



Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Centro Tecnológico (CTC)
Departamento de Arquitetura e Urbanismo (ARQ)
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
(PósARQ)

YURI FRANCIS PIFFER

**TRANSWALLS: modelagem ótica, de transferência de calor e
análise térmica de sistemas vidro-água-vidro.**

Florianópolis
2018

YURI FRANCIS PIFFER

**TRANSWALLS: modelagem ótica, de transferência de calor e
análise térmica de sistemas vidro-água-vidro.**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós Graduação em Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de MESTRE em Arquitetura.

Orientador: Prof. Dr. Martin Ordenes
Mizgier

Coorientador: Prof. Dr. Saulo Güths

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Piffer, Yuri Francis

Transwalls: : modelagem ótica, de transferência de calor e análise térmica de sistemas vidro-água vidro. / Yuri Francis Piffer ; orientador, Martin Ordenes Mizgier, coorientador, Saulo Güths, 2018. 184 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Transferência de calor em aberturas. 3. Espectroseletividade. 4. Desempenho térmico na construção civil. I. Mizgier, Martin Ordenes. II. Güths, Saulo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Yuri Francis Piffer

TRANSWALLS: modelagem ótica, de transferência de calor e análise térmica de sistemas vidro-água-vidro.

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Florianópolis, 02 de Agosto de 2018.

Prof. Michele Fossati, Dr.
Subcoordenadora do PósARQ

Banca Examinadora:

Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr - Orientador – PósARQ-UFSC

Prof. Saulo Güths, Dr - coorientador – PosMec-UFSC

Prof. Roberto Lamberts, PhD – PósARQ/PPGEC-UFSC

Prof. Deivis Marinoski, Dr – PPGEC-UFSC

Prof. Antonio Cesar S. B. da Silva , Dr – PROGRAU-UFpel
VIDEOCONFERÊNCIA

Carol,
Jeann,
Maria e
Rajej

Um mestrado ainda não é o suficiente para
expressar o carinho que tenho por vocês!
Obrigado até aqui ☺

AGRADECIMENTOS

Este trabalho envolve muitas mãos, como as divindades indianas. Ultrapassa fronteiras, sejam elas temporais, institucionais ou de região. Escrevo aqui a parte mais importante de todas as folhas dessa dissertação; os agradecimentos.

Rajej (Lucas Pessoa), das explicações de transferência de calor desenhadas nas areias de Matosinhos em 2013 (parece romantizado, mas é verdade) até as correções de sintaxe do Matlab em 2018 você sempre esteve presente e solícito. A sua amizade é um enorme presente para mim! Aliás, quem diria que a matéria da Marie Harder seria o início de um ciclo de estudos que chega ao mestrado?

É imprescindível, portanto, meu reconhecimento pelo programa Ciência sem Fronteiras, por meio do qual eu tive o primeiro contato com transwalls na Inglaterra. Agradeço a paciência do Dr. Poorang Proozfar com minha teimosia de insistir no assunto de radiação solar, fachadas e energia durante minha bolsa de pesquisa na Universidade de Brighton. Talvez ter me envolvido com o projeto em andamento de Phase Change Materials fosse uma boa - e lógica - ideia naquele momento, mas algo tanto quanto interessante estava por vir. E a Sabrina Andrade Barbosa nunca me deixou duvidar disso. Obrigado, querida!

A pesquisa seguiu em frente durante o TCC no ano de 2015 orientado pelo Dr. Renato Leão Rego. Professor, a tua sensatez em me nortear sob as exigências que o programa de Arquitetura da Universidade Estadual de Maringá impunham sem sufocar o caráter de pesquisa do trabalho me deram espaço para discutir aspectos construtivos e da experiência visual de uma transwall. Professor Aloísio Schmid (UFPR) obrigado pelas assessorias!

