



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

JULIANA AVILA

Estudo Paramétrico de Paredes Térmicas Compostas

CAMPINAS
2018

JULIANA AVILA

Modelagem de Paredes Térmicas Compostas

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual de Campinas como parte
dos requisitos exigidos para obtenção do título de
Mestra em Engenharia Mecânica, na Área de
Térmica e Fluidos .

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA
PELA ALUNA JULIANA AVILA, E ORIENTADA
PELO PROF. DR. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL.

.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2018**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Modelagem de Paredes Térmicas
Compostas**

Autor: Juliana Avila

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Kamal Abdel Radi Ismail
Instituição: Unicamp / FEM

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady
Instituição: Unicamp / FEM

Vivaldo Silveira Junior
Instituição: Unicamp / FEA

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 05 de fevereiro de 2018.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Av55e Avila, Juliana, 1989-
Estudo paramétrico de paredes térmicas compostas / Juliana Avila. –
Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Mecânica.

1. Conforto térmico. 2. Análise térmica. 3. Modelagem matemática e
simulação. 4. Isolamento térmico. I. Ismail, Kamal Abdel Radi, 1940-. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Parametric study of composite thermal walls

Palavras-chave em inglês:

Human comfort

Thermal analysis

Simulation and modeling

Insulation (Heat)

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestra em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Kamal Abdel Radi Ismail [Orientador]

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

Vivaldo Silveira júnior

Data de defesa: 05-02-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9125-4695>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7843764485542993>

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio Avila de Jesus e Maria Lucia de Sousa Avila, e aos meus irmãos Ileana Avila, Luis Antonio de Sousa Avila e Anne Karoline Avila.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a vida, saúde e por permitir que eu pudesse realizar e concluir este trabalho.

Aos meus pais Antônio Avila de Jesus e Maria Lucia de Sousa Avila, e aos meus irmãos Ileana Avila, Luis Antonio de Sousa Avila e Anne Karoline Avila, que mesmo distantes, me darem todo apoio, carinho e força que foram fundamentais nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail, pela orientação deste trabalho, por ter confiado em mim e contribuído para meu crescimento profissional.

A WIKA, pelo apoio financeiro. Em especial ao Fernando Albuquerque e Carlos Guapyassu, por confiarem em mim e pelo apoio dado.

A pessoa especial, José Jair de Albuquerque Júnior, que me apoiou nos momentos mais difíceis dessa jornada e sempre esteve ao meu lado.

A todas as pessoas, que de alguma forma contribuíram para esta conquista, direta ou indiretamente, meu agradecimento.

Resumo

O conforto térmico em edifícios residenciais contribui entre 30 a 40% do consumo de energia elétrica afetando diretamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a demanda de energia, provocando altos picos de energia durante determinadas horas do dia. A correta modelagem de paredes térmicas compostas empregadas em edificações e seus elementos construtivos promovem maior eficiência energética e conforto térmico aos usuários. A presente pesquisa visa estudar os efeitos da variação de espessura das paredes, modelagem de paredes duplas com e sem isolante térmico, propriedades físicas dos materiais de construção e revestimento externo das paredes, buscando assim, a melhor opção entre elas e até mesmo a melhor combinação das alternativas apresentadas. Testes numéricos foram realizados para aperfeiçoar a grade numérica. Três paredes térmicas foram investigadas; parede simples usada como parede de referência, parede simples com diferentes revestimentos na superfície externa, adição de biomassa em blocos de construção e, finalmente, parede dupla, parede dupla com espaçamento cheio de ar estagnado ou água. A influência dessas variações na temperatura ambiente interna máxima e retardamento de pico de temperatura correspondente em relação à temperatura máxima da superfície externa foi calculada para cada caso. Os resultados mostraram que a aplicação dessas estratégias ou combinações delas pode aumentar a massa térmica do sistema, reduzir as flutuações de temperatura no ambiente interno e reduzir as perdas de energia.

Palavras-chave: Parede térmica, conforto térmico passivo, modelagem de paredes térmicas.

Abstract

Active thermal comfort in residential buildings contributes 30 to 40% of the energy consumption and this directly impacts the greenhouse gas emissions and the global energy demand, provoking severe energy demand peaks during certain hours of the day. The correct modeling of composite thermal walls used in buildings and their constructive elements promote greater energy efficiency and thermal comfort to users. This research aims to study the effects of varying the thickness of the wall, modeling double walls with and without thermal insulation, physical properties of building materials and outer coating of the walls, looking like the best option among them, and even the best combination the alternatives presented. Numerical tests were realized to optimize the numerical grid. Three thermal walls were investigated; simple wall used as a reference wall, simple wall with incorporations of external surface color, bio mass additives to construction blocks, and finally double wall, double wall with spacing filled with stagnant air and water. The influence of these variations on the maximum internal ambient temperature and the corresponding time lag with respect to the maximum external surface temperature were calculated for each case. The results showed that applying these strategies or combinations of them can increase the thermal mass of the system, reduce the temperature fluctuations in the internal ambient and reduce energy losses.

Keywords: Thermal walls; Passive thermal comfort; Modeling of thermal walls.

Lista de Ilustrações

Figura 3. 1 - Geometria das paredes térmicas analisadas.....	31
Figura 3. 2 – Tempo E em minutos para cada dia do ano.	32
Figura 3. 3 – Ângulos solares e relação com a superfície inclinada.	34
Figura 3. 4 – Declinação solar ao longo do dia do ano, conforme Equação 3.15.	35
Figura 5. 1 - Malha computacional das paredes térmicas.	51
Figura 5. 2- Fluxograma do programa computacional.	61
Figura 5. 3 - Fluxograma do programa computacional SIMPLE.....	64
Figura 6. 1 – Comparação entre o presente trabalho e resultados numéricos apresentados por Castro (1991) para a temperatura horaria da superfície interna e externa diária para uma parede simples.	66
Figura 6. 2 – Comparação entre o presente trabalho e resultados numéricos apresentados por Castro (1991) para a temperatura horaria da superfície interna e externa diária para uma parede dupla.....	66
Figura 6. 3 – Comparação entre o presente trabalho e resultados experimentais apresentados por Castro (1991) para a temperatura horaria da superfície interna e externa diária para uma parede dupla.....	67
Figura 6. 4 – Comparação entre o presente trabalho e resultados experimentais apresentados por Marques (2007) para a temperatura horaria da superfície interna e externa diária para uma parede simples.	68
Figura 7. 1 – Radiação total instantânea incidente.....	70
Figura 7. 2 - Definição do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura	70
Figura 7. 3 - Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície externa.	72
Figura 7. 4 - Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície interna.....	73
Figura 7. 5 - Efeito da variação da razão de temperatura máxima e deslocamento de temperatura para diferentes espessuras de parede.....	73

Figura 7. 6 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação da espessura da parede e uma parede padrão	74
Figura 7. 7 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície externa.....	75
Figura 7. 8 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície interna.....	76
Figura 7. 9 - Efeito da variação da condutividade térmica na razão de temperatura máxima e deslocamento de temperatura.	76
Figura 7. 10 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação da condutividade térmica da parede e uma parede padrão	77
Figura 7. 11 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície externa.....	79
Figura 7. 12 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície interna.....	79
Figura 7. 13 - Efeito da variação do acabamento da superfície externa na razão de temperatura máxima.....	80
Figura 7. 14 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação dos revestimentos externos da parede e uma parede padrão	80
Figura 7. 15 - Efeito da variação da adição de biomassa em material de construção na temperaturas da superfície externa.....	82
Figura 7. 16 - Efeito da variação da adição de biomassa em material de construção na temperaturas da superfície interna.....	82
Figura 7. 17 - Efeito da adição de biomassa em materiais de construção na razão de temperatura máxima.....	83
Figura 7. 18 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento entre as paredes de 12 cm espaçada por 0,2 cm de ar confinado.....	84
Figura 7. 19 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento entre as paredes de 12 cm espaçada por 1,00 cm de ar confinado.....	85
Figura 7. 20 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento entre as paredes de 12 cm espaçada por 2,00 cm de ar confinado.....	85

Figura 7. 21 - Efeito da variação do espaçamento na temperatura da superfície externa.	86
Figura 7. 22 - Efeito da variação do espaçamento na temperatura da superfície interna.	86
Figura 7. 23 - Efeito da variação do espaçamento no Fator de Decremento (RT^*)......	87
Figura 7. 24 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre o espaçamento entre as paredes e uma parede padrão	87
Figura 7. 25 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 0,2 cm para paredes com revestimento externo de cor branca.....	89
Figura 7. 26 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 0,2 cm para paredes com revestimento de vegetação.	89
Figura 7. 27 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 0,2 cm para paredes com revestimento externo de cor preta.	90
Figura 7. 28 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 2 cm para paredes com revestimento externo de cor branca.....	90
Figura 7. 29 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 2 cm para paredes com revestimento externo de vegetação.	91
Figura 7. 30- Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 2 cm para paredes com revestimento externo de cor preta	91
Figura 7. 31- Efeito da variação da absorvidade no Fator de Decremento (RT^*).	92
Figura 7. 32 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação da absorvidade térmica da parede e uma parede padrão	92
Figura 7. 33 – Perfil de temperatura para o espaçamento “b” de paredes de diferentes espessuras.....	93
Figura 7. 34 - Fator de Decremento (RT^*) na região “b” referente ao espaçamento entre paredes de diferentes espessuras.	94
Figura 7. 35 – Taxa horária de energia de calor durante uma hora para varias espessuras de parede.	95
Figura 7. 36 – Temperatura da superfície externa para varias as modelagens de paredes.	96
Figura 7. 37 - Temperatura da superfície interna para varias as modelagens de paredes.	96
Figura 7. 38 - Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) para as modelagens de parede.	97

Lista de Tabelas

Tabela 3. 1 - Fator de simulação em porcentagem para cada hora do dia.	38
Tabela 7. 1 - Absorvidade α e emissividade ε dos revestimentos externos conforme Çengel (2012) e ASHRAE (2001)	78
Tabela 7. 2 - Propriedades térmica da biomassa	81
Tabela 7. 3 - Absorvidade α e emissividade ε dos revestimentos externos conforme Çengel (2012) e ASHRAE (2001)	88
Tabela 7. 4 - Propriedades térmica da água	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

A	Área [m ²]
a	Região da parede externa
b	Região do espaçamento entre as paredes
Bi	Coeficiente de Transferência de Calor [adimensional]
c	Região da parede interna
<i>E</i>	Tempo em função do dia do ano [min]
g	Aceleração gravitacional [m/s ²]
<i>Gr</i>	Número de Grashof [adimensional]
h	Coeficiente global de transferência de calor por convecção [W/m ² . °C]
I	Radiação total instantânea [W/m ²]
I _D	Intensidade da Radiação Direta [W/m ²]
I _d	Intensidade da Radiação Difusa [W/m ²]
I _{dh}	Radiação difusa horária [W/m ²]
I _o	Insolação extraterrestre diária [KJ/m ²]
I _{on}	Radiação solar [W/m ²]
<i>I_{sc}</i>	Irradiância solar total [W/m ²]
I _{TH}	Radiação total média diária [W/m ²]
<i>k</i>	Condutividade Térmica [W/m . °C]
L _{tt}	Meridiano [°]
L _{long}	Longitude [°]
N	Duração do dia [h]
n	Dia do ano [adimensional]
<i>Nu</i>	Número de Nusselt [adimensional]
P _r	Número de Prandtl [adimensional]
Q	Taxa de condução de calor [kW]
Q _s (t)	Intensidade solar incidente sobre a superfície [MJ/m ²]
Ra	Número de Rayleigh [adimensional]
T	Temperatura [°C]

T_{Solar}	Tempo solar [min]
$T_{\text{Terrestre}}$	Tempo terrestre em [min]
a_0, a_1, k	Constantes referentes à características metroológicas [adimensional]
x	Espessura da parede [m]

Subscritos

AR	Ar ambiente
EXT	Região externa
i	Região da parede
INT	Região interna
máx	Máximo
min	Mínimo
cal	Calculado

Letras gregas

α	Difusividade Térmica [m ² /s]
α_s	Absortividade [adimensional]
β	Ângulo de inclinação entre a superfície terrestre e o plano horizontal [°]
β	Coefficiente de expansão volumétrica [1/K]
γ	Ângulo azimute da superfície [°]
δ	Declinação solar [°]
ε	Emissividade da superfície [adimensional]
θ_z	Ângulo Zênite [°]
$\theta(x,t)$	Temperatura [adimensional]
ν	Viscosidade cinemática do fluido [m ² /s].
ρ	Densidade [kg/m ³]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [adimensional]
τ	Tempo [adimensional]

τ_D	Transmitância da radiação solar direta para a atmosfera terrestre [adimensional]
ϕ	Latitude [°]
ω	Ângulo horário [°]
ω_s	Ângulo do horário do por do sol [°]

Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos Gerais	21
1.2 Objetivos Específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Arquitetura e Conforto Térmico	23
2.2 Desempenho Térmico em paredes e edificações	24
2.3 Transferência de Calor	26
2.3.1 Condução	27
2.3.2 Convecção	28
2.3.3 Radiação	28
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	30
3.1 Definição do problema	30
3.2 Temperatura da face aquecida pelo sol	31
3.2.1 Estimativa da intensidade de radiação total	31
3.2.2 Estimativa da temperatura do ar ambiente	37
3.3 Parede plana simples	38
3.3.1 Estimativa da temperatura na face aquecida pelo sol	38
3.3.2 Estimativa da temperatura na face da parede interna	39
3.4 Parede dupla sem espaçamento	40
3.4.1 Estimativa da temperatura na interface entre as paredes ($a-c$)	40
3.4.2 Estimativa da temperatura na face da parede interna (c)	41
3.5 Parede dupla com espaçamento preenchido com ar estagnado (transferência de calor por condução nas interfaces do espaçamento)	41
3.5.1 Estimativa da temperatura na interface entre a parede (a) e o espaçamento (b)	41
3.5.2 Estimativa da temperatura na interface entre o espaçamento (b) e a parede (c)	42
3.6 Parede dupla com espaçamento preenchido com fluido (transferência de calor por convecção no espaçamento)	42
3.6.1 Cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção	43
3.6.2 Estimativa da temperatura na interface entre a parede (a) e o espaçamento (b)	43
3.6.3 Estimativa da temperatura na interface entre o espaçamento (b) e parede (c) ..	44

3.6.4	Equações de conservação	44
3.6.4.1	Equação da continuidade.....	44
3.6.4.2	Equação da quantidade de movimento.....	45
3.6.4.3	Equação de conservação da energia	45
4	ADMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES	46
4.1	Parede plana simples	46
4.2	Parede dupla sem espaçamento	47
4.3	Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por condução)	48
4.4	Parede dupla com espaçamento (transferência de calor por convecção no espaçamento)	48
4.4.1	Equações de conservação	49
5	TRATAMENTO NUMÉRICO	51
5.1	Equações de diferenças finitas.....	52
5.4.1	Equações de diferenças finitas para parede simples.....	54
5.4.2	Equações de diferenças finitas para parede dupla sem espaçamento	54
5.4.3	Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por condução)	55
5.4.4	Parede dupla com espaçamento (transferência de calor por convecção no espaçamento)	56
5.4.4.1	Algoritmo SIMPLE	57
5.2	Critério de Estabilidade	58
5.2.1	Parede simples.....	58
5.2.2	Parede dupla sem espaçamento	59
5.2.3	Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por condução)	59
5.2.4	Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por convecção)	59
5.3	Simulação numérica.....	60
6	VALIDAÇÃO	65
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
7.1	Parede Simples.....	71
7.1.1	Análise dos efeitos da variação de espessura para paredes simples.....	71

7.1.2	Análise dos efeitos da variação da condutividade térmica de materiais de construção	74
7.1.3	Análise dos efeitos de revestimentos externo	77
7.1.4	Análise dos efeitos da adição de biomassa em material de construção	81
7.2	Parede dupla.....	83
7.2.1	Análise dos efeitos da variação do espaçamento entre paredes compostas	83
7.2.2	Análise dos efeitos de revestimentos externo em paredes compostas	88
7.2.3	Análise dos efeitos do preenchimento de água entre as paredes	93
7.3	Comparação entre as paredes.....	95
8	CONCLUSÃO	98
9	SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO	100
	BIBLIOGRAFIA	101

1 INTRODUÇÃO

A contribuição do aquecimento e refrigeração para o conforto térmico em edifícios residenciais e comerciais representa geralmente cerca de 30 a 40% da conta de energia. Este consumo afeta diretamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aumenta a demanda e o consumo de energia, criando problemas de distribuição de energia e altos picos de energia durante certas horas do dia. Esforços intensivos são dados a incentivos para projetar edifícios de baixo consumo de energia utilizando elementos de construção com características térmicas específicas, o que ajuda a estabelecer o conforto térmico passivo. Elementos de construção que têm alta capacidade térmica e grande massa térmica efetiva são possíveis candidatos para residências e edifícios de baixo consumo de energia. O aumento da capacidade térmica de paredes, teto e piso dos edifícios pode ser reforçado através do encapsulamento ou incorporação de material de mudança de fase (PCMs) adequado dentro dessas superfícies. O aumento da capacidade de armazenamento térmico de um edifício pode aumentar o conforto humano diminuindo a frequência de oscilações internas da temperatura do ar de modo que a temperatura do ar interior esteja mais próxima da temperatura desejada por um período mais longo (ISA et al., 2010; KUZNIK et al.; 2011 e ZHU et al . 2009).

Segundo Barandier (2013), “para o momento atual estima-se, que na maioria dos municípios brasileiros, as despesas com energia elétrica representem o segundo maior gasto da administração pública local, atrás apenas das despesas com pessoal. Portanto a redução do consumo de energia elétrica, que está diretamente associada à redução da implantação de infraestrutura adicional, redução das emissões de gases de efeito estufa e economia dos recursos, pode significar também a liberação de recursos financeiros para investimento em outras áreas”.

A maior parcela do território brasileiro está localizada na Zona Intertropical (baixas latitudes, com climas quentes e úmidos) o que se faz necessário, cada vez mais, o uso de aparelhos de ar-condicionado para atingir o conforto térmico. Porém esse tipo de aparelho tem sido apontado como vilão quando o assunto é redução no consumo de energia elétrica. Além de responder por boa parte do consumo de uma residência ou empresa (algo como 20% ou até 25%), esses equipamentos normalmente são ligados durante o dia, quando a demanda é maior e as tarifas mais caras (Ismail, 2003).

Muitos estudos vêm sendo realizados visando o conforto térmico associado à economia de energia elétrica. Atualmente existem normas que estabelecem parâmetros para conforto térmico de edificações NBR 16401 (ABNT, 2008) e fornecem diretrizes construtivas para habitações conforme a localização bioclimática NBR 15220 (ABNT, 2005).

Casas energeticamente eficientes são projetadas de forma a minimizar a perda de calor no inverno e ganhar calor no verão. Uma alternativa de baixo custo e de fácil acesso a ser utilizada na construção é a modelagem de paredes que funcionem como armazenadoras de calor, que proporcionem isolamento térmico eficiente, retarde ou impeça o que o calor proveniente da insolação atinja o ambiente interno e eliminem a necessidade de sistemas de ar condicionado.

O uso de material de mudança de fase (PCM) vem sendo reconhecido como tecnologia de energia avançada no aprimoramento da eficiência energética e sustentabilidade dos edifícios, uma vez que proporciona um potencial para um melhor conforto térmico interior e menor consumo global de energia devido à redução / mudança de carga.

Muitas transformações ocorreram no mundo, alterando o contexto de planejamento energético e urbano em função das necessidades de redução do consumo de energia e efeitos das mudanças climáticas.

Paredes solares vêm sendo estudadas há décadas como forma de aquecimento de construção a partir de uma fonte de energia renovável. Esse efeito é devido à sua capacidade de armazenamento. No entanto, isso aumenta seu peso e volume, o que limita sua integração ao edifício existente. Para aliviar este problema, a massa de armazenamento pode ser substituída por um material de mudança de fase adequado que funde completamente antes do pôr-do-sol e se solidifica completamente antes do nascer do sol. Isso leva a uma redução significativa do consumo de energia no edifício. A mesma tecnologia de incorporação de PCM nas paredes pode ser usada para telhados e pisos para melhorar o conforto térmico no espaço interior de um edifício e economizar energia consumida.

Bernard et al. (1985) relataram os resultados de um estudo experimental comparativo sobre paredes térmicas de calor latentes e sensíveis. O ganho de energia das paredes e as variações de temperatura da sala interna foram comparados com uma parede de alvenaria. A vantagem da parede de calor latente sobre a parede de alvenaria é a massa que era 1/12 da massa da parede de alvenaria, portanto, apropriada para adaptações.

Ismail e Castro (1997) apresentaram os resultados de um estudo numérico e experimental de paredes e telhados preenchidos com PCM em condições operacionais reais

para alcançar o conforto térmico passivo. O modelo de transferência de calor é unidimensional e se dá por pura condução. O tratamento numérico baseia-se no uso de método implícito e aproximações de diferenças finitas. A comparação entre os resultados da simulação e os resultados experimentais indicaram boa concordância. Outras análises econômicas indicaram que o conceito poderia efetivamente ajudar a reduzir o consumo de energia elétrica, melhorar a demanda de energia e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Tyagi e Buddhi (2007) apresentaram uma revisão abrangente de vários métodos possíveis para aquecimento e resfriamento em edifícios como a utilização de PCM em paredes de trombe, placas de parede com PCM, persianas com PCM, blocos de construção com PCM, sistemas de aquecimento a ar, aquecimento de piso, placas de teto dentre outros. Todos os sistemas têm um bom potencial para reduzir a demanda de energia de aquecimento e resfriamento em edifícios.

Nos edifícios convencionais, a massa térmica é uma característica de construção permanente que depende do projeto do prédio. No entanto, nenhum dos conceitos de massa térmica permanente é ótimo em todas as condições operacionais. Hoes et al. (2011) propôs um conceito que combina os benefícios dos edifícios com baixa e alta massa térmica através da aplicação de sistemas e materiais de armazenamento térmico adaptáveis híbridos para um edifício leve. Os cálculos mostram reduções da demanda de energia de aquecimento de até 35% e aumento do conforto térmico comparado com os conceitos convencionais de massa térmica.

Conforme mencionado anteriormente, a massa térmica combinada com outras estratégias passivas pode desempenhar um papel importante na eficiência energética dos edifícios, minimizando a necessidade de sistemas mecânicos para promover conforto térmico. No entanto, o uso de materiais leves com baixa massa térmica e com baixa condutividade térmica estão se tornando cada vez mais comuns e, frequentemente, este tipo de tratamento é estendido para telhados e pisos, como em Rostamizadeha et al. (2012), Silva et al. (2012), Zalewski et al. (2012), Soares et al. (2013), Faraji et al. (2014), Miqdam e Abaas (2015), Pasupathy et al. (2008), Alqallaf e Alawadhi (2013), Chou et al. (2013), Guichard et al. (2014) e Tokuc et al. (2015).

O objetivo deste estudo é investigar o comportamento das paredes térmicas como elementos de baixo consumo de energia em edifícios e residências. O problema formulado é baseado em um modelo unidimensional e resolvido numericamente pelo método de diferenças

finitas. Testes numéricos foram realizados para otimizar a grade numérica. Quatro paredes térmicas foram investigadas; parede simples usada como parede de referência, parede simples com incorporações de cor de superfície externa, aditivos de biomassa para blocos de construção e, finalmente, parede dupla, parede dupla com espaçamento cheio de ar estagnado e parede dupla com espaçamento cheio de água com escoamento laminar resultante de convecção natural. A influência destas variações na temperatura ambiente interna máxima e no tempo de atraso referente à temperatura máxima da superfície externa foi calculada para cada caso. Os resultados mostraram que a aplicação dessas estratégias ou combinações delas pode aumentar a massa térmica do sistema, reduzir as flutuações de temperatura no ambiente interno e reduzir as perdas de energia.

1.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo paramétrico de paredes térmicas compostas.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo numérico utilizando um modelo unidimensional em regime transiente aplicando o método de diferenças finitas para três modelos de paredes utilizando-se técnicas de armazenamento térmico de calor sensível: parede simples usada como parede de referência, parede dupla, parede dupla com espaçamento cheio de ar estagnado e parede dupla com espaçamento cheio de água;
- Verificar a influência da variação das espessuras das paredes, propriedades físicas dos materiais de construção e revestimento externo das paredes;
- Realizar simulação para os métodos utilizados;

- Analisar influência dessas variações na temperatura máxima da superfície interna e retardamento de pico de temperatura correspondente, em relação à temperatura máxima da superfície externa;
- Comparar os resultados e analisar a eficiência de cada modelo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Arquitetura e Conforto Térmico

A procura pelo conforto térmico remonta ao início da história da humanidade, onde os primeiros seres humanos viviam em cavernas, pois estas proporcionavam abrigo e proteção às condições térmicas extremas. Com a evolução da humanidade, novas técnicas começaram a ser utilizadas e aperfeiçoadas, principalmente na área da construção civil, onde as estruturas das edificações eram robustas e as paredes muito largas. Sistemas de iluminação e climatização artificial foram criados e passaram a ser utilizados largamente nas edificações, resultando em um crescente consumo energético (Çengel, 2012).

Molina et al. (2016) analisaram a evolução do número de publicações mundiais relacionados ao conforto térmico e eficiência energética em construções a partir dos anos 70 e verificou um aumento em estudos, principalmente em construções residenciais, religiosas e museus. Das publicações analisadas 73% tinham como objetivo a redução no consumo energético e melhorar o conforto térmico interno.

A partir da crise petróleo na década de 1970, da crise energética no Brasil em 2001 e aumento do aquecimento global, destacou-se a importância de incrementar a eficiência energética e intensificar a busca por edificações adaptadas ao clima do local, reduzindo ou eliminando o uso de aparelhos de ar condicionado e sistemas de iluminação artificial.

A norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, dividindo o país em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima, e as Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social, buscando aperfeiçoar a relação entre arquitetura e clima de modo a promover a otimização do desempenho térmico das edificações e um maior conforto térmico aos usuários destes espaços.

Givoni (1991) realizou um estudo do desempenho e aplicabilidade de sistemas de resfriamento passivo e de baixo consumo de energia considerando tipos diferentes de construções e condições climáticas, mostrando que a inadequação do edifício ao clima local pode proporcionar sensação de desconforto térmico além do desperdício de energia.

A arquitetura deve atender simultaneamente à eficiência energética e às condições de conforto do usuário, onde o conforto do corpo humano depende basicamente dos fatores ambientais: temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, e oxigênio, sendo a temperatura ambiente a mais significativa para o conforto.

Fanger (1970) realizou diversos experimentos sobre conforto térmico. Suas equações e métodos têm sido utilizados mundialmente servindo como base para a elaboração de Normas Internacionais e fornecendo subsídios para o equacionamento e cálculos analíticos de conforto térmicos conhecidos hoje como PMV (*Predicted Mean Vote*) e o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), método considerado o mais completo dos índices de conforto, pois analisa a sensação de conforto em função de 6 variáveis relacionado com PMV e o PPD. Seus experimentos comprovaram que os limites de conforto propostos são universais.

Moraes (2009) avaliou o comportamento térmico real em sala de aula com o levantamento de variáveis climatológicas do ambiente externo e interno da edificação localizada em duas universidades brasileiras no estado de São Paulo utilizando os métodos de conforto térmico proposto por Givoni (1991) de ambientes envoltórios e sua correlação com a sensação térmica humana conforme proposto por Fanger (1970) com a participação do aluno. Os resultados deste trabalho propõem um modelo adaptativo de conforto para um país com uma vasta variação latitudinal como o Brasil.

2.2 Desempenho Térmico em paredes e edificações

Estudos para investigar o desempenho térmico de edificações e seus elementos construtivos veem sendo realizados com o objetivo de promover maior eficiência energética e conforto aos usuários. A seguir são apresentados alguns estudos onde foi analisado o desempenho térmico de diversos tipos de edificações analisando variáveis construtivas e sua influencia nos resultados.

Segundo Çengel (2012): As paredes de alvenaria pintadas de cor escura, chamadas paredes de Trombe, são comumente usadas do lado sul das casas com energia solar passiva para absorver energia solar, armazená-la durante o dia e liberá-la para a casa durante a noite. A idéia foi proposta por E.L. Morse, de Massachusetts, em 1881, e nomeada em referência ao Professor Felix Trombe, da França, que a

usou extensivamente em seus projetos na década de 1970. Normalmente uma camada única ou dupla de vidro é colocada fora da parede e transmite a maior parte da energia solar, bloqueando as perdas de calor da superfície exposta da parede externa.

As paredes de Trombe posicionadas com face para o sul são destinadas a regiões localizadas no hemisfério norte da atmosfera terrestre, pois esta é a superfície que recebe maior radiação solar. Para cidades do Brasil, a parede que recebe maior radiação solar é a de face norte.

Cavalcanti (2013) avaliou o desempenho térmico de um ambiente padrão a partir do uso de parede de trombe com diferentes configurações e tipologias de uso, por meio de comparações com um ambiente da mesma dimensão dotado de janelas convencionais, para oito cidades brasileiras. O uso da parede de trombe melhorou o conforto térmico dos usuários, promovendo ventilação natural e aquecimento solar passivo.

A vegetação como estratégia bioclimática é bastante conhecida de profissionais, tanto do meio acadêmico quanto da construção. Como elemento de fachada, a vegetação pode minimizar o ganho de calor, proporcionando uma melhor condição no conforto térmico das edificações. O uso da vegetação nas fachadas contribui para o conforto térmico de um ambiente construído, atenuando a radiação solar, reduzindo a temperatura do ar e temperatura superficial de parede interna e externa (MORELLI, 2009 e BARTHOLOMEI, 2003).

Comportamento de diferentes materiais em relação à absorção, reflexão e transmissão de radiação solar podem propiciar uma redução no consumo de energia, tanto para resfriar quanto aquecer ambientes internos.

A razão entre a amplitude máxima da temperatura interna e externa depende das propriedades termofísicas dos materiais de construção e da espessura da parede. Aumentando a espessura da parede e diminuindo a condutividade térmica, a amplitude da temperatura interna diminui e o aumenta o tempo de transferência de calor para a parede interna (Givoni, 1976).

Lima (2005) desenvolveu uma pesquisa sobre material composto para uso na construção civil, utilizando argamassa de gesso e fibra vegetal, com objetivo obter um novo material que possa ser utilizado como revestimento ou elementos de vedação, agregando a este propriedade que conduza à baixa condutividade térmica. Os testes realizados indicaram que as propriedades térmicas da Fibra Vegetal proporcionaram um ganho de 27,14 % em isolamento térmico pela redução da condutividade térmica instantânea do composto.

Castro (1991) realizou um estudo numérico e experimental de armazenamento térmico por calor latente em paredes e tetos utilizando material de mudança de fase com propriedades fornecidas pela literatura e com propriedades levantadas no laboratório com comprovação experimental. A utilização de material de mudança de fase em tetos e paredes não altera as propriedades estruturais dos elementos construtivos e funciona como uma barreira térmica à penetração de calor, suavizando o impacto da variação da carga térmica externa transmitida para o ambiente interno.

Marques (2007) analisou os efeitos sob o conforto térmico em um protótipo de habitação situado na cidade de São Luis – MA, alterando a geometria do telhado e monitorando a temperatura da parede. Os resultados obtidos permitiram concluir que quanto maior a inclinação do telhado, menor a temperatura interna.

2.3 Transferência de Calor

Para a análise do desempenho de paredes térmicas é necessário conhecer os mecanismos da transferência de calor envolvidos no problema. Para uma parede simples com superfície plana deve-se considerar radiação solar incidente, convecção nas superfícies e condução através da parede, conforme mostrado na Figura 2. 1.

