispostas na tabela 25 da referida norma. A tabela completa está disposta no anexo I desse trabalho. Os detalhamentos das estratégias devem seguir as outras

orientações das tabelas 22, 23 e 24 da norma, de forma a colaborar para o melhor conforto térmico do usuário.

2.4 SISTEMAS DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.4.1 Painéis de concreto moldados *in loco*

Os painéis de concreto moldados *in loco*, também chamados de painéis monolíticos moldados *in loco*, possuem além da finalidade de vedar o ambiente a função estrutural, utilizam o sistema de fôrmas duplas e podem incorporar na sua execução, parte das instalações prediais e esquadrias (SACHT, 2008).

Segundo Lordsleem Junior (1998) ao comparar o sistema de painéis monolíticos moldados *in loco* à alvenaria tradicional, verificou-se que ambos promovem um desempenho semelhante, porém existem algumas vantagens tais como o aumento de velocidade de produção, redução de custos de mão-de-obra e reduzida geração de entulhos.

A figura 4 exemplifica na prática o uso de painéis de concreto moldados *in loco*, como uma opção de vedação vertical.

Figura 4: Vedação vertical em painéis de concreto moldados *in loco*.



Fonte: MR Construtora. Acesso em 03 Março de 2018. Adaptado pelo autor.

2.4.2 Painéis de alvenaria com bloco de concreto

Segundo a ProntoMix (2018), a alvenaria com blocos de concreto é uma alternativa construtiva que permite economia, qualidade e rapidez no ato de construir. O material é disponível tanto para alvenaria estrutural e de vedação, o bloco de concreto atende os diversos tipos de obras, como também fornece racionalização no processo construtivo e menor tempo de execução. As vantagens nesse tipo de material em relação à qualidade e produtividade são destacadas pela ProntoMix (2018) como segue:

- Qualidade:
 - ✓ Resistência de acordo com as necessidades do projeto;
 - ✓ Material ensaiado em laboratório e produzido de acordo com as normas técnicas da ABNT;
 - ✓ Resistência ao fogo (menor índice de propagação de incêndio);
 - ✓ Produtos de acordo com os preceitos da Norma de Desempenho (NBR 15.575:2013).
- Produtividade:
 - ✓ Instalações das redes elétricas, hidráulicas e telefônicas sem quebra de paredes;
 - ✓ Maior produtividade da equipe de obras;
 - ✓ Baixo índice de perdas e desperdício de materiais;
 - ✓ Entrega paletizada, possibilitando melhor organização do canteiro de obras.

A seguir a figura 5, mostra uma construção de um residencial multifamiliar em painéis de vedação com blocos de concreto.

Figura 5: Vedação vertical em bloco de concreto.



Fonte: ProntoMix. Acesso 03 Março de 2018. Adaptado pelo autor.

2.4.3 Painéis de alvenaria cerâmica

Segundo Thomaz (2009) as paredes de alvenaria cerâmica são constituídas pelo assentamento de tijolos maciços ou blocos vazados, interligados com argamassa, que tem por finalidade suportar apenas seu peso próprio e cargas de ocupação, como por exemplo armários, prateleiras, redes de dormir, entre outros.

Dessa forma, o projeto das alvenarias de vedação precisa levar em consideração além do desempenho mecânico, exigências relacionadas a fatores como estanqueidade à água, à isolamento térmica, acústica, resistência ao fogo e as outras características relativas ao conforto do usuário (THOMAZ, 2009). A figura 6 mostra o processo de construção de uma residência em alvenaria convencional de tijolos furados.

Figura 6: Vedação vertical em bloco cerâmico convencional.



Fonte: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento da Arquitetura - IBDA. Acesso 03 Março de 2018.

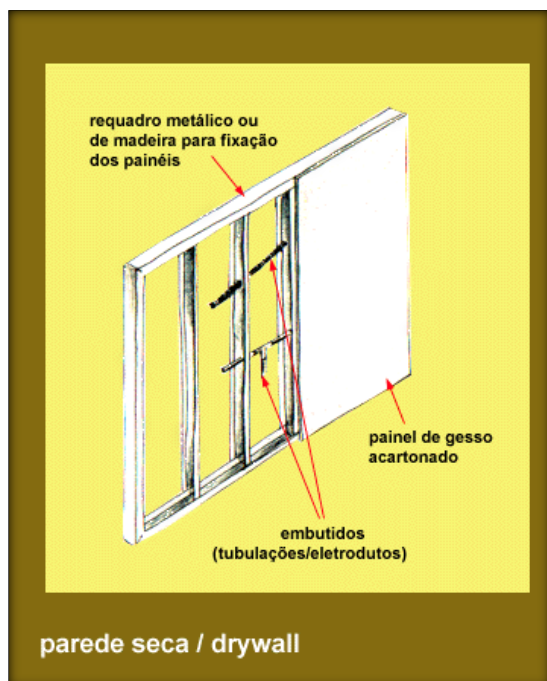
2.4.4 Painéis de gesso acartonado – Drywall

Segundo o Krüger (2000), os painéis de gesso acartonado são basicamente compostos por placas de gessos revestidas com folhas de papelão em ambos os lados, esse processo forma um conjunto resistente à tração e flexão. Na sua fixação, são empregados montantes e guias em aço ou madeira com parafusos comum.

Esse sistema permite atender as necessidades básicas da vedação vertical, tais como isolamento acústico, resistência à umidade e ao fogo, como também proporcionar um bom

conforto térmico (KRÜGER, 2000). A figura 7.a) mostra o processo de instalação de painéis de gesso acartonado, já a figura 7.b) mostra o painel já aplicado em uma edificação.

Figura 7: Painéis em gesso acartonado – Drywall. a) Processo de instalação de placas de gesso acartonado – Drywall; b) Paredes em gesso acartonado – Drywall em uma residência.



a)

Fonte: KRÜGER, 2000. Adaptado pelo autor.



b)

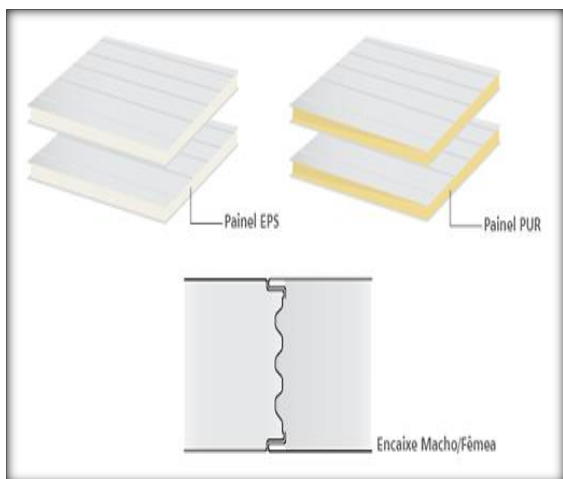
Fonte: Art Decor. Acesso 03 Março de 2018.

2.4.5 Painéis isotérmicos

O painel isotérmico tem como principal objetivo diminuir a variação térmica de ambientes, controlando assim a temperatura, ou seja, estabilizando-a. Esse material é indicado para câmaras frigoríficas ou locais de temperaturas extremamente reduzidas (TERMKCAL, 2017).

Segundo Krüger (2000), esses painéis são geralmente utilizados em instalações industriais, porém os mesmos ainda são recomendados para fechamentos de paredes internas de residências, prédios comerciais, shoppings etc. Sua composição é dada por seu miolo em poliestireno expandido revestidos com chapas de aço galvanizado pré pintados, de espessura de 0,50 mm e são montados de acordo com encaixe, como ilustrado na figura 8.

Figura 8: Painéis de vedação em placas isotérmicas. a) Placas de painéis isotérmicos; b) Construção em Paineis Isotérmicos.



a)

Fonte: (Krüger, 2000). Adaptado pelo autor.



b)

Fonte: Art Decor. Acesso 03 Março de 2018.

2.5 ANÁLISE TÉRMICA EM ELEMENTOS FINITOS APLICADO AO PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR

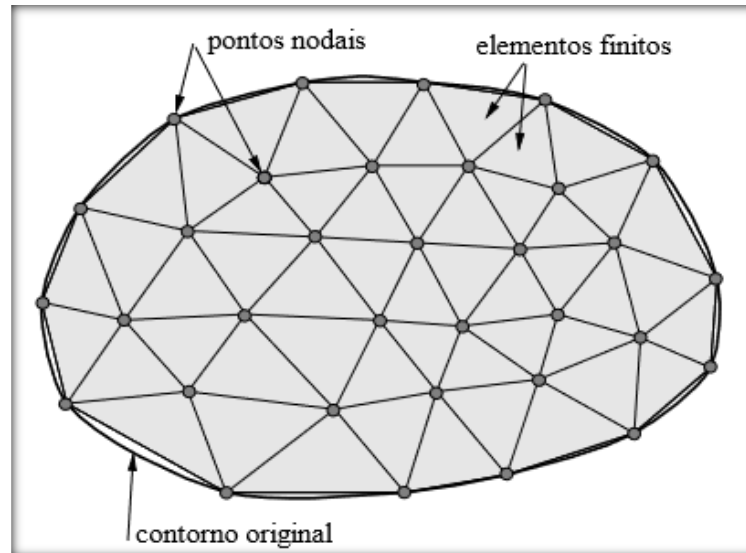
2.5.1 Método dos elementos finitos – MEF

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico aproximado que promove análises de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, podem ser descritos através de equações diferenciais parciais, por meio de condições de contorno, também chamado de valor de contorno, e possivelmente com condições iniciais (para problemas de variáveis no tempo). O MEF é um método genérico, e pode ser aplicado em inúmeros soluções de problemas da engenharia (SOUZA, 2003).

Segundo Souza (2003), são inúmeras as áreas de aplicações do método de elementos finitos, dentre os campos de atuação estão a Indústria da construção civil; Indústria automobilística, naval, aeronáutica e aeroespacial; Metalurgia; Mineração; Exploração de petróleo; Setor energético; Telecomunicações; Forças Armadas; Meio ambiente; Recursos Hídricos; Saúde, e entre outras. E sua primeira aplicação foi realizada em um problema de engenharia estrutural, mais precisamente em análises de tensões.

A ideia principal do método é basicamente dividir o domínio, meio contínuo, do desafio em sub-regiões de geometria simples, ou seja, uma geometria conhecida como por exemplo o formato triangular, quadrangular, cúbico, etc. (SOUZA, 2003), como mostra a Figura 9.

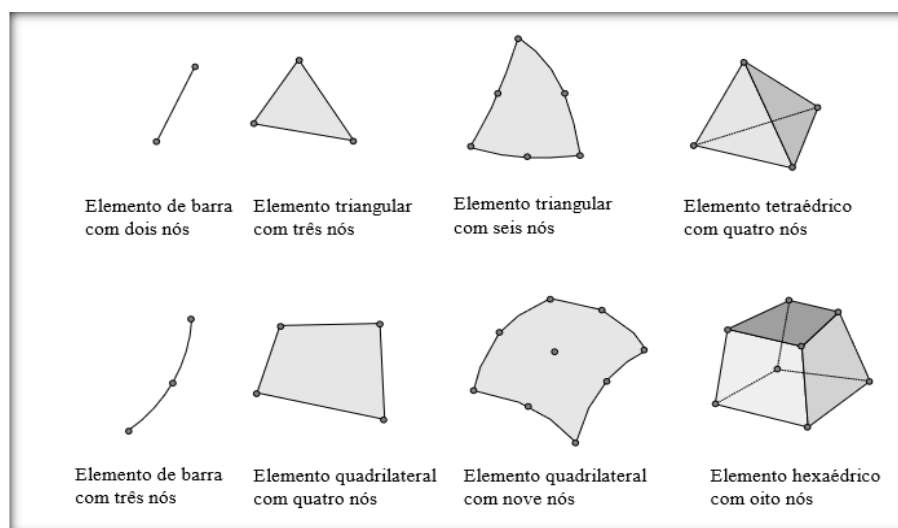
Figura 9: Malha de Elementos Finitos para problema plano.



Fonte: Souza, 2003. Adaptado pelo autor.

Em contraste com os elementos infinitesimais utilizados no cálculo diferencial e no cálculo de integral, estão as sub-regiões, dimensões finitas, chamadas de elementos finitos. Dessa forma, as sub-regiões são conectadas entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais. Algumas representações de elementos finitos estão ilustradas na figura 10 a seguir:

Figura 10: Diferentes tipos de representações geométricas dos elementos finitos.