Sem a menor sombra de dúvidas, não teríamos aqui este trabalho sem o ombro amigo e solidário da Carolina Lynn Ribeiro, Jeann Alves e Maria Claudia Mukai num período tão difícil após a graduação. Jussara Sobenko Hatum, minha querida professora de matemática e amiga, devo muito a você também. Um trabalho de mestrado certamente não é o bastante para agradecer-los.

João Winiarski, professora Rosely Peralta e Carina, obrigado por todas as explicações e assessorias em Química.

Sorte a minha, eu posso também agradecer ao time de excelência do LabCon e LabEEE da Universidade Federal de Santa Catarina que são diretamente ligados a esta dissertação:

Dr. Martin Mizgier, orientador, eu devo a confiança e também o agradecimento de paciência com minha teimosia no desenvolvimento do trabalho;

Dr. Saulo Güths, coorientador, você foi peça indispensável nesse quebra-cabeça;

Dr. Roberto Lamberts, Fernando Rutkkay Pereira, Deivis Marinowski e Fernando Westphal, não posso contar as inúmeras vezes em que, em termos práticos, vocês também me orientaram.

Turminha do Laboratório (Rupp, Naty, Mônica, Lu, Ana Carolina e mais tanta gente que passou pelo Labcon) – é saudade que fala, né?

À bolsa concedida pela Capes e ao PósARQ-UFSC agradeço o espaço para desenvolver esta pesquisa.

Ao Luiz Filipe Longo pelo programa de temperatura, ao empréstimo de computadores para simulação dos pesquisadores do LabEEE, ao auxílio do Allan Starke na programação do MatLab e, principalmente ao Dr. Jacob Jonsson do Lawrence Berkeley National Laboratory no desenrolar das etapas de ótica eu registro aqui meu reconhecimento pela importância de vocês no decorrer do trabalho.

A todo o apoio e dedicação ao longo dos anos recebido dos familiares – Cristina, Camila e Piffer – e pessoas com quem morei durante esses 6 anos que toleraram as ausências quando a vida acadêmica era inexorável eu dedico o meu carinho.

Um baita de um muito obrigado, pessoal!

RESUMO

Esta pesquisa avalia modelos óticos, de transferência de calor e o desempenho térmico de transwalls – sistemas espaciares transparentes de vidro preenchidos de água – que apresentam a característica espectroseletiva de transmitir luz natural, filtrar calor da radiação solar além de alta capacidade térmica. São analisadas lâminas de água entre 2mm e 10cm e cenários ambientais característicos de regiões de clima quente. A metodologia se divide em três etapas que englobam (I) o ensaio espectrofotométrico e caracterização ótica de transwalls com líquidos transparentes; (II) análise de incerteza de modelos óticos de múltiplas reflexões e (III) análise de sensibilidade de modelos de transferência de calor pelo método transiente de seções finitas, além do desempenho térmico de variadas configurações de transwalls. Os resultados reforçam o desempenho espectroseletivo da água, alta absorção radiante nas primeiras seções do líquido e que transwalls transferem mais luz e menos calor que o vidro duplo. Transwalls com 2mm de água tem transmissão solar de 68.9% com transmissão visível de 87.9%. No caso de 10mm de lâmina de água, a transmissão solar foi de 64.1% e 88% de transmissão visível. Corroborar-se a importância do aumento do número de interreflexões para precisão ótica, a baixa sensibilidade da imprecisão dos valores de refletância “vidro-líquido”, mas alta para “vidro-ar” e, principalmente, a importância da precisão do coeficiente de absorção molar. A alternância entre modelos de transferência de calor impactou na temperatura da água sem interferir no balanço térmico, exceto quando considerado troca radiante entre os vidros ou negligenciado o efeito convectivo da água. Observou-se inexpressivo atraso térmico de transwalls delgadas, mas atenuação térmica considerável. Exceto para a lâmina de água de 2mm, houve constância nos valores de Fator solar equivalente mesmo modificando-se o cenário ambiental e a orientação solar O Fator solar equivalente para 100mm de lâmina de água variou entre 51.68% e 49.04%; entre 55.44% e 52.46% para 50mm; entre 63.11% e 58.22% para 10mm e apresentou demasiada variação para a lâmina de 2mm de água: entre 72.63% e 59.42%. Confirma-se o potencial espectroseletivo das transwalls e a redução não linear da transmissão solar com o aumento da espessura da água. Recomenda-se futuros experimentos em campo para validar os resultados das simulações realizadas.