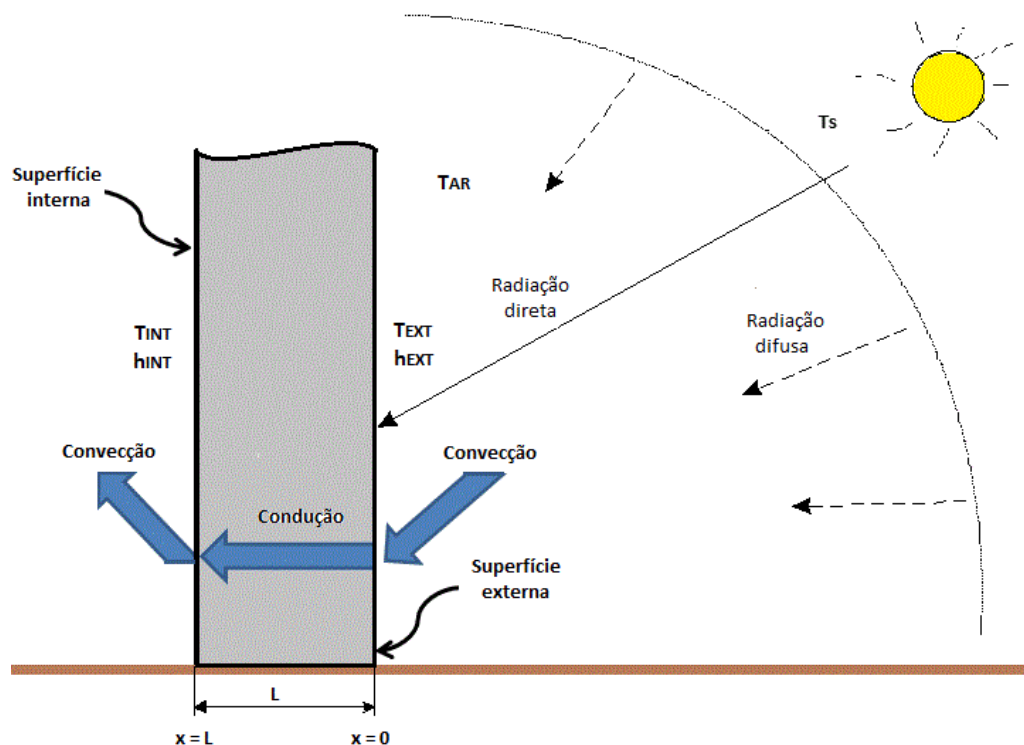


Figura 2. 1– Esquema dos fenômenos de transferência de calor na parede.
Fonte: Autoria própria.

A transferência de calor ocorre do meio de maior temperatura, para o meio de menor temperatura e pode ser transferida de três modos diferentes: Condução, Convecção e Radiação. Condução é dada pela interação de partículas de maior energia de uma dada substância com partículas adjacentes de menor energia e pode ocorrer em líquidos, sólidos ou gases; Convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido; e Radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) resultante das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas (Çengel, 2012).

2.3.1 Condução

A diferença de temperatura, tipo de material, espessura e geometria determinam a taxa de condução por um meio. Para as paredes, a taxa de condução de calor Q é proporcional à diferença de temperatura (T) entre as superfícies e à área (A) de transferência de calor, mas

inversamente proporcional à espessura (x). Essa relação foi expressa na forma diferencial pela lei de condução de calor de Fourier para condução de calor, conforme Equação:

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

sendo que a condutividade térmica k do material representa a medida da capacidade do material de conduzir calor. Um valor alto desta propriedade significa que o material é um bom condutor de calor, um valor baixo representa um material mal condutor ou isolante.

A velocidade com que o calor se difunde através do material é conhecida como difusividade térmica, e é definida pela razão entre o calor conduzido através do material (k) e calor armazenado por unidade de volume (ρc_p). Quanto maior for a difusividade térmica, mais rapidamente será a propagação de calor no meio. Um pequeno valor de difusividade térmica (ex.: água) significa que a maior parte do calor é absorvida pelo material e uma pequena quantidade é conduzida adiante. Sendo assim, é possível citar que a água é um pobre condutor de calor em relação ao ferro, entretanto é um excelente meio para armazenar energia térmica. A difusividade térmica é dada, conforme Equação 2.2:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.2)$$

2.3.2 Convecção

A transferência de calor por convecção na parede térmica acontece de forma natural através do movimento do fluido próximo à ela. A taxa de transferência de calor é expressa pela lei de Newton do resfriamento, e é proporcional à diferença de temperatura entre o fluido e a parede, conforme Equação 2.3:

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Sendo que, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção estimado, A é a área da parede, T_s é a temperatura da parede e T_∞ é a temperatura do fluido.

2.3.3 Radiação

Para que ocorra a transferência de calor por radiação não é necessária presença de um meio interveniente, já que a radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas ou fótons.

A taxa de radiação emitida pela parede é menor que a emitida pelo um corpo negro dado pela lei de Stefan-Boltzmann, e é expressa conforme Eq. 2.4:

$$Q = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.4)$$

Sendo que, T_s é a temperatura da superfície na temperatura termodinâmica, $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε é a emissividade da superfície.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a formulação das equações de transferência de calor e suas respectivas condições de contorno desenvolvido para o cálculo do método numérico em paredes térmicas.

3.1 Definição do problema

A parede térmica é composta por uma superfície plana sujeita a radiação solar incidente, convecção na superfície da parede externa e interna, condução através da parede, condução entre as paredes duplas preenchidas com ar, e convecção entre as paredes duplas com água. Considerando a temperatura inicial uniforme, propriedades físicas dos materiais construtivos constantes, coeficiente de transmissão de calor convectivo, das faces internas e externas, constantes, parede sem umidade, e temperatura do ar no ambiente interno constante.

Três configurações de paredes térmicas foram analisadas: I) Parede plana simples; II) Parede dupla sem espaçamento entre elas; III) Parede dupla com espaçamento preenchido com ar ou com água. As configurações são apresentadas na Figura 3. 1 e, dependendo de sua modelagem, foram divididas em três regiões:

- 1) Parede externa (a);
- 2) Espaçamento com ou sem isolamento térmica (b);
- 3) Parede interna (c);

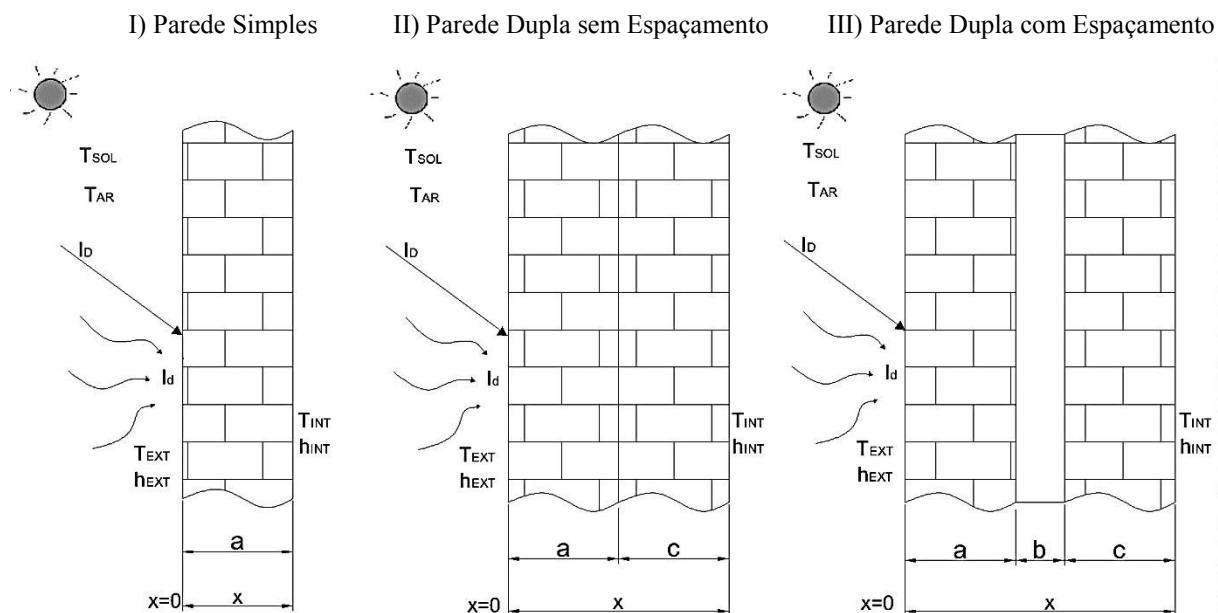


Figura 3.1 - Geometria das paredes térmicas analisadas.
Fonte: Autoria própria.

3.2 Temperatura da face aquecida pelo sol

A modelagem apresentada para cálculo da temperatura da face da parede externa aquecida pelo sol, através da radiação incidente total (direta e difusa), permite a simulação horária da temperatura para um dia claro, sem cobertura de nuvens, utilizando as características geográficas e estudo meteorológicos.

Primeiramente utiliza-se o método proposto por Hottel (1976), para realizar a estimativa da intensidade de radiação solar direta, e o modelo de Liu e Jordan (1960) para a estimativa da radiação difusa. Com a radiação total (direta e difusa), calcula-se a intensidade média da radiação total hora a hora utilizada para determinar a temperatura na face externa da parede.

3.2.1 Estimativa da intensidade de radiação total

Primeiramente é necessário calcular o Tempo Solar, aplicando correções referentes à posição geográfica e rotação terrestre, conforme proposto por Duffie (2013). A diferença em minutos entre o Tempo Solar e o Tempo Terrestre é calculada pela Equação 3.1:

$$T_{Solar} = T_{Terrestre} + 4(L_{tt} - L_{long}) + E \quad (3.1)$$

sendo que, T_{Solar} é o tempo solar em minutos, $T_{Terrestre}$ é o tempo terrestre em minutos, L_{tt} é o meridiano em graus, L_{long} é a longitude em graus, e E é o tempo em minutos em função do dia do ano demonstrado na Figura 3. 2, calculado conforme Equação 3.2:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (3.2)$$

onde,

$$B = (n-1) \frac{360}{365} \quad (3.3)$$

sendo n o dia do ano ($1 \leq n \leq 365$).

Observa-se que para todas as equações são utilizados graus, e não radianos.

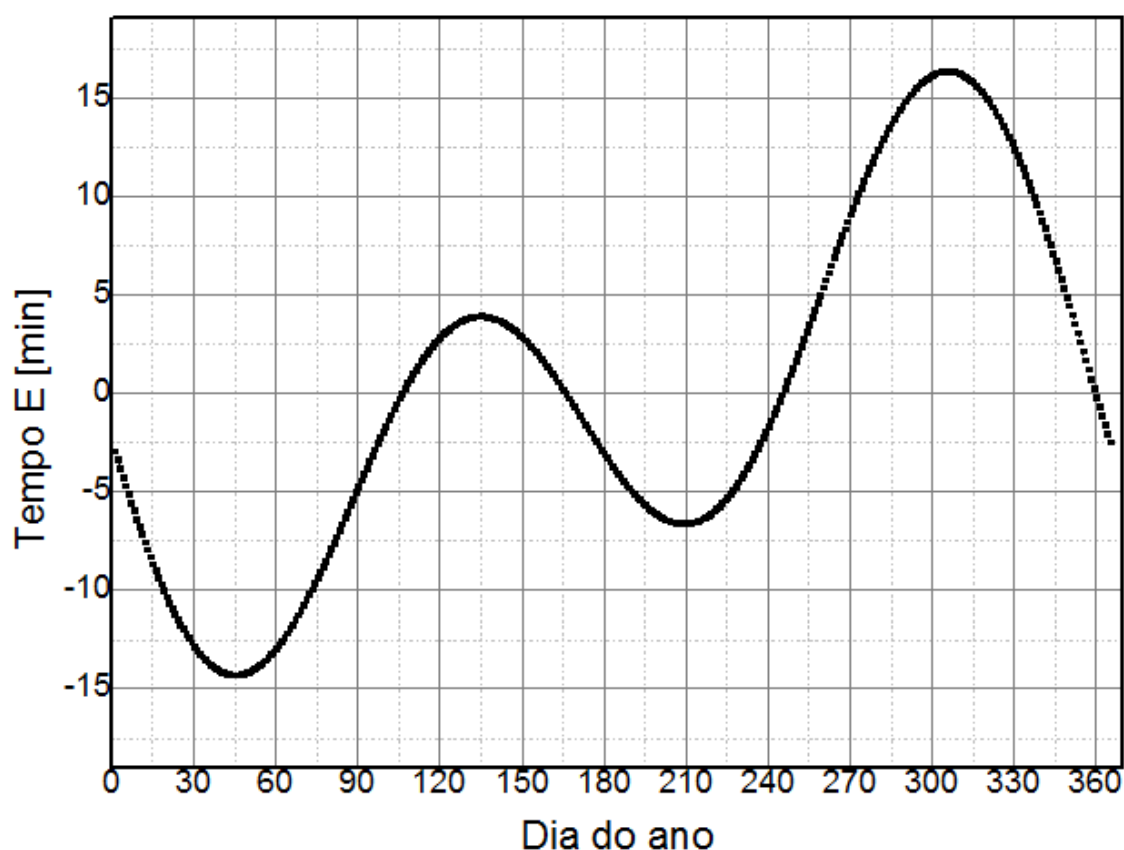


Figura 3. 2 – Tempo E em minutos para cada dia do ano.
Fonte: Autoria própria.

A radiação total instantânea (I) incidente sobre a superfície externa da parede é resultado da somatória da Radiação Direta (I_D) com a Radiação Difusa (I_d), conforme Equação 3.4:

$$I = I_D + I_d \quad (3.4)$$

A intensidade da radiação direta (I_D) pode ser estimada, conforme Equação 3.5:

$$I_D = I_{on} \times \tau_D \quad (3.5)$$

ao qual I_{on} é a radiação extraterrestre medida no plano normal da radiação em um determinado dia do ano e τ_D é a transmitância da radiação solar direta para a atmosfera terrestre.

A radiação extraterrestre I_{on} em um dia do ano é calculada, conforme Equação 3.6:

$$I_{on} = I_{sc} \left(1 + 0,003 \cos \frac{360n}{365}\right) \quad (3.6)$$

ao qual I_{sc} é a irradiância solar total (também chamada de constante solar), cujo valor segundo Çengel (2012) é 1.373 W/m².

A transmitância da radiação solar direta, segundo Hottel (1976), é dada pela Equação 3.7:

$$\tau_D = a_0 + a_1 e^{-k / \cos \theta_z} \quad (3.7)$$

sendo que, a_0 , a_1 e k são constantes referentes à características metrológicas, tais como a visibilidade média do mês, a altitude e o tipo de clima do local; θ_z é o ângulo Zênite (o ângulo de incidência do feixe de radiação solar sobre uma superfície horizontal).

As constantes a_0 , a_1 e k podem ser calculadas com as equações do Modelo Haze para a Visibilidade, apresentando um erro menor que 0,3 por cento do valor da transmitância.

Para altitudes (A) de até 2,5 km e visibilidade de 23 km, as constantes podem ser calculadas pelas Equações:

$$a_0 = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \quad (3.8)$$

$$a_1 = 0,5055 + 0,00595(6,5 - A)^2 \quad (3.9)$$

$$k = 0,2711 + 0,01858(2,5 - A)^2 \quad (3.10)$$

Para altitudes (A) de até 2,5 km e visibilidade de 5 km, as constantes podem ser calculadas através das Equações:

$$a_0 = 0,2538 - 0,006(6 - A)^2 \quad (3.11)$$

$$a_1 = 0,7678 + 0,0010(6,5 - A)^2 \quad (3.12)$$

$$k = 0,249 + 0,081(2,5 - A)^2 \quad (3.13)$$

A relação geométrica para o ângulo zênite (θ_z) pode ser definida, conforme a Equação 3.14 (Braun e Mitchell, 1983), e os ângulos solares em relação à superfície inclinada são mostrados na Figura 3.3:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (3.14)$$

ao qual δ é a Declinação, ângulo da posição do sol em relação à Terra, ou seja, ângulo de inclinação entre o eixo da terra sobre o qual gira sempre 24 horas e o eixo sobre o qual a Terra gira em torno do Sol sempre 365 dias; ϕ é a Latitude, ângulo de localização ao norte (sinal positivo) ou sul (sinal negativo) da linha do equador, o valor está entre $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$; ω é o ângulo horário que corresponde à rotação da terra a partir do meio dia solar, sendo que cada hora corresponde a 15° contados a partir das 12h, ou seja, a razão de 360° em 24 horas, sendo o período da manhã negativo e o período da tarde positivo.

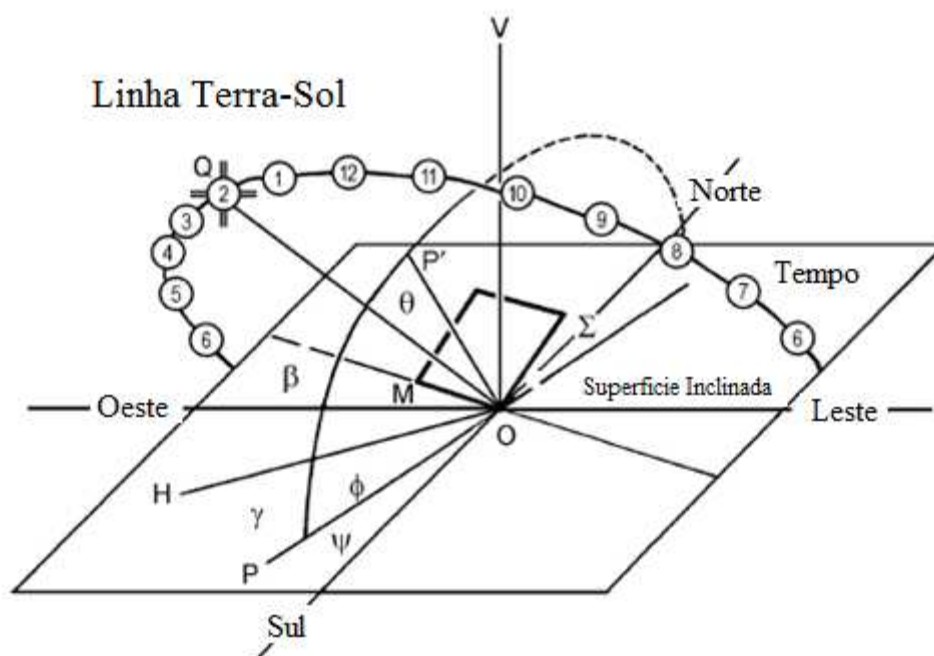


Figura 3.3 – Ângulos solares e relação com a superfície inclinada.

Fonte: Ashrae- Hvac Applications (2011).

A declinação (δ), também conhecido como o ângulo de posição angular do Sol ao meio-dia com relação à linha do equador é demonstrada na Figura 3.4 e pode ser calculada pela Equação 3.15 de Cooper (1969):

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{24 + n}{365} \right) \quad (3.15)$$

sendo n o dia do ano ($1 \leq n \leq 365$).

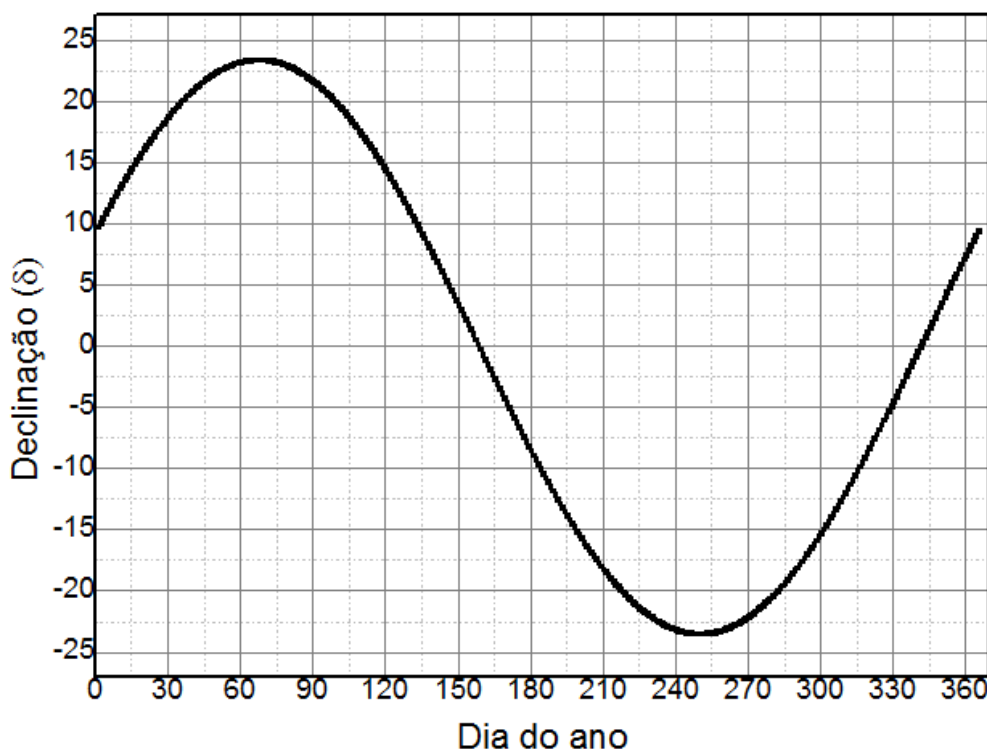


Figura 3. 4 – Declinação solar ao longo do dia do ano, conforme Equação 3.15.

Com base em dados metrológicos é possível calcular a intensidade da radiação difusa instantânea para uma determinada hora do dia em certo dia do ano, a partir da intensidade de radiação total diária em um plano horizontal para diversos meses do ano, sendo que se deve primeiramente determinar a duração aproximada do dia e a insolação extraterrestre.

A duração do dia em horas (N) pode ser determinada conhecendo a latitude (ϕ) e a declinação (δ), conforme Equação:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.16)$$

A insolação extraterrestre diária I_o (média diária do mês em uma superfície horizontal), pode ser determinada através da latitude e o dia do mês pela Equação:

$$I_o = \frac{24 \times 3600 \times I_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left(\cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (3.17)$$

Sendo que ω_s é o Ângulo do horário do por do sol, calculado pela Equação:

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (3.18)$$

A partir da correlação da fração da radiação difusa diária em função de (K_T) é possível determinar a radiação total diária disponível. Com a radiação total média diária (I_{TH}), em um

determinado mês (extraída de publicações metrológicas), e a insolação extraterrestre diária I_o , obtêm-se a relação (K_T), conforme Equação:

$$K_T = \frac{\bar{I}_{TH}}{\bar{I}_O} \quad (3.19)$$

Com esta relação é possível determinar a fração da radiação total difusa (I_d), que depende da estação do ano e consequentemente do ângulo horário do por do Sol (ω_s), conforme Equação:

$$\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}_{TH}} \quad (3.20)$$

Assim, para $\omega_s \leq 81.4^\circ$:

$$\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}_{TH}} = \begin{cases} 1,0 - 0,2727K_T + 2,4495K_T^2 & \text{Para } K_T < 0,715 \\ -11,9514K_T^3 + 9,3879K_T^4 & \\ 0,143 & \text{Para } K_T \geq 0,715 \end{cases} \quad (3.21)$$

Para $\omega_s > 81.4^\circ$:

$$\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}_{TH}} = \begin{cases} 1,0 + 0,2832K_T - 2,5557K_T^2 + 0,8448K_T^3 & \text{Para } K_T < 0,722 \\ 0,175 & \text{Para } K_T \geq 0,722 \end{cases} \quad (3.22)$$

A relação (r_t) da radiação difusa horária total (I) para a radiação difusa diária total (I_{TH}) é obtida pela função da duração do dia em horas (N) e o horário em questão, onde é possível encontrar a porcentagem da radiação diária total em um determinado horário. A relação é calculada pela Equação:

$$r_t = \frac{I}{I_{TH}} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \left(\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \right) \quad (3.23)$$

sendo que os coeficientes a e b são calculados com as Equações abaixo:

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.24)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.25)$$

A relação da radiação difusa horária (I_{dh}) para a radiação difusa diária (I_d) é obtida pela função da hora pela duração do dia (N), conforme Equação:

$$I_d = \frac{I_{dh}}{I_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (3.26)$$

Com os dados obtidos, é possível calcular a radiação total instantânea incidente (I) horizontal para determinado dia, mês, hora e local, considerando um dia sem nuvens.

A relação geométrica entre a superfície plana e o ângulo da radiação incidente, depende do ângulo referente à posição do Sol em relação ao plano em questão, levando em consideração a posição geográfica e a hora do dia. Para encontrar a parcela desta radiação que atinge perpendicularmente uma superfície que tem um ângulo β com a horizontal utiliza-se a Equação:

$$I_n = I \cos \theta \quad (3.27)$$

ao qual I é a radiação total instantânea incidente sobre a superfície externa, e θ é o ângulo de radiação incidente entre a radiação direta na superfície e a normal da superfície.

O ângulo de radiação incidente (θ) é calculado relacionando-se outros ângulos, conforme Equação 3.28 para superfície vertical, sendo:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \omega \cos \gamma + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.28)$$

sendo que β é o ângulo de inclinação entre a superfície terrestre e o plano horizontal ($0 \leq \beta \leq 180^\circ$); γ é o Ângulo azimute da superfície, ângulo de inclinação entre a superfície e a horizontal (que deve ser positivo quando a superfície está voltada para o oeste, negativo quando voltada para o leste e zero na posição sul ($-180 \leq \gamma \leq 180^\circ$);

3.2.2 Estimativa da temperatura do ar ambiente

A temperatura do ar ambiente (T_{AR}) em determinado horário do dia (t) é calculada conforme modelo proposto no ASHARE (2001), pela Equação:

$$T_{AR}(t) = T_{\max} - \left(\frac{f}{100} \right) (T_{\max} - T_{\min}) \quad (3.29)$$

sendo que T_{\max} e T_{\min} são as médias mensais de temperatura máxima e mínima obtidos pelos dados meteorológicos da região analisada, e f é o fator de simulação em porcentagem para cada hora do dia, conforme Tabela 3. 1:

Tabela 3. 1 - Fator de simulação em porcentagem para cada hora do dia.
Fonte: ASHARE-FUNDAMENTALS (2001).

Hora (h)	Fator (f)	Hora (h)	Fator (f)	Hora (h)	Fator (f)
1	87	9	71	17	10
2	92	10	56	18	21
3	96	11	39	19	34
4	99	12	23	20	47
5	100	13	11	21	58
6	98	14	3	22	68
7	93	15	0	23	76
8	84	16	3	24	82

3.3 Parede plana simples

O problema de transferência de calor em uma parede simples com superfície plana consiste em três etapas: radiação solar incidente e convecção na superfície externa, condução do calor absorvido proveniente da superfície externa ao longo da espessura da parede e convecção na superfície interna. Para as três etapas, a equação governante que estabelece a distribuição de temperatura por condução de calor se reduz a equação diferencial de Fourier:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad (3.30)$$

ao qual i é a região da parede determinada no item 3.1, α é a difusividade térmica da parede, que representa a velocidade com que o calor se difunde através de um material [m²/s] e pode ser encontrada na literatura ou calculada conforme Equação 2.2.

Foram determinadas as condições de contorno de cada região para o cálculo do método numérico em paredes térmicas.

3.3.1 Estimativa da temperatura na face aquecida pelo sol

A temperatura da parede no início da insolação $T(x,t)$, sendo $x=0$ e $t=0$ é igual para todo o meio e igual à temperatura ambiente T_{AR} .

O balanço de energia para a temperatura da face externa é dada pela Equação:

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_s Q_s(t) + \alpha_\lambda S(t) - \varepsilon_\lambda \bar{S}(t) - h_{ext} (T_a|_{x=0} - T_{AR}) \quad (3.31)$$

sendo que k_a é a condutividade térmica da parede; α_s é a absorptividade para a face externa; $Q_s(t)$ é intensidade solar incidente sobre a superfície [MJ/m²]; α_λ é a absorptividade em comprimento de onda da radiação; $S(t)$ é a radiação em comprimento de onda ao longo dos arredores; ε_λ é a emissividade em comprimento de onda da radiação; $\bar{S}(t)$ é a radiação em comprimento de onda na parede; h_{EXT} é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa da parede e o ar ambiente [W/m² . °C]; T_a é a temperatura da parede;

Realizando as seguintes considerações:

$$\begin{aligned} \alpha_\lambda &= \varepsilon_\lambda = \varepsilon \\ -\bar{S}(t) + S(t) &= \Delta R \end{aligned} \quad (3.32)$$

A Equação 3.32 pode ser reescrita, conforme a Equação:

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_s Q_s(t) - \varepsilon \Delta R - h_{ext} (T_a|_{x=0} - T_{AR}) \quad (3.33)$$

Reorganizando a Equação 3.34, conforme proposto por Srivastava (1980), tem-se a condição de contorno, conforme Equação:

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{ext} (T_s - T_a|_{x=0}) \quad (3.34)$$

sendo que:

$$T_s = - \left(\frac{\alpha_s Q_s(t) - \varepsilon \Delta R - h_{ext} T_{AR}}{h_{ext}} \right) \quad (3.35)$$

Sendo que:

$$\Delta R = I - \sigma T_{AR}^4 \quad (3.36)$$

ao qual T_s é a temperatura solar em °C, ΔR é a diferença entre a radiação solar incidente e difusa na superfície e a radiação emitida por um corpo negro na temperatura do ar ambiente (kJ/m² h), σ é a Constante de Stefan-Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), e I é a radiação total instantânea (W/m²);

3.3.2 Estimativa da temperatura na face da parede interna

A condição de contorno para calculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$ sendo $x=a$ é calculada conforme Equação:

$$-K_a \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=a} = h_{INT} [T_a(x,t) - T_{INT}] \quad (3.37)$$

sendo que T_{INT} é a temperatura do ar no ambiente interno, h_{INT} é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície interna da parede e o ar ambiente $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

3.4 Parede dupla sem espaçamento

A transferência de calor em uma parede dupla sem espaçamento entre elas consiste em cinco fenômenos de transferência de calor: radiação solar incidente e convecção na superfície externa, condução do calor absorvido pela parede “a” proveniente da superfície externa ao longo da espessura da parede, resistência de contato entre as paredes “a” e “c”, condução do calor transferido ao longo da espessura da parede “c” e convecção na superfície interna da parede “c”. Para as cinco etapas, a equação governante que estabelece a distribuição de temperatura por condução de calor se reduz a equação diferencial de Fourier 3.30.

Para a parede “a”, as condições de contorno para a estimativa da temperatura na face aquecida pelo sol $T(x,t)$ sendo $x=0$ e a estimativa da temperatura ao longo da espessura da parede $T(x,t)$ sendo $x<0<a$ são determinadas no item 3.3.

3.4.1 Estimativa da temperatura na interface entre as paredes (a-c)

Quando se utiliza paredes duplas, existe uma queda de temperatura entre as interfaces devido à resistência térmica de contato R_{tc} definida conforme a Equação:

$$R_{tc} = \frac{T_a - T_c}{q_x} \quad (3.38)$$

A Resistência térmica de contato se dá pelo fato das superfícies serem rugosas e apresentarem uma área de contato com pequenas lacunas preenchidas com ar que funcionam como isolamento oferecendo uma resistência térmica à transferência de calor. Esse efeito pode ser minimizado aumentando a área dos pontos de contato, acréscimo na pressão de contato, redução da rugosidade das superfícies de contato ou seleção de um fluido interfacial com elevada condutividade térmica.

A condição de contorno para calculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$ sendo $x=a$ é calculada conforme Equação:

$$k_a \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial x_a} \Big|_{x=a} = k_c \frac{\partial T_c(x,t)}{\partial x_c} \quad (3.39)$$

3.4.2 Estimativa da temperatura na face da parede interna (c)

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$, sendo $x=c$ é calculada, conforme Equação:

$$-k_c \frac{\partial T_c(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=c} = h_{INT} [T_c(x,t) - T_{INT}] \quad (3.40)$$

3.5 Parede dupla com espaçamento preenchido com ar estagnado (transferência de calor por condução nas interfaces do espaçamento)

A modelagem matemática para a transferência de calor numa parede dupla com espaçamento entre elas preenchido com ar estagnado, é utilizada quando o numero de Nusselt for menor ou igual à 1, pois significa que a transferência de calor nas interfaces do espaçamento ocorre apenas por condução. Os fenômenos de transferência de calor nessa parede consistem em sete etapas: radiação solar incidente e convecção na superfície externa, condução do calor absorvido pela parede “a” proveniente da superfície externa ao longo da espessura da parede, interface entre a parede “a” e o espaçamento “b”, condução de calor transferido ao longo do espaçamento “b”, interface entre o espaçamento “b” e a parede “c”, condução do calor transferido ao longo da espessura da parede “c” e convecção na superfície interna da parede “c”. Para as sete etapas, a equação governante que estabelece a distribuição de temperatura por condução de calor se reduz a equação diferencial de Fourier 3.30.