Fonte: Souza, 2003. Adaptado pelo autor.

Ainda segundo Souza (2003), a precisão do método está pautada em alguns aspectos relacionados a quantidade de nós e elementos, como também ao tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Outro ponto importante aspecto do MEF diz respeito a convergência de valor, mesmo tratando-se de método de aproximação, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e consequentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para solução exata do problema.

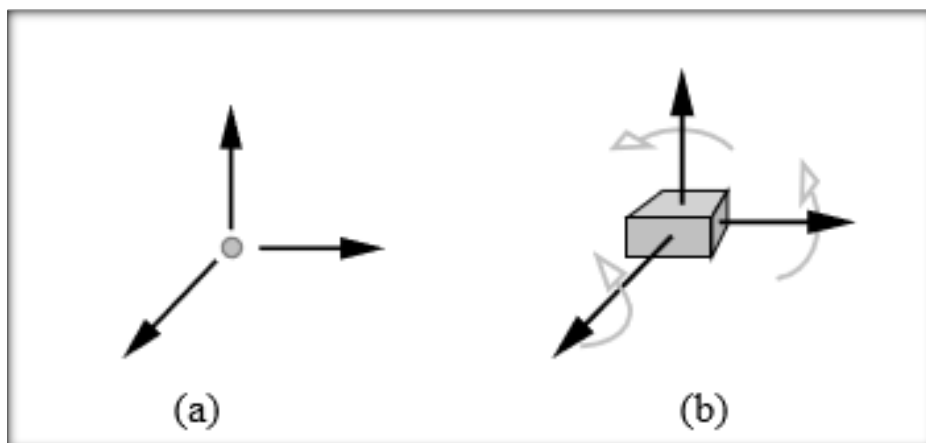
2.5.2 Grau de liberdade no MEF

Além dos conceitos de “elementos finitos” e “nós” no MEF, outro conceito tem grande importância para a determinação das análises dos problemas propostos, sendo chamado de grau de liberdade (*degree of freedom*) ou simplesmente a abreviatura “gdl” (SOUZA, 2003).

Essa ideia de grau de liberdade tem sua origem ligada ao movimento de partículas em problemas de Mecânica, onde são considerados dois princípios básicos, que segundo Souza (2003) são:

- Um ponto apresenta, no espaço tridimensional, três graus de liberdade, quais sejam três possíveis movimentos de translação.
- Mais genericamente, um corpo rígido apresenta, no espaço tridimensional, seis graus de liberdade, quais sejam, três possíveis movimentos de translação e três possíveis movimentos de rotação.

Figura 11: Graus de liberdade. a) graus de liberdade de um ponto; b) graus de liberdade de um corpo rígido.



Fonte: Souza, 2003. Adaptado pelo autor.

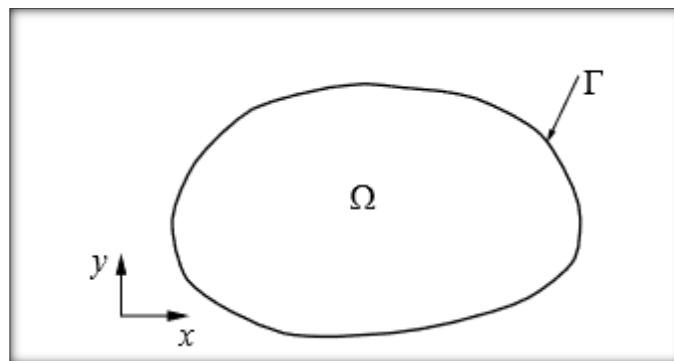
Os graus de liberdade dos nós, para problemas de mecânica dos sólidos (análise de tensões), correspondem aos possíveis movimentos que estes podem sofrer, como exemplo, o problema de análise de tensões em um meio tridimensional apresentam três graus de liberdade por nó, sendo possível três translações. Estes movimentos ou deslocamentos dos nós são as incógnitas principais da análise pelo método tradicional de Elementos Finitos do problema geral da mecânica dos sólidos (SOUZA, 2003).

Já para a condução de calor, embora não se estude o movimento de partículas, utiliza-se comumente o termo grau de liberdade para se referir a incógnita do problema, qual seja o valor do campo de temperatura nos nós da malha (SOUZA, 2003).

2.5.3 Equações governantes do problema - Condução de calor

A formulação matemática que descreve o problema de condução de calor de um corpo bidimensional (de espessura constante) com domínio Ω e contorno Γ possui como referência um sistema de coordenadas cartesianas (x, y) conforme ilustra a Figura 12:

Figura 12: Corpo bidimensional com domínio Ω e contorno Γ , com referência a um sistema de coordenadas cartesianas (x, y) .



Fonte: Souza, 2003. Adaptado pelo autor.

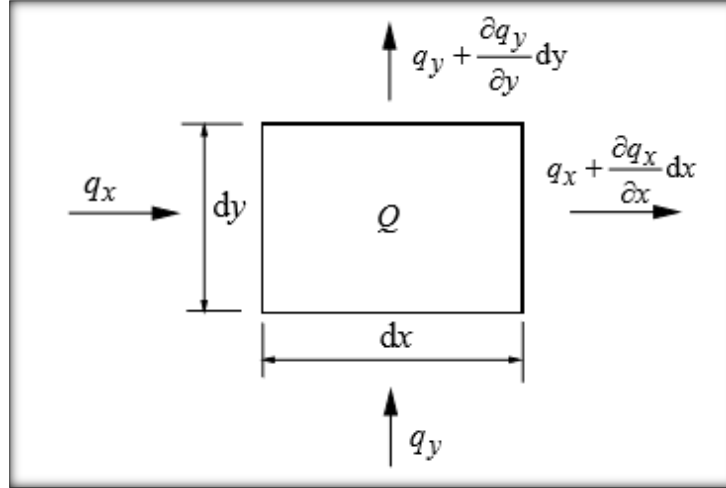
Seja $Q(x,y)$ a taxa de geração de calor intensa ou fonte (fontes de calor Q são proporcionadas, por exemplo, por resistência à corrente elétrica e reações químicas), essa taxa é dada em calor por unidade de volume e tempo, e $q_x(x,y)$ e $q_y(x,y)$ são as componentes do vetor de calor, dado em calor por unidade de área e tempo, em um ponto (x,y) do corpo Ω (SOUZA, 2003).

Eq. [2.1]

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}(x, y) = \begin{cases} q_x(x, y) \\ q_y(x, y) \end{cases}$$

Segundo Souza (2003), a equação que governa o problema de condução de calor em um meio bidimensional em equilíbrio (regime estacionário, sem variação no tempo) pode ser deduzida utilizando um elemento diferencial de lados dx e dy , e com o fluxo de calor atravessando o contorno do elemento, como a figura 13 mostra:

Figura 13: Elemento diferencial com fluxo de calor atravessando o contorno do elemento.



Fonte: Souza, 2003. Adaptado pelo autor.

Considerando, que não há perda de generalidade, e que a espessura do corpo é unitária, a taxa de calor gerado no corpo será $Qdxdy$. Dessa forma, se as faces anteriores e posteriores indicadas na figura forem isoladas termicamente, então a condição seguinte deve ser satisfeita (SOUZA, 2003).

Eq. [2.2]

$$Qdxdy + q_xdy + q_ydx = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x}dx\right)dy + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y}dy\right)dx$$

Cancelando os termos repetidos, e dividindo a equação resultante por $dxdy$ chega-se a equação que governa o problema estacionário de condução de calor:

Eq. [2.3]

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + Q = 0 \text{ em } \Omega$$

De forma mais compacta, tem-se:

Eq. [2.4]

$$-\text{div}q + Q = 0 \text{ em } \Omega$$

Ou ainda:

Eq. [2.5]

$$-\nabla^T \cdot \mathbf{q} + Q = 0 \text{ em } \Omega$$

Onde:

Eq. [2.6]

$$\nabla = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

A Eq. [7], mostra operador diferencial nabla (ou del), tal que:

Eq. [2.7]

$$\nabla^T \cdot \mathbf{q} = \left\langle \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right\rangle \cdot \begin{Bmatrix} qx \\ qy \end{Bmatrix} = \frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial y} = \text{div} \mathbf{q}$$

No caso de fluxo unidimensional, observa-se fisicamente que o fluxo de calor em uma direção é proporcional à taxa de variação da temperatura T naquela direção (Lei de Fourier):

Eq. [2.8]

$$qx = -k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

Onde K_x é o coeficiente de condutividade térmica (calor por unidade de comprimento, tempo e temperatura).

Para o caso mais geral (bi ou tridimensional), observa-se que o vetor fluxo de calor é função do gradiente de temperatura T:

Eq. [2.9]

$$\mathbf{q} = -K \nabla T$$

Onde, para o caso bidimensional:

Eq. [2.10]

$$\mathbf{k} = k(x, y) = \begin{bmatrix} K_{xx}(x, y) & k_{xy}(x, y) \\ K_{xy}(x, y) & k_{yy}(x, y) \end{bmatrix}$$

sendo $\mathbf{k}$ a matriz de condutividade térmica, e

Eq. [2.11]

$$\nabla T = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \cdot T = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix} = \text{grad}T$$

Dessa forma a equação **Eq. [2.9]** pode ser escrita como segue:

Eq. [2.12]

$$\frac{qx}{qy} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & k_{xy} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

Ou seja,

Eq. [2.13]

$$qx = - \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

Eq. [2.14]

$$qy = - \left(K_{xy} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

Substituindo as equações Eq.[2.13] e [2.14] na Eq.[2.3] tem-se:

Eq. [2.15]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial T}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = 0$$

Se as direções cartesianas (x,y) coincidirem com as direções principais do material, então $K_{xy}=0$. Além disso, no caso particular de um meio isotrópico (com mesma condutividade térmica em todas as direções), tem-se que $K_{xx}=K_{yy}=K$. Neste caso, a matriz de condutividade térmica é escrita como:

Eq.[2.16]

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}(x, y) = \begin{bmatrix} K(x, y) & 0 \\ 0 & K(x, y) \end{bmatrix} = K(x, y) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = K(x, y) \mathbf{I}$$

sendo $\mathbf{I}$ a matriz identidade de ordem 2.

No caso de um meio homogêneo, a condutividade térmica não depende das coordenadas (x,y), ou seja, K_{xx} e K_{yy} são constantes.

Para um meio isotrópico e homogêneo, tem-se $K_{xy}=0$ e $K_{xx}=K_{yy}=k=\text{cte}$. Neste caso, a Eq. [2.15].

Dessa forma, tem-se:

Eq. [2.17]

$$K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + Q = 0$$

Sendo assim, chega-se a conhecida equação de **Poisson**. Esta equação governa diferentes problemas de campos importantes na engenharia.

3. METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho trata-se de um estudo de modelagem em elementos finitos, com o objetivo de descrever o comportamento do conforto térmico dos diferentes tipos de painéis de vedação verticais, e comparar com os parâmetros da NBR 15.575:2013. Dessa forma, será feita uma pesquisa do tipo revisão bibliográfica, a fim de se conhecer como os outros pesquisadores tratam a relação temperatura e conforto térmico das edificações.

Pesquisa bibliográfica se trata do levantamento da bibliografia já publicada, que pode ser apresentada em forma de teses, dissertações, monografias, livros, revistas e publicações de imprensa escritas ou avulsas. Este método permite que o pesquisador tenha acesso direto com todo o material escrito sobre determinado assunto específico de interesse da pesquisa, auxiliando assim na análise e na manipulação das informações colhidas (MARCONI E LAKATOS, 2003).

Com isso, a pesquisa foi realizada por meio de revisão na literatura, basicamente artigos científicos publicados no portal Periódicos Capes, em livros, dissertações e outros materiais de cunho científico.

3.2 ETAPAS OPERACIONAIS DO ESTUDO

Para se proceder com o estudo de modelagem em elementos finitos foram seguidas algumas etapas: modelagem do sistema no software ABAQUS/CAE edição 2016 e análise dos resultados.

A modelagem do sistema que descreve o comportamento térmico das edificações na região do semiárido brasileiro, será feita através de um programa computacional em elementos

finitos que demonstra matematicamente a relação de transferência de calor do ambiente externo para o interno, podendo assim comparar os dados fornecidos pelo programa com os parâmetros da NBR 15.575:2013.