Palavras-chave: Transwall; Espectroseletividade; Fator Solar; Eficiência térmica.

ABSTRACT

This research evaluates the performance of optical and heat transfer Transwalls models and its resulting thermal performance. Transwalls can be described as a transparent and specular double glazing system filled with water. It features spectral selective behavior by transmitting light, but controlling heat gain besides its high thermal capacity. Water sections from 2mm to 10cm have been tested in different hot climate scenarios. The method has been divided in 3 steps which are (I) spectrophotometric tests for optical description of transparent liquids; (II) optical uncertainty analysis of multiple reflection models and (III) transwall's sensitivity analysis applying Transient Heat Balance Model (THBM) for thermal performance simulation of different transwall's sections. The results have reaffirmed the spectral selective behavior of water with higher solar radiation absorbance in its first millimeters. In comparison with double glazing panels, transwall models deliver more light and transfer less heat than double glazing panels. Transwalls with 2mm water section have 68.9% of solar and 87.9% of visible transmittance. When increasing the water section to 10mm, the values are 64.1% of solar and 88% of visible transmittance. Regarding Transwall's optical precision, it has been noticed the importance of increasing the number of multiple reflections; the low sensitivity of "glass-liquid" reflectance values uncertainty, but high for "glass-air" and, especially, the importance of adopting precise absorption coefficient values. No big difference has been observed in heat balance results from thermal models even though temperatures in the sections were significantly different from one model to another. There are only two exception: models considering radiation exchange between the glazings and when disregarding water convective behavior. Thermal performance results highlighted the importance of irradiation angle variation dependency when modeling optical absorption. It highlights also a considerable thermal attenuation behavior of transwalls, but no expressive thermal lag. Except for 2mm water sections, the equivalent solar heat gain coefficient (F_{solar}) used in this research has achieve similar values for the same water thickness regardless of climate and solar orientation conditions. The F_{solar} for a 100mm water width transwall varied from 51.68% to 49.04%; between 55.44% and 52.46% for 50mm; from 63.11% to 58.22% for 10mm and a high variation for 2mm water transwalls: from 72.63% to 59.42%. It has been confirmed the spectral selective behavior of transwalls and the non-linear reduction of solar transmittance when increasing water thickness. Further studies should carry in situ experiments to validate the simulations ran in this dissertation.

Keywords: Transwall; Spectral Selective; Solar Heat Gain Coefficient; Thermal efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Total diário de irradiação no plano inclinado na latitude, média anual.	26
Figura 2: Poder emissivo de corpos negros pela temperatura superficial (K).....	34
Figura 3: Espectro da radiação eletromagnética	35
Figura 4: Distribuição espectral da radiação solar	35
Figura 5: Comportamento da radiação ao incidir sobre superfícies transparentes.	37
Figura 6: Múltiplas interreflexões em sistemas transparentes.	38
Figura 7: Exemplos de transwall e water wall já comercializados no passado.	40
Figura 8: Modelo em escala real de transwall e waterwall de concreto.....	50
Figura 9: Fluxograma da execução da pesquisa.	55
Figura 10: Esquema do módulo de medição com esfera integradora do Lambda 1050.	59
Figura 11: Espectrofotômetro modelo Lambda 1050.	59
Figura 12: Amostra posicionada dentro do espectrofotômetro.	59
Figura 13: Imagem dos cinco protótipos construídos.	60
Figura 14: Protótipo de 10 mm cheio de água.	61
Figura 15: Processo de cálculo de absorção das seções de transwall.....	64
Figura 16: Método 1 de absorção de radiação.	64
Figura 17: Método 2 de absorção de radiação.	65
Figura 18: Método 3 de absorção de radiação.	66
Figura 19: Método 4 de absorção de radiação.	67
Figura 20: Centrossimetria de fluidos em câmara verticais.....	74
Figura 21: Modelos de convecção.	75
Figura 22: Seções do Método Transiente de Seções Finitas.	78
Figura 23: Ganho de temperatura por fluxo unidirecional no ponto nodal.	177
Figura 24: Perda de temperatura por fluxo bidirecional no ponto nodal.	178
Figura 25: Método Explícito.	179
Figura 26: Método Implícito.	180
Figura 27: Formulação das seções finitas ao longo do tempo	181
Figura 28: Pontos nodais e o cálculo pelo MTSF.....	182