Para a parede “a”, as condições de contorno para a estimativa da temperatura na face aquecida pelo sol $T(x,t)$ sendo $x=0$, a estimativa da temperatura ao longo da espessura da parede $T(x,t)$ sendo $x<0<a$, e a condição de contorno para a estimativa da temperatura na face interna da parede $T(x,t)$ em que $x=c$ são determinadas no item 3.3.

3.5.1 Estimativa da temperatura na interface entre a parede (a) e o espaçamento (b)

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$ sendo que $x=a$ é calculada conforme Equação:

$$k_a \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial x_a} \Big|_{x=a} = k_b \frac{\partial T_b(x,t)}{\partial x_b} \quad (3.41)$$

3.5.2 Estimativa da temperatura na interface entre o espaçamento (b) e a parede (c)

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$ sendo que $x=b$ é calculada conforme Equação:

$$k_b \frac{\partial T_b(x,t)}{\partial x_b} \Big|_{x=b} = k_c \frac{\partial T_c(x,t)}{\partial x_c} \quad (3.42)$$

3.6 Parede dupla com espaçamento preenchido com fluido (transferência de calor por convecção no espaçamento)

A transferência de calor numa parede dupla com espaçamento entre elas consiste em sete etapas: radiação solar incidente e convecção na superfície externa, condução do calor absorvido pela parede “a” proveniente da superfície externa ao longo da espessura da parede, interface entre a parede “a” e o espaçamento “b”, convecção natural no espaçamento “b”, interface entre o espaçamento “b” e a parede “c”, condução do calor transferido ao longo da espessura da parede “c” e convecção na superfície interna da parede “c”. Para as sete etapas, a equação governante que estabelece a distribuição de temperatura por condução de calor se reduz a equação diferencial de Fourier 3.30.

Para a parede “a”, as condições de contorno para a estimativa da temperatura na face aquecida pelo sol $T(x,t)$ sendo que $x=0$, a estimativa da temperatura ao longo da espessura da parede $T(x,t)$ ao qual $x<0<a$, a condição de contorno para a estimativa da temperatura na face interna da parede $T(x,t)$ sendo que $x=c$ são determinadas nos itens 3.3.

Para o cálculo da temperatura do fluido ao longo do espaçamento entre as paredes, foram analisadas as equações de conservação, utilizando o método de volumes de controle para uma cavidade bidimensional com paredes impermeáveis analisando o fenômeno da convecção natural aplicando as equações governantes da dinâmica dos fluidos, que são representações matemáticas das leis de conservação: conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia.

3.6.1 Cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção

O coeficiente de transferência de calor por convecção calculado h_{cal} é determinado de forma adimensional pelo número de Nusselt Nu , definido como:

$$h_{cal} = \frac{k}{x} Nu \quad (3.43)$$

Para espaços fechados retangulares verticais, o numero de Nusselt é definido pelas correlações abaixo:

$$Nu = 0,42 Ra^{1/4} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{x} \right)^{-0,3} \quad \text{Para } 10^4 < Ra < 10^7 \quad (3.44)$$

$$Nu = 0,046 Ra^{1/3} \quad \text{Para } 10^6 < Ra < 10^9 \quad (3.45)$$

Quanto maior o número de Nusselt, mais eficaz é a convecção. $Nu=1$, significa que a transferência de calor ocorre apenas por condução.

A correlação para o número de Nusselt na convecção natural é expressa em número de Rayleigh, que descreve a relação entre a flutuação e a viscosidade dentro do fluido:

$$Ra = Gr Pr \quad (3.46)$$

sendo que Pr é o número de Prandtl, que descreve a relação entre a difusividade da quantidade de movimento e a difusividade térmica.

A transferência de calor por convecção natural ocorre em qualquer movimento de fluidos por meios naturais. O regime de escoamento é regido pelo número de Grashof (Gr), que é expressa pela razão entre a força de empuxo e a força viscosa, agindo sobre o fluido:

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) x^3}{\nu^2} \quad (3.47)$$

ao qual g é a aceleração gravitacional $9,81 \text{ m/s}^2$; β é o coeficiente de expansão volumétrica do fluido; T_s é a temperatura da superfície [$^\circ\text{C}$]; T_∞ é a temperatura do fluido longe da superfície, [$^\circ\text{C}$]; x é o comprimento do espaçamento [m]; ν é a viscosidade cinemática do fluido [m^2/s].

3.6.2 Estimativa da temperatura na interface entre a parede (a) e o espaçamento (b)

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$ sendo que $x=a$ é calculada conforme Equação:

$$-k_a \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=a} = h_{cal} [T_a(x,t) - T_c(x,t)] \quad (3.48)$$

3.6.3 Estimativa da temperatura na interface entre o espaçamento (b) e parede (c)

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna $T(x,t)$ sendo que $x=b$ é calculada conforme Equação:

$$-k_c \frac{\partial T_c(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=a} = h_{cal} [T_a(x,t) - T_c(x,t)] \quad (3.49)$$

3.6.4 Equações de conservação

Para análise da transferência de calor por convecção na cavidade formada pelas paredes duplas, são levados em consideração que os gradientes de temperatura causam gradientes de densidade no fluido no interior da cavidade, e o campo gravitacional gera forças de empuxo devidas aos gradientes de densidade no fluido. Essas forças causam o movimento do fluido por convecção natural, e as equações de conservação governantes para este problema são representadas pelas equações de continuidade, quantidade de movimento e conservação de energia.

3.6.4.1 Equação da continuidade

A equação da continuidade, que também é conhecida como a conservação de massa ou balanço de massa, é uma declaração de que a massa não pode ser criada ou destruída durante um processo, ou seja, o fluxo líquido mássico de saída do volume de controle será igual ao incremento temporal da massa no interior do volume de controle considerado. A equação de conservação de massa é expressa pela equação diferencial parcial que envolve as derivadas da massa específica e da velocidade, conforme Equação:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (3.50)$$

sendo que o termo $\partial \rho / \partial t$ representa a variação da densidade em relação ao tempo, e o segundo e terceiro termo descrevem o fluxo líquido de massa atravessando as fronteiras do volume de controle.

3.6.4.2 Equação da quantidade de movimento

As equações da quantidade de movimento são obtidas pela aplicação da segunda lei de Newton do movimento para um elemento diferencial de volume de controle, sendo que a força que age sobre o volume é igual a massa vezes a aceleração do elemento dentro do volume de controle. Para um fluido Newtoniano incompressível e com viscosidade constante, a equação diferencial da quantidade de movimento pode ser representada pelas equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem de Navier-Stokes, conforme Equação 3.52 para a componente de movimento no eixo x, e Equação 3.53 para a componente de movimento no eixo y:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (3.51)$$

$$-pg_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (3.52)$$

Se a variação da pressão na cavidade for pequena, a densidade ρ do fluido no seu interior varia apenas com a temperatura do fluido. Essa variação pode ser descrita através do coeficiente de expansão volumétrica aproximado pela substituição das quantidades diferenciais pelas diferenças, conforme Equação:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_\infty)] \quad (3.53)$$

ao qual β é o coeficiente de expansão volumétrica e T_∞ é a Temperatura do fluido na parede “b”.

As forças de empuxo na cavidade são avaliadas através da hipótese de Boussinesq, se a variação da densidade for considerada no termo da força de empuxo, todas as propriedades nas equações de conservação podem ser consideradas constantes.

3.6.4.3 Equação de conservação da energia

A equação de conservação de energia de um volume de controle durante qualquer processo é expresso como $\Delta E_{sis} = E_{ent} - E_{sai}$, ao qual estabelece que a quantidade de energia do sistema é igual à diferença entre a energia que entra e a energia que sai.

A equação de energia para o escoamento permanente bidimensional do fluido com propriedades constantes é descrita, conforme Equação:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (3.54)$$

4 ADMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

A adimensionalização reduz o número de variáveis independentes e parâmetros facilitando a apresentação dos resultados. Os critérios utilizados para adimensionalizar as equações de contorno são descritas abaixo:

- Temperatura adimensionalizada:

$$\theta(x, \tau) = \frac{T(x, t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad (4.1)$$

- Tempo adimensional (Numero de Fourier):

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta X^2} \quad (4.2)$$

- Distância adimensional:

$$X = \frac{x}{L} \quad (4.3)$$

Sendo que $L = a + b + c$.

- Coeficiente de troca de calor adimensionalizada (número de Biot):

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (4.4)$$

A equação governante que estabelece a distribuição de temperatura por condução de calor, equação diferencial de Fourier 3.30, é escrita na forma adimensional, conforme Equação:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (4.5)$$

As condições de contorno adimensionalizadas são apresentadas para cada modelagem de parede térmica.

4.1 Parede plana simples

Para a condição de contorno para $x=0$, Equação 3.41, tem-se a equação adimensional:

$$-k_a \frac{T_a - T_s}{L} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{ext} (T_s - T_a|_{x=0}) (\theta_s - \theta_a) \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial X} \Big|_{x=0} = \frac{h_{ext} L}{k_a} (\theta_a - \theta_s) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial X} \Big|_{x=0} = Bi (\theta_a - \theta_s) \quad (4.8)$$

Para a condição de contorno da temperatura da parede interna para $x=a$ calculada através Equação 3.35, tem-se a equação adimensionalizada:

$$-K_a \frac{T_{INT} - T_a}{L} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=a} = h_{INT} (T_a - T_{INT}) (\theta_a - \theta_{INT}) \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial X} \Big|_{x=a} = \frac{h_{INT} L}{k_a} (\theta_{INT} - \theta_a) \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial X} \Big|_{x=a} = Bi (\theta_{INT} - \theta_a) \quad (4.11)$$

4.2 Parede dupla sem espaçamento

As condições de contorno adimensional para $x=0$ e $x<0<a$, são calculadas conforme itens anteriores, Equação 4.8 e Equação 4.11.

A condição de contorno para cálculo da interface entre as paredes “a” e “c” para $x=a$ calculada através da Equação 3.40, é apresentada na forma adimensional conforme abaixo:

$$k_a \frac{\partial \theta_a}{\partial X_a} \Big|_{x=a} = k_c \frac{\partial \theta}{\partial X_c} \quad (4.12)$$

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna para $x=c$, conforme equação:

$$-k_c \frac{T_{INT} - T_c}{L} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=c} = h_{INT} (T_c - T_{INT}) (\theta_c - \theta_{INT}) \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial X} \Big|_{x=c} = \frac{h_{INT} L}{k_c} (\theta_{INT} - \theta_c) \quad (4.14)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_c}{\partial X} \right|_{x=c} = Bi(\theta_{INT} - \theta_c) \quad (4.15)$$

4.3 Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por condução)

As condições de contorno adimensional para $x=0$ e $x<0<a$, são calculadas conforme itens anteriores, Equação 4.8 e Equação 4.11.

Para a parede c , a condição de contorno para a estimativa da temperatura na face interna da parede para $x=c$ é calculado conforme Equação 4.15.

A condição de contorno para a temperatura da parede interna para $x=b$, conforme equação 3.43, é determinada na forma adimensional conforme Equação abaixo:

$$k_b \left. \frac{\partial \theta_b}{\partial X_b} \right|_{x=b} = k_c \left. \frac{\partial \theta_c}{\partial X_c} \right|_{x=b} \quad (4.16)$$

4.4 Parede dupla com espaçamento (transferência de calor por convecção no espaçamento)

As condições de contorno adimensional para $x=0$ e $x<0<a$, são calculadas conforme itens anteriores, Equação 4.8 e Equação 4.11.

Para a parede c , a condição de contorno para a estimativa da temperatura na face interna da parede para $x=c$ é calculado conforme Equação 4.15.

A condição de contorno para calculo da temperatura da parede interna para $x=a$, calculada conforme equação 3.49, é dada na forma adimensional conforme equação abaixo:

$$-k_a \frac{T_c - T_a}{L} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=a} = h_{cal}(T_a - T_c)(\theta_a - \theta_c) \quad (4.17)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_a}{\partial X} \right|_{x=a} = \frac{h_{cal}L}{k_a}(\theta_c - \theta_a) \quad (4.18)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_a}{\partial X} \right|_{x=a} = Bi(\theta_c - \theta_a) \quad (4.19)$$

A condição de contorno para cálculo da temperatura da parede interna para $x=b$, calculada conforme equação 3.50, é dada na forma adimensional conforme equação abaixo:

$$-k_c \frac{T_c - T_a}{L} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=b} = h_{cal}(T_a - T_c)(\theta_a - \theta_c) \quad (4.20)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_c}{\partial X} \right|_{x=b} = \frac{h_{cal}L}{k_c} (\theta_c - \theta_a) \quad (4.21)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_c}{\partial X} \right|_{x=b} = Bi(\theta_c - \theta_a) \quad (4.22)$$

4.4.1 Equações de conservação

As equações de conservação descritas no item 3.6, são adimensionalizadas inicialmente considerando as coordenadas espaciais da aresta da cavidade, conforme Equação:

$$X = \frac{x}{a} \text{ e } Y = \frac{y}{a} \quad (4.23)$$

As componentes de velocidade podem ser expressas de forma adimensional, conforme a Equação:

$$U = \frac{ua}{\nu} \text{ e } V = \frac{va}{\nu} \quad (4.24)$$

O termo do gradiente de pressão é escrito na forma adimensional, conforme Equação:

$$P^* = \frac{p^*}{\rho \left(\frac{\nu}{a} \right)^2} \quad (4.25)$$

Substituindo os termos adimensionalizados na Equação 4.26 da quantidade de movimento para a componente Y:

$$\left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Gr\theta \quad (4.26)$$

Substituindo os termos adimensionalizados na Equação 4.27 da quantidade de movimento para a componente X:

$$\left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial U}{\partial t} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial X} + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (4.27)$$

Substituindo os termos adimensionalizados na Equação 4.28 da conservação de energia:

$$\left(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) = \frac{1}{\text{Pr}} + \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4.28)$$

5 TRATAMENTO NUMÉRICO

Para a solução do problema de transferência de calor transiente unidimensional na parede é utilizado o método de diferenças finitas na forma explícita para a representação da seção transversal da parede plana, realizando uma discretização no tempo e no espaço e utilizando as formulações matemáticas discretizadas apresentadas no capítulo anterior. As Equações de diferenças finitas são obtidas utilizando a expansão de Taylor para representar a derivada das funções adimensionalizadas e determinar a temperatura $\theta(x,\tau)$ em um determinado ponto (x,τ) , regularmente espaçado na malha (m,n) , conforme mostrado na Figura 5. 1:

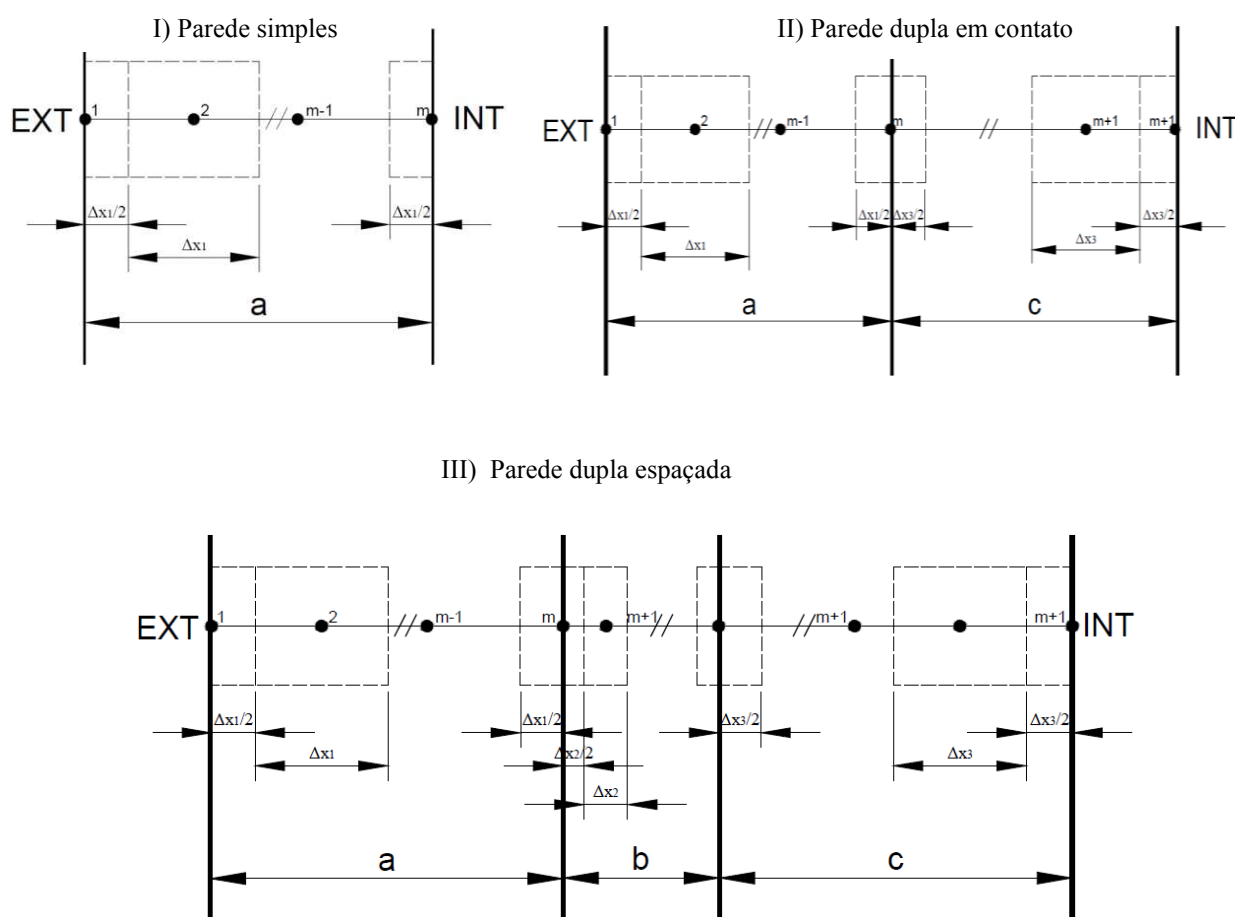


Figura 5. 1 - Malha computacional das paredes térmicas.

Para a transferência de calor por convecção, foi utilizada a formulação de Volumes Finitos para o cálculo das equações adimensionais. O código computacional, escrito na

linguagem FORTRAN, usa algoritmo SIMPLE (PATANKAR, 1980) para o acoplamento de pressão e velocidade, que se baseia em um processo de correção de campo de velocidade com base em um campo de pressão que permite satisfazer a equação de conservação de massa e o método TDMA (*Tri-Diagonal Matrix Algorithm*) na solução dos sistemas de equações.

5.1 Equações de diferenças finitas

Considerando a expansão em série de Taylor para uma função $\theta(X, \tau)$ em torno de um ponto x , nas direções progressivas e regressivas, é possível obter as derivadas, conforme Equações 5.1 e 5.2, mostradas abaixo:

$$\theta(X + \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) + \Delta X \left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{m,n} + \frac{\Delta X^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \right|_{m,n} + \frac{\Delta X^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 \theta(X, \tau)}{\partial X^3} \right|_{m,n} + \dots \quad (5.1)$$

$$\theta(X - \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) - \Delta X \left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{m,n} + \frac{\Delta X^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \right|_{m,n} - \frac{\Delta X^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 \theta(X, \tau)}{\partial X^3} \right|_{m,n} + \dots \quad (5.2)$$

Truncando as Equações 5.1 e 5.2 a partir da derivada de segunda ordem, tem-se:

$$\theta(X + \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) + \Delta X \left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{m,n} + \frac{\Delta X^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \right|_{m,n} \quad (5.3)$$

$$\theta(X - \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) - \Delta X \left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{m,n} + \frac{\Delta X^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \right|_{m,n} \quad (5.4)$$

Subtraindo as Equações 5.4 de 5.3 é possível obter a equação para obtenção da primeira derivada:

$$\theta(X + \Delta X, \tau) - \theta(X - \Delta X, \tau) = 2\Delta X \left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{m,n} \quad (5.5)$$

Reorganizando a Equação 5.5:

$$\left. \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \right|_{m,n} = \frac{\theta(X + \Delta X, \tau) - \theta(X - \Delta X, \tau)}{2\Delta X} \quad (5.6)$$

Somando as Equações 5.3 e 5.4 é possível obter a equação para obtenção da segunda derivada:

$$\theta(X + \Delta X, \tau) + \theta(X - \Delta X, \tau) = 2\theta(X, \tau) + (\Delta X)^2 \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{m,n} \quad (5.7)$$

Reorganizando a Equação 5.7 :

$$\frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{m,n} = \frac{\theta(X + \Delta X, \tau) + \theta(X - \Delta X, \tau) - 2\theta(X, \tau)}{(\Delta X)^2} \quad (5.8)$$

Para a direção do tempo é possível obter as derivadas seguindo o mesmo procedimento da posição x , conforme equação abaixo:

$$\theta(X, \tau + \Delta \tau) = \theta(X, \tau) + \Delta \tau \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{m,n} + \frac{\Delta \tau^2}{2!} \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial \tau^2} \Big|_{m,n} - \frac{\Delta \tau^3}{3!} \frac{\partial^3 \theta(X, \tau)}{\partial \tau^3} \Big|_{m,n} + \dots \quad (5.9)$$

Truncando e reorganizando a Equação 5.9 a partir da derivada de primeira ordem, tem-se:

$$\frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial \tau} \Big|_{m,n} = \frac{\theta(X, \tau + \Delta \tau) - \theta(X, \tau)}{\Delta \tau} \quad (5.10)$$

Com as Equações 5.6, 5.8 e 5.10 das derivadas de primeira e segunda ordem, é possível representar a temperatura $\theta(x, \tau)$ em determinado ponto (m, n) como:

$$\theta(m\Delta X, n\Delta \tau) = \theta(m, n) \quad (5.11)$$

Sendo que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{m,n} = \frac{\theta(m+1, n) - \theta(m-1, n)}{2\Delta X} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \Big|_{m,n} = \frac{\theta(m+1, n) + \theta(m-1, n) - 2\theta(m, n)}{(\Delta X)^2} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \Big|_{m,n} = \frac{\theta(m, n+1) - \theta(m, n)}{\Delta \tau} \quad (5.14)$$

Aplicando as equações acima na equação governante do problema, Equação 3.30, tem-se a equação de diferenças finitas:

$$\frac{\theta(m+1, n) + \theta(m-1, n) - 2\theta(m, n)}{(\Delta X)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\theta(m, n+1) - \theta(m, n)}{\Delta \tau} \quad (5.15)$$

5.4.1 Equações de diferenças finitas para parede simples

Para a condição de contorno da primeira região, em que $x=0$, conforme Equação 4.8 adimensional, tem-se:

$$k_a \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} + h_{ext}(\theta_s - \theta_a) = \rho c_a \frac{\Delta X_a}{2} \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau} \quad (5.16)$$

Reorganizando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n) \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{ext} \Delta X_a}{k_a} \right) + 2\tau \theta(m+1,n) + 2\tau \frac{h_{ext} \Delta X_a}{k_a} \theta_s \quad (5.17)$$

Simplificando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n)(1 - 2\tau - 2\tau Bi_a) + 2\tau \theta(m+1,n) + 2\tau Bi_a \theta_s \quad (5.18)$$

Para a condição de contorno da segunda região da parede em que $0 < x < a$, conforme Equação 4.11, tem-se:

$$k_a \frac{\theta(m-1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} + k_a \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} = \rho c_a \Delta X_a \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau} \quad (5.19)$$

Simplificado:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n)(1 - 2\tau) + \tau [\theta(m-1,n) + \theta(m+1,n)] \quad (5.20)$$

Para a condição de contorno da temperatura da parede interna, em que $x=a$ calculada através equação 4.12, tem-se:

$$k_a \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} + h_{INT}(\theta_a - \theta_{INT}) = \rho c_a \frac{\Delta X_a}{2} \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau} \quad (5.21)$$

Reorganizando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n) \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{INT} \Delta X_a}{k_a} \right) + 2\tau \theta(m+1,n) + 2\tau \frac{h_{INT} \Delta X_a}{k_a} \theta_{INT} \quad (5.22)$$

Simplificando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n)(1 - 2\tau - 2\tau Bi_a) + 2\tau \theta(m+1,n) + 2\tau Bi_a \theta_{INT} \quad (5.23)$$

5.4.2 Equações de diferenças finitas para parede dupla sem espaçamento

As equações de diferenças finitas obtidas para o cálculo da primeira região da parede para $x=0$, e da segunda região da parede, em que $x < 0 < a$, são dadas pelas Equações 5.18 e 5.20.

Para o cálculo na interface entre as paredes “a” e “c”, em que $x=a$, conforme Equação 4.15, tem-se:

$$\begin{aligned}\theta(m, n+1) = & \theta(m-1, n) \left[\frac{2k_a \Delta \tau \alpha_a \alpha_c}{\Delta X_a (k_a \Delta X_a \alpha_c + 2k_b \Delta X_b \alpha_b + k_c \Delta X_c \alpha_a)} \right] \\ & + \theta(m, n) \left[\frac{2k_a k_c \Delta \tau \alpha_a \alpha_c}{\Delta X_a \Delta X_c (k_a \Delta X_a \alpha_c + 2k_b \Delta X_b \alpha_b + k_c \Delta X_c \alpha_a)} \right] \\ & + \theta(m+1, n) \left[\frac{2k_c \Delta \tau \alpha_a \alpha_c}{\Delta X_c (k_a \Delta X_a \alpha_c + 2k_b \Delta X_b \alpha_b + k_c \Delta X_c \alpha_a)} \right]\end{aligned}\quad (5.24)$$

Para a condição de contorno da segunda região da parede, em que $a < x < c$, conforme Equação 4.15, tem-se:

$$k_c \frac{\theta(m-1, n) - \theta(m, n)}{\Delta X_c} + k_c \frac{\theta(m+1, n) - \theta(m, n)}{\Delta X_c} = \rho c_c \Delta X_c \frac{\theta(m, n+1) - \theta(m, n)}{\Delta \tau} \quad (5.25)$$

Simplificado:

$$\theta(m, n+1) = \theta(m, n)(1 - 2\tau) + \tau[\theta(m-1, n) + \theta(m+1, n)] \quad (5.26)$$

Para a condição de contorno da temperatura da parede interna, em que $x=c$, calculada pela equação 4.15, tem-se:

$$k_c \frac{\theta(m+1, n) - \theta(m, n)}{\Delta X_c} + h_{INT}(\theta_c - \theta_{INT}) = \rho c_c \frac{\Delta X_c}{2} \frac{\theta(m, n+1) - \theta(m, n)}{\Delta \tau} \quad (5.27)$$

Reorganizando:

$$\theta(m, n+1) = \theta(m, n) \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{INT} \Delta X_c}{k_c} \right) + 2\tau \theta(m+1, n) + 2\tau \frac{h_{INT} \Delta X_c}{k_c} \theta_{INT} \quad (5.28)$$

Simplificando:

$$\theta(m, n+1) = \theta(m, n)(1 - 2\tau - 2\tau Bi_c) + 2\tau \theta(m+1, n) + 2\tau Bi_c \theta_{INT} \quad (5.29)$$

5.4.3 Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por condução)

As equações de diferenças finitas obtidas para o cálculo da primeira região da parede em que $x=0$ e $x < 0 < a$, são dadas pelas Equações 5.18 e 5.20. Para a segunda parede em que $b < x < c$ e $x=0$, as equações de diferenças finitas são dadas pelas Equações 5.26 e 5.29.

Para a interface entre a parede “a” e “b”, em que $x=a$, tem-se:

$$\begin{aligned}
& k_a \frac{\theta(m-1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} + k_b \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} \\
& = \left(\rho c_a \frac{\Delta X_a}{2} + \rho c_b \frac{\Delta X_b}{2} \right) \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau}
\end{aligned} \tag{5.30}$$

Reorganizando:

$$\begin{aligned}
\theta(m,n+1) = \theta(m,n) & + [\theta(m-1,n) - \theta(m,n)] \frac{2k_a \Delta \tau}{\Delta X_a (\rho c_a \Delta X_a + \rho c_b \Delta X_b)} \\
& + [\theta(m+1,n) - \theta(m,n)] \frac{2k_b \Delta \tau}{\Delta X_b (\rho c_a \Delta X_a + \rho c_b \Delta X_b)}
\end{aligned} \tag{5.31}$$

Para a segunda região “b”, em que $a < x < b$, tem-se:

$$k_b \frac{\theta(m-1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_b} + k_b \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_b} = \rho c_b \Delta X_b \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau} \tag{5.32}$$

Simplificado:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n)(1 - 2\tau) + \tau[\theta(m-1,n) + \theta(m+1,n)] \tag{5.33}$$

Para a interface entre a parede “b” e “c”, em que $x=b$, tem-se:

$$\begin{aligned}
& k_b \frac{\theta(m-1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_b} + k_c \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_c} \\
& = \left(\rho c_b \frac{\Delta X_c}{2} + \rho c_c \frac{\Delta X_c}{2} \right) \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau}
\end{aligned} \tag{5.34}$$

Reorganizando:

$$\begin{aligned}
\theta(m,n+1) = \theta(m,n) & + [\theta(m-1,n) - \theta(m,n)] \frac{2k_b \Delta \tau}{\Delta X_b (\rho c_b \Delta X_b + \rho c_c \Delta X_c)} \\
& + [\theta(m+1,n) - \theta(m,n)] \frac{2k_c \Delta \tau}{\Delta X_c (\rho c_b \Delta X_b + \rho c_c \Delta X_c)}
\end{aligned} \tag{5.35}$$

5.4.4 Parede dupla com espaçamento (transferência de calor por convecção no espaçamento)

As equações de diferenças finitas obtidas para o cálculo da primeira região da parede, em que $x=0$ e $x < 0 < a$, são dadas pelas Equações 5.18 e 5.20. Para a segunda parede, em que $b < x < c$ e $x=0$, as equações de diferenças finitas são dadas pelas Equações 5.26 e 5.29.

Para a interface entre a parede a e b, em que $x=a$, tem-se:

$$k_a \frac{\theta(m-1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_a} + h_{cal} [\theta(m,n) - \theta(m+1,n)] = \rho c_a \frac{\Delta X_a}{2} \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau} \quad (5.36)$$

Reorganizando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n) \left(1 - 2\tau + 2\tau \frac{h_{cal} \Delta X_a}{k_a} \right) + 2\tau \theta(m-1,n) - 2\tau \frac{h_{cal} \Delta X_a}{k_a} \theta(m+1,n) \quad (5.37)$$

Simplificando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n) (1 - 2\tau + 2\tau Bi_a) + 2\tau \theta(m-1,n) - 2\tau Bi_a \theta(m+1,n) \quad (5.38)$$

Para a interface entre a parede a e c, em que $x=b$, tem-se:

$$k_c \frac{\theta(m+1,n) - \theta(m,n)}{\Delta X_c} + h_{cal} [\theta(m-1,n) - \theta(m,n)] = \rho c_c \frac{\Delta X_c}{2} \frac{\theta(m,n+1) - \theta(m,n)}{\Delta \tau} \quad (5.39)$$

Reorganizando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n) \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{cal} \Delta X_c}{k_c} \right) + 2\tau \theta(m+1,n) + 2\tau \frac{h_{cal} \Delta X_c}{k_c} \theta(m-1,n) \quad (5.40)$$

Simplificando:

$$\theta(m,n+1) = \theta(m,n) (1 - 2\tau - 2\tau Bi_a) + 2\tau \theta(m+1,n) + 2\tau Bi_a \theta(m-1,n) \quad (5.41)$$

5.4.4.1 Algoritmo SIMPLE

Para a solução das equações de conservação, utilizando o algoritmo SIMPLE, são realizadas as seguintes etapas:

- 1) A partir das equações de conservação da quantidade de movimento na sua forma discretizada, o processo iterativo tem início com a estimativa de um valor para os campos de pressão e velocidade. Conhecendo o campo de pressão, as equações são resolvidas para fornecer a estimativa para o campo de velocidades u^* e v^* ;
- 2) Posteriormente, são definidas as correções de pressão e velocidade como sendo a diferença entre os campos arbitrados e os corretos;
- 3) Utilizando as definições das correções, as equações de conservação da quantidade de movimento podem ser reescritas de forma a representar uma relação entre as correções de velocidade e pressão. Neste momento é feita a principal aproximação do algoritmo SIMPLE, quando os termos dos vizinhos são ignorados. Usando essa aproximação e as equações para a correção de pressão e velocidade, chega-se às equações de correção de velocidade;

- 4) É realizado o cálculo para a correção da pressão, através do cálculo dos coeficientes;
- 5) Cálculo das velocidades u e v corrigidas;

Nota: Várias iterações serão necessárias até o processo convergir.