3.3 MATERIAIS E MÉTODOS ADOTADOS

A cidade de Caraúbas/RN possui clima predominantemente quente ao longo do ano, devido esse motivo foram utilizadas as temperaturas da cidade, no decorrer do dia 19 de março 2018, como mostra no quadro 7.

Quadro 7: Temperaturas da cidade de Caraúbas para o dia 19 de março de 2018.

01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h
26	25	24	24	24	24	26	28	31	32	34	35
13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
36	36	36	34	32	30	29	28	28	27	27	27

Fonte: www.climatempo.com.br (2018).

Dessa forma foi possível simular o comportamento dos painéis referentes à transmitância térmica, aplicados a uma edificação localizada em frente a Universidade Federal Rural do Semiárido, no loteamento Portal Caraúbas.

Os painéis em estudo são:

- Pannel em concreto C25 de espessuras de 10 cm;
- Pannel de alvenaria convencional com tijolos de 8 furos com espessura total de 14 cm;
- Pannel de alvenaria com tijolos maciços com espessura total de 10 cm.

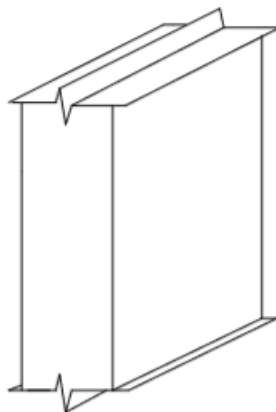
Ambos os painéis, foram modelados no software AbaqusCae, com intuito de descrever como o fluxo de calor se comporta nesse modelo. As características de ambas as vedações verticais são apresentadas a seguir.

i) **Painel de vedação em concreto maciço:**

- Parede de concreto maciço;
- Material C25;
- Espessura total da parede: 10,0 cm.

A figura 14 apresenta uma exemplificação de como dispõe o painel de Concreto maciço.

Figura 14: Painel de vedação em concreto maciço



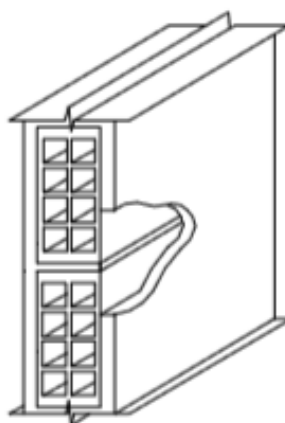
Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

ii) **Painel de vedação convencional com tijolos de 8 furos:**

- Parede de tijolos 8 furos quadrados;
- Assentados na menor dimensão;
- Dimensões do tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm
- Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm
- Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm
- Espessura total da parede: 14,0 cm

A figura 15, mostra como deve ser executado a parede em análise, e exemplifica as características a cima citadas.

Figura 15: Pannel de vedação em alvenaria convencional com tijolos de 8 furos quadrados



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

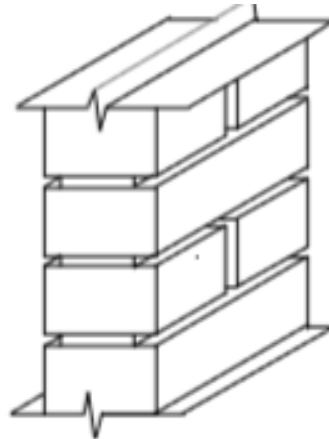
Painel de tijolos maciços aparentes:

- Parede de tijolos maciços aparentes;
- Dimensões do tijolo: 10,0x6,0x22,0 cm;

- Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm;
- Espessura total da parede: 10,0 cm.

A figura 16, caracteriza como são dispostas essas características do painel em tijolo maciço aparente.

Figura 16: Pannel de vedação em alvenaria de tijolos maciços aparentes



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

De acordo com a NBR 15220:2005 os parâmetros relativos a Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico, avaliados aos modelos em estudo, são apresentados abaixo no quadro 8.

Quadro 8: Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico

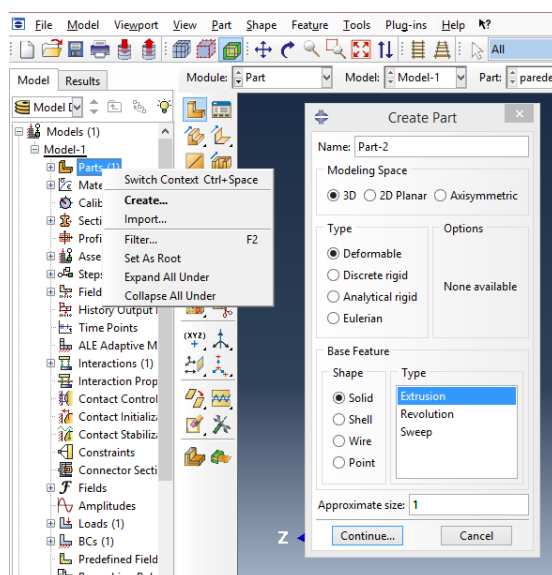
Tipo de parede	U [W/(m².K)]	CT [kJ/(m².K)]	φ [horas]
Parede de tijolos 8 furos quadrados	4,40	158	3,30
Parede de concreto maciço	2,49	240	2,70
Parede de tijolos maciços aparentes	3,70	149	2,4

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.

3.4 ELABORAÇÃO DO MODELO

Inicialmente no programa Abaqus Cae, para simular uma estrutura é necessário criar o modelo em análise através no comando *create part*, onde o usuário deverá entrar com alguns dados relativos ao tipo, forma e tamanho aproximado (fator de escala) do desenho, como mostra a figura 17.

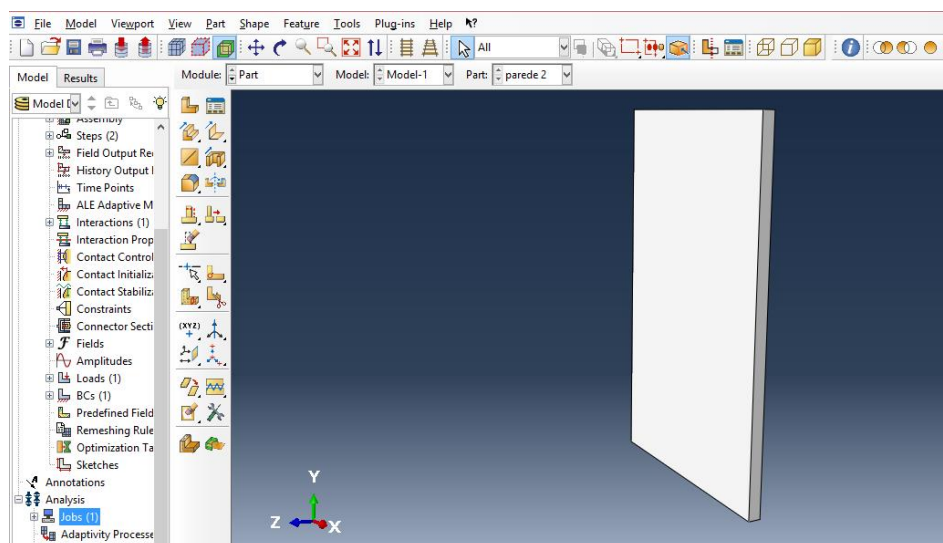
Figura 17: Criação do modelo em estudo.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Para as análises foram modeladas placas que representassem o tipo de painel e consequentemente os materiais e parâmetros dispostos no quadro 7, a figura 18 mostra como o exemplo do painel de concreto maciço com espessura de 10 cm.

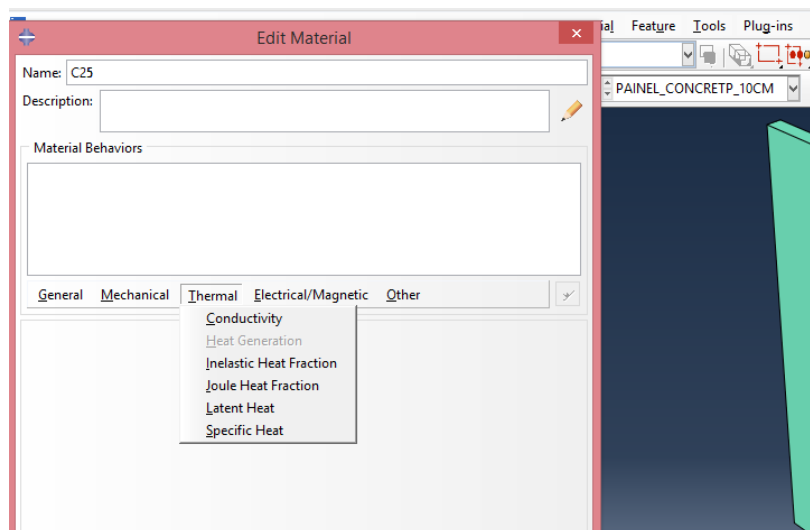
Figura 18: Painel de concreto maciço com espessura de 10cm.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Neste passo é atribuído o material em estudo, e aplicado um coeficiente de condutividade térmica correspondente ao material, como mostra a figura 19.

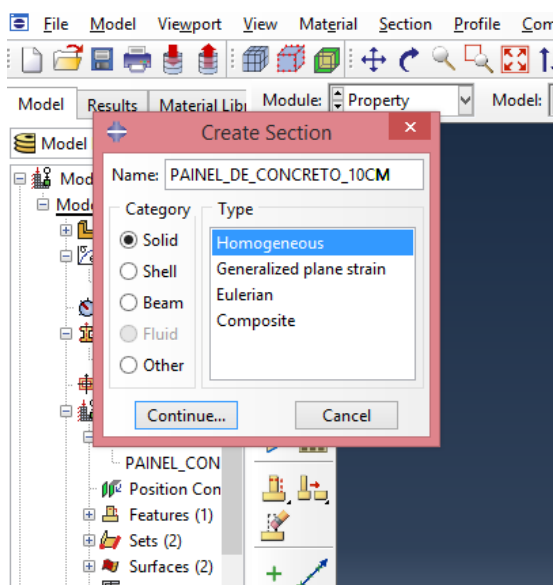
Figura 19: Propriedades térmica do material



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Logo em seguida, foi definida a seção do material, levando em consideração que o material é concreto maciço e que todo o painel será constituído do mesmo material e mesma seção. A seção definida foi nomeada como PAINEL_DE_CONCRETO_10CM, a categoria que descreve a seção é sólida e o tipo foi classificado como homogêneo, e a espessura de 10 cm, que foi fixada de acordo com o modelo exposto pela NBR 15220:2005, como mostra a figura 20 a seguir.

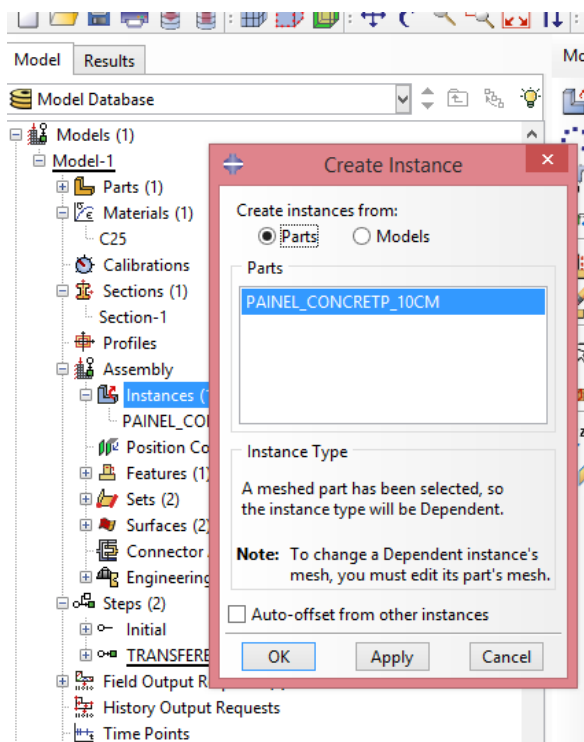
Figura 20: Características da seção do material



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Na figura 21, mostra a sequência da montagem do modelo, nesse passo é necessário clicar em *assembly* e ao expandir o ícone, clicar com o botão direito do mouse em *instances*.