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: comparação do coeficiente de absorção molar (α) por comprimento de onda do vidro simples (escala logarítmica).....	70
Gráfico 2: comparação do coeficiente de absorção molar (α) por comprimento de onda da água (escala logarítmica).....	70
Gráfico 3: Modelos de temperatura externa e temperatura de céu.....	81
Gráfico 4: Modelos de ângulo solar.....	83
Gráfico 5: Transmissão solar (a) e potência de radiação solar transmitida (b) de amostras de vidro e água.....	92
Gráfico 6: Transmissão solar das amostras de álcoois e ácido acético.....	93
Gráfico 7: Transmissão solar de soluções aquosas.....	93
Gráfico 8: Potência de radiação solar transmitida de compostos analisados.....	93
Gráfico 9: Transmissão solar dos vidros comparativos.....	94
Gráfico 10: Absorção solar por seção (2mm água) – Métodos 1, 2, 3 e 4 vs. Bases de dados A, B, C, D e E.....	96
Gráfico 11: Absorção solar por seção (10mm água) – Métodos 1, 2, 3 e 4 vs. Bases de dados A, B, C, D e E.....	97
Gráfico 12: Absorção solar por seção (50mm água) – Métodos 1, 2, 3 e 4 vs. Bases de dados A, B, C, D e E.....	98
Gráfico 13: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 2mm de água.....	102
Gráfico 14: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 10mm de água.....	103
Gráfico 15: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 50mm de água.....	104
Gráfico 16: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 100mm de água.....	105
Gráfico 17: Refletância para a variação do índice de refração entre 1.233 e 1.433.....	107
Gráfico 18: Refletância para a variação do índice do refração entre 1.637 e 1.857.....	107
Gráfico 19: Refletância para a variação do índice de refração entre 1 e 1.2.....	108
Gráfico 20: Absorção total do protótipo com amostra em que n varia de 1.233 a 1.433.....	109
Gráfico 21: Transmissão total do protótipo com amostra em que n varia de 1.232 a 1.432.....	109
Gráfico 22: Absorção total do protótipo com amostra em que n varia de 1.637 a 1.837.....	110
Gráfico 23: Transmissão total do protótipo com amostra em que n varia de 1.637 a 1.837.....	110
Gráfico 24: Absorção total do protótipo com amostra em que n varia de 1 a 1.2.....	111
Gráfico 25: Transmissão total do protótipo com amostra em que n varia de 1 a 1.2.....	111
Gráfico 26: Temperaturas por seção ao longo do dia (1A, 2mm).....	116
Gráfico 27: Temperaturas por seção ao longo do dia (1A – frio até 6A, 2mm).....	117
Gráfico 28: Temperaturas por seção ao longo do dia (7A – 12A, 2mm).....	118
Gráfico 29: Temperaturas por seção ao longo do dia (1B – 6B, 2mm).....	119