5.2 Critério de Estabilidade

O cálculo das equações de diferenças finitas na forma explícita é de fácil utilização, porém é um método instável, sendo que é necessário determinar um critério de estabilidade para evitar que as soluções oscilem ou divirjam da solução real, utilizando um passo de tempo $\Delta\tau$ abaixo do limite máximo estipulado pelo critério da estabilidade.

Analisando as equações de diferenças finitas para todos os nós, foi identificado a equação que possui o menor coeficiente primário (coeficiente de todas θ_m^n nas expressões de θ_m^{n+1}) e determinado os valores admissíveis de $\Delta\tau$ por meio da aplicação do critério de estabilidade para esta equação. O critério de estabilidade mais restritivo foi utilizado para o cálculo.

Todas as equações de diferenças finitas foram analisadas e o procedimento para escolha do critério de estabilidade mais restritivo ficou automatizado dentro do programa desenvolvido, resultando nos seguintes critérios de estabilidade:

5.2.1 Parede simples

Das equações de diferenças finitas 5.18, 5.20 e 5.23, tem-se os seguintes critérios de estabilidade:

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_a^2}{2\alpha_a \left(1 + h_{EXT} \frac{\Delta X_a}{k_a} \right)} \quad (5.42)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_a^2}{2\alpha_a} \quad (5.43)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_a^2}{2\alpha_a \left(1 - h_{INT} \frac{\Delta X_a}{k_a} \right)} \quad (5.44)$$

5.2.2 Parede dupla sem espaçamento

Das equações de diferenças finitas 5.24, 5.26 e 5.29, tem-se os seguintes critérios de estabilidade:

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_a \Delta X_c (k_a \Delta X_a \alpha_c + 2k_b \Delta X_b \alpha_b + k_c \Delta X_c \alpha_a)}{2k_a k_c \alpha_a \alpha_c} \quad (5.45)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_c^2}{2\alpha_c} \quad (5.46)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_c^2}{2\alpha_c \left(1 - h_{INT} \frac{\Delta X_c}{k_c} \right)} \quad (5.47)$$

5.2.3 Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por condução)

Das equações de diferenças finitas 5.31, 5.33 e 5.35, tem-se os seguintes critérios de estabilidade:

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_a (\rho c_a \Delta X_a + \rho c_b \Delta X_b)}{2k_a} \text{ e } \Delta\tau \leq \frac{\Delta X_b (\rho c_a \Delta X_a + \rho c_b \Delta X_b)}{2k_b} \quad (5.48)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_b^2}{2\alpha_b} \quad (5.49)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_b (\rho c_b \Delta X_b + \rho c_c \Delta X_c)}{2k_b} \text{ e } \Delta\tau \leq \frac{\Delta X_c (\rho c_b \Delta X_b + \rho c_c \Delta X_c)}{2k_c} \quad (5.50)$$

5.2.4 Parede dupla com espaçamento (transferência de calor no espaçamento por convecção)

Das equações de diferenças finitas 5.38 e 5.41, tem-se os seguintes critérios de estabilidade:

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_a^2}{2\alpha_a \left(1 - h_{cal} \frac{\Delta X_a}{k_a} \right)} \quad (5.51)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta X_c^2}{2\alpha_c \left(1 + h_{cal} \frac{\Delta X_c}{k_c} \right)} \quad (5.52)$$

5.3 Simulação numérica

Foi desenvolvido um programa computacional na linguagem C para o cálculo das equações, possibilitando simular para cada modelagem de parede térmica a variação de espessura das paredes, propriedades físicas dos materiais de construção e revestimento externo das paredes. Nas simulações, a escolha do incremento de tempo ficou automatizado dentro do programa, conforme os critérios de estabilidade definidos. Foram utilizados valores de passo de tempo $\Delta\tau$ de 0,0001 à 0,005 segundos, valores de espaçamento nodal Δx de 0,015 à 0,16 metros. Para a malha computacional foram utilizados 4 nós fixos m , regularmente espaçados nas regiões I e III, e 10 nós fixos m , regularmente espaçados região II da parede dupla espaçada. Os demais dados de entrada foram mantidos iguais alterando apenas o dado do objeto de estudo (espessura, propriedades dos materiais, emissividades etc).

Para a parede dupla com água foram calculadas as temperaturas nas interfaces, em que $m=a$ e $m=b$, utilizando o mesmo programa computacional, calculando o coeficiente de transferência de calor por convecção h , determinado de forma adimensional pelo número de Nusselt Nu . Foi utilizado o algoritmo SIMPLE (Patankar, 1980) para o cálculo da temperatura da água ao longo do espaçamento entre as paredes, sendo que a análise das equações de conservação se dá através do método de volumes de controle para uma cavidade bidimensional com paredes impermeáveis, analisando o fenômeno da convecção natural, aplicando as leis de conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e conservação de energia. Foi considerada uma malha computacional contendo 60x60 nós igualmente espaçados.

Nas Figura 5. 2 e 5.3, são demonstrados os fluxogramas do programa computacional para cada modelo de parede analisado.

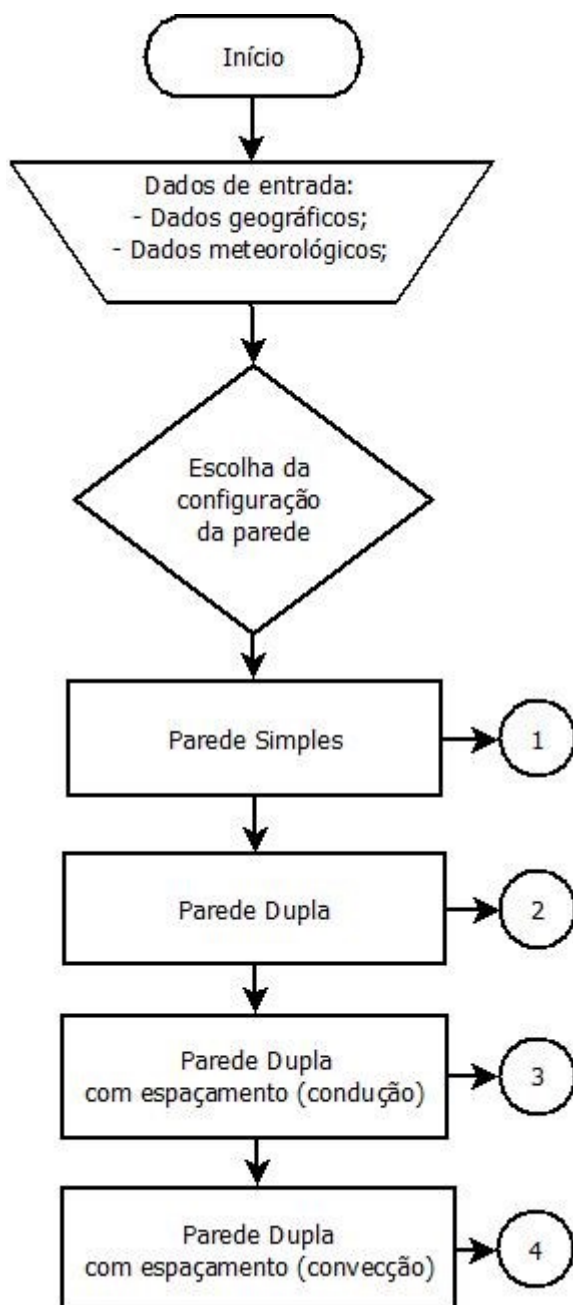


Figura 5. 2- Fluxograma do programa computacional.

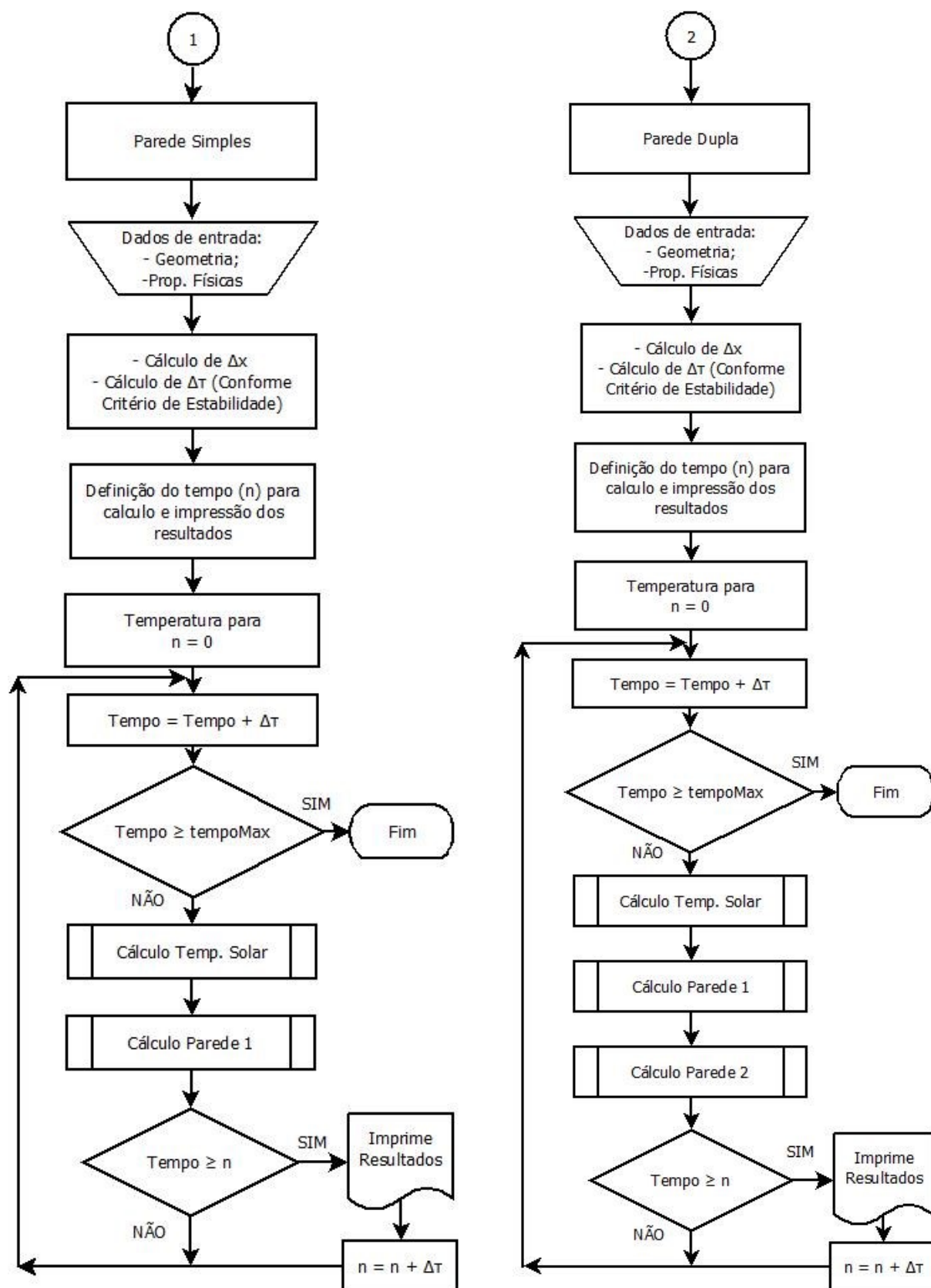


Figura 5. 2 - Fluxograma do programa computacional (continuação).

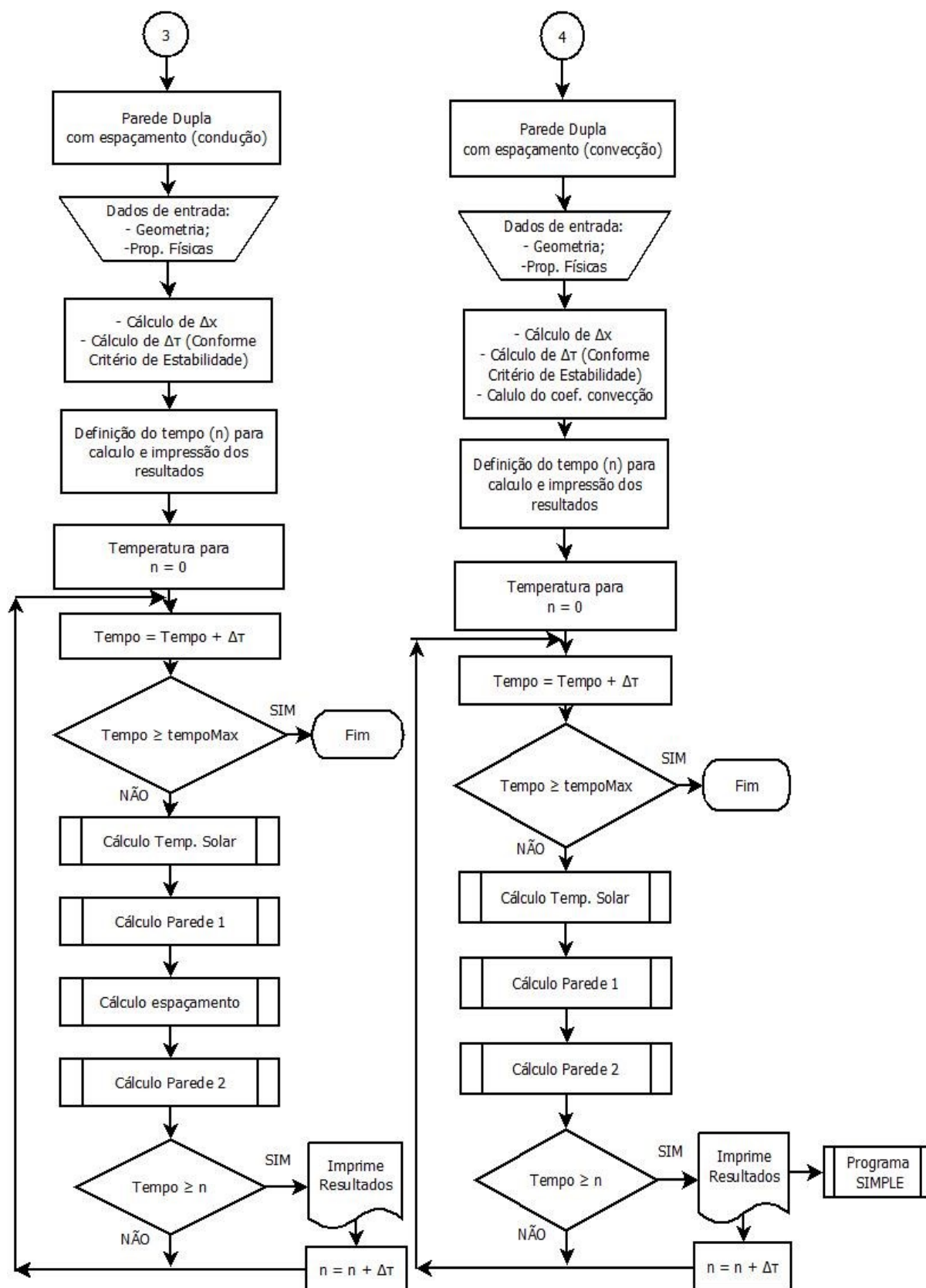


Figura 5. 2 - Fluxograma do programa computacional (continuação).

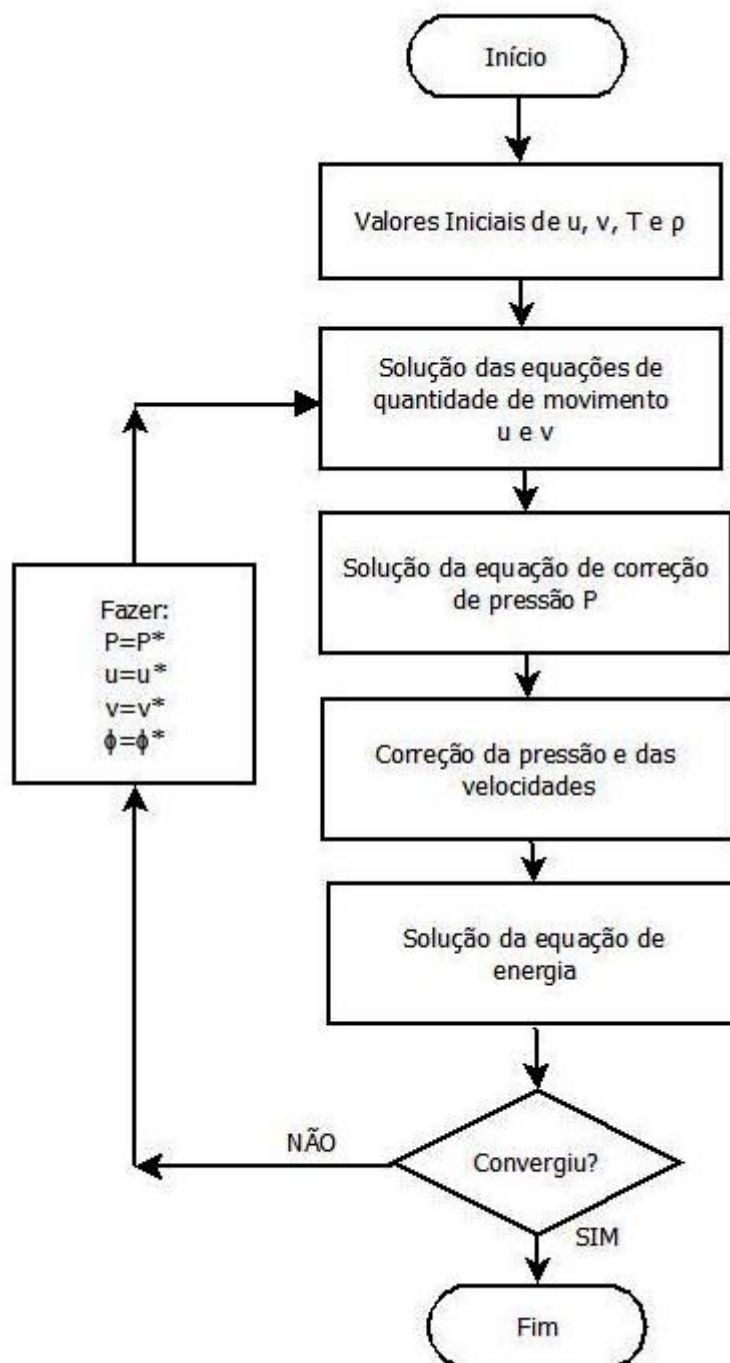


Figura 5. 3 - Fluxograma do programa computacional SIMPLE.

6 VALIDAÇÃO

Com o objetivo de convalidar a modelagem matemática e solução numérica para um modelo unidimensional em regime transiente aplicando o método de diferenças finitas, foram realizadas simulações para paredes térmicas simples e compostas, conforme o trabalho realizado por Castro (1991) e simulações para paredes térmicas simples, conforme o trabalho realizado por Marques (2007).

Primeiramente, a solução numérica apresentada neste trabalho foi comparada com os resultados numéricos apresentados por Castro (1991), utilizando as mesmas condições para dois modelos de paredes, com espessuras de 120 mm e 240 mm. O tijolo utilizado é do tipo a vista com dimensões de 240 mm x 120 mm x 60 mm, com condutividade térmica de 0,7 W/m °C, calor específico de 0,840 kJ/kg °C, massa específica de 1600 kg/m³, absorvidade de 0,63 e emissividade de 0,93. Foram considerados os coeficientes de convecção externo e interno de 17.03 W/m² e 8.0 W/m², respectivamente. Para os dados meteorológicos foi considerado o dia do ano de nº 344 que possui uma média de radiação total diária igual à 550 W/m², temperaturas médias máxima e mínima do ar ambiente de 29 °C e 17.9 °C, respectivamente.

A Figura 6. 1 mostra a comparação entre o presente trabalho e os resultados apresentados por Castro (1991) para a variação de temperatura interna e externa durante as horas do dia para uma parede simples. Como pode ser observado, os resultados obtidos apresentaram resultados aceitáveis, ou seja, a maior diferença encontrada entre as temperaturas do presente trabalho e dos resultados apresentados por Castro (1991) foi de aproximadamente 9 °C na temperatura externa da parede às 17h. A Figura 6. 2 mostra a variação horária da temperatura interna e externa para uma parede dupla, sendo que os resultados obtidos também foram razoáveis, ou seja, as maiores diferenças encontrada entre as temperaturas do presente trabalho e dos resultados apresentados por Castro (1991) foram no início da manhã e no final da noite. Os desvios apresentados na temperatura da parede interna são dados pela resistência de contato entre as paredes duplas que foram consideradas na simulação numérica, porém não foi considerado por Castro (1991).

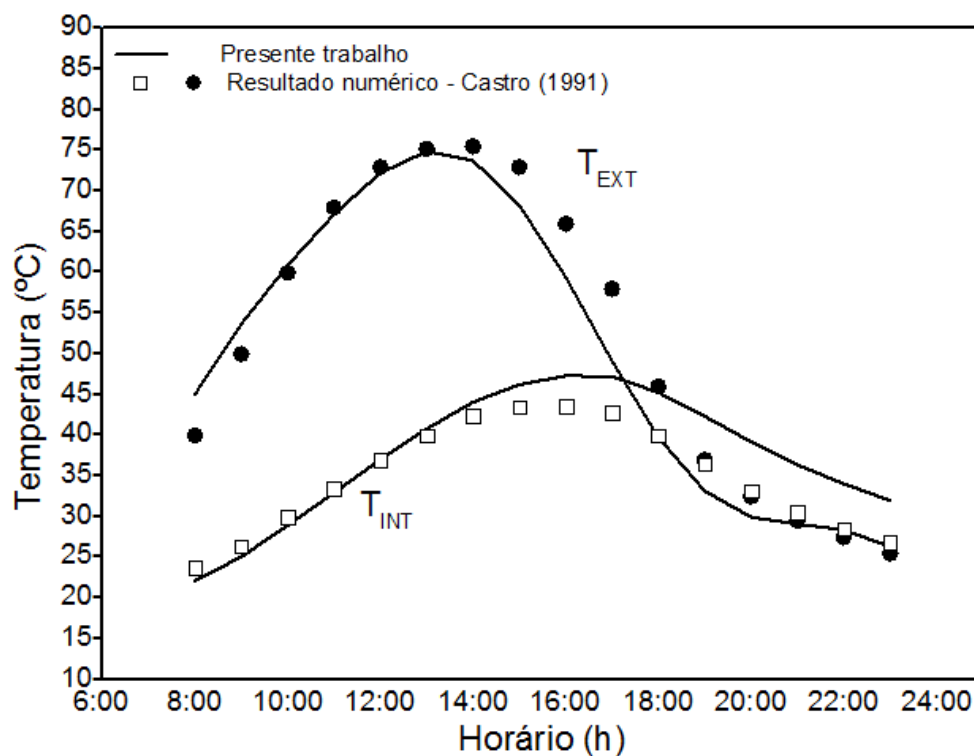


Figura 6. 1 – Comparação entre o presente trabalho e resultados numéricos apresentados por Castro (1991) para a temperatura horária da superfície interna e externa diária para uma parede simples.

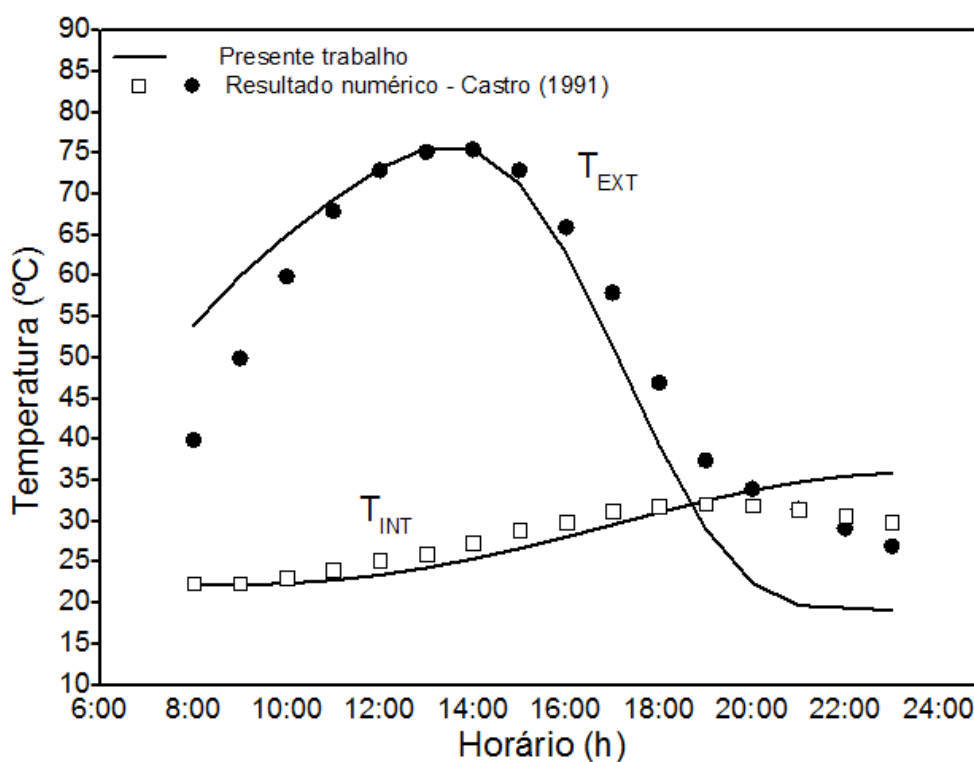


Figura 6. 2 – Comparação entre o presente trabalho e resultados numéricos apresentados por Castro (1991) para a temperatura horária da superfície interna e externa diária para uma parede dupla.

Posteriormente, a solução numérica apresentada neste trabalho foi comparada com os resultados experimentais apresentados por Castro (1991) para uma parede dupla. Os valores das propriedades térmicas do material de construção são os mesmos das simulações numéricas apresentadas anteriormente, apenas os dados meteorológicos foram alterados. O resultado apresentado na Figura 6. 3 é para uma parede dupla composta por uma parede externa de 120 mm de espessura e uma parede interna 60 mm de espessura. Sendo que as simulações foram realizadas para o dia do ano de nº 220 que possui uma média de radiação total diária igual a 381 W/m^2 , temperaturas médias máxima e mínima do ar ambiente de $26,8^\circ\text{C}$ e $12,8^\circ\text{C}$, respectivamente. Conforme resultado apresentado, a temperatura externa segue a mesma tendência e os desvios encontrados no início da manhã e no início da noite podem ser atribuídos à possível presença de umidade, uma vez que os testes experimentais são realizados ao ar livre. Da mesma forma a temperatura interna mostram alguns desvios que podem ser atribuídos à possível transferência de umidade para a parede interna.

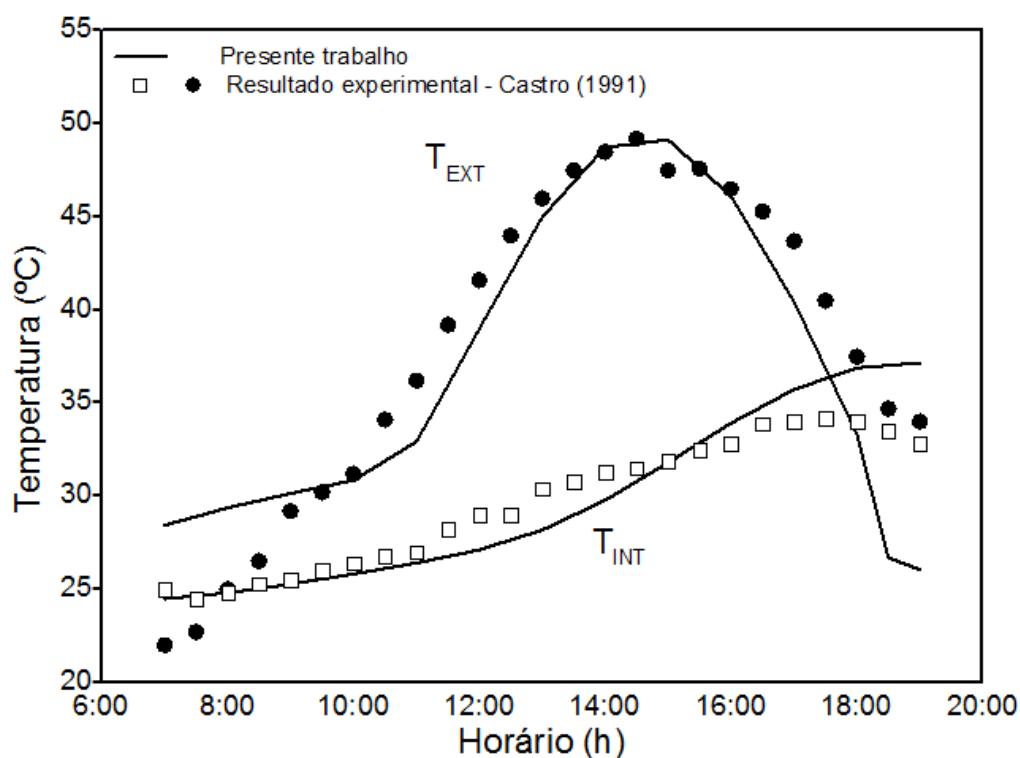


Figura 6. 3 – Comparação entre o presente trabalho e resultados experimentais apresentados por Castro (1991) para a temperatura horária da superfície interna e externa diária para uma parede dupla.

Da mesma forma, a solução numérica apresentada neste trabalho foi comparada com os resultados experimentais apresentados por Marques (2007), utilizando as mesmas condições para uma parede simples, com espessuras de 100 mm e acabamento com reboco de cor clara. O tijolo utilizado é de alvenaria, com condutividade térmica de $0,72 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, calor específico de $0,840 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$, massa específica de 1600 kg/m^3 , absorvidade de 0,59 e emissividade de 0,93, considerando os coeficientes de convecção externo e interno de $17,03 \text{ W/m}^2$ e $8,0 \text{ W/m}^2$ respectivamente. O protótipo foi construído por Marques (2007) na cidade de São Luís, no estado do Maranhão, com localização de Latitude e Longitude de $2^\circ 35'$ e $44^\circ 12'$ respectivamente, considerado o dia do ano de nº 346 com uma média de radiação total diária igual a 381 W/m^2 , temperaturas médias máxima e mínima do ar ambiente de 34°C e 27°C , respectivamente.

Conforme resultado apresentado na Figura 6. 4, a temperatura externa segue a mesma tendência e os desvios encontrados no início da manhã e no início da noite podem ser atribuídos à possível presença de umidade, uma vez que os testes experimentais são realizados ao ar livre. Da mesma forma a temperatura interna mostram alguns desvios que podem ser atribuídos à possível transferência de umidade para a parede interna.