Figura 21: Características da seção do material



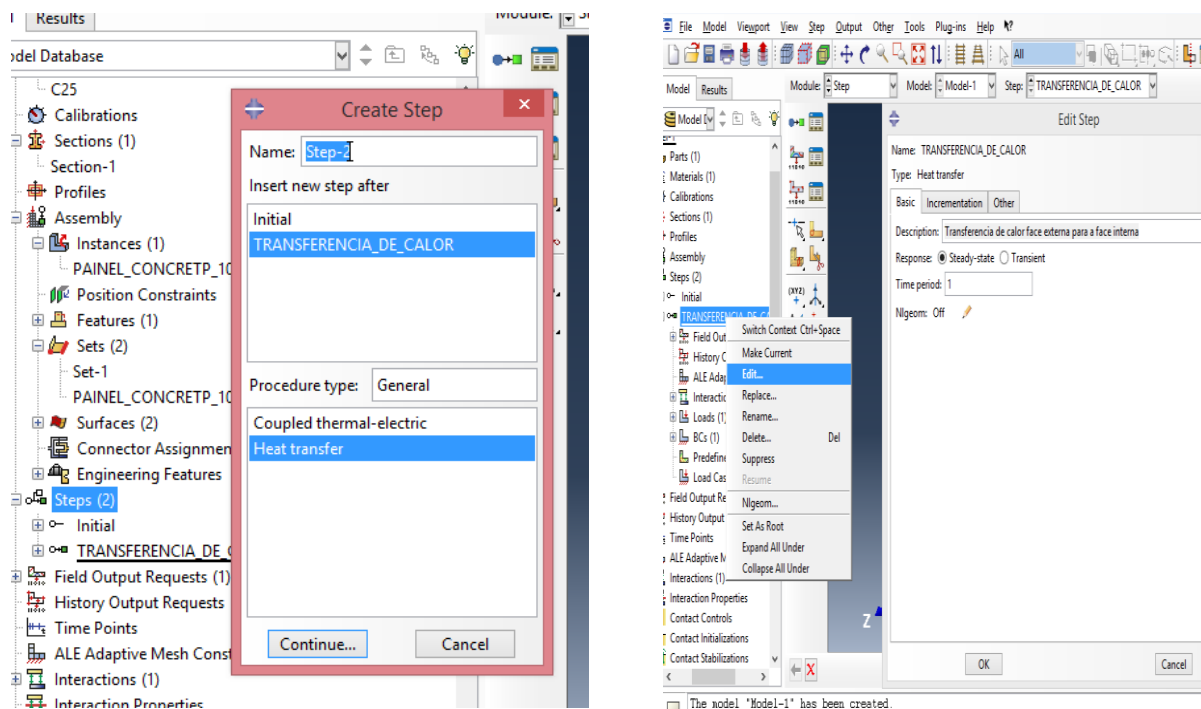
Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Para simular a resposta térmica do painel, será utilizado o passo de transferência de calor. Os passos para análise de transferência de calor são:

- Na Árvore do Modelo, clique duas vezes em *Steps* para criar um passo;
- Na lista de procedimentos gerais disponíveis em *Create Step* da caixa de diálogo, selecione *Heat transfer* e clique em *Continue*.
- *Edit Step* da caixa de diálogo aparece. No campo *Description* da página, o usuário deve ir no *Basic*, e entrar com transferência de calor em regime permanente.
- Mude o tipo de resposta para *Steady state*.
- Aceite todos os outros valores pré-selecionados fornecidos para o passo.
- Clique em OK para criar o passo e sair do editor de passos.

Dessa forma, a figura 22 mostra a sequência desses passos.

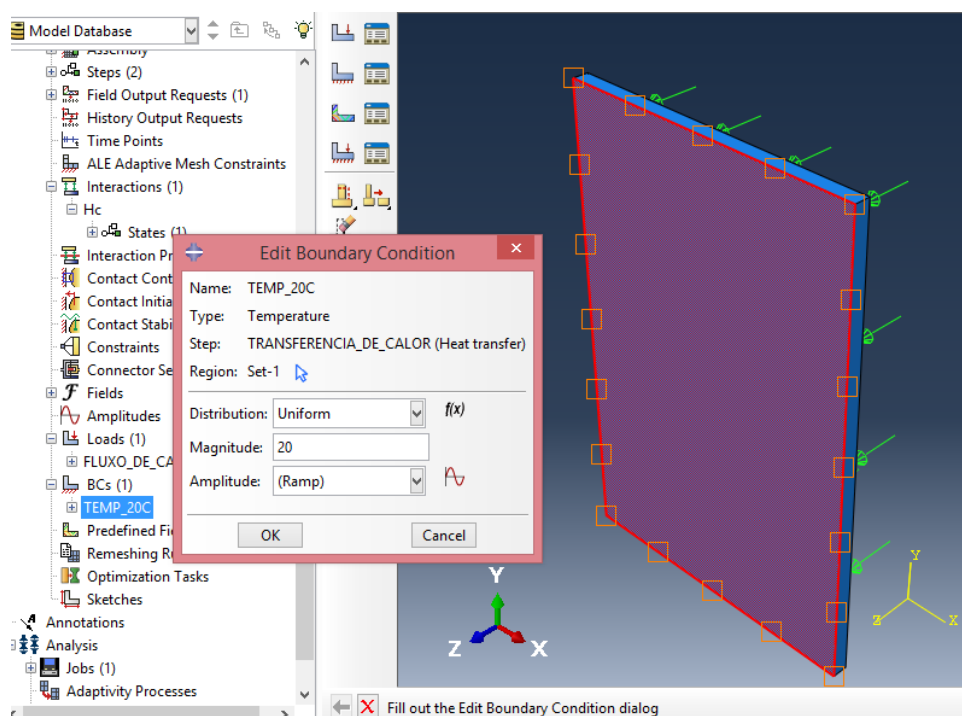
Figura 22: Criando os passos para análise de transferência de calor



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Nesse passo foi criado no comando BCs (carregamento de temperatura) uma condição de temperatura do ambiente interno do painel, como mostrado na figura 23.

Figura 23: Aplicando a temperatura interna para análise de transferência de calor



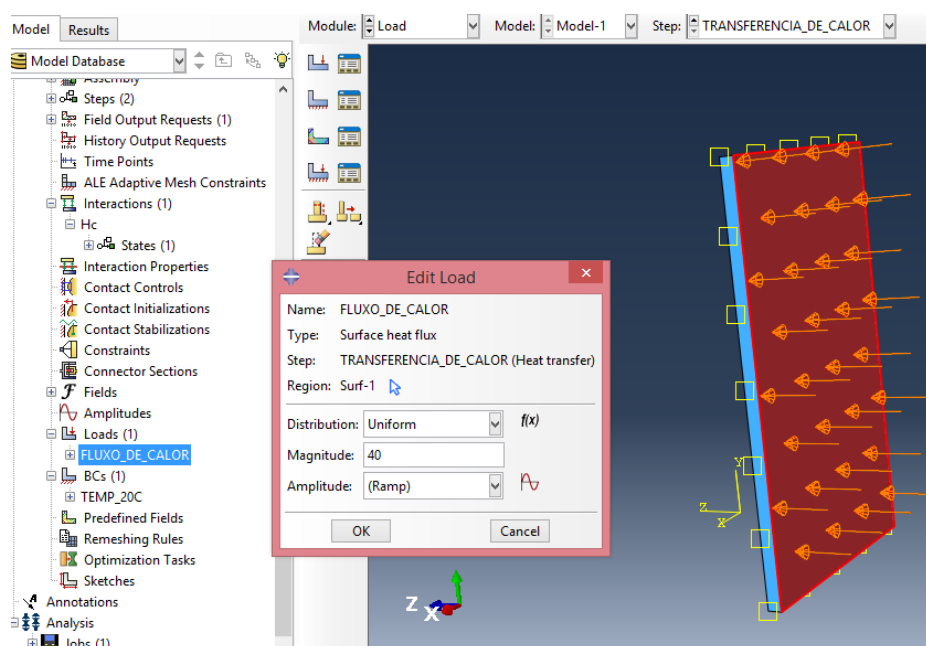
Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Para criar uma carga de temperatura na outra face do painel é necessário seguir os seguintes passos:

- Na Árvore do Modelo, clique duas vezes em *Loads* para criar uma nova carga.
- Na caixa de diálogo *Create Load*:
 - ✓ Chame a carga de fluxo superficial.
 - ✓ Selecione *Step-1* como o passo em que a carga será aplicada.
 - ✓ Na lista *Category*, selecione *ThennaJ*.
 - ✓ Na lista *Types for SeJected Step*, selecione *Surface heat flux*. Clique em Continue.
- Na caixa de diálogo *Region Selection*, selecione a *superffcie* nomeada de Fluxo de calor.
- Depois de certificar-se de que a *superffcie* foi corretamente selecionada. clique em Continue. A caixa de diálogos *Edit Load* aparece.
- Na caixa de diálogos *Edit Load*:
 - ✓ Entre com um valor de 40°C.
 - ✓ Aceite as pré-seleções *Ramp* para *AmpUtude* e *Uniform* para *Distribution*.
 - ✓ Clique em OK para criar a definição de carga e sair do editor.

A figura 24, apresenta a sequência desse passo a passo para obtenção do carregamento na face externa do painel.

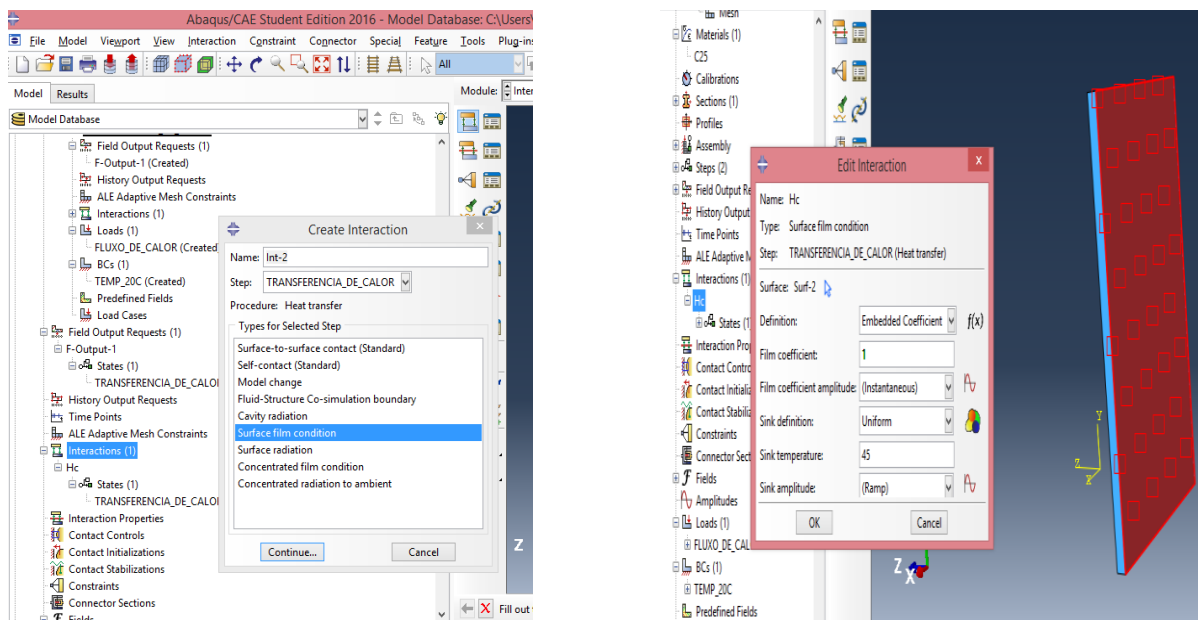
Figura 24: Criando um fluxo de calor aplicado na face externa do painel



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

A aplicação do Coeficiente de transferência de calor (H_c) do painel em análise é feita através no passo *Interactions* como mostrado na figura 25, onde será necessário dizer qual a superfície será aplicada esse coeficiente.

Figura 25: Aplicando o coeficiente de transferência de calor para o concreto



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Para gerar as malhas no objeto em análise, primeiramente deve ir na árvore de serviço e selecionar a opção *Mesh* e o tipo de modelo deve ser *Part*.