Gráfico 30: Temperaturas por seção ao longo do dia (7B – 12B, 2mm).....	120
Gráfico 31: Temperaturas por seção ao longo do dia (1C – 3C, 100mm).....	121
Gráfico 32: Temperaturas por seção ao longo do dia (4C – 6C, 100mm).....	122
Gráfico 33: Temperaturas por seção ao longo do dia (7C – 9C, 100mm).....	123
Gráfico 34: Temperaturas por seção ao longo do dia (10C – 12C, 100mm).	124
Gráfico 35: Temperaturas por seção ao longo do dia (1D – 3D, 100mm).	125
Gráfico 36: Temperaturas por seção ao longo do dia (4D – 6D, 100mm).	126
Gráfico 37: Temperaturas por seção ao longo do dia (7D – 9D, 100mm).	127
Gráfico 38: Temperaturas por seção ao longo do dia (10D – 12D, 100mm).	128
Gráfico 39: Carga térmica por caso simulado (Grupos A, B, C e D).	134
Gráfico 40: Fluxo de calor por fonte (Caso 1A: “2mm, ‘Verão’”).	137
Gráfico 41: Fluxo de calor por fonte (Caso 1B: “2mm, ‘Inverno ameno’”).	138
Gráfico 42: Fluxo de calor por fonte (Caso 1C: “100mm, ‘Verão’”)......	139
Gráfico 43: Fluxo de calor por fonte (Caso 1D: “100mm, ‘Inverno ameno’”).	140
Gráfico 44: Comparação entre o fluxo de calor total com e sem variação angular (“Fachada Norte com sol a pino”).....	143
Gráfico 45: Comparação entre o fluxo de calor total com e sem variação angular (“Fachada Norte com sol inclinado”).....	144
Gráfico 46: Fator solar equivalente ao longo do dia: análise da sensibilidade da variação angular para 2, 10, 50 e 100mm para fachadas “Norte com sol a pino” (ang. Solar 1) e “Norte com sol inclinado (ang. Solar 2).	145
Gráfico 47: Fluxo total, Cenário 1:	147
Gráfico 48: Fluxo total, Cenário 1	148
Gráfico 49: Fluxo total, Cenário 2	149
Gráfico 50: Fluxo total, Cenário 2	150
Gráfico 51: Fluxo total, Cenário 3	151
Gráfico 52: Fluxo total, Cenário 3	152
Gráfico 53: Atraso térmico e atenuação térmica.	172
Gráfico 54: Camada limite e a velocidade dos fluidos.....	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condição desejável de irradiação em aberturas.	29
Tabela 2: Estado da arte das transwalls: descrição dos estudos.	43
Tabela 3: Estado da arte das transwalls: métodos e parâmetros.	44
Tabela 4: Estado da arte das transwalls: propriedades óticas.	45
Tabela 5: Estado da arte das transwalls: comparação dos resultados.	46
Tabela 6: Absorção das amostras com corante de Wu e Lei (2016c)	52
Tabela 7: Método 1: Sem reflexão.	64
Tabela 8: Método 2: Sem reflexão.	65
Tabela 9: Método 3: Reflexões de 1ª ordem.	66
Tabela 10: Método 4: Reflexões de 2ª ordem.	67
Tabela 11: Métodos de cálculo da absorção de radiação e trabalhos relacionados.	69
Tabela 12: Tabela de apresentação da base de dados óticos.	71
Tabela 13: Índice de refração dos materiais analisados e suas variações.	73
Tabela 14: Propriedades termofísicas do vidro.	77
Tabela 15: Propriedades termofísicas da água.	77
Tabela 16: Equações do MTSF.	79
Tabela 17: Tabela de ângulos solares.	82
Tabela 18: Lista de casos simuladas.	85
Tabela 19: Número de simulações ou ensaios por etapa.	89
Tabela 20: Amostras ensaiadas.	91
Tabela 21: Absorção e Transmissão solar (2mm) – Métodos vs. Base de dados.	99
Tabela 22: Absorção e Transmissão solar (10mm) – Métodos vs. Base de dados.	99
Tabela 23: Absorção e Transmissão solar (50mm) – Métodos vs. Base de dados.	100
Tabela 24: Absorção solar (vidro duplo 3mm) – (Rubin,1985).	100
Tabela 25: Absorção e Transmissão total a 0° de incidência solar (%).	106
Tabela 26: (A) simulações com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,5s.	113
Tabela 27: (B) simulações com o modelo de absorção da radiação solar por MÉDIA, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,5s.	113
Tabela 28: (C) Simulação com temperatura inicial das seções próximas à 7°C, modelo de absorção da radiação por SEÇÃO e Δt de 0,5s e (D) Simulação com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,2.	113
Tabela 29: Casos da Análise de Sensibilidade da subetapa III.2.	114
Tabela 30: Valores do balanço térmico e Fator Solar equivalente (Grupos A, B, C e D).	135
Tabela 31: Balanço de energia (dependência da variação angular).	146
Tabela 32: Balanço térmico (Cenários 1, 2 e 3 para 2, 10, 50 e 100mm de água).	153
Tabela 33: Fator solar equivalente (Cenários 1, 2 e 3 para 2, 10, 50 e 100mm de água).	153
Tabela 34: Redução do Fator Solar equivalente com o aumento da espessura da água (Cenários 1, 2 e 3).	155
Tabela 35: Participação por tipo de fonte de calor no balanço energético.	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – International Standards and Testing Organization (antigamente American Society for Testing and Materials)