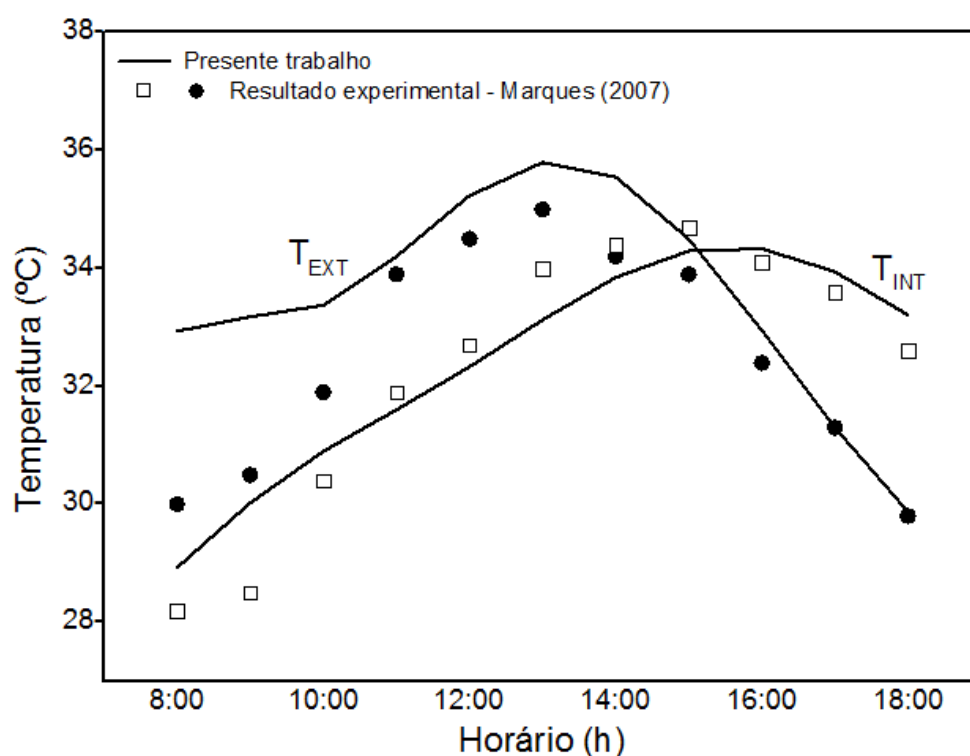


Figura 6. 4 – Comparação entre o presente trabalho e resultados experimentais apresentados por Marques (2007) para a temperatura horária da superfície interna e externa diária para uma parede simples.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma grande quantidade de simulações numéricas foi realizada nas três configurações de paredes térmicas para investigar os efeitos da variação da espessura, espaçamento entre as paredes, propriedades termofísicas dos materiais de construção e acabamento externo das paredes. Os dados meteorológicos e de radiação utilizados são para a cidade de Campinas, São Paulo, Brasil, para o dia do ano de número 220, considerando a radiação total média diária de $38,1 \text{ MJ/m}^2$, com visibilidade de 12 km, média mensal de temperatura máxima e mínima iguais a $26,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $12,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e coeficiente de transferência de calor interno de $8,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ e externo de $17,03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, constantes, conforme recomendado por ASHRAE (2001). Uma parede simples de 12 cm de espessura com difusividade térmica de $0,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividade térmica de $0,9 \text{ W/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, foi considerada como uma “parede padrão”, utilizada como referência para comparação e análise da eficiência das modelagens estudadas.

Para as paredes duplas preenchidas com ar estagnado no espaçamento, a modelagem matemática utilizada foi a de transferência de calor por condução, uma vez que para os espaçamentos utilizados o número de Nusselt calculado foi menor que 1, indicando que a transferência de calor no espaçamento ocorre somente por condução. Já na parede dupla preenchida com água, a modelagem matemática utilizada foi a de transferência de calor por convecção.

A intensidade da radiação total incidente calculada para os dados meteorológicos e de radiação, é apresentada hora a hora na Figura 7. 1.

Foram analisadas as variações da temperatura na superfície interna e externa das paredes, a variação da temperatura ao longo das espessuras e espaçamentos das paredes, a variação do fator de decremento (RT^*) e retardamento do pico de temperatura ao longo das horas do dia. Sendo que o fator de decremento (RT^*) e retardamento do pico de temperatura foram definidos, conforme Figura 7. 2:

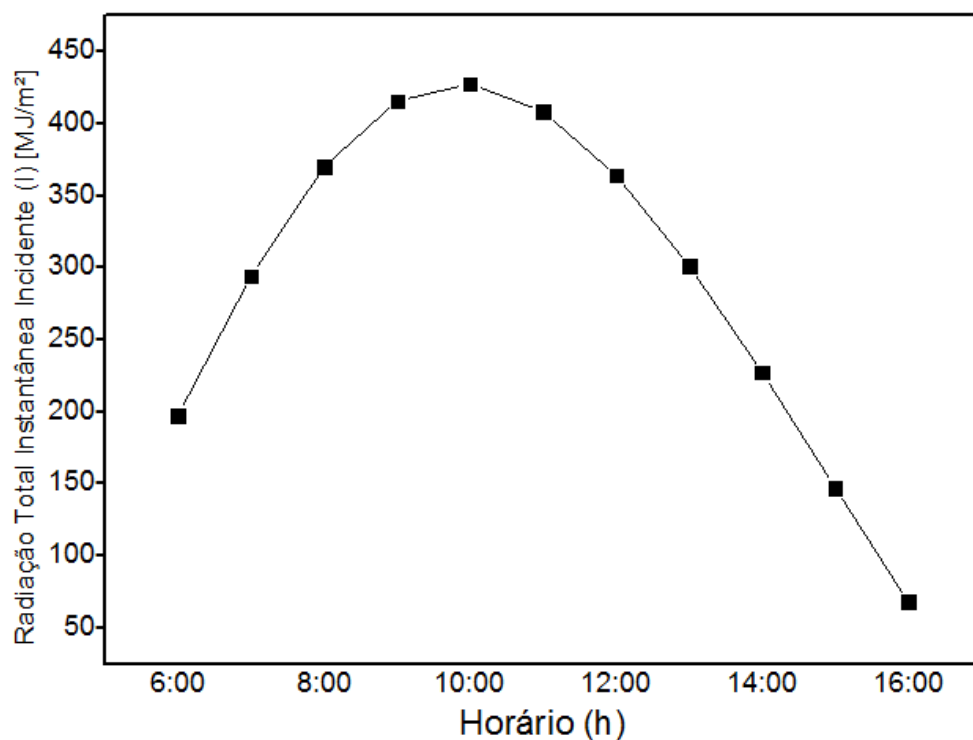


Figura 7. 1 – Radiação total instantânea incidente.

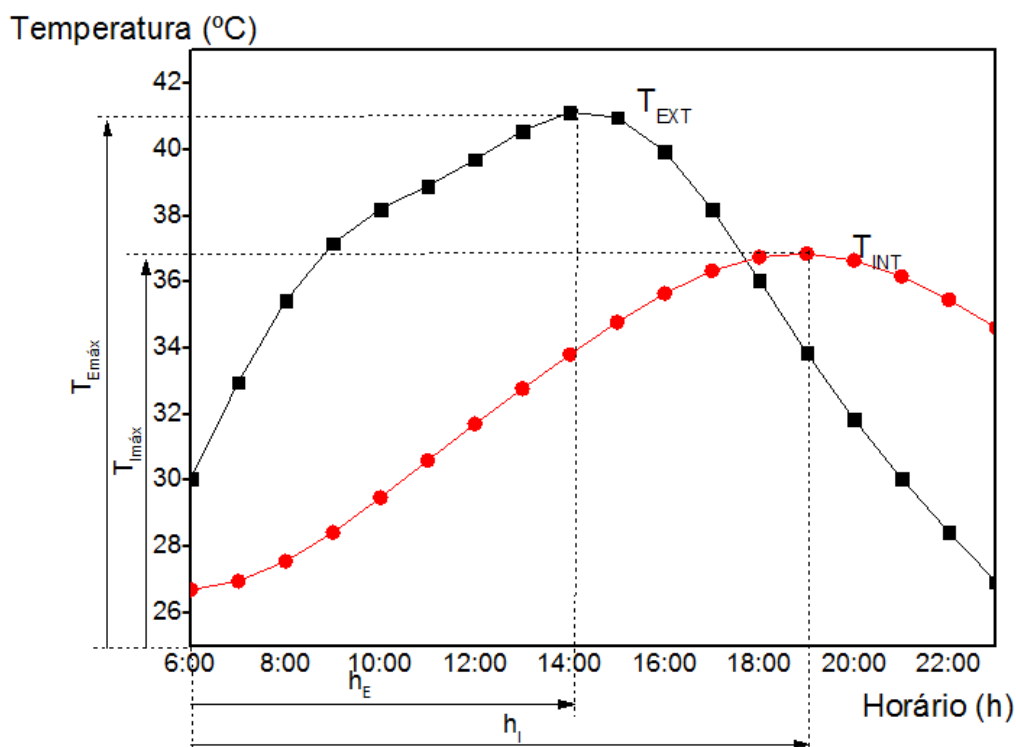


Figura 7. 2 - Definição do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura

Sendo que T_{EXT} e T_{INT} são as temperaturas das superfícies externa e interna da parede, $T_{\text{Emáx}}$ e $T_{\text{Imáx}}$ são as temperaturas máximas das superfícies, respectivamente, h_E e h_I são os

horários de um determinado dia, sendo que foram atingidas as temperaturas máximas nas superfícies externa e interna da parede.

O fator de decremento (RT^*) é a razão entre $T_{Imáx}$ e $T_{Emáx}$ e pode ser calculado, conforme Equação:

$$RT^* = \frac{T_{Imáx}}{T_{Emáx}} \quad (7.1)$$

O fator de decremento (RT) é a razão entre T_{EXT} e T_{INT} para cada hora do dia, e pode ser calculado, conforme Equação:

$$RT = \frac{T_{INT}}{T_{EXT}} \quad (7.2)$$

O retardamento do pico de temperatura (Ret) é a diferença entre h_I e h_E e pode ser calculado conforme Equação:

$$Ret = h_I - h_E \quad (7.3)$$

7.1 Parede Simples

7.1.1 Análise dos efeitos da variação de espessura para paredes simples

O efeito da variação da espessura da parede na temperatura da superfície externa é apresentado na Figura 7. 3, sendo que a difusividade térmica da parede de $0,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividade térmica de $0,7 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ foram mantidas iguais para as simulações realizadas, porém com espessuras variando de 6 à 48 cm

Como pode ser visto na Figura 7. 4, o aumento da espessura da parede aumenta a resistência térmica da parede, reduz o calor transferido através da parede e consequentemente a temperatura máxima da superfície interna. Pode-se também observar o retardamento do pico de temperatura e, portanto, o aumento do intervalo de tempo para as temperaturas máximas atingirem a superfície interna da parede.

Para o fator de decremento RT^* , analisando a Figura 7. 5, é possível observar que à medida que a espessura da parede aumenta, a resistência térmica aumenta, reduz a taxa de transferência de calor e também a proporção da temperatura interna máxima para a temperatura externa máxima (RT^*). O intervalo de tempo definido como o tempo em que a

temperatura máxima atinge a superfície interna aumenta com o aumento da espessura da parede (Retardamento do pico de temperatura).

Comparando os Fatores de Decremento (RT^*) obtidos na variação da espessura da parede com o RT^* da “parede padrão”, é possível observar na Figura 7. 6 a razão entre os Fatores de Decremento (RT^*) sendo que é possível verificar uma melhora na redução do calor transferido através da parede em até 5 % do RT^* para a parede de 48 cm de espessura. Pode-se também observar o retardamento do pico de temperatura (Ret) de aproximadamente 2,5 vezes para uma parede de 48 cm de espessura quando comparada com a parede padrão.

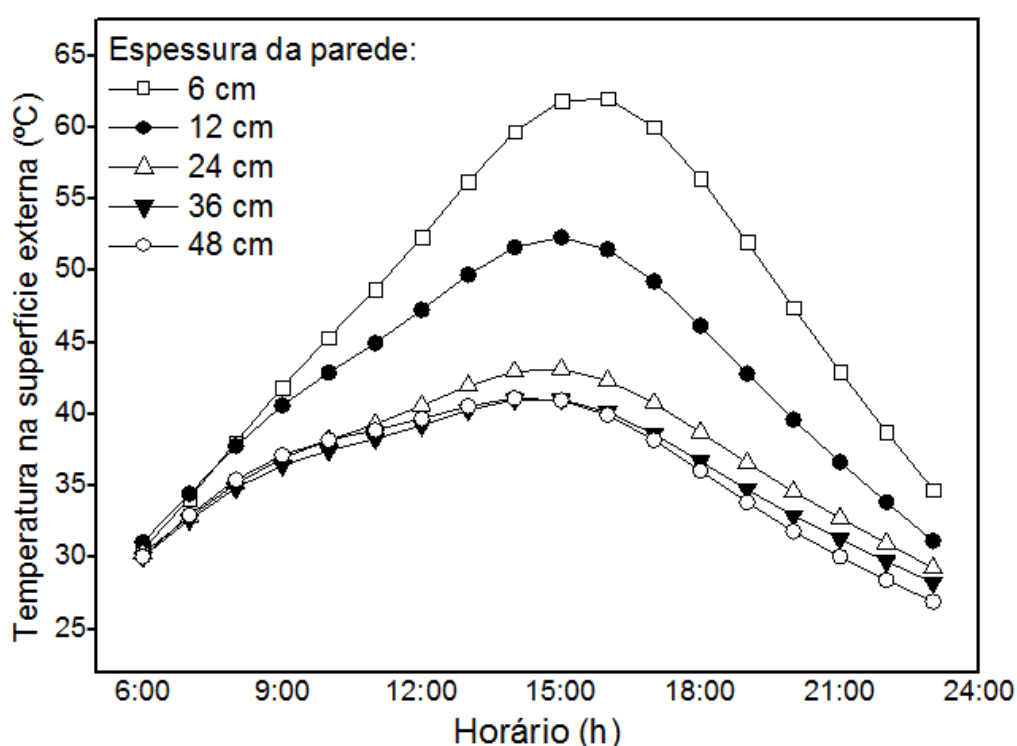


Figura 7. 3 - Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície externa.

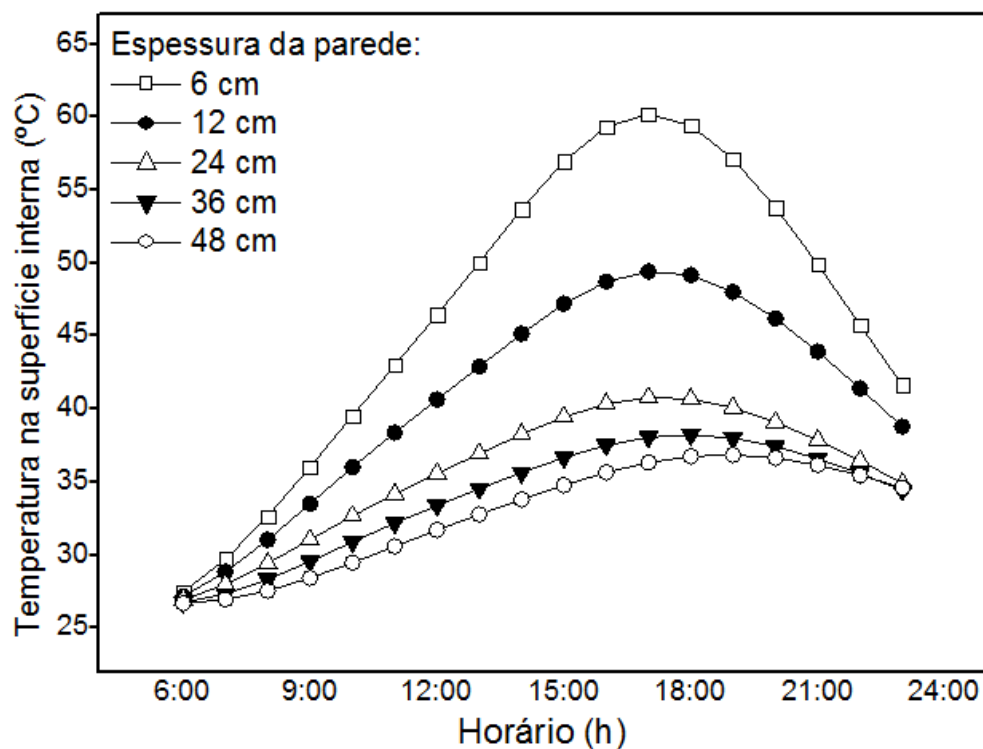


Figura 7. 4 - Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície interna.

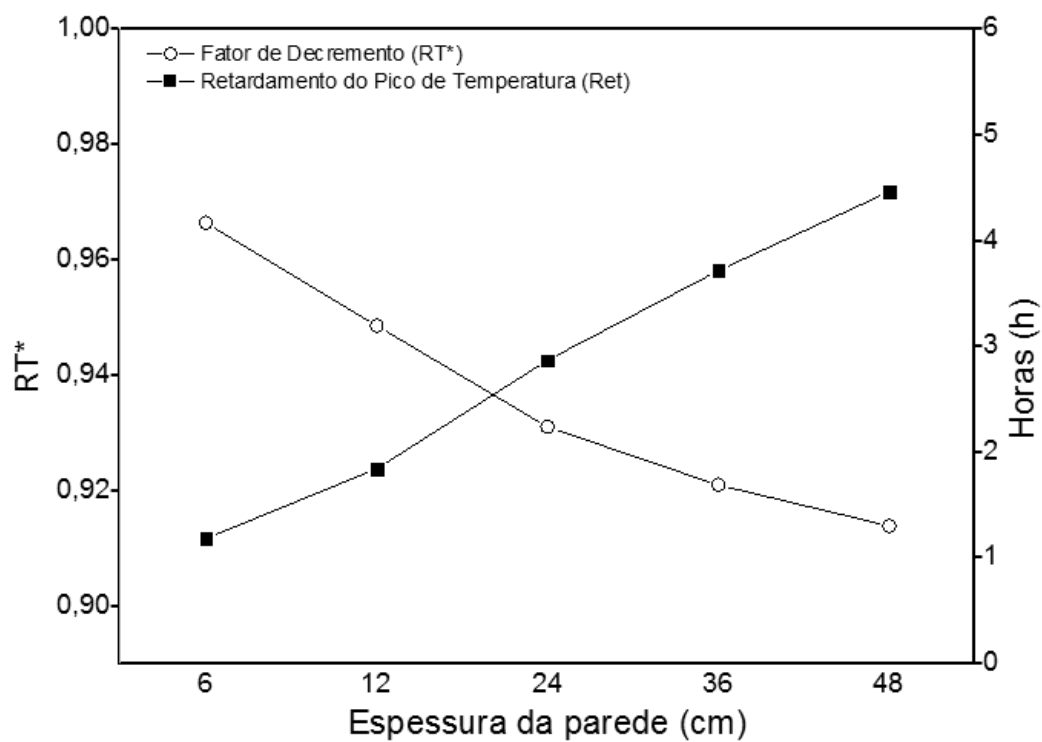


Figura 7. 5 - Efeito da variação da razão de temperatura máxima e deslocamento de temperatura para diferentes espessuras de parede.

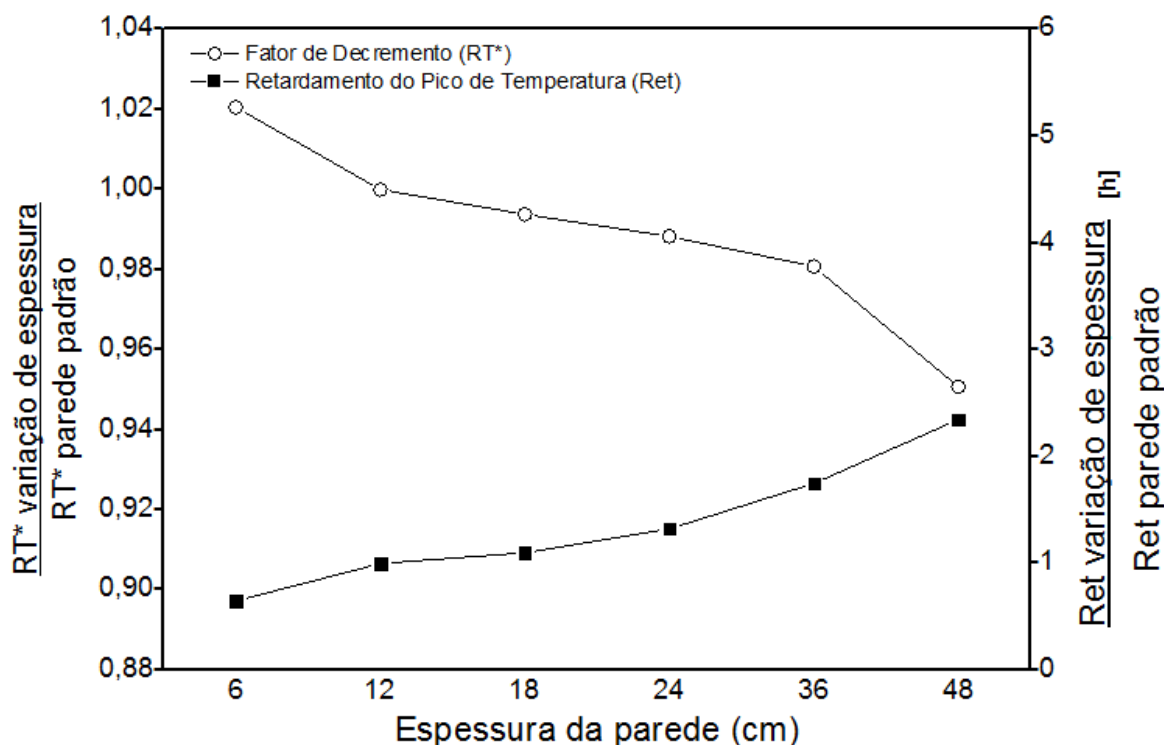


Figura 7. 6 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação da espessura da parede e uma parede padrão .

7.1.2 Análise dos efeitos da variação da condutividade térmica de materiais de construção

Os resultados das simulações dos efeitos da variação da condutividade térmica de materiais de construção na temperatura da superfície externa de uma parede simples é apresentado na Figura 7. 7 para espessura de 12 cm, massa específica de 1600 kg/m^3 , calor específico de $0,92 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$, absortividade de 0,63 e emissividade de 0,93, enquanto a condutividade térmica foi variada de 0,1 à $0,9 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$, simulando materiais como placas de compensado, blocos de alvenaria, cimento etc.

Analisando a Figura 7. 8, é possível notar que a temperatura máxima da face interna da parede aumenta com o aumento da condutividade térmica devido ao elevado gradiente térmico. Diminuindo a condutividade térmica do material de construção há um aumento da resistência térmica do material e do retardamento do pico de temperatura.

Conforme resultados apresentados na Figura 7. 9, o aumento da condutividade térmica dos materiais de construção eleva o fluxo de calor para a superfície interna da parede diminuindo o retardamento do pico de temperatura (Ret) e aumentando o fator de decremento (RT^*).

Os valores considerados para as condutividades térmicas simulam paredes com características de materiais isolantes que apresentam baixa condutividade térmica, ou seja, são maus condutores de calor, enquanto valores mais elevados são de materiais comuns na construção. Os materiais de construção mais comuns possuem um condutividade térmica relativamente alta, na faixa de 0,65 à 1.3 W/m.°C (Çengel, 2012).

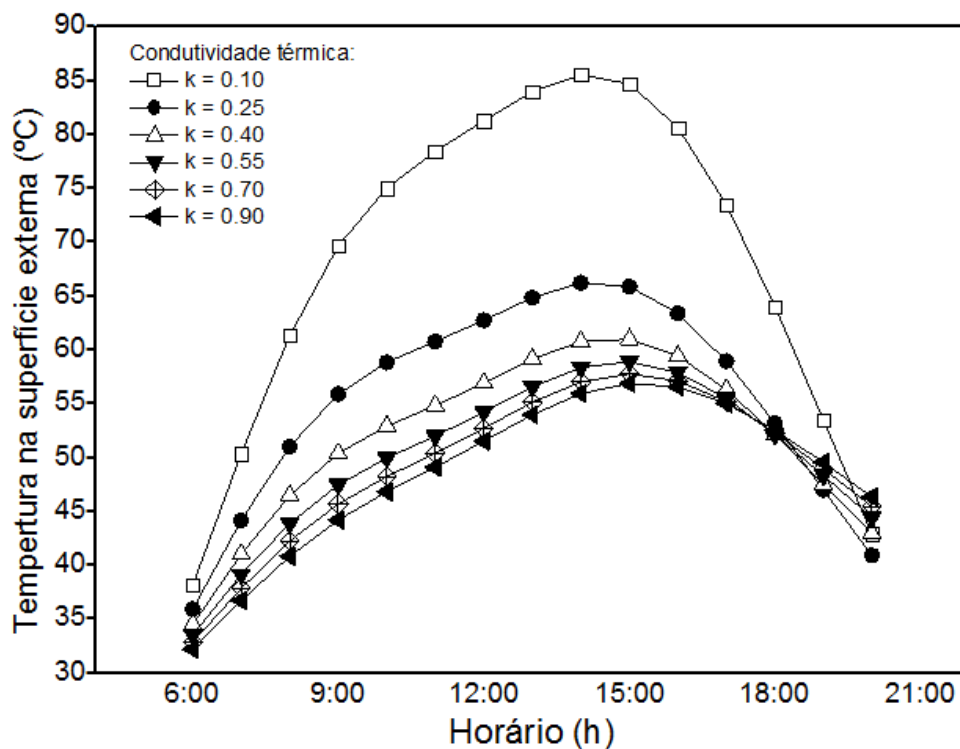


Figura 7. 7 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície externa.

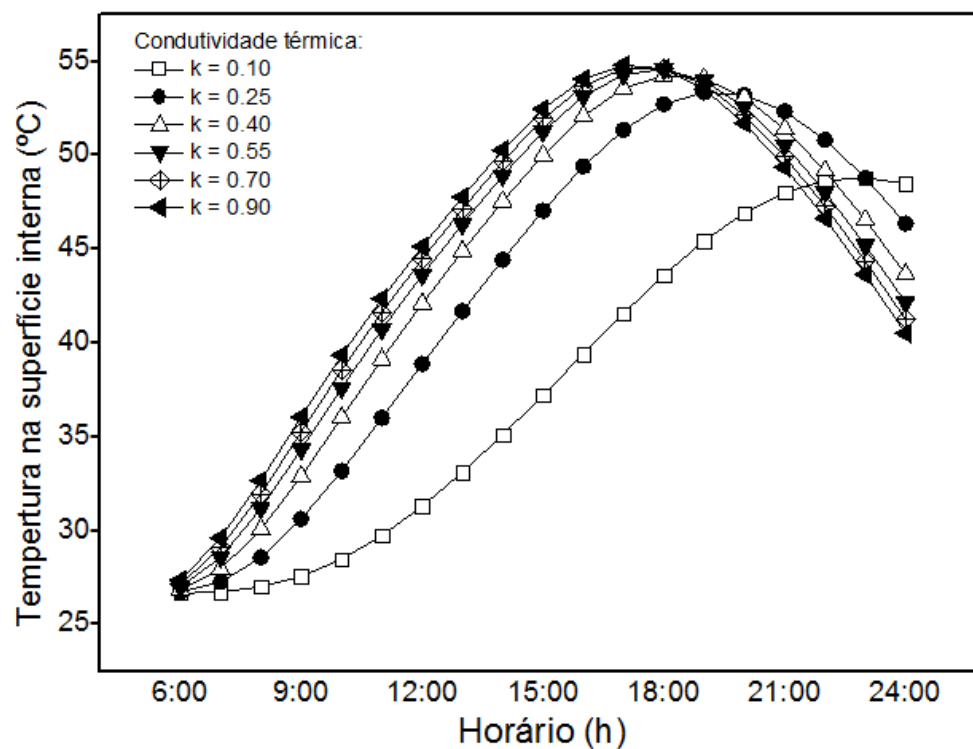


Figura 7. 8 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície interna.

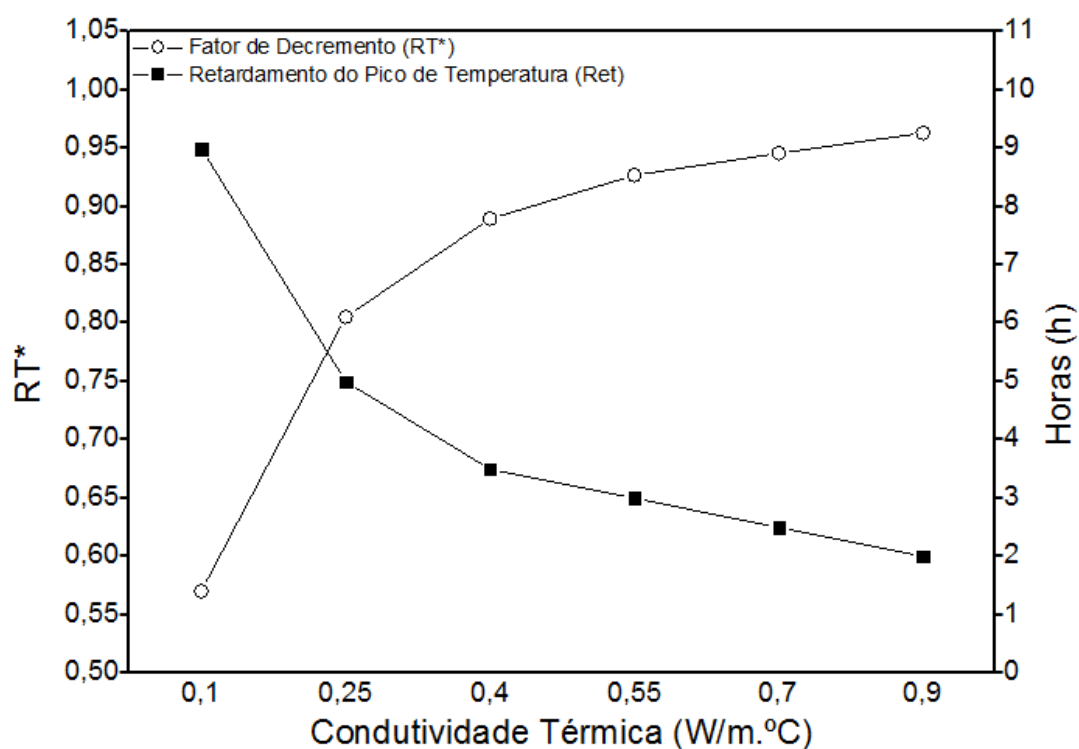


Figura 7. 9 - Efeito da variação da condutividade térmica na razão de temperatura máxima e deslocamento de temperatura.

Na Figura 7. 10, foram comparados os Fatores de Decremento (RT^*) obtidos na variação da condutividade térmica da parede com o RT^* da “parede padrão”, sendo que é possível observar a razão entre os Fatores de Decremento (RT^*) e verificar uma melhora na redução do calor transferido, através da parede em até 42 % do RT^* para a parede com condutividade térmica de $0,1 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$. Pode-se também observar o retardamento do pico de temperatura (Ret) de aproximadamente 4,5 vezes para a mesma parede com condutividade térmica de $0,1 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ quando comparada com a parede padrão.