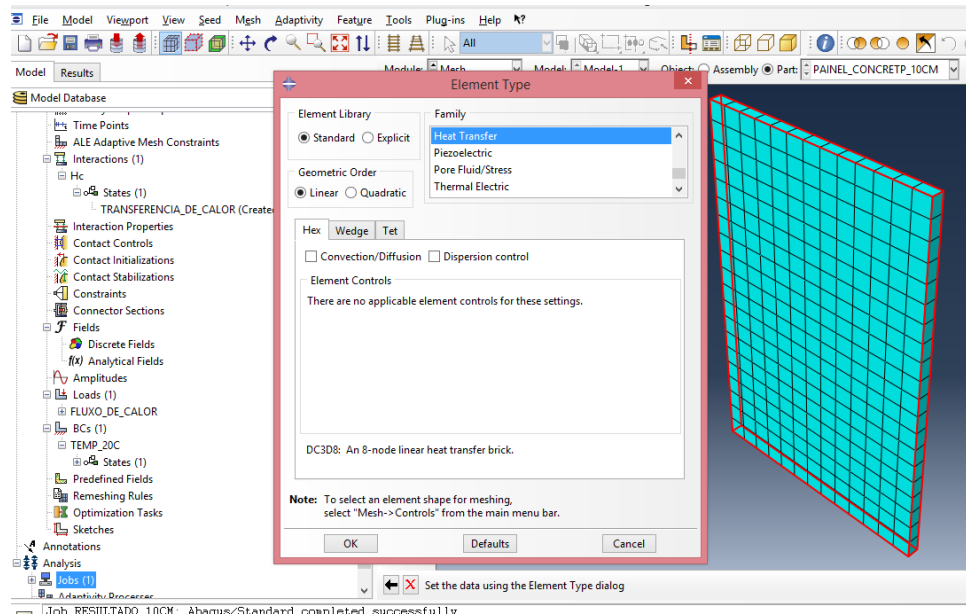
Em seguida, na barra do menu principal, selecione *Mesh*, e logo após selecione *Element Type*.

Na caixa de diálogos *Element Type*, selecione:

- ✓ Standard para *Element Library*.
- ✓ Linear para *Geometric Order*.
- ✓ *Heat Transfer* para Family (família de elementos).

Na parte mais baixa da caixa de diálogos, examine as opções para a forma do elemento. Uma breve descrição do elemento pré-selecionado está disponível no botão de cada página de tabelas. Clique OK para designar elementos DC2D3 para o objeto e fechar a caixa de diálogos, como mostrado na figura 26.

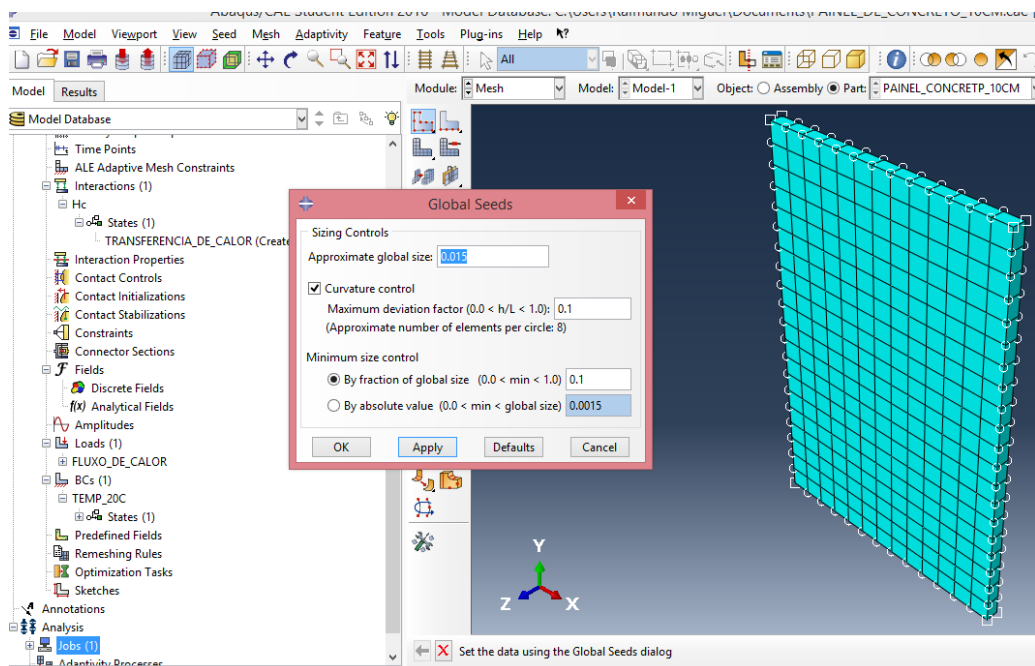
Figura 26: Criação da malha em elementos finitos para transferência de calor.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

O passo a seguir, é ilustrado na figura 27, que após submeter o modelo a uma malha em elementos finitos, foi aplicada uma escala global que determina o número de elementos finitos distribuídos no painel. Para todos os painéis em simulação, foi adotado um fator *approximate global size* de 0.015, devido a versão gratuita do programa só permitir até 1000 elementos finitos.

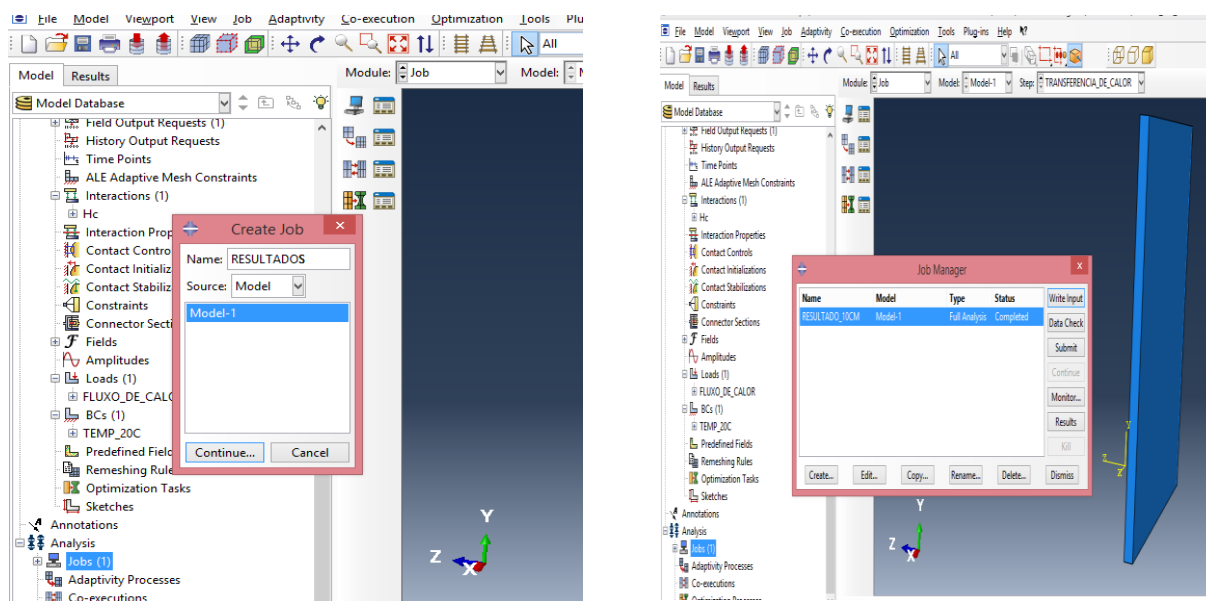
Figura 27: Fator de escala dos elementos finitos no painel.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Após os passos a cima, o modelo praticamente está pronto para ser executado. Para simular a análise deve-se ir na árvore de modelo e clicar com o botão direito do mouse em *Jobs*, no comando *create* e em *name* nomear com RESULTADOS, e clicar em ok. Logo após clicar como *manager*, ir em *submit*, o programa irá rodar e logo após o processamento, deve-se ir no ícone resultados, como ilustrado na figura 28.

Figura 28: Finalizando o modelo – Criando o jobs



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Feito esses procedimentos é possível analisar os resultados obtidos e chegar nas discussões propostas nos objetivos desse trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

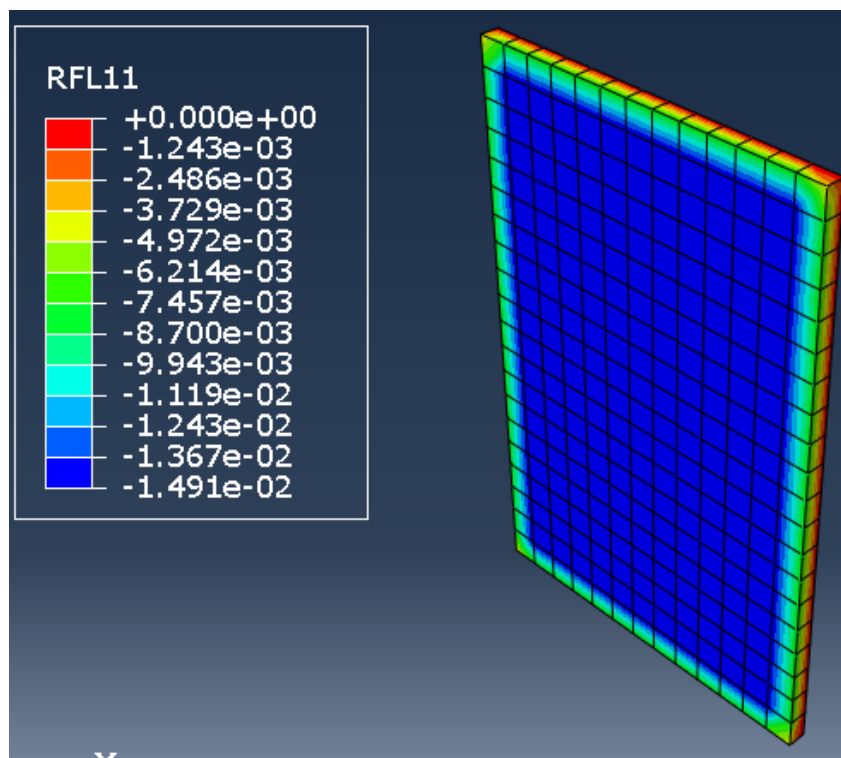
4.1 ANÁLISE DE FLUXO DE CALOR EM PAINEIS DE CONCRETO COM ESPESSURA DE 10CM.

O material escolhido para o primeiro modelo analisado foi o concreto da classe C25, com o peso por unidade de volume de 25 kN/m³ e módulo de elasticidade secante de 24.000.000 kN/m², o f_{ck} do concreto será de 25.000 kN/m². Segundo a NBR 15220:2005, o coeficiente de condutividade térmica aplicado para o concreto será de 1,75 W/m².C°.

Após realizar os passos descritos no item 3.4 da metodologia e obter os resultados da simulação é possível visualizar os valores da temperatura nodal (NT), fluxo de calor por

unidade de área (HFL) e fluxo das reações (RFL), causadas pelo calor, nos elementos. O diagrama de distribuição de temperaturas está ilustrado na figura 29.

Figura 29: Diagrama de distribuição dos Fluxos das reações (RFL11) – Painel com temperaturas interna e externa de 20° e 40° C, respectivamente.

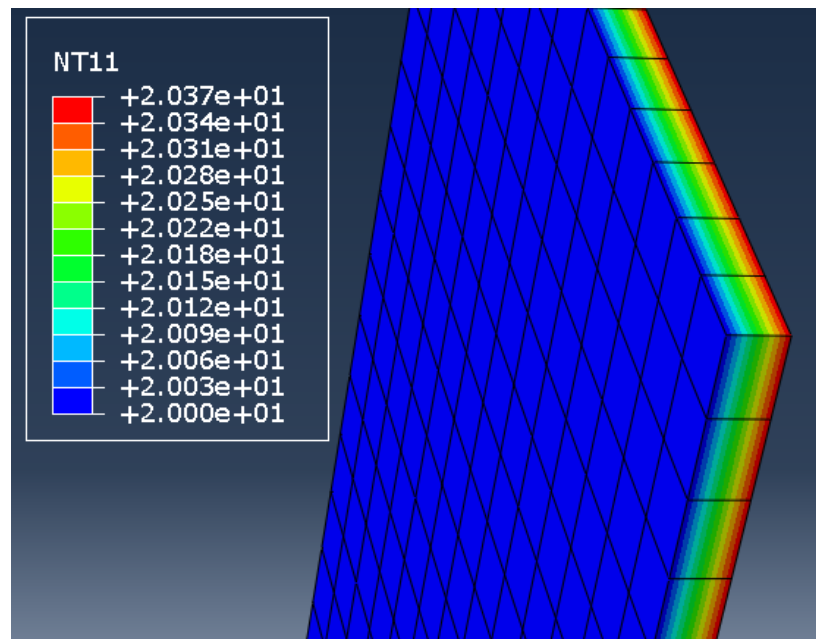


Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Para o painel ilustrado na figura 29, foram adotadas temperaturas medianas referentes à cidade de Caraúbas/RN, de forma que essas temperaturas promovessem uma situação semelhante as temperaturas sentidas na cidade. A face interna foi carregada com uma temperatura de 20°C e a externa uma temperatura de 40°C, e observou-se que ocorre o fluxo de calor por unidade de área da face externa, representada pela cor vermelha, para a face interna, representada pela cor azul, onde a temperatura é conduzida através do fluxo para a face interna.