CFD – Computational Fluid Dynamics

LBL – Lawrence Berkeley National Laboratory

MTSF – Método Transiente de Seções Finitas

NFRC – National Fenestration Rating Council

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

α	(óptica) Coeficiente de absorção molar
α	(térmica) Difusividade térmica (m^2/s)
A	(óptica) Absorção de radiação
A	(térmica) Área de superfície (m^2)
β	Coeficiente de expansão volumétrica (K^{-1})
Bi	Número de Biot
c	Calor específico ($J/Kg.K$)
$^{\circ}C$	Temperatura em graus Célsius
d	Distância percorrida por um raio em um material com espessura l (m)
ΔT	Diferença de temperatura (K)
Δt	Intervalo de tempo (seg)
Δx	Intervalo de espaço (m)
ϵ	Emissividade
F _{solar}	Fator Solar equivalente
F _o	Número de Fourier
g	Aceleração gravitacional
Gr	Número adimensional de Grashof
H	Altura da câmara de água (m)
h	Coeficiente de transferência térmica por convecção (W/m^2K)
H _{ORIR}	Intensidade de radiação infravermelha horizontal (W/m^2K^4)
θ	Medida de ângulo em graus
I.V.	Radiação infravermelha
λ	(óptica) Comprimento de onda (nm)
L	Largura da câmara de água (m)
l	(óptica) Espessura de um material (m)
k	(óptica) Coeficiente de extinção molar
k	(térmica) Condutividade térmica (W/mK)
k _{eq}	Condutividade térmica equivalente (W/mK)
K	Temperatura em Kelvin
N	Nebulosidade de céu
n	Índice de refração
Nu	Número adimensional de Nusselt

Pr	Número adimensional de Prandtl
σ	Constante de Boltzmann (W/m^2K^4)
R	Reflexão de radiação
ρ	(óptica) Refletância
ρ	(térmica) Densidade do material (Kg/m^3)
T ou τ	(óptica) Transmissão de radiação
T _{vis}	(óptica) Transmissão no espectro visível
T _t	(óptica) Transmissão total de radiação
T _{céu}	Temperatura superficial do céu (K)
T _()	(térmica) Temperatura do nó em Kelvin
T(núm.)	(térmica) Posição do nó
T _{vis}	(óptica) Transmissão no espectro visível
ν	Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)
μ	Viscosidade dinâmica (Kg/ms)

**Os símbolos utilizados para descrever o cálculo do método de transferência de radiação em transwalls (Método 1, 2, 3 e 4 entre as páginas 64 e 67) não serão listados aqui e aplicam-se especificamente àqueles cálculos.*

GLOSSÁRIO

(Base de dados) **A, B, C D e E** (modelagem ótica): Cinco base de dados de coeficiente de absorção molar e índice de refração para vidro e água de diferentes autores que foram nomeadas em A, B, C, D e E como forma de distingui-las.