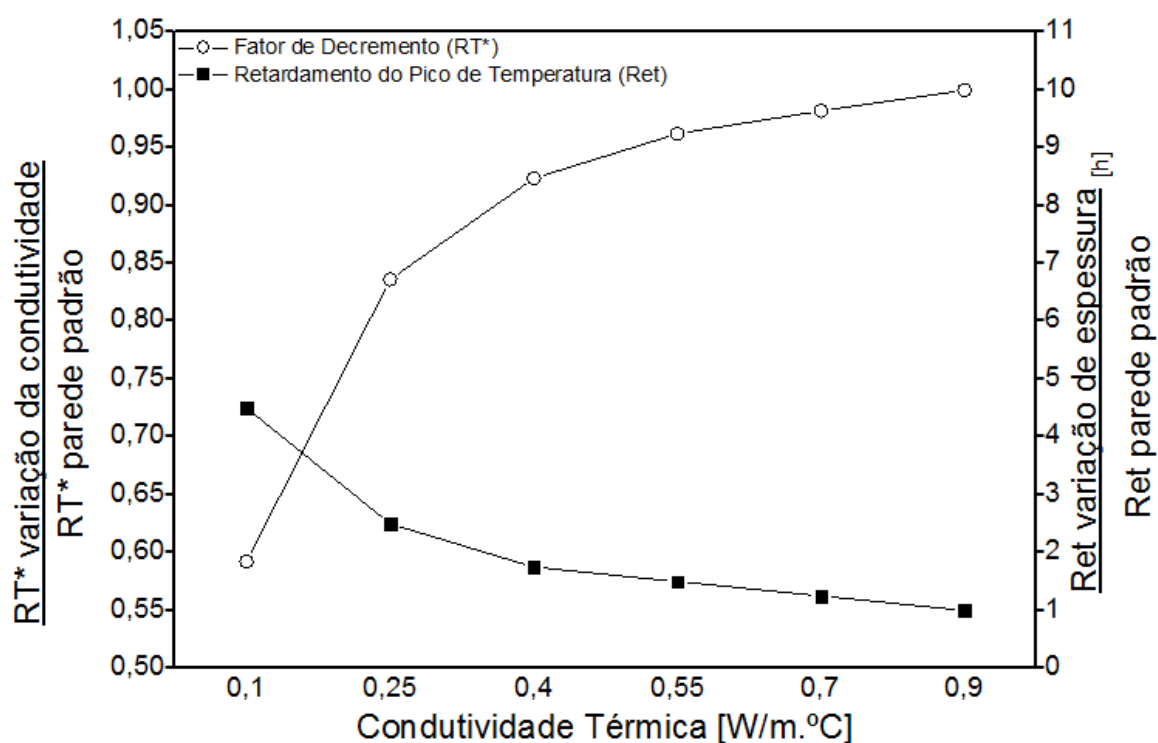


Figura 7. 10 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação da condutividade térmica da parede e uma parede padrão .

7.1.3 Análise dos efeitos de revestimentos externo

Os efeitos do material de acabamento aplicado na superfície externa da parede, isto é, sua emissividade e absorção no valor da temperatura interna máxima e no retardamento do pico de temperatura foram investigadas. As simulações foram realizadas para uma parede simples com espessura de 12 cm, condutividade térmica de $0,9 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ e demais propriedades físicas iguais aos apresentados no item 7.1.1, porém com superfícies externas diferentes (pintura branca, pintura preta e vegetação) variando a absortividade α e

emissividade ϵ , conforme valores apresentados por Çengel (2012) e ASHRAE (2001), mostradas na Tabela 7. 1:

Tabela 7. 1 - Absorvidade α e emissividade ϵ dos revestimentos externos conforme Çengel (2012) e ASHRAE (2001)

Revestimento externo	α	ϵ
Pintura Branca	0,14	0,93
Vegetação	0,59	0,92
Pintura Preta	0,98	0,98

As Figura 7. 11 e 7.12 mostram os resultados da variação da temperatura nas superfícies da parede externa e interna, respectivamente, conforme as horas do dia, sendo que um acabamento externo de vegetação pode reduzir a temperatura externa da parede em aproximadamente 50%, enquanto a o acabamento com pintura da cor branca absorve uma pequena quantidade de radiação incidente e consequentemente transfere menos calor para a parede interna.

Na Figura 7. 13, é possível notar a grande diferença da variação da temperatura na face externa e na face interna devido às propriedades térmicas da superfície da parede. As superfícies com pintura preta são destinadas para paredes, onde há a necessidade de coletar energia solar, pois apresentam alta absorvidade solar, mas valores baixos de emissividade. Já as superfícies com pintura branca apresentam propriedades opostas e são destinadas para paredes, onde há a necessidade de se manter fria e se torna útil para manter o conforto térmico. As superfícies revestidas com plantas absorvem e emitem de forma moderada se comparado com a pintura preta e branco.

Na Figura 7. 14 foram comparados os Fatores de Decremento horário (RT) obtidos na variação dos revestimentos externos da parede com o RT da “parede padrão”, sendo que é possível observar a razão entre os Fatores de Decremento horário (RT) e verificar que a tendência de uma parede revestida com vegetação é próxima à “parede padrão”, já a pintura preta apresenta um RT menor que a “parede padrão” no início do dia, devido ao elevado gradiente de temperatura. A diferença entre os RTs comparados para a parede preta e branca no final do dia é de aproximadamente 50%, sendo que a parede preta irá absorver aproximadamente 35% a mais de calor para a face interna da parede quando comparado com a “parede padrão”, e a parede branca irá impedir a transferência de aproximadamente 15% a menos de calor para a face interna da parede quando comparado com a “parede padrão”.

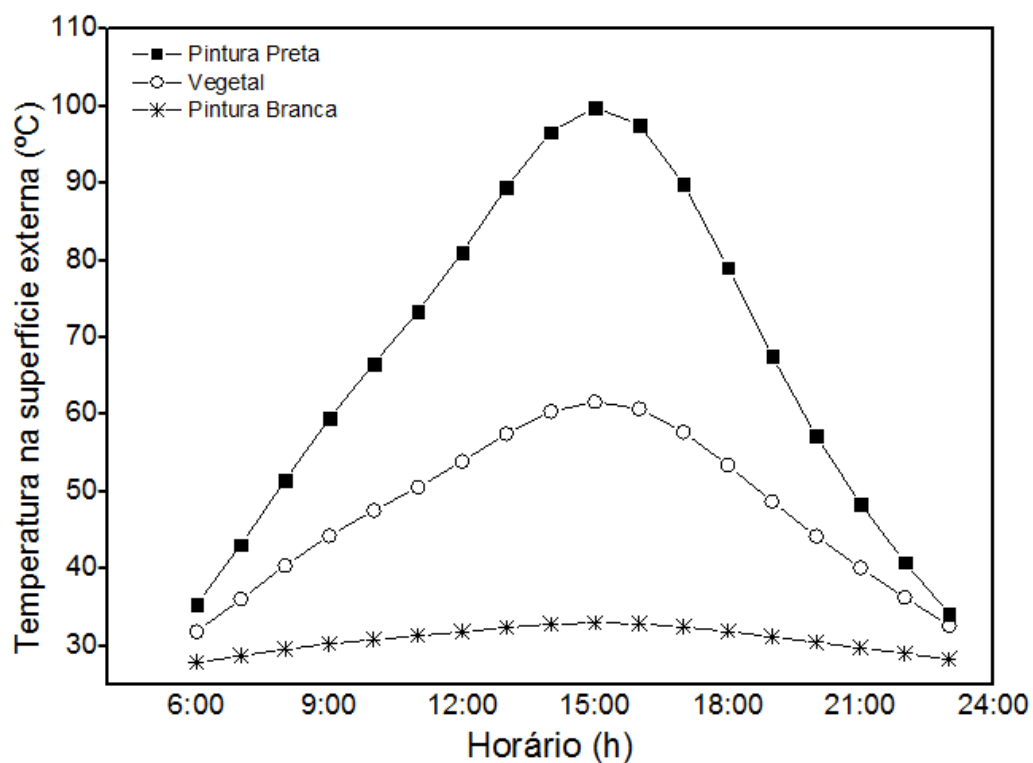


Figura 7. 11 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície externa.

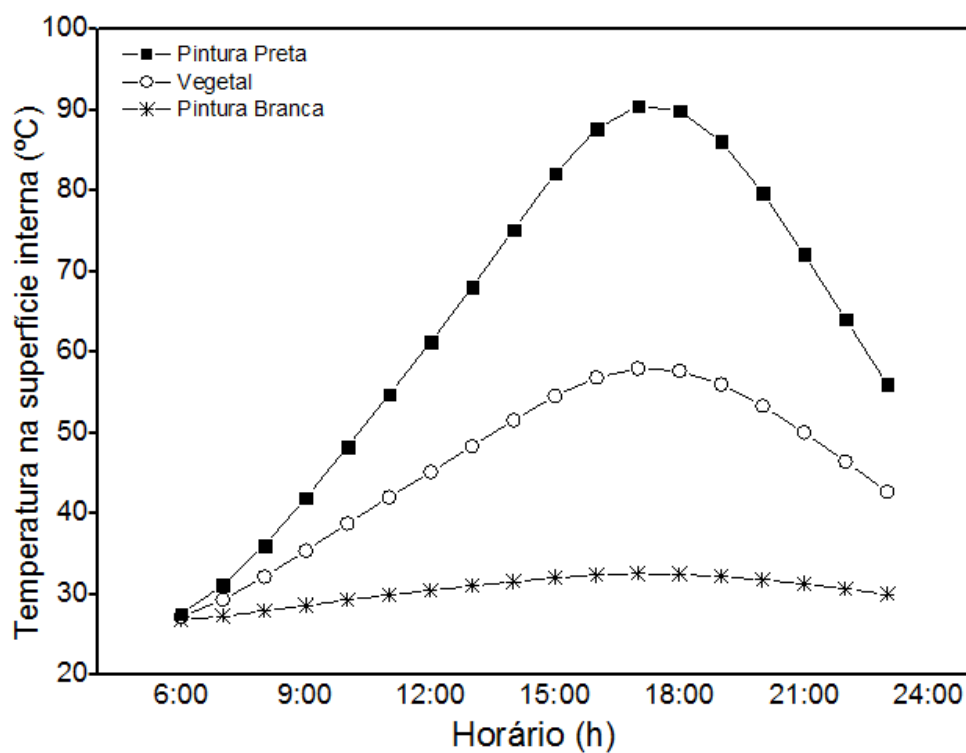


Figura 7. 12 - Efeito da variação da condutividade térmica na temperaturas da superfície interna.

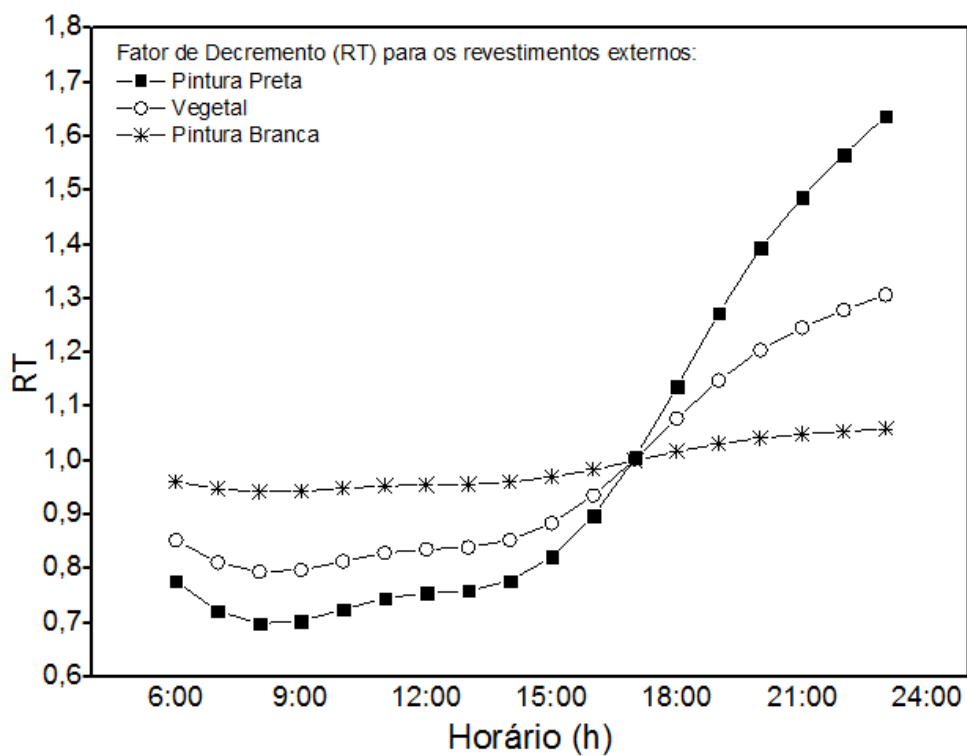


Figura 7. 13 - Efeito da variação do acabamento da superfície externa na razão de temperatura máxima.

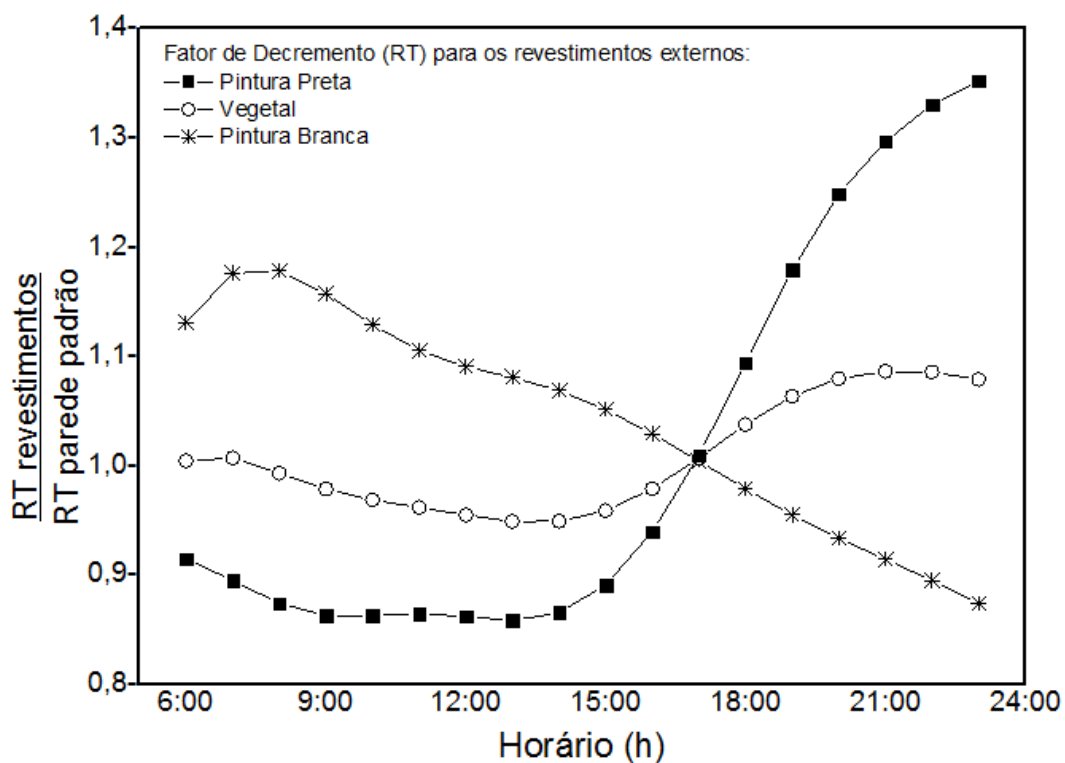


Figura 7. 14 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação dos revestimentos externos da parede e uma parede padrão .

7.1.4 Análise dos efeitos da adição de biomassa em material de construção

Os resultados da simulação realizada para a análise dos efeitos da adição de biomassa em argamassa de gesso são representados na Figura 7. 15 e 7.16, utilizando as propriedades físicas da Tabela 7. 2 apresentadas no estudo realizado por Lima (2005), onde foram realizadas simulações para paredes utilizando as amostras com porcentagens de adição de biomassa de 0% a 10%. Atingindo o objetivo de obter um novo material que pudesse ser utilizado como revestimento ou elementos de vedação, agregando a este propriedade que conduza baixa condutividade térmica. É possível notar que amostra com 0% apresentou um retardamento do pico de temperatura de 3 horas, e a amostra de 10% um retardamento de 5,5 horas, indicando que o material com boa resistência térmica possui características que favorece o conforto passivo.

A Figura 7. 17 apresenta o resultado do fator de decremento (RT^*), onde é possível analisar que quanto maior a porcentagem de adição de biomassa em argamassa de gesso menor será o fluxo de calor para a superfície interna da parede.

Tabela 7. 2 - Propriedades térmica da biomassa

Parede Dimensões: 230x114x64 mm	Propriedades			
	Massa específica [kg/m³]	Calor Específico [kJ/kg °C]	Condutividade Térmica [W/m.°C]	Absortividade e Emissividade
Amostra A ₀ : 0% de M.v.M;	1159,36	2,168	0,53	0,63 0,93
Amostra A ₅ : 5% de M.v.M;	1031,54	2,623	0,25	0,63 0,93
Amostra A ₁₀ : 10% de M.v.M;	943,40	1,817	0,17897	0,63 0,93
Amostra A ₂₀ : 20% de M.v.M;	598,20	3,064	0,20448	0,63 0,93
Amostra A ₃₀ : 30% de M.v.M;	457,80	3,718	0,19533	0,63 0,93

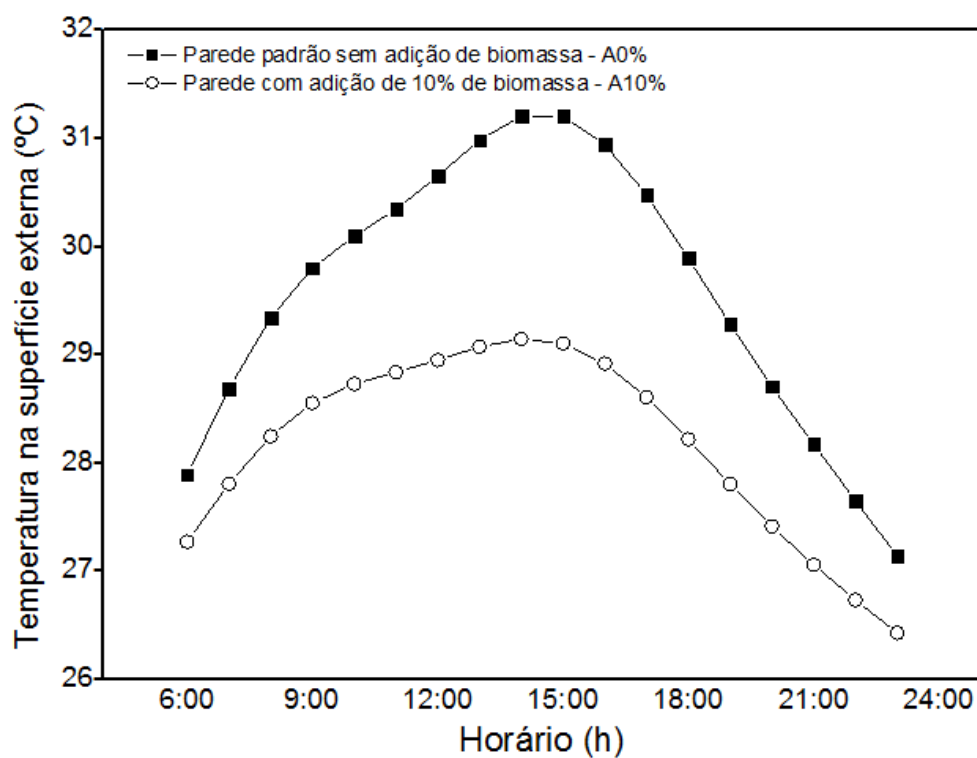


Figura 7. 15 - Efeito da variação da adição de biomassa em material de construção na temperaturas da superfície externa.

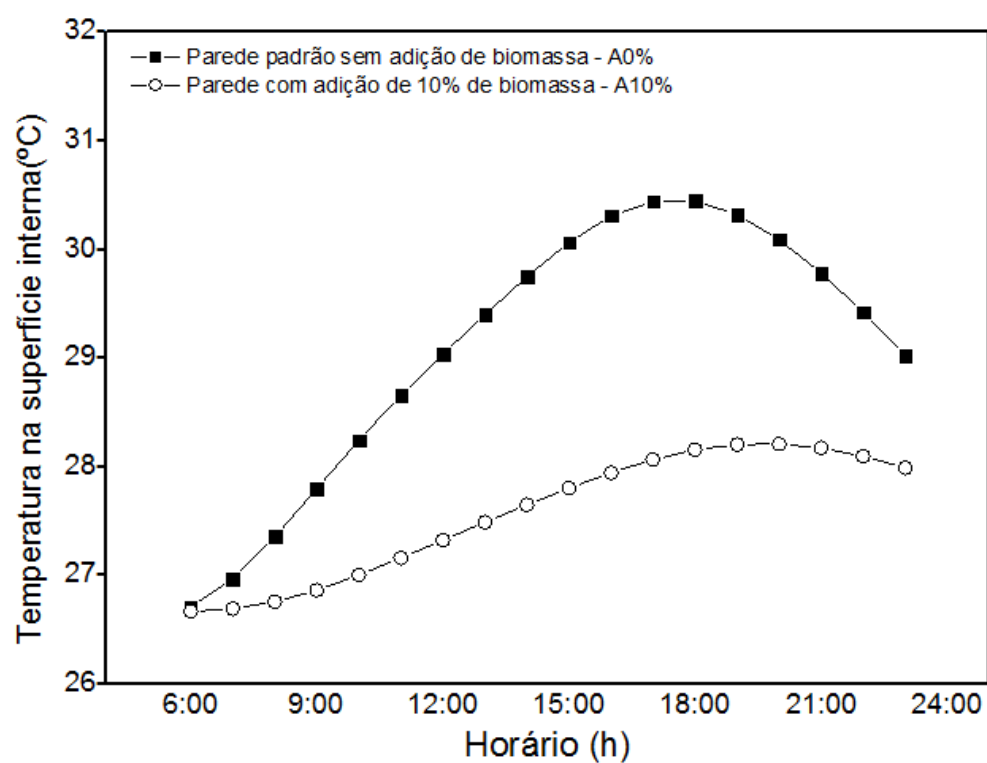


Figura 7. 16 - Efeito da variação da adição de biomassa em material de construção na temperaturas da superfície interna.

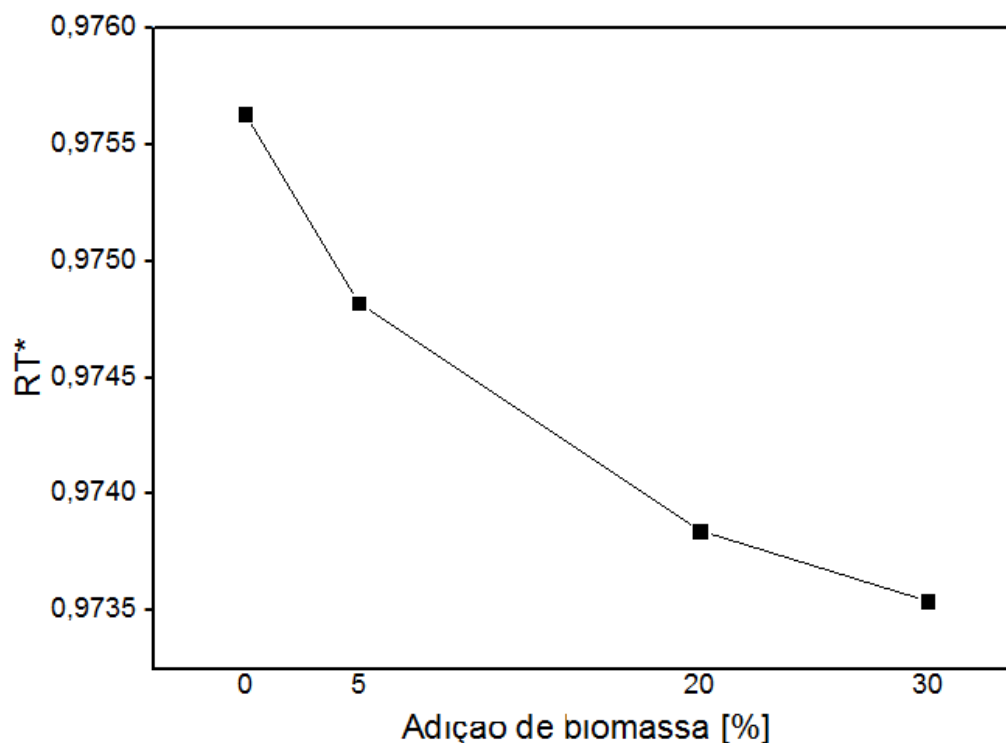


Figura 7. 17 - Efeito da adição de biomassa em materiais de construção na razão de temperatura máxima.

7.2 Parede dupla

7.2.1 Análise dos efeitos da variação do espaçamento entre paredes compostas

Os resultados dos efeitos da variação da largura do espaçamento entre paredes duplas compostas são representados nas Figura 7. 18 a 7.22 para paredes com espessura de 12 cm, condutividade térmica de 0,7 W/m.°C, massa específica de 1600 kg/m³, calor específico de 0,84 kJ/kg °C, absorvidade de 0,63 e emissividade de 0,93, com espaçamento entre as paredes preenchido com ar confinado de condutividade térmica de 0,025 W/m.°C, massa específica de 1,184 kg/m³ e calor específico de 1 kJ/kg °C, porém variando o espaçamento entre as paredes de 0,2 cm à 2 cm.

Analisando a Figura 7. 23, é possível verificar que quando o espaçamento é pequeno (0,2 cm e 0,5 cm), a resistência térmica também é pequena, porém aumentando o espaçamento para 1 cm e 2 cm, a resistência térmica aumenta e consequentemente a temperatura através do espaçamento para de aumentar e a parede interna não mostra nenhuma

alteração na temperatura com o tempo. Como pode ser visto, um espaçamento de 2 cm mantém uma temperatura interna constante independente da variação da temperatura ambiente externa por causa da alta resistência térmica do ar confinado que se assemelha a um isolamento térmico.

Na Figura 7. 24 foram comparados os Fatores de Decremento (RT^*) obtidos na variação do espaçamento entre as paredes com o RT^* da “parede padrão”, onde é possível observar a razão entre os Fatores de Decremento (RT^*) e verificar uma melhora na redução do calor transferido através da parede para todas as variações de espaçamentos, sendo que uma variação de 2 cm apresentou o melhor resultados.

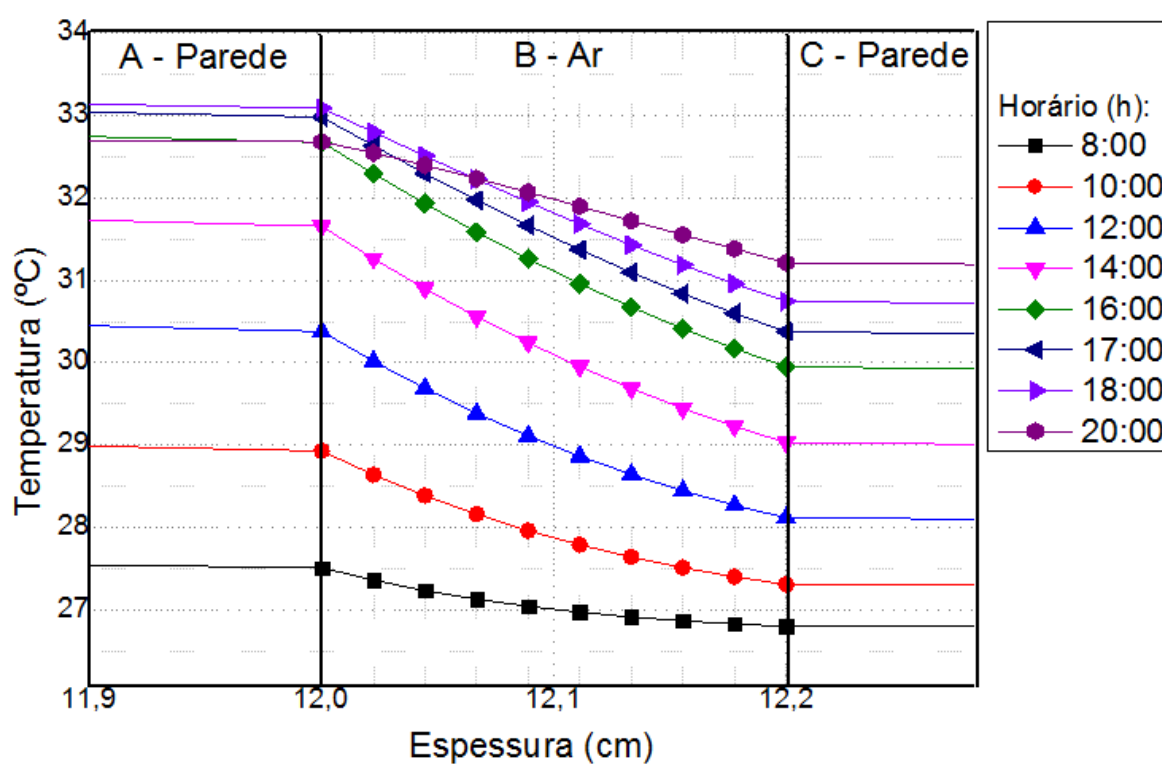


Figura 7. 18 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento entre as paredes de 12 cm espaçada por 0,2 cm de ar confinado.

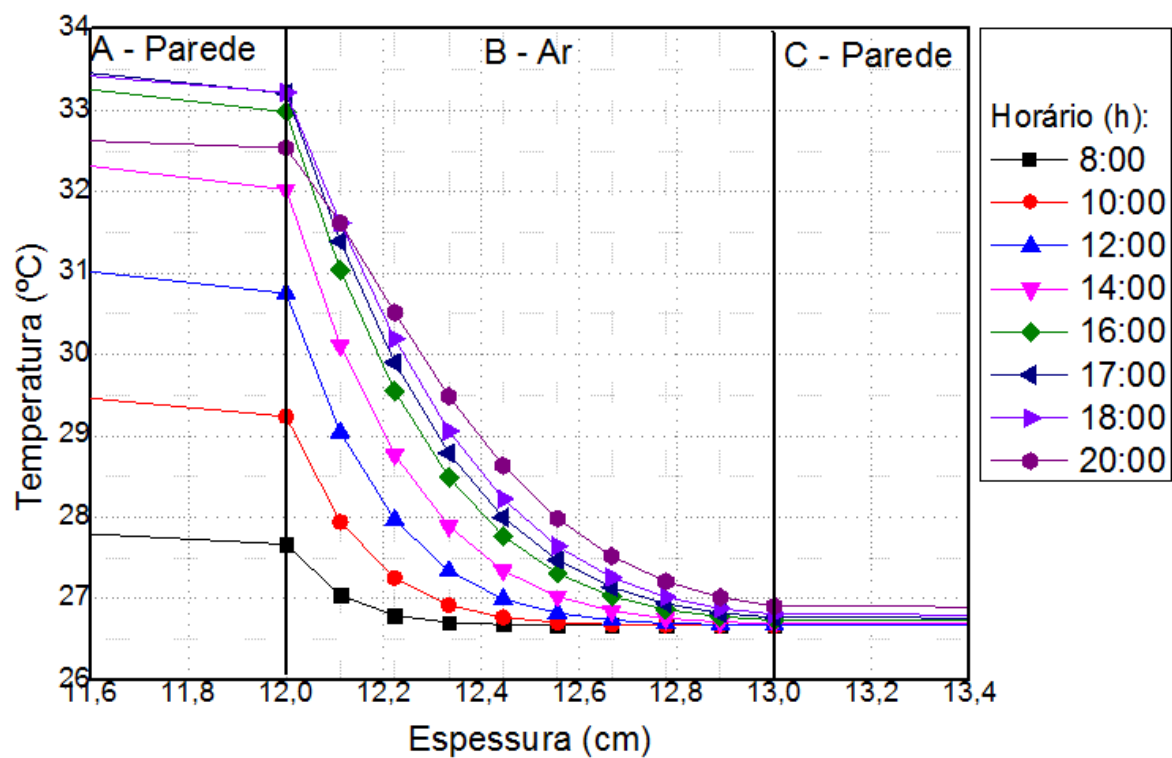


Figura 7. 19 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento entre as paredes de 12 cm espaçada por 1,00 cm de ar confinado.