É possível observar resultados referentes às Temperaturas Nodais (NT) e Fluxo de calor por unidade de área (HFL), o fluxo de calor é dado pela unidade W/m².C (Watt por metro quadro vezes Celsius), como ilustra as figuras 30 e 31.

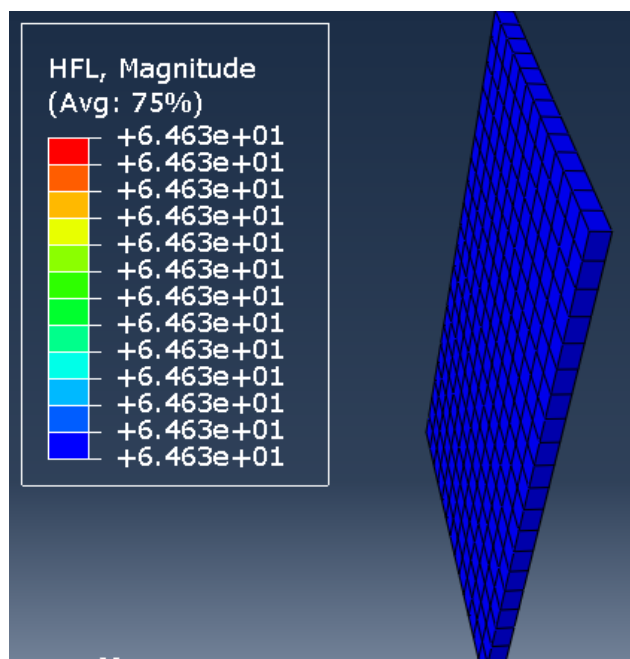
Figura 30: Diagrama de distribuição de temperatura nodais – Painel com temperaturas interna e externa de 20° e 40° C, respectivamente.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

As temperaturas nodais (NT) são transferidas seguindo o fluxo de calor, ou seja, elas saem da face externa, destacada no diagrama através da cor vermelha, e vão para a face interna do painel, representada pela cor azul.

Figura 31: Diagrama de distribuição do fluxo de calor por unidade de área – Painel com temperaturas interna e externa de 20° e 40° C, respectivamente.



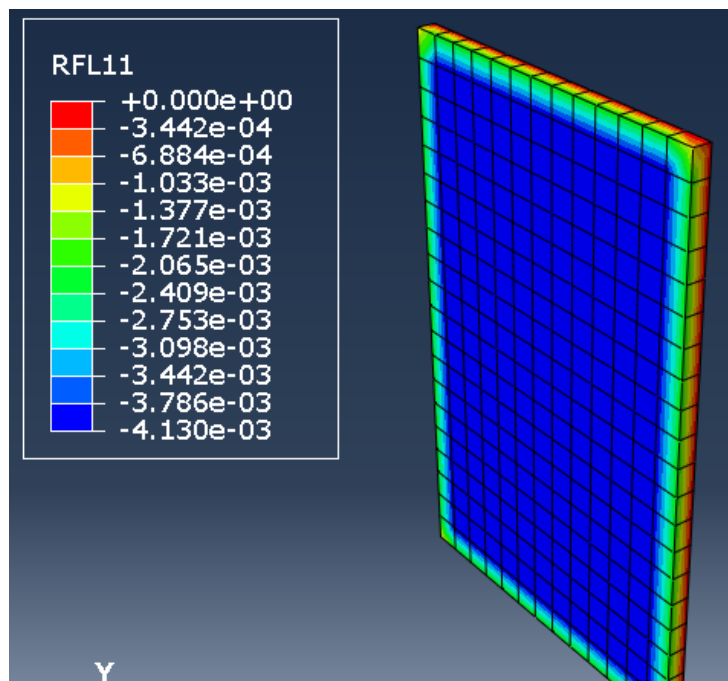
Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Como ilustrado no diagrama na página 49, o fluxo de calor é transferido de forma igual ao longo do painel, devido a condutividade térmica ser igual ao longo do modelo. Observa-se que o fluxo de calor é ilustrado na figura 31 pela cor azul, percorrendo todo o painel.

A mesma análise foi feita para o painel de vedação em concreto com uma temperatura da face interna de 26°C e da face externa de 36°C, temperaturas essas que representam o período de 12:00hs às 13:00hs em Caraúbas/RN no dia 19/03/2018, foi escolhido esse horário do dia, pois faz-se referência as maiores temperaturas para o dia em análise.

O painel possui a mesma espessura do anteriormente, apenas as temperaturas foram modificadas. A figura 32, mostra o diagrama de distribuição do fluxo das reações no painel em análise.

Figura 32: Diagrama de distribuição dos Fluxos das reações (RFL) – Painel com temperaturas interna e externa de 26° e 36° C, respectivamente.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Observa-se que não há mudança nas temperaturas nodais (NT) e no fluxo de calor por unidade de área (HFL), em relação a primeira análise feita, isso é explicado devido o material ser o mesmo e a espessura ser a mesma, sendo assim a temperatura nodal, ou seja a quantidade de calor por elemento é a mesma, e o fluxo permanece o mesmo, devido a condutividade térmica ser igual.

Já para o fluxo das reações (RFL) é possível observar que há uma diferença no fluxo das reações, como mostram os diagramas de fluxos nas figuras 29 e 32, essa mudança é causada devido à variação da temperatura aplicada no sistema.

4.1.1 Transmitância Térmica calculada (U_c) – painel de concreto com espessura de 10 cm.

Com os dados obtidos, é possível calcular a transmitância térmica do painel de vedação em concreto maciço com espessura de 10 cm. Segundo Poças (2008), a expressão que permite calcular é dada a seguir:

Eq. [4.1.1]

$$U_c = \frac{\Sigma Fl}{\Delta T \cdot l \cdot h}$$

Onde:

Fl: fluxo de calor em cada nó;

ΔT : diferença de temperatura em kelvin;

l: comprimento do painel;

h: altura do painel.

Ao aplicar a malha na modelagem, obtive-se 588 elementos finitos e em cada elemento, um fluxo de calor de 6,463 W/m².K. Dessa forma, é possível calcular a U_c .

$$U_c = \frac{588 \cdot 6,463}{283,15 \cdot 2,3}$$

$$U_c = 2,2368 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Sendo assim, é possível comparar a transmitância térmica calculada, com a fornecida pela NBR 15220-3:2005, segundo a norma a transmitância térmica limite para painéis de vedação em concreto maciço de 10 cm, é de $U = 2,49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

4.2 ANÁLISE DE FLUXO DE CALOR EM PAINÉIS DE ALVENARIA CONVENCIONAL COM ESPESSURA DE 14CM

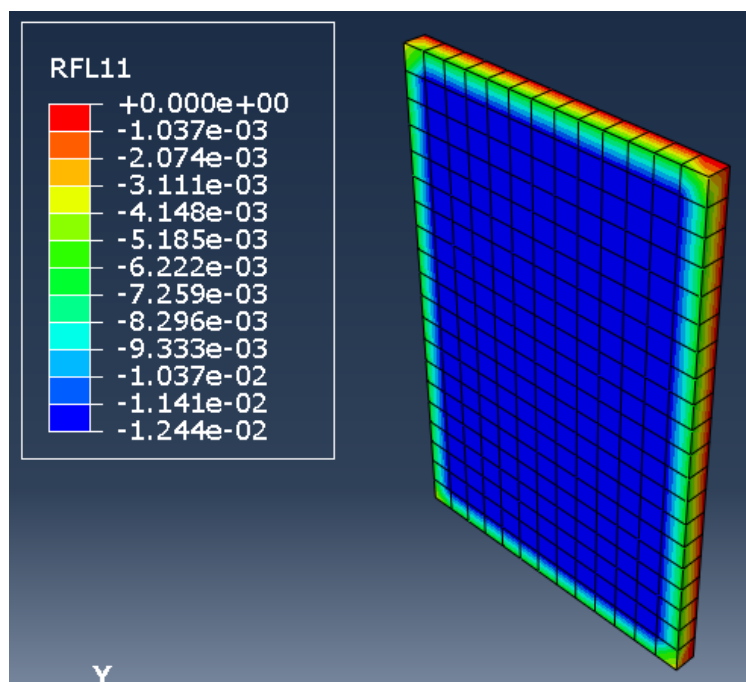
Para simular o comportamento térmico em painéis de vedação em alvenaria convencional com tijolos de 8 furos, com espessura total da parede em 14 cm, foi realizado procedimento análogo ao item 3.4 desse trabalho.

Segundo a NBR 15220:2005, os painéis de alvenaria convencional de tijolos cerâmicos de 8 furos, tem condutividade térmica 0,70 w/m².C. Para fins de simulação, foram aplicadas as

seguintes temperaturas, na face interna 20°C e na externa 40°C, referente a primeira análise feita.

Ao realizar os passos e simular o programa, foi possível obter os seguintes resultados referentes à temperatura nodal (NT), fluxo de calor por unidade de área (HFL) e fluxo das reações (RFL). Na figura 33, observa-se o diagrama do fluxo das reações no painel de alvenaria convencional com temperaturas internas e externas de 20° e 40° C, respectivamente.

Figura 33: Diagrama de distribuição dos Fluxos das reações – Painel de alvenaria convencional com tijolos de 8 furos.

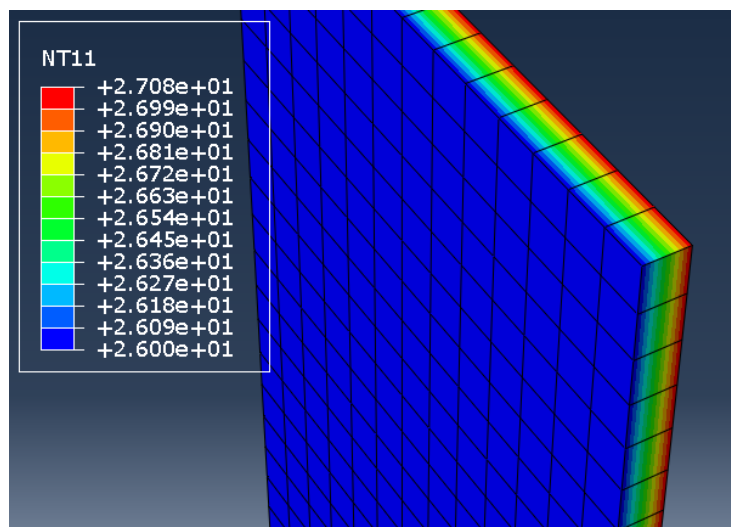


Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

O diagrama ilustrado na figura 33 representa como ocorre o fluxo das reações causados pela aplicação do carregamento da temperatura no painel. Observa-se que há uma variação do fluxo das reações partindo da face externa, representada pela cor vermelha, para a face interna de cor azul, onde há uma maior concentração desse fluxo.