(Grupo de casos) **A, B, C e D** (modelagem térmica): Quatro grupos de casos com modelagens diferentes de transferência de calor, cada qual com a espessura da lâmina de água e condições climáticas em comum.

Amostra: descrição do líquido (ex: água, soluções ou álcool).

Caso: simulação a partir de modelos e cenários.

Cenário: Condições ambientais externas (temperaturas e irradiância).

Configuração (de transwall): especificação das partes e espessuras de uma transwall (p.ex. 3mm de vidro – 10mm de água e 3mm de vidro).

Fator solar equivalente ou Fator solar (Fsolar): relação entre a integral do ganho direto e indireto de energia para o ambiente interno pela integral da irradiância na face externa da abertura ao longo do dia (24h).

Fator solar horário: Fator solar equivalente no intervalo de tempo de 1h.

Fator solar tabelado: Fator solar calculado conforme padronização internacional (diferente do F_{solar} deste trabalho).

Método de absorção de radiação/Método ótico: forma de modelagem matemática para o cálculo de absorção de radiação no líquido (p.ex. com reflexão de 1ª ordem, reflexão de 2ª ordem ou infinitas reflexões).

Modelo de absorção de radiação/Modelo ótico: configurações de um dado método de absorção por radiação (p.ex.: modelo com ou sem dependência angular e com absorção de radiação por seção ou absorção média).

Método de transferência de calor: refere-se ao Método Transiente de Seções Finitas de uma dimensão e com cálculo explícito.

Modelo de transferência de calor: configuração das condições de trocas de calor (radiação, condução, convecção e absorção de irradiação) de uma seção específica de um nó do Método Transiente de Seções Finitas - MTSF.

Modelo de convecção: refere-se à equação de Nusselt escolhida.

Protótipo: modelo físico “vidro-líquido-vidro” ensaiado no espectrofotômetro.

Refletância: proporção entre a radiação refletida pela incidente sobre uma superfície.

Reflexões múltiplas de primeira ordem: modelo de cálculo das interreflexões de um raio em um sistema de n materiais onde um raio muda seu sentido de propagação uma única vez ao se deparar com a troca de índice de refração entre materiais (superfícies) e as outras interações com superfícies são ignoradas.

Reflexões múltiplas de segunda ordem: modelo similar ao de múltiplas reflexões de primeira ordem, mas o mesmo raio agora muda seu sentido de propagação duas vezes.

Setagem: junção das configurações necessárias para uma simulação de MTSF.

Trap Material: Chapa transparente de material com capacidade de absorção da radiação solar e que também serve para conter o processo convectivo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	PROBLEMATICA E JUSTIFICATIVA	25
1.2	OBJETIVO	33
1.2.1	Objetivo geral	33
1.2.2	Objetivos específicos	33
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	34
2.1	MATERIAIS TRANSPARENTES E IRRADIAÇÃO SOLAR	34
2.2	TROCAS DE CALOR EM TRANSWALLS.....	38
2.3	TRANSWALL: ESTADO DA ARTE.....	39
2.3.1	Waterwall.....	39
2.3.2	Transwall	41
2.4	CONCLUSÕES DO REFERENCIAL TEÓRICO	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1	ETAPA I: DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS ...	58
3.1.1	Espectrofotômetro: equipamento, funcionamento e protocolo de uso	58
3.2	ETAPA I: DESENHO DOS EXPERIMENTOS	60
3.2.1	(Subetapa I.1) Seleção de líquidos possivelmente espectroseletivos	60
3.2.2	(Subetapa I.2) Testes no espectrofotômetro.....	60
3.3	ETAPA II: DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS...	61
3.3.1	Cálculo das interreflexões em sistemas transparentes de múltiplas faces.....	61
3.4	ETAPA II: DESENHO DOS EXPERIMENTOS	68
3.4.1	(Subetapa II.1) Comparação dos métodos de absorção solar e precisão dos dados de entrada	68
3.4.2	(Subetapa II.2) Comportamento de transmissão solar com variação angular.....	72
3.4.3	(Subetapa II.3) Incerteza do índice de refração (n) no método de absorção	72