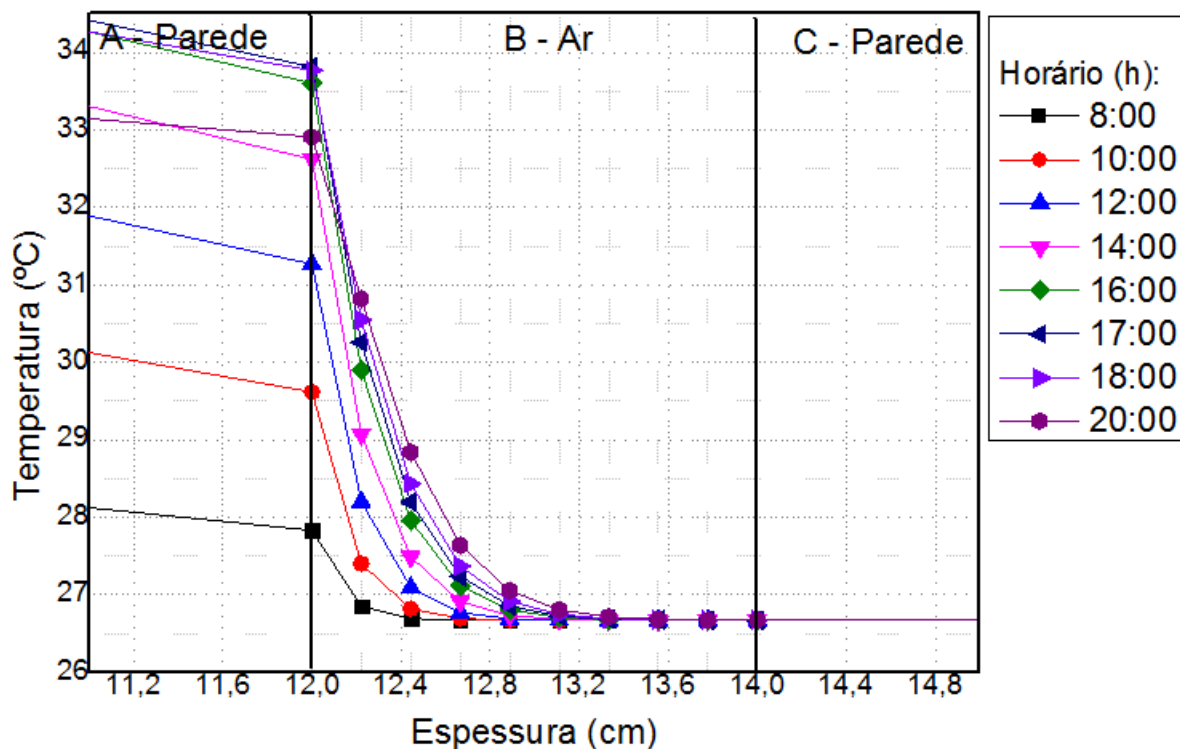


Figura 7. 20 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento entre as paredes de 12 cm espaçada por 2,00 cm de ar confinado.

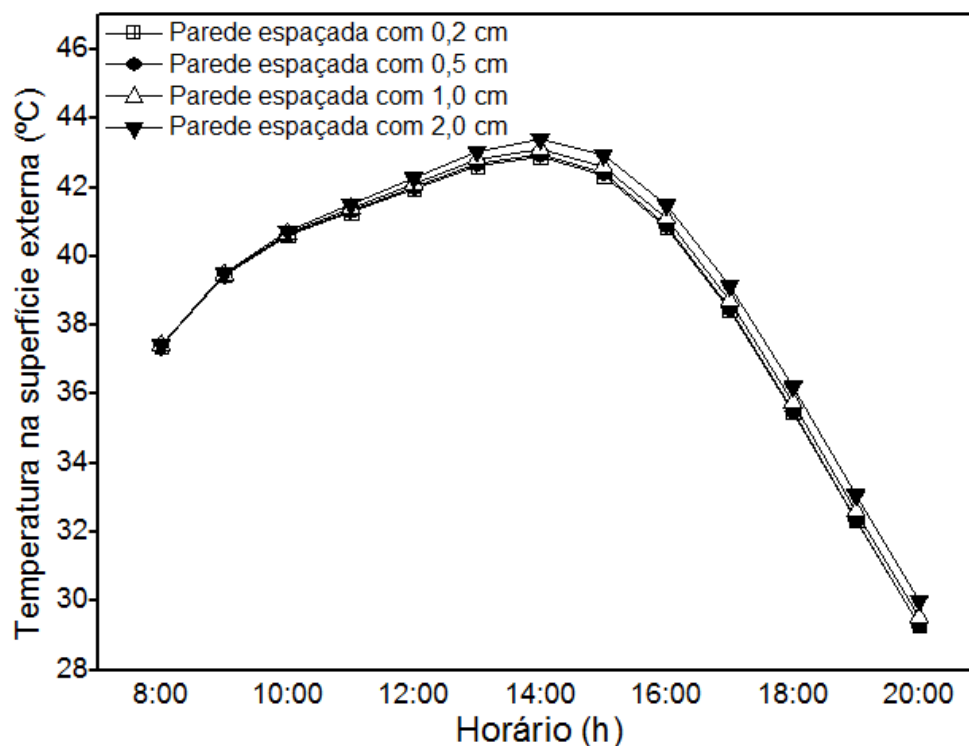


Figura 7. 21 - Efeito da variação do espaçamento na temperatura da superfície externa.

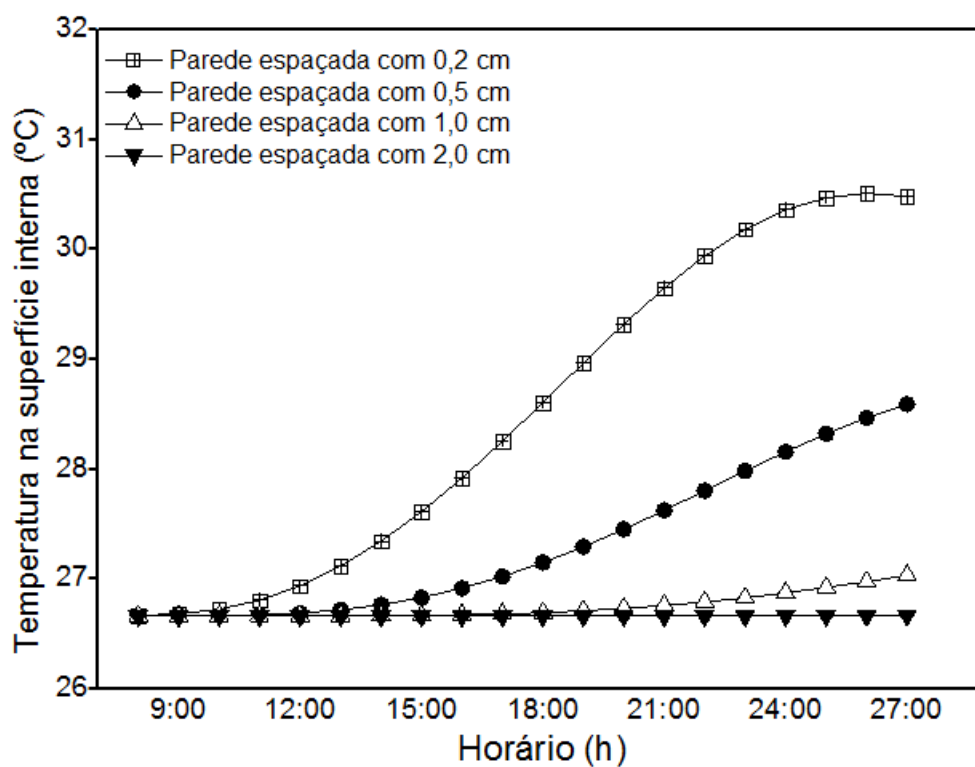


Figura 7. 22 - Efeito da variação do espaçamento na temperatura da superfície interna.

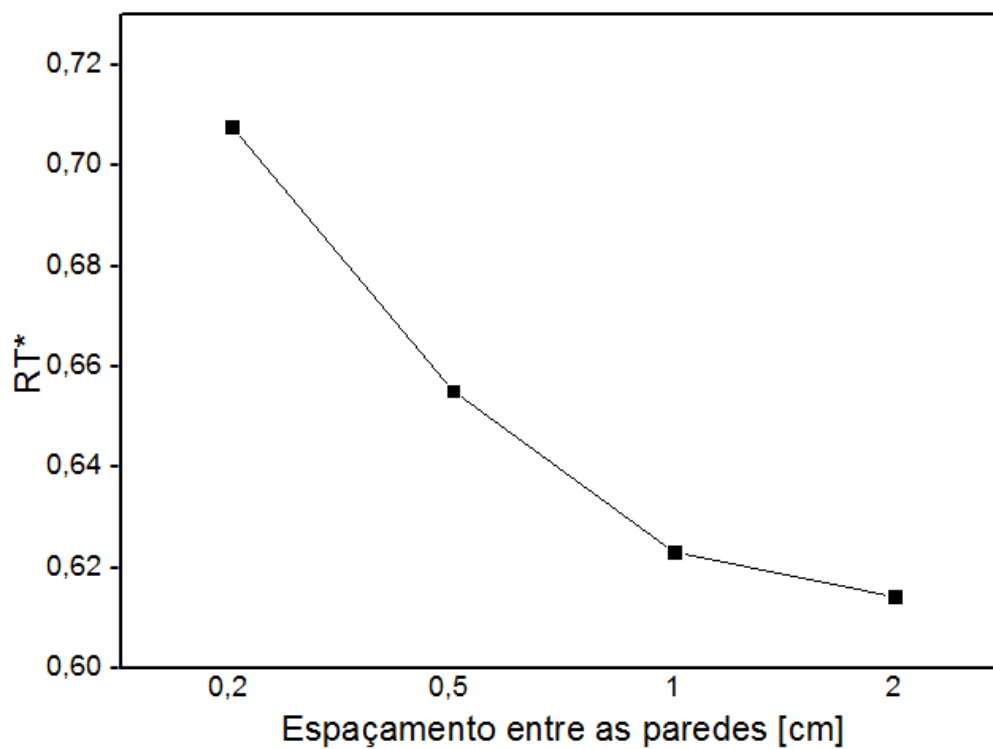


Figura 7. 23 - Efeito da variação do espaçamento no Fator de Decremento (RT^*).

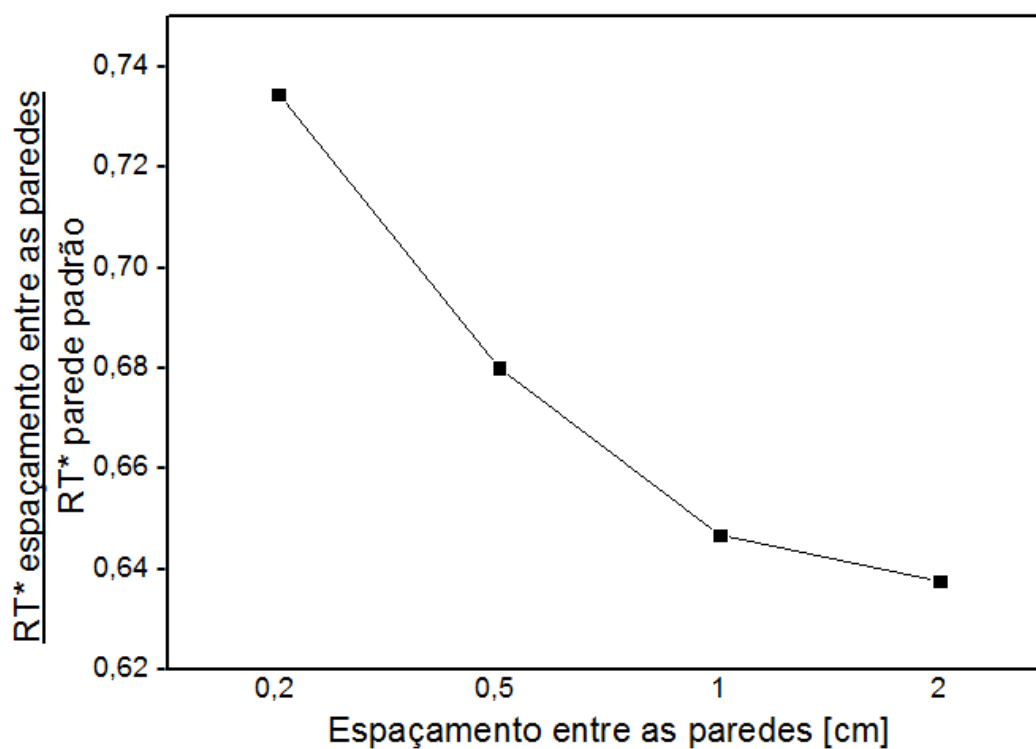


Figura 7. 24 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre o espaçamento entre as paredes e uma parede padrão .

7.2.2 Análise dos efeitos de revestimentos externo em paredes compostas

Os resultados dos efeitos da variação do tipo de revestimento externo para paredes compostas espaçadas com 2 cm de ar confinado são representados para paredes com espessura de 12 cm, variando a absorvidade α e emissividade ε , conforme propriedades térmicas apresentadas na Tabela 7. 3 conforme Çengel (2012) e ASHRAE (2001):

Tabela 7. 3 - Absorvidade α e emissividade ε dos revestimentos externos conforme Çengel (2012) e ASHRAE (2001)

Revestimento externo	α	ε
Pintura Branca	0,14	0,93
Pintura Amarela	0,30	0,90
Vegetação	0,59	0,92
Pintura Vermelha	0,74	0,90
Pintura Preta	0,98	0,98

Nas Figura 7. 25 à 7.30, observa-se que o ar confinado entre as paredes promove uma grande resistência térmica ao fluxo de calor proveniente do revestimento na parede externa, fazendo com que a influência do revestimento se dê apenas na primeira parede.

A Figura 7. 31 apresenta o resultado do fator de decremento (RT^*), onde é possível analisar que o ar confinado entre as paredes promove uma grande resistência térmica ao fluxo de calor proveniente do revestimento na parede externa, fazendo com que a influencia do revestimento se dê apenas na primeira parede.

O acabamento externo das superfícies para este caso será determinado pela finalidade da parede externa: coletar energia solar utilizando pintura preta ou manter a parede fria utilizando pintura branca, já que a escolha não influenciará na temperatura interna.

Na Figura 7. 32 foram comparados os Fatores de Decremento (RT^*) obtidos na variação da absorvidade das paredes com o RT^* da “parede padrão”, onde é possível observar a razão entre os Fatores de Decremento (RT^*) e verificar uma redução do calor transferido através da parede, conforme o aumento no espaçamento entre as paredes, sendo que o aumento da absorvidade térmica aumenta o gradiente de temperatura entre a superfície interna e externa da parede, consequentemente diminuindo o RT^* .

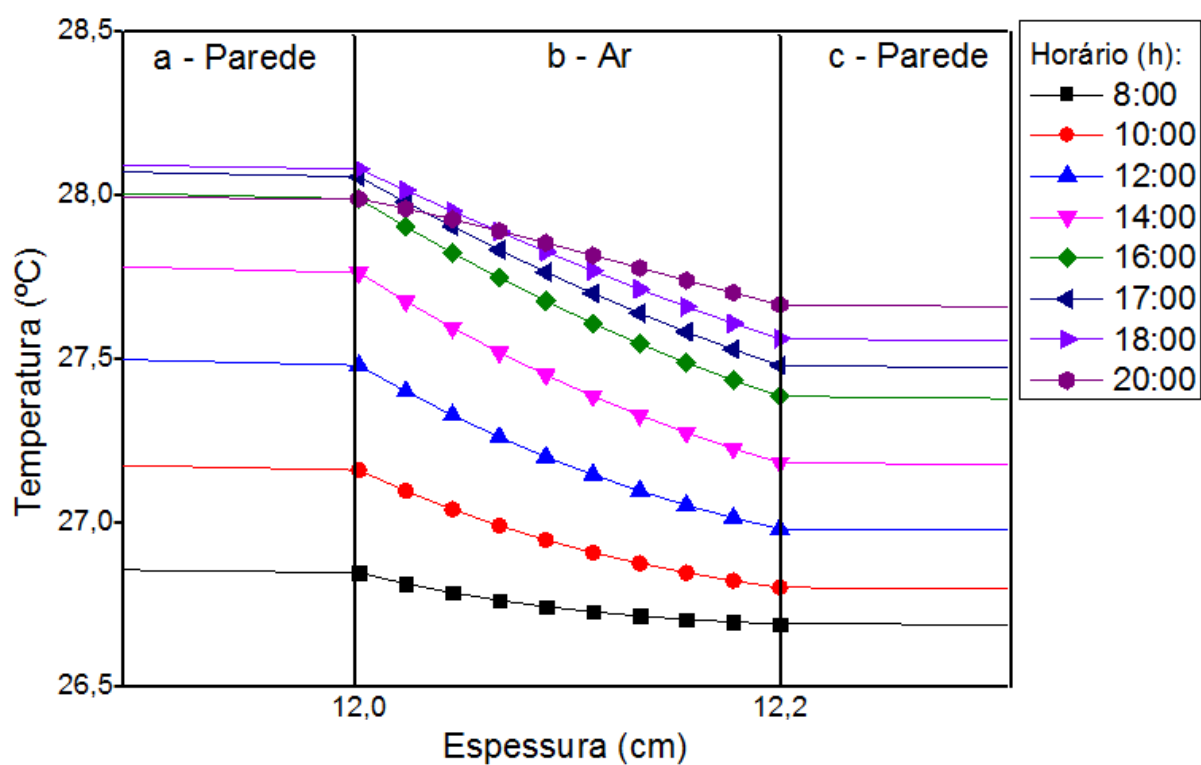


Figura 7. 25 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 0,2 cm para paredes com revestimento externo de cor branca.

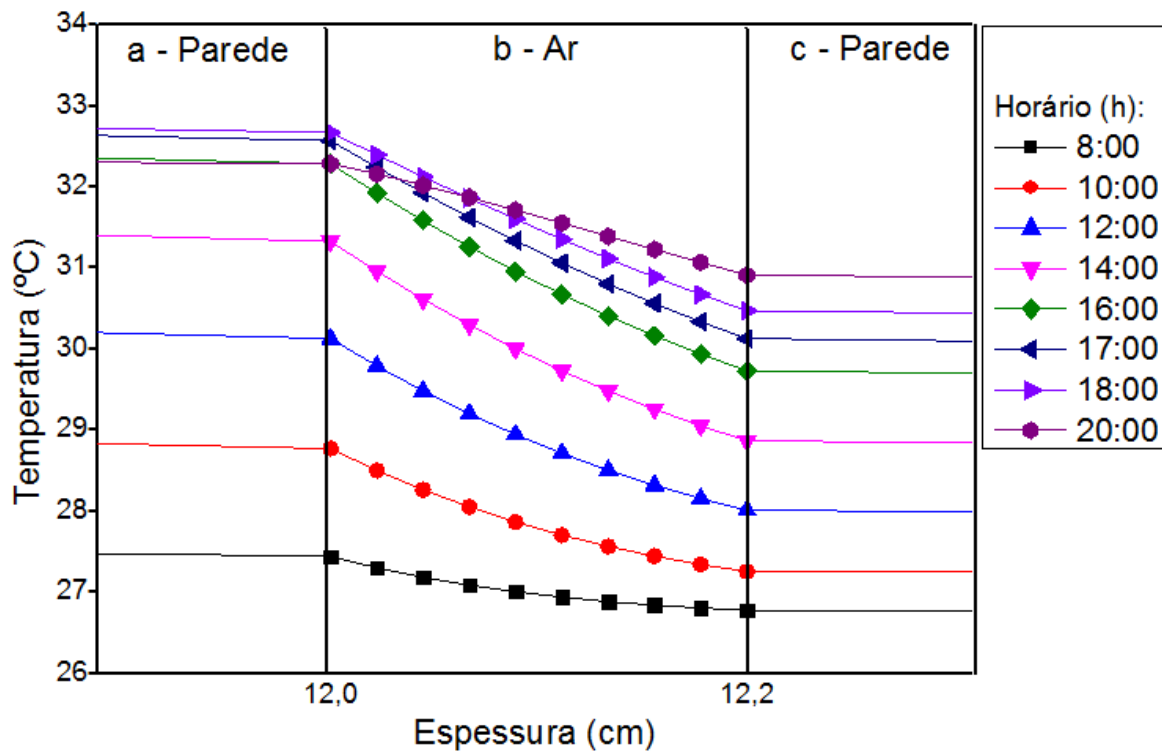


Figura 7. 26 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 0,2 cm para paredes com revestimento de vegetação.

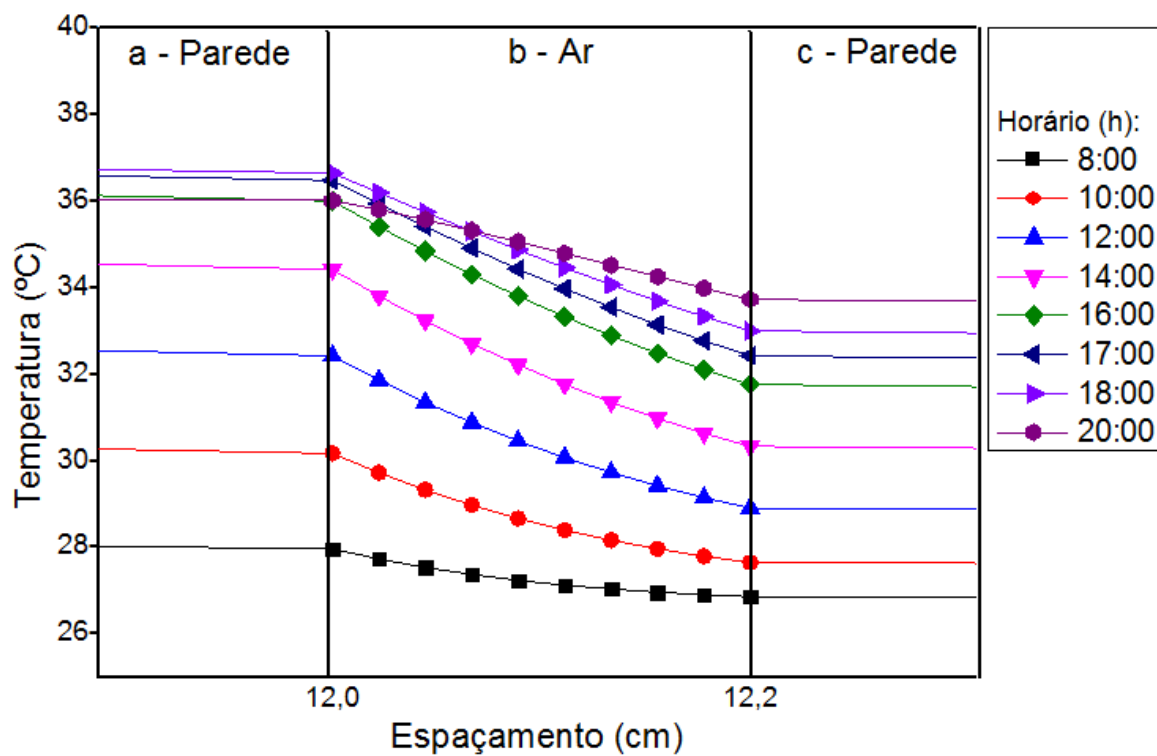


Figura 7. 27 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 0,2 cm para paredes com revestimento externo de cor preta.

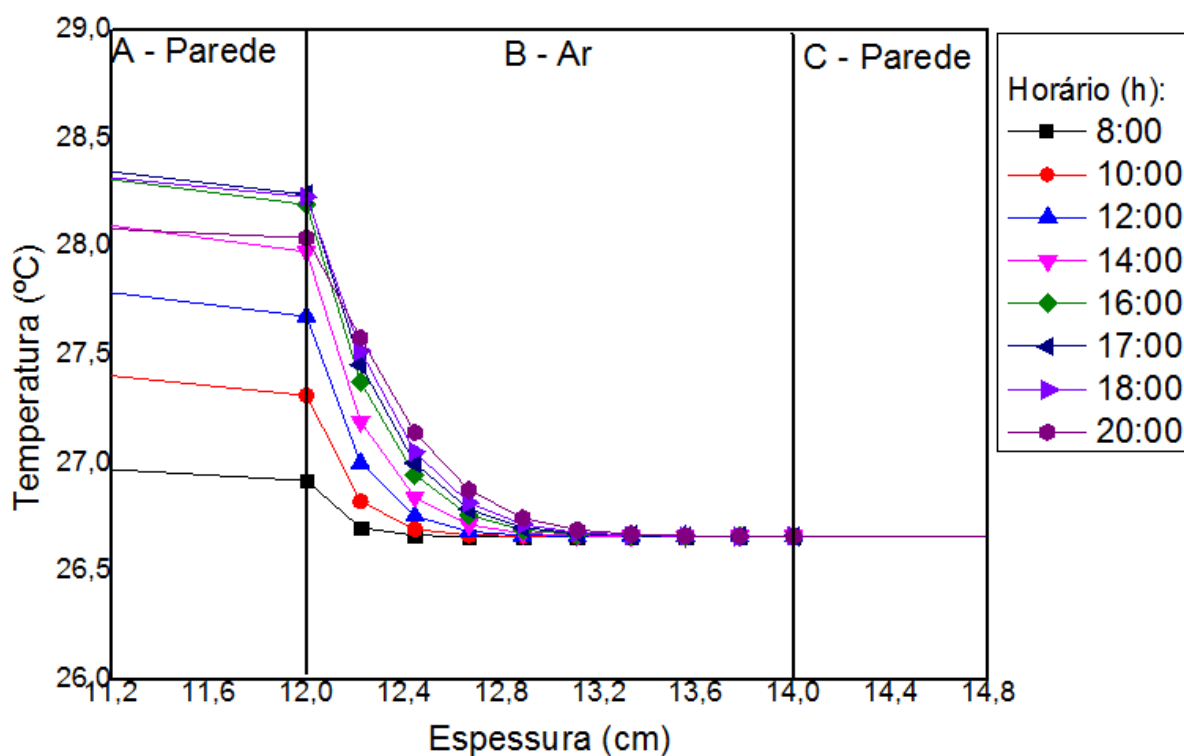


Figura 7. 28 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 2 cm para paredes com revestimento externo de cor branca.

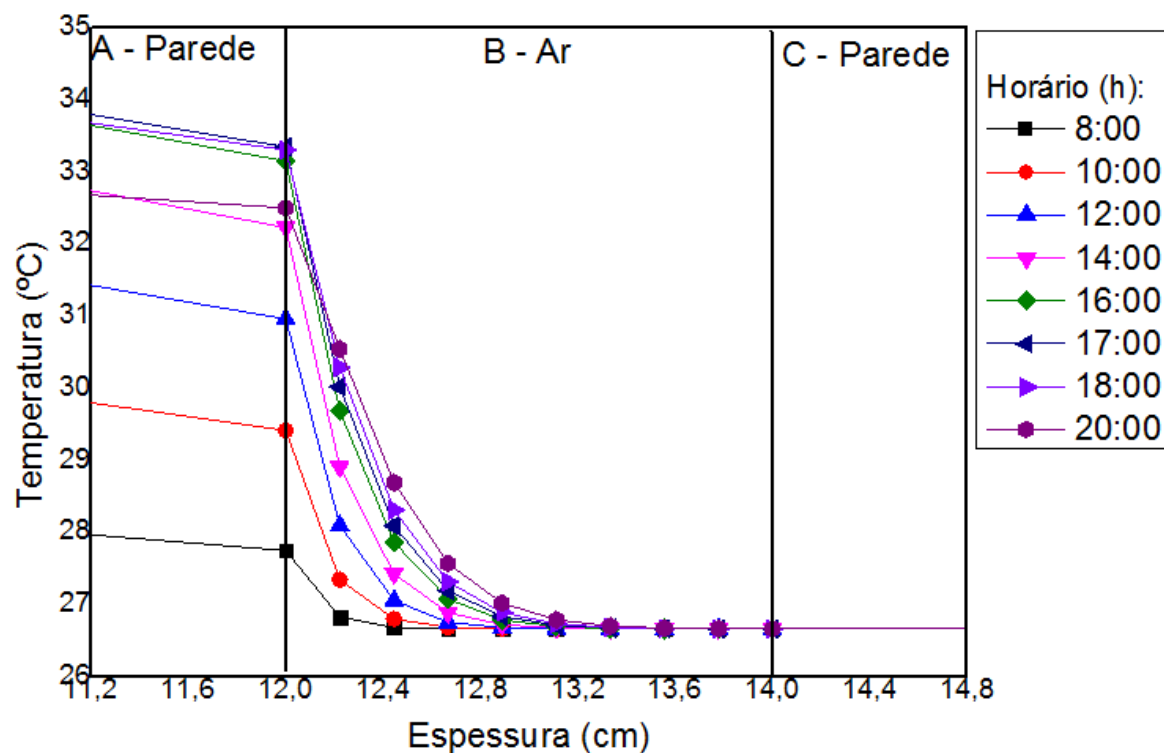


Figura 7. 29 - Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 2 cm para paredes com revestimento externo de vegetação.

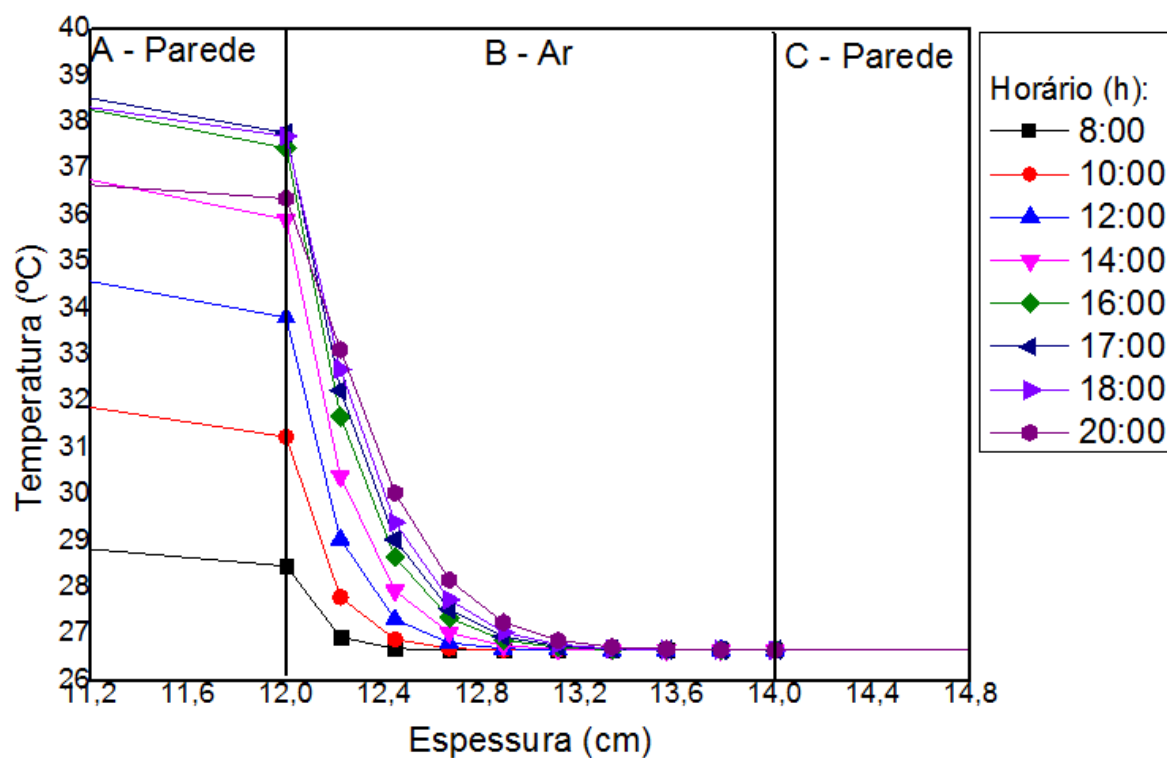


Figura 7. 30- Efeito da variação da temperatura ao longo do espaçamento de 2 cm para paredes com revestimento externo de cor preta

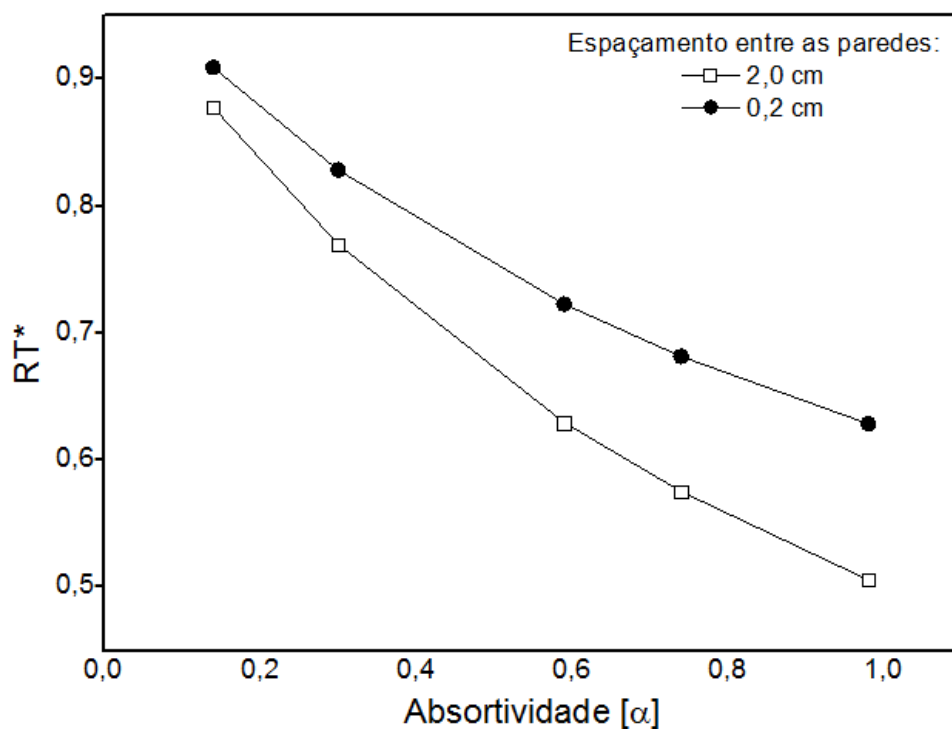


Figura 7. 31- Efeito da variação da absorptividade no Fator de Decremento (RT^*).