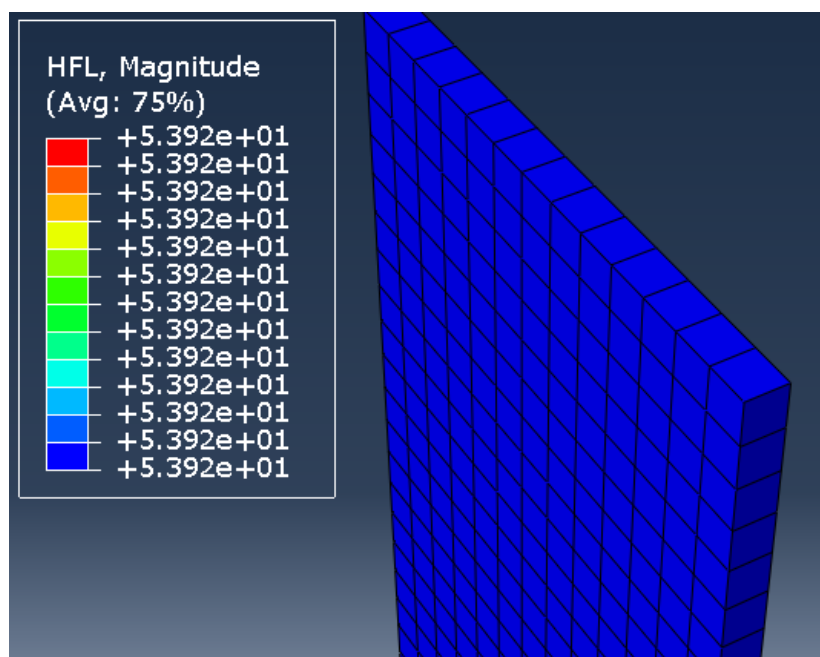
Os resultados por elemento finitos, das temperaturas nodais e fluxo de calor por unidade de área, são expressos a seguir, como mostram os diagramas nas figuras 34 e 35.

Figura 34: Diagrama de distribuição da temperatura nodais – Painel de alvenaria convencional.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Figura 35: Diagrama de distribuição do fluxo de calor por unidade de área – Painel com temperaturas interna e externa de 20° e 40° C, respectivamente.



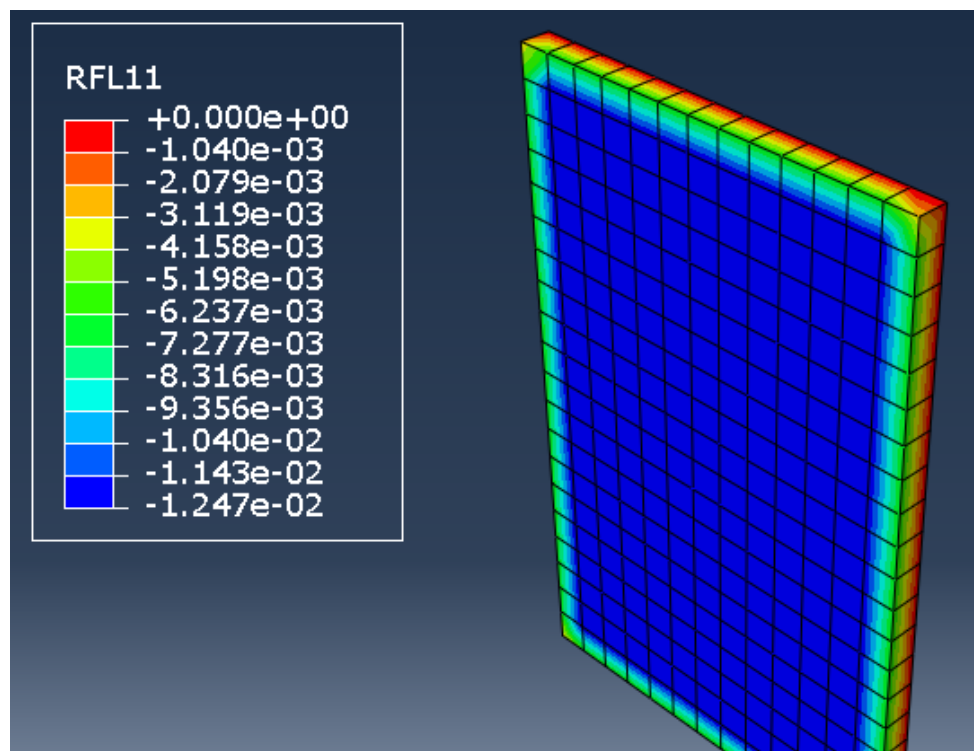
Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

No diagrama ilustrado na figura 35, tem-se o fluxo de calor por unidade de área para o painel de vedação em alvenaria convencional de tijolos de 8 furos, observa-se que o fluxo é igual para todos os elementos finitos, isso se dá devido o material ser homogêneo e pelo fato da condutividade térmica ser a mesma.

Como na simulação do painel de vedação em concreto maciço com espessura de 10 cm, o mesmo procedimento foi realizado no painel de vedação em alvenaria convencional, com as mesmas temperaturas aplicadas ao painel. As temperaturas aplicadas são 26° e 36° C respectivamente, de modo que essa situação represente o período entre 12:00hs às 13:00hs do dia 19/03/2018 na cidade de Caraúbas/RN, adotando como o período mais quente do dia.

Como esperado, os resultados das temperaturas nodais e fluxo de calor por unidade área permanecem as mesmas, devido o material ser o mesmo, ou seja, a condutividade permanece a mesma. Já o fluxo das reações é modificado, seguindo a mudança de intensidade de temperatura aplicada nas faces internas e externas do painel, como mostrado na figura 36.

Figura 36: Diagrama de distribuição dos Fluxos das reações – Painel de alvenaria convencional de tijolos de 8 furos, com temperaturas internas e externas de 26° e 36° C.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Desse modo, ao observar as figuras 33 e 36, nota-se uma mudança no fluxo das reações, isso é causado devido a variação da temperatura aplicada em ambos os painéis, onde no primeiro se aplicou 20° e 40° C, e na segunda análise foram aplicados 26° e 36° C.

4.2.1 Transmitância Térmica calculada (U_c) – painel de alvenaria convencional de tijolos de 8 furos com espessura de 14 cm.

A transmitância térmica calculada, é obtida através do fluxo de calor por unidade de área, fornecida pelo programa, dessa forma obtém-se uma comparação com a transmitância térmica limite da NBR 15220-3:2005. Utiliza-se a equação 4.1.1, como mostrada no item anterior.

Ao aplicar a malha na modelagem, obteve-se 588 elementos finitos e em cada elemento, se deu um fluxo de calor de 5,392 W/m².K. Dessa forma, é possível calcular a U_c .

$$U_c = \frac{588.5,392}{283,15.2.3}$$
$$U_c = 1,8662 \text{ W/m}^2. \text{K}$$

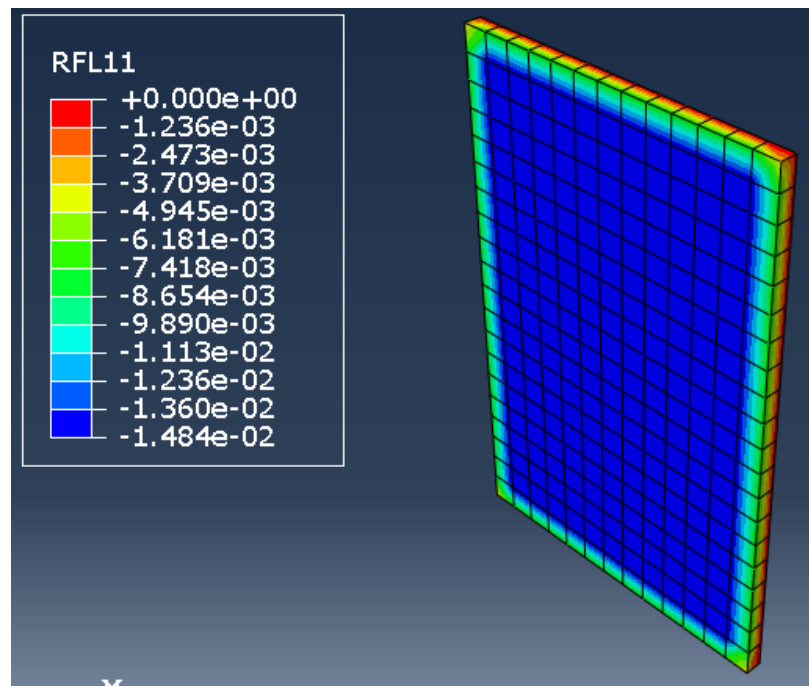
Sendo assim, ao compararmos a $U_c = 1,8662 \text{ W/m}^2. \text{K}$ com a $U = 4,40 \text{ W/m}^2. \text{K}$ fornecida pela norma, tem-se que o painel em alvenaria convencional de tijolos de 8 furos está abaixo do limite máximo orientado pela norma, atendendo assim os critérios da zona 8, classificação bioclimática, que no qual a cidade de Caraúbas/RN está inserida.

4.3 ANÁLISE DE FLUXO DE CALOR EM PAINEIS DE TIJOLOS MACIÇOS APARENTES, COM ESPESSURAS TOTAL DA PAREDE DE 10 CM.

Seguindo as simulações, foram feitos os procedimentos para o painel de vedação em alvenaria de tijolos maciços aparentes, com espessura total da parede de 10 cm, e seguindo orientações da NBR 15220:2005 foi aplicado um coeficiente de condutividade térmica de 0,90 W/m². C° para o material constituinte. Da mesma que nos itens anteriores, foram aplicadas as temperaturas de 20° e 40° C para as faces internas e externas, respectivamente.

Foram obtidos os seguintes resultados referentes ao fluxo das reações (RFL), como mostra o diagrama ilustrado na figura 37.

Figura 37: Diagrama de distribuição do Fluxo das Reações – Pannel com temperaturas interna e externa de 20° e 40° C, respectivamente.

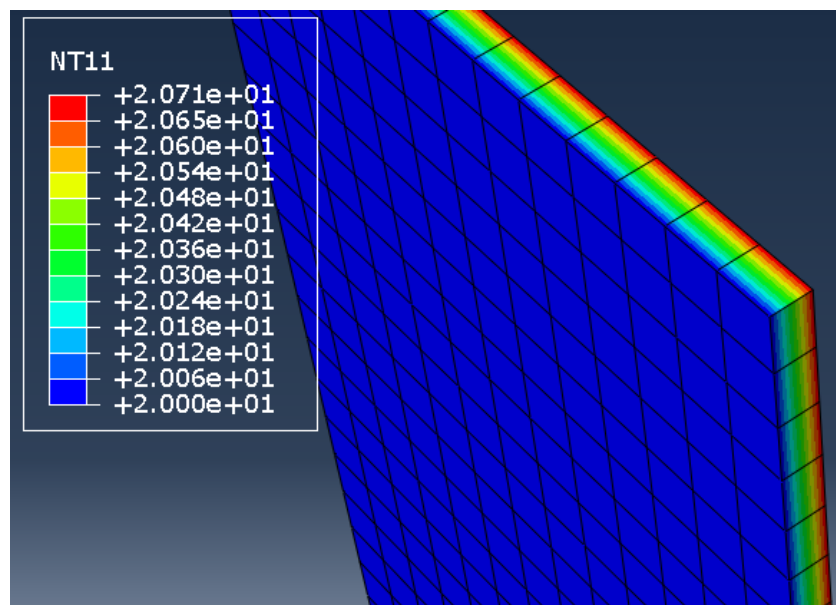


Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor

Como mostrado a cima no diagrama, o fluxo das reações ocorre da face externa, exemplificado pela cor vermelha, para a face interna onde predomina o fluxo na cor azul.

As temperaturas nodais (NT) para o painel de tijolos aparentes estão evidenciadas na figura 38.

Figura 38: Diagrama de distribuição da temperatura nodais – Pannel de alvenaria de tijolos maciços aparentes.

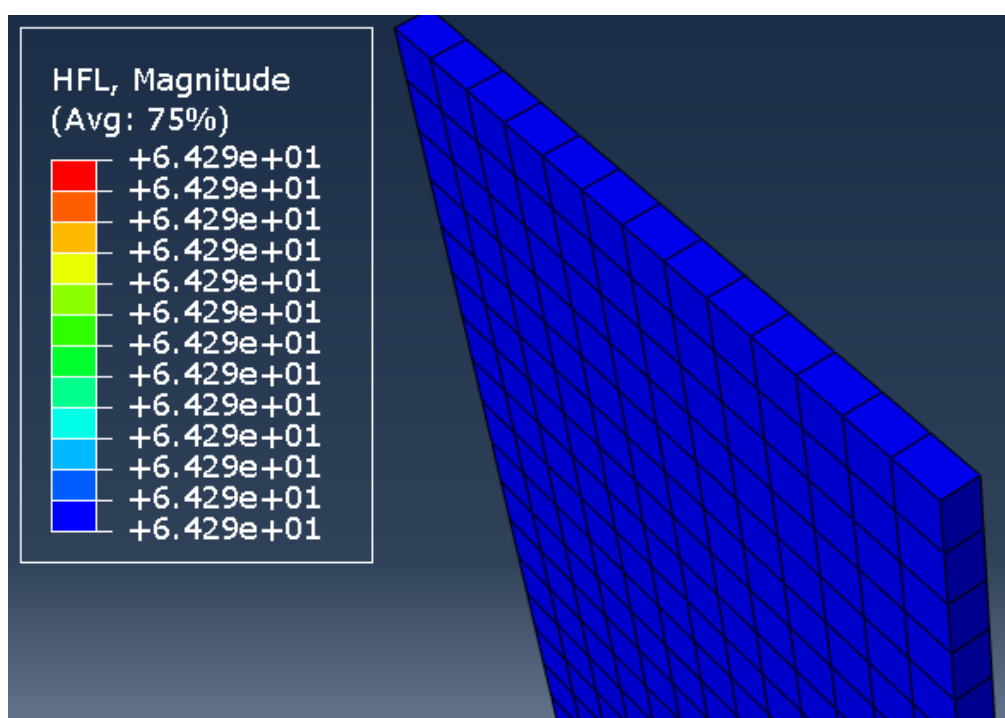


Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Essas temperaturas estão distribuídas ao longo do painel, onde na cor vermelha (face externa) as temperaturas estão entorno dos $2,07 \times 10^1$ C° e na cor azul (face interna) essas temperaturas estão entorno de $2,00 \times 10^1$, ocorrendo uma pequena variação das temperaturas por elemento.

Já a figura 39, mostra o diagrama de distribuição do fluxo de calor por unidade de área para o painel de tijolos maciços aparentes, com temperaturas aplicadas na face interna 20° e 40° C.

Figura 39: Diagrama de distribuição do fluxo de calor por unidade de área – Painel de alvenaria de tijolos maciços aparentes.

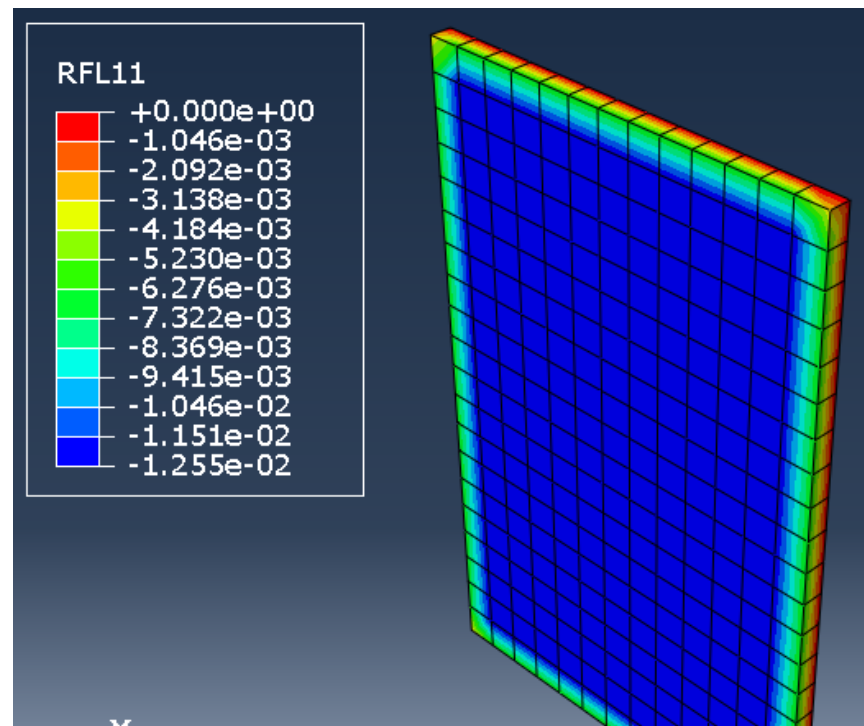


Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Observa-se que o fluxo de calor por unidade de área corresponde as outras análises feitas, de modo que o fluxo permanece o mesmo em todos os elementos finitos distribuídos, e que isso é devido a condutividade térmica ser a mesma para cada elemento.

Nos outros modelos foram feitas análises mudando a temperatura das faces, da mesma forma foi aplicado para o painel da vedação em alvenaria de tijolos maciços aparentes. Aplicou-se as temperaturas de 26° e 36° C, nas faces internas e externas. E dessa forma, obteve-se que o fluxo de calor por unidade de área e as temperaturas nodais permanecem as mesmas devido ser mantido os parâmetros de condutividade térmica e espessuras, porém como esperado houve uma variação no fluxo das reações, devido a variação de temperatura no painel, como mostra a figura 40.

Figura 40: Diagrama de distribuição do Fluxo das Reações – Pannel com temperaturas interna e externa de 26° e 36° C, respectivamente.



Fonte. Software Abaqus 2016. Adaptado pelo autor.

Nota-se que houve uma variação nos fluxos das reações ilustrados nas figuras 37 e 40, devido a mudança das temperaturas aplicadas no painel.

4.3.1 Transmitância Térmica calculada (U_c) – Pannel de tijolos maciços aparentes, com espessura total da parede de 10cm.

Como calculado nas outras análises, obtive-se o fluxo de calor por unidade de área, e assim foi possível obter a transmitância térmica calculada. Através da norma 15220-3:2005 é possível comparar o valor calculado com o da norma.

Ao aplicar a malha na modelagem, obtive-se 588 elementos finitos e em cada elemento, tem-se um fluxo de calor de 6,429 W/m².K. Sendo assim, é possível calcular a U_c .

$$U_c = \frac{588 \cdot 6,429}{283,15 \cdot 2,3}$$

$$U_c = 2,2251 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Ao compararmos a $U_c = 2,2251 \text{ W/m}^2.\text{K}$ com a $U = 3,70 \text{ W/m}^2.\text{K}$ fornecida pela norma, tem-se que o painel em alvenaria tijolos maciços aparentes está abaixo do limite máximo orientado pela norma, atendendo assim os critérios da zona 8, classificação bioclimática, que no qual a cidade de Caraúbas/RN está inserida.

4.4 COMPARANDO OS RESULTADOS OBTIDOS

O quadro 9, mostra um comparativo dos resultados encontrados referentes as transmitâncias térmicas calculadas e a transmitância térmica fornecida pela NBR 15220-3:2005, referentes aos modelos analisados nesse trabalho.

Quadro 9: Valores de transmitância térmica calculada versus transmitância térmica fornecida pela NBR 15220-3:2005.

Modelo	Transmitância Térmica Calculada – U_c	Transmitância Térmica NBR 15220-3:2005
Painel em concreto C25.	2,2368 $\text{W/m}^2.\text{K}$	2,49 $\text{W/m}^2.\text{K}$
Painel alvenaria Convencional tijolos de 8 furos.	1,8622 $\text{W/m}^2.\text{K}$	4,40 $\text{W/m}^2.\text{K}$
Painel de alvenaria Tijolos Maciços aparentes.	2,2251 $\text{W/m}^2.\text{K}$	3,70 $\text{W/m}^2.\text{K}$

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, observa-se que o modelo que mais se aproximou do limite da norma foi o painel em concreto maciço da classe C25, onde obteve uma transmitância térmica calculada de $2,2368 \text{ W/m}^2.\text{K}$, no qual a diferença para o limite da norma corresponde a 10,1686 %.

Já o painel de alvenaria convencional de tijolos de 8 furos, foi o modelo que se manteve mais distante do valor limite de transmitância térmica, onde a diferença do valor calculado corresponde a 57,68% do limite da norma. Isso se deu devido os vazios no interior da alvenaria (os furos) onde os mesmos estão preenchidos com ar, dessa forma possibilita uma menor passagem de calor.

5. CONCLUSÃO

Ao térmico desse trabalho é possível realizar as considerações finais sobre as análises dos resultados obtidos através do software Abaqus CAE 2016.

Após a análise dos resultados encontrados, foi possível concluir que o fluxo das reações de calor depende da variação da temperatura aplicada em ambas as faces do painel de vedação vertical, de modo que ao comparar painéis carregados com temperaturas diferentes, obteve-se resultados de fluxos diferentes.

Também é possível concluir que as temperaturas nodais não mudam com a variação do carregamento térmico, visto que cada elemento finito transmite a mesma quantidade de calor ao longo do painel. Nas análises foi observado, que ao comparar painéis do mesmo material, espessura e temperaturas diferentes, observou-se que não há mudança nas temperaturas nodais, isso devido a condutividade térmica ser igual em ambos os painéis comparados.

Da mesma forma, ocorre para o fluxo de calor por unidade de área, de modo que ao modificar a intensidade das temperaturas nas faces internas e externas, obteve-se o mesmo fluxo de calor por unidade de área, sendo explicado da mesma forma que o parágrafo anterior, o painel possui a mesma espessura, dimensões e condutividade térmica, desse modo o fluxo de calor por unidade de área permanece o mesmo para condições de temperaturas diferentes.

Ainda é possível concluir, que ao comparar os resultados encontrados de transmitância térmica com os dados fornecidos pela NBR 15220-3:2005, tem-se que os painéis de vedação em alvenaria convencional de tijolos de 8 furos, com espessura total da parede de 14 cm, são mais viáveis tecnicamente, relacionados aos parâmetros de conforto térmico e bem-estar dos usuários, isso devido a diferença da transmitância térmica calculada ter correspondido a 57,58% do limite de aceitação da transmitância técnica da norma. Isso, se deve aos vazios preenchidos pelo ar no interior da alvenaria (os furos) de modo a diminuir a passagens do calor do ambiente externo para interno.

De modo geral, conclui-se que os três modelos analisados nesse trabalho atenderam os parâmetros de aceitação da NBR 15220-3:2005, onde ao calcular a transmitância térmica de cada painel, obteve-se que todos estão a baixo do limite máximo de aceitação dos valores. E que o painel de concreto maciço da classe C25 está próximo do parâmetro que limita o uso, porém ainda atende a estratégia do zoneamento bioclimática 8, no qual a cidade de Caraúbas/RN caracterizada.

REFERÊNCIAS

ARANTES, Beatriz. **Conforto térmico em edificações de interesse social**, Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Bauru, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.575: Norma de Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

BOGO, Amílcar José, **Limitações quanto aos parâmetros de desempenho térmico e estratégias bioclimáticas recomendadas pela norma brasileira de desempenho térmico de habitações de interesse social**, Florianópolis, 2003.

CAU/BR – Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil. **Norma de Desempenho da ABNT: garantia de qualidade em obras de casas e apartamentos**. Disponível em: <<http://www.caubr.gov.br/mudancasnormadesempenho/>>. Acesso em: 04 dez. 2017.

CLIMA TEMPO. Previsão do tempo. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

DUARTE, Vanessa C. P. **Desempenho Térmico de Edificações**. 239 p. Universidade Federal de Santa Catarina CTC - Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2016.

LAKATOS, Eva Maria, MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos da metodologia científica**, 5 ed, São Paulo: Atlas, 2003.

LORDSLEEM JUNIOR, A. C. **O processo de produção das paredes maciças. Seminário Tecnologia e Gestão na produção de edifícios – Vedações Verticais**. 1998, São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC.

KRÜGER, Paulo Gustavo Von. **Análise de Painéis de Vedação nas Edificações em Estrutura Metálica**. P. 167. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

POÇAS, João Pedro Marques. **Estudo do comportamento térmico e mecânico em paredes de alvenaria**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

POSSEBOM, Alessandro; PINHEIRO, Anderson Duarte; MULLER, Gean. **Ventilação cruzada**. 5º Seminário internacional de construções sustentáveis. 2016. Passo Fundo. Imed, 2016. 4 p.

PRONTOMIX – **Pavimento e blocos de concreto**. Disponível em: <http://www.prantomix.com.br/site/produtos_blocos_alvenaria>. Acesso em: 04 dez. 2017.

RORIZ, Maurício. **Conforto e desempenho térmico de edificações**. São Carlos: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia Programa de Pós-graduação em Construção Civil, 2008. 61 p.

SACHT, Helenice Maria. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. P. 286. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2008.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

TERMKCAL – **Painéis Isotérmicos**. Disponível em: < <http://www.termkcal.com.br/paineis-isotermicos/>>. Acesso em: 04 jan. 2018.

THOMAZ, Ercio ...[et al.]. **Alvenaria de vedação em blocos cerâmicos**. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2009. Publicação IPT.

ANEXOS

ANEXO I: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico.

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.

L	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21°C e 30°C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação, pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.
---	---

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT,2005). Adaptado pelo autor.