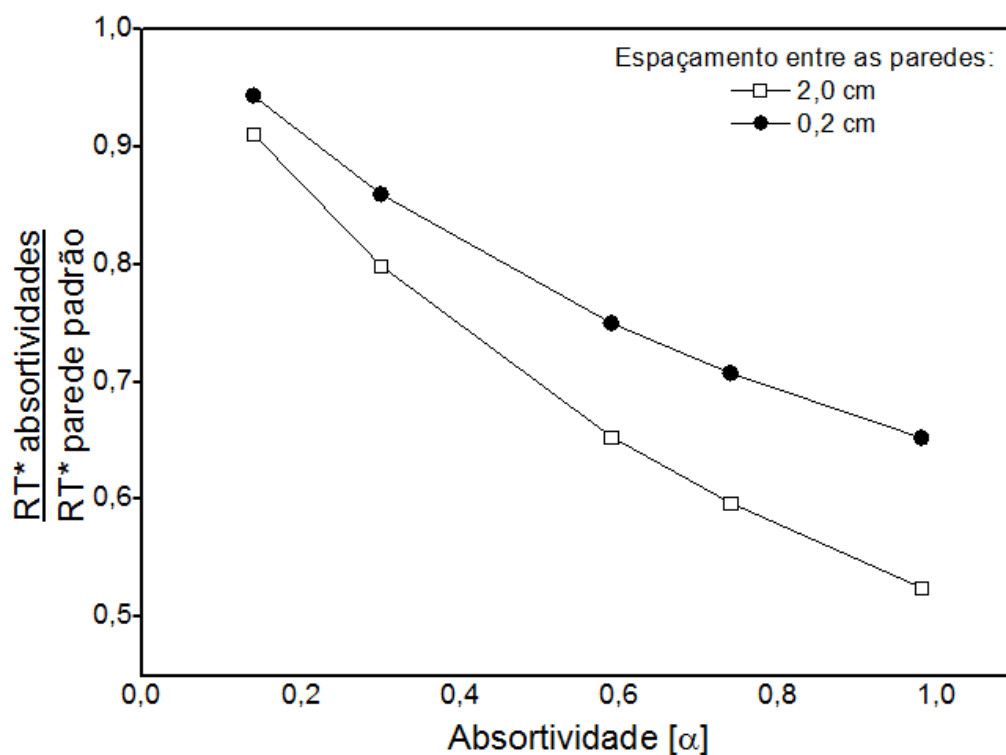


Figura 7. 32 - Efeito da variação da razão do Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) entre a variação da absorptividade térmica da parede e uma parede padrão .

7.2.3 Análise dos efeitos do preenchimento de água entre as paredes

Os resultados dos efeitos do preenchimento de água entre paredes compostas com altura de 2,8 m e espaçadas com 2 cm são representados para paredes com propriedades térmica, conforme apresentado no item 7.1.1, e propriedades térmicas da água saturada no estado líquido à 25 °C conforme Tabela 7. 4, variando a espessuras das paredes de 3 à 12 cm:

Tabela 7. 4 - Propriedades térmica da água

Viscosidade cinemática [m ² /s]	Número de Prandtl	Coefficiente de expansão volumétrica [1/k líquido]	Condutividade Térmica [W/m.°C]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg · k]
2,3855x10-7	6,14	0,247x10-3	0,607	997,0	4180

A Figura 7. 33 apresenta o resultado da variação da temperatura no espaçamento “b” entre as paredes, onde é possível notar que quanto menor a espessura da parede externa (região “a”), maior é o calor absorvido pela água e transferido para a parede interna (região “c”). O aumento da espessura da parede aumenta a resistência térmica da parede, reduz o calor transferido através da parede e consequentemente o calor absorvido pela água é menor.

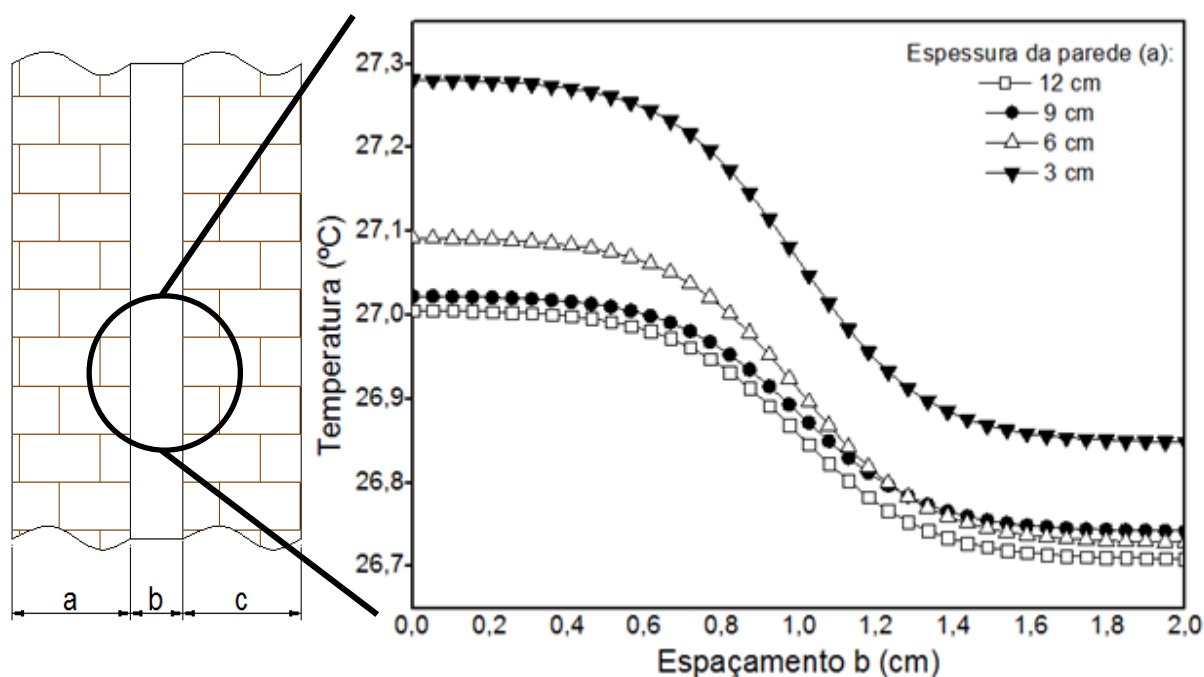


Figura 7. 33 – Perfil de temperatura para o espaçamento “b” de paredes de diferentes espessuras.

A Figura 7. 34 apresenta o resultado do fator de decremento (interface entre as regiões a e b) para a temperatura externa máxima (interface entre as regiões b e c) referente ao

espaçamento entre as paredes (região b). Onde é possível analisar que a água entre as paredes promove uma grande resistência térmica ao fluxo de calor proveniente da parede externa.

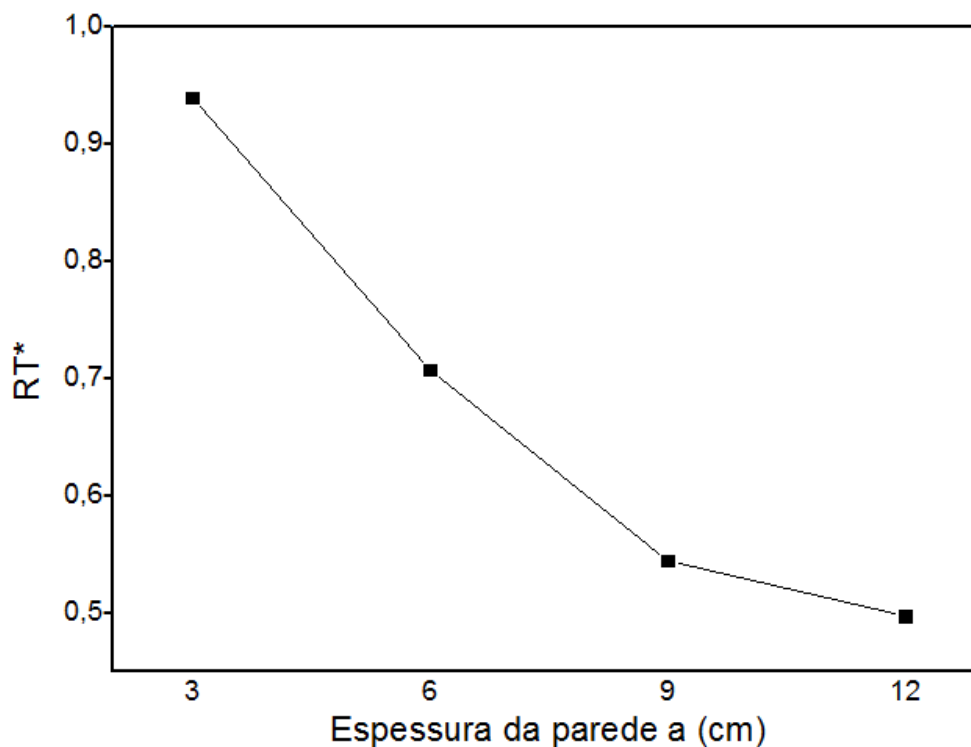


Figura 7. 34 - Fator de Decremento (RT^*) na região “b” referente ao espaçamento entre paredes de diferentes espessuras.

Com o objetivo de realizar o aproveitamento da energia térmica armazenada na água, foi calculada a Taxa horária de ganho de calor e o calor total ganho pela água durante o período de um dia, conforme mostrado na Figura 7. 35, onde foi analisada a variação da espessura das paredes e mantido o espaçamento entre elas de 2 cm.

Conforme é possível verificar, quanto menor a espessura da parede externa (região “a”), maior é o calor absorvido pela água.

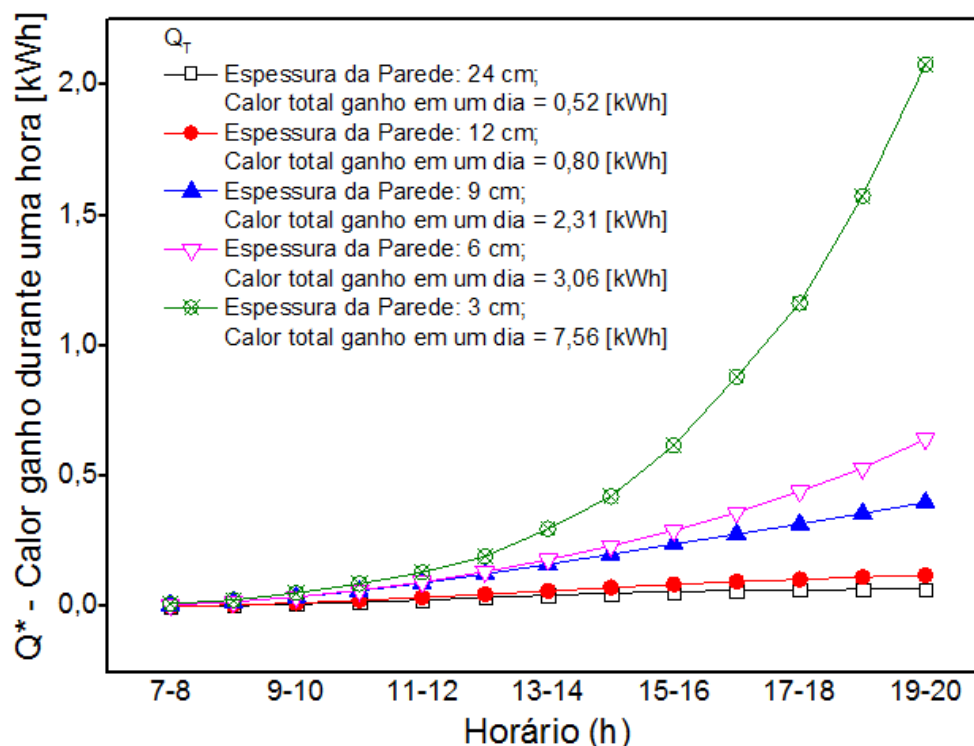


Figura 7. 35 – Taxa horária de energia de calor durante uma hora para varias espessuras de parede.

Além de promover um conforto térmico passivo para a construção, a utilização de água entre as paredes é um excelente meio para armazenar energia térmica, sendo que a água pode ser incorporada na construção através de serpentinas, bolsões ou tubulações.

7.3 Comparação entre as paredes

Os resultados da análise das diferentes modelagens de paredes térmicas são apresentados nas Figuras 7.36 a 7.38, para paredes simples, parede dupla em contato e parede espaçada por 2 cm de ar confinado, onde todas as paredes possuem 12 cm de espessura e propriedades térmicas, conforme apresentado no item 7.1.1.

É possível notar que paredes simples possuem pouca resistência térmica à transferência de calor proveniente da insolação, já na parede dupla a resistência térmica aumenta, porém não o suficiente para impedir o fluxo de calor para a parede interna. Na parede dupla espaçada o ar confinado ou a água confinada se torna um bom isolante térmico impedindo a transferência de calor para a parede interna.

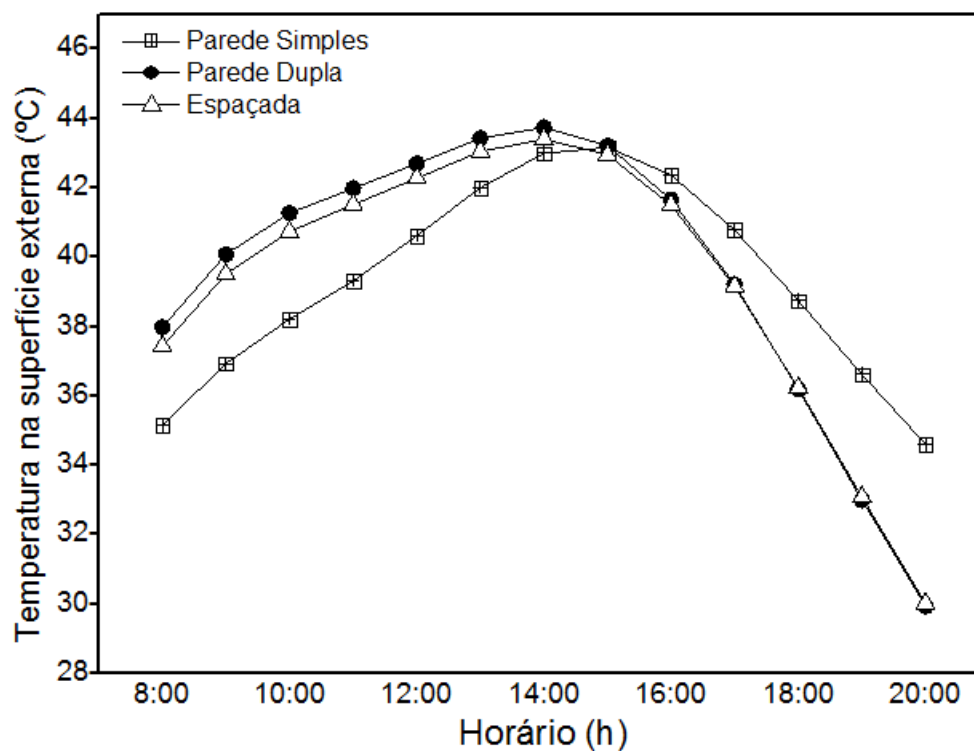


Figura 7. 36 – Temperatura da superfície externa para varias as modelagens de paredes.

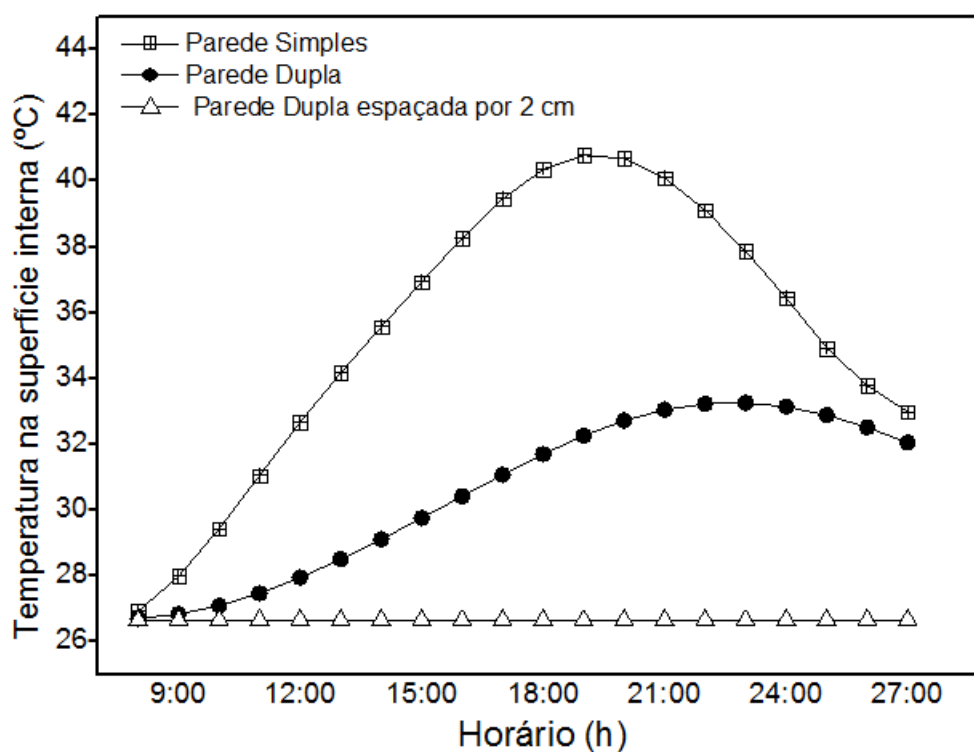


Figura 7. 37 - Temperatura da superfície interna para varias as modelagens de paredes.

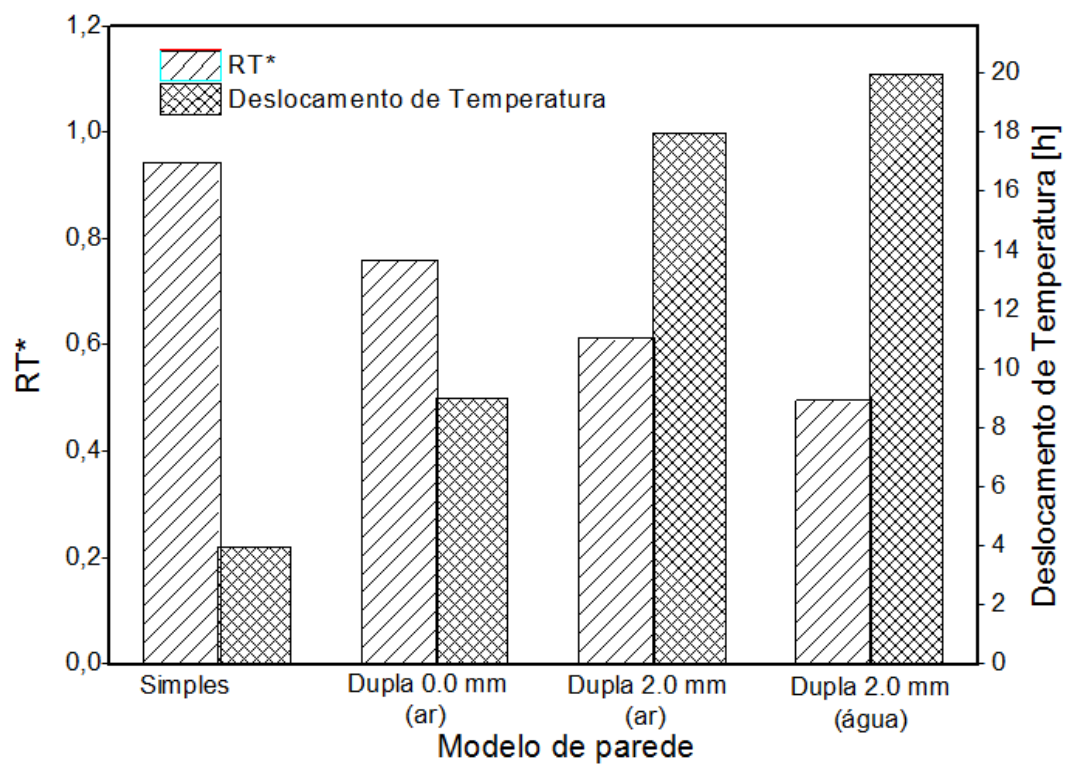


Figura 7. 38 - Fator de Decremento (RT^*) e Retardamento do Pico de Temperatura (Ret) para as modelagens de parede.

8 CONCLUSÃO

O aumento da espessura das paredes, a correta modelagem de paredes térmicas, assim como a utilização de materiais com características isolantes de baixa condutividade térmica e baixa absorvidade solar, retardam o fluxo de calor para o interior do ambiente, reduzindo ou eliminando o uso de aparelhos de ar condicionado.

Aumentando a espessura da parede, aumenta-se a resistência térmica da parede, reduz o calor transferido através da parede, a taxa de transferência de calor, a proporção da temperatura interna máxima para a temperatura externa máxima (RT^*) e aumenta o tempo em que a temperatura máxima atinge a superfície interna.

Material com alta condutividade térmica eleva o fluxo de calor para a superfície interna da parede, diminuindo o retardamento do pico de temperatura e aumentando o fator de decremento. Diminuindo a condutividade térmica do material de construção há um aumento da resistência térmica do material e do retardamento do pico de temperatura.

Como elemento de fachada, a vegetação e pintura podem minimizar o ganho de calor, proporcionando uma melhor condição no conforto térmico das edificações. As superfícies com pintura preta são destinadas para paredes onde há a necessidade de coletar energia solar, pois apresentam alta absorvidade solar, mas valores baixos de emissividade. Já as superfícies com pintura branca apresentam propriedades opostas e são destinadas para paredes, onde há a necessidade de se manter fria e se torna útil para manter o conforto térmico. As superfícies revestidas com plantas absorvem e emitem de forma moderada se comparado com a pintura preta e branco.

Para paredes duplas com espaçamento entre elas, o ar confinado entre as paredes promove uma grande resistência térmica ao fluxo de calor proveniente do revestimento na parede externa, fazendo com que a influência do revestimento se dê apenas na primeira parede. O acabamento externo das superfícies para este caso será determinado pela finalidade da parede externa: coletar energia solar utilizando pintura preta ou manter a parede fria utilizando pintura branca, já que a escolha não influenciará na temperatura interna.

Argamassa utilizando fibra vegetal ou outros recursos naturais representam alternativas de matérias primas que podem ser utilizadas na construção civil como placas isolantes térmicas, e serem aplicadas como entremeios de paredes e pisos, forros e revestimentos e propiciar à edificação condicionamento ambiental desejável.

O ar confinado entre as paredes duplas reduz o coeficiente de transferência de calor e aumenta significativamente a resistência térmica, se assemelhando a um isolante térmico eficiente e de baixo custo.

A utilização de água entre as paredes duplas promovem conforto térmico passivo para a construção e é um excelente meio para armazenar energia térmica, sendo que a água pode ser incorporada na construção através de serpentinas, bolsões ou tubulações, e pode ser utilizada pelos usuários.

9 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO

Realizar um estudo experimental utilizando e aperfeiçoando as análises abordadas neste trabalho.

Empregar vidro como elemento de fachada na construção, já que estão sendo utilizados largamente nas construções atuais devido ao design moderno, porém não há preocupação com o conforto térmico dos usuários.

Realizar um estudo econômico para verificar a eficiência das modelagens abordadas com o objetivo de reduzir o uso de sistemas de refrigeração ou aquecimento. Utilizar a água como isolante térmico e avaliar possíveis formas de reaproveitamento.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**. Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401**: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.

BERNARD, C.; BODY, Y.; ZANOLI, A. Experimental Comparison of Latent and sensible heat thermal walls. **Solar Energy**, v. 34, p. 475-487, 1985.

ASHRAE **Handbook of Fundamentals**, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001.

ASHRAE **Handbook of Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications**, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2011.

AYC, Tokuc; BASARAN, Tahsin; Aran, YESÜGEY S. Cengiz. An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: The case of a flat roof in Istanbul. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 91–104, 2015.

BARTHOLOMEI, C. L. **Influencia da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. 2003. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BARANDIER, H.; ALMEIDA M. C. T. SOARES DE; MORAES, R. **Planejamento e controle ambiental-urbano e a eficiência energética**. IBAM/DUMA; ELETROBRAS/PROCEL. Rio de Janeiro 2013. 222 p.

BRAUN, J. E.; MITCHELL J. C. Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces. **Solar Energy**, v. 31, p. 439-444, 1983.

CASTRO, J. N. **Peredes Térmicas**. 1991. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Térmica e Fluidos, Campinas, 1991.

CAVALCANTI, FERNANDO A DE M SÁ. **Paredes Trombe no Brasil: Análise do Potencial de utilização para aquecimento e refrigeração**. 2013. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia . Instituto de Arquitetura e Urbanismo da universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012.

CHAICHAN, Miqdam Tariq; ABAAS Khalil Ibrahim. Performance amelioration of a Trombe wall by using Phase Change Material (PCM). **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology**, v. 2, April 2015.

CHOU, Huann-Ming; CHEN, Chang-Ren; NGUYEN, Vu-Lan. A new design of metal-sheet cool roof using PCM. **Energy and Buildings**, v. 57, p. 42–50, 2013.

COOPER, P. The absorption of radiation in solar stills. **Solar Energy**, v. 12, p. 333-346, 1969.

DUFFIE. J. A.; BECKMAN, W. A.. **Solar Energy Thermal processes**. 4. ed. New York, Wiley Interscience, 2013.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. Copenhagen, Danish Technical, 1970.

FREDERIC Kuznik; DAMIEN David; KEVYN Johannes; Jean-Jacques Roux. A review on phase change materials integrated in building walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p. 379–391, 2011.

GIVONI, Baruch. **Man, Climate and Architecture**. 2. ed. London, Applied Science Plubishers, 1976.

GIVONI, Baruch. Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. **Energy and Buildings**, v.17, p. 177-199, 1991.

GUICHARD, Stéphane; MIRANVILLE, Frédéric; BIGOT, Dimitri; BOYER, Harry. A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 71–80, 2014.

HASHEM, J. Alqallaf; ESAM M. Alawadhi. Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. **Energy and Buildings**, v.61, p. 73–80, 2013.

HOES, P.; TRCKA, M.; HENSEN, J.L.M.; BONNEMA, B. Hoekstra. Investigating the potential of a novel low-energy house concept with hybrid adaptable thermal storage. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 2442–2447, 2011.

HOTTEL, H. C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. **Solar Energy**, v.18, p.129-134, 1976.

ISA, Mohd Hafizal Mohd; YOSHINO, Xudong Zhao and Hiroshi. Preliminary Study of Passive Cooling Strategy Using a Combination of PCM and Copper Foam to Increase Thermal Heat Storage in Building Façade. **Sustainability**, v. 2, p. 2365-2381, 2010.

ISMAIL and CASTRO. PCM thermal insulation in buildings. **Journal of Energy Research**, v. 21, p. 1281-1296, 1997.

ISMAIL, K. A. R.. ‘Banco de gelo’ economiza energia ao armazenar frio. Tecnologia desenvolvida por pesquisadores da FEM torna sistema de climatização mais eficiente e racional, **Jornal da Unicamp**, Campinas, p. 8, 5 out. 2003.

LIMA, João Pinto. **Modelagem e Teste de Condutividade Térmica em Placa de Gesso e Fibra Vegetal**, Mauritia vinifera Martius, para uso na Construção Civil. 2005. Trabalho Final de Mestrado Profissional. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LIU, B.Y.H.; JORDAN, R.C. The interrelations and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v.4, n.3, p.1-19, 1960.

MALALASEKERA, W.; VERSTEEG, H.K. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed., Harlow, England: Pearson/Prentice Hall, 2007.

MARQUES, L. L. **Aplicação de conceitos de conforto térmico passivo na construção civil em São Luís**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica Campinas, Campinas, 2007.

MARTÍNEZ, Molina A.; TORT, Ausina I.; CHO, Soolyeon, VIVANCOS, J.Luiz. Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: a review. **Energy Rev.**, v. 61, p. 70–85, 2016.

MORAES, Clélia Mendonça De. **Conforto térmico em salas de aula no Brasil: análise experimental e numérica**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica Campinas, Campinas, 2009.

MORELLI, Denise Damas de Oliveira. **Paredes verdes vegetação como qualidade ambiental no espaço construído**. 2009. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MUSTAPHA, Faraji; MUSTAPHA, E. Alami; MOSTAFA Najam. Thermal Control of Building Using Latent Heat Storage South Wall. **Journal of mathematics and computer science**, v. 10, p. 212-227, 2014.

NA ZHU; ZHENJUN, Ma; WANG, Shengwei Wang. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 3169–3181, 2009.

PASUPATHY A.; ATHANASIOS L.; VELRAJ R.; SEENIRAJ R.V.. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, p. 556–565, 2008.

PATANKAR, Suhas. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Washington, Hemisphere, 1980.

ROSTAMIZADEHA, Mohammad; KHANLARKHANI, Mehrdad; SADRAMELI, S. Mojtaba. Simulation of energy storage system with phase change material (PCM). **Energy and Buildings**, v. 49, p. 419–422, 2012.

SILVA, Tiago; VICENTEA, Romeu; SOARES, Nelson; FERREIRA, Victor. Experimental testing and numerical modeling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 235–245, 2012.

SOARES, N.; COSTA, J.J.; GASPAR, A.R.; SANTOS, P.. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 82–103, 2013.

SRIVASTAVA Alok, A. K. Thermal performance of a south facing wall as solar collector storage system. **Energy Research**, v. 4, p. 309-316, 1980.

TYAGI, Vineet Veer; BUDDHI D.. PCM thermal storage in buildings: A state of art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 1146–1166, 2007.

ZALEWSKI, Laurent; JOULIN, Annabelle; LASSUE, Stephane; ROUSSE, Yvan Dutil, Daniel. Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material. **Solar Energy**, v. 86, p. 208–219, 2012.