3.5	ETAPA III: DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS .	74
3.5.1	Transferência de calor em transwalls	74
3.6	ETAPA III: DESENHO DOS EXPERIMENTOS	84
3.6.1	(Subetapa III.1) Calibração e convergência do MTSF.....	84
3.6.2	(Subetapa III.2) Análise de sensibilidade: grupos A, B, C, D	85
3.6.3	(Subetapa III.3) Dependência da variação angular	87
3.6.4	(Subetapa III.4) Análise de desempenho por orientação solar: cenários 1,2 e 3.....	88
4	RESULTADOS.....	89
4.1	(Subetapa I.1) Seleção de líquidos possivelmente espectroselectivos	90
4.2	(Subetapa I.2) Testes no espectrofotômetro	90
4.3	(Subetapa II.1) Comparação dos métodos de absorção solar e precisão dos dados de entrada.....	94
4.4	(Subetapa II.2) Comportamento de transmissão solar com variação angular	101
4.5	(Subetapa II.3) Incerteza do índice de refração (n) no método de absorção	106
4.6	(Subetapa III.1) Calibração e convergência do MTSF	112
4.7	(Subetapa III.2) Análise de sensibilidade: grupos A, B, C, D e variações	114
4.8	(Subetapa III.3) Dependência da variação angular	142
4.9	(Subetapa III.4) Análise de desempenho por orientação solar: cenários 1, 2 e 3.....	146
5	CONCLUSÕES	157
	REFERÊNCIAS	163
	APÊNDICE A – Balanço térmico	170
	APÊNDICE B – Processos convectivos naturais.....	173
	APÊNDICE C – Método Transiente de Seções Finitas (MTSF)	176

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMATICA E JUSTIFICATIVA

A preocupação com a eficiência energética é um tema concernente à construção civil a qual é responsável por expressiva parte da demanda elétrica nacional. A representatividade de edifícios na demanda elétrica somado ao aumento da demanda energética brasileira ao longo dos últimos anos mantém em voga o tema do uso adequado e eficiente de energia no ambiente construído.

São fatores do aumento de demanda energética no país o crescimento populacional brasileiro, o maior consumo per capita e o suprimento de energia para famílias antes sem acesso à eletricidade em rede, como apresentado a seguir. Nos últimos vinte anos a população brasileira cresceu de 145 milhões para mais de 200 milhões de habitantes e espera-se que em 2030 chegue a 240 milhões. Além de mais pessoas, a melhoria de qualidade de vida e o acesso a serviços que demandam energia expandem o consumo individual. De 1970 a 2005 o crescimento de consumo energético era de 3.3% ao ano. A previsão agora é que até 2030 a taxa suba para 3.7% ao ano. (BRASIL, 2007).

A representatividade no consumo energético brasileiro do ambiente construído pode ser comprovada pelo Balanço Energético Nacional. O relatório para o ano de 2016 (BRASIL, 2017) do Ministério de Minas Energia mostra que o ambiente construído (residencial, comercial e institucional) representa 14.6% do consumo total de energia (consumo final do setor residencial, comercial e público somados) ficando atrás apenas do consumo da indústria (33%) e dos transportes (32.4%). Quando analisado o uso de eletricidade isoladamente, o ambiente construído assume 51.04% do gasto final/total de energia elétrica (265.412 GWh), sendo superior ao consumo de todos os outros setores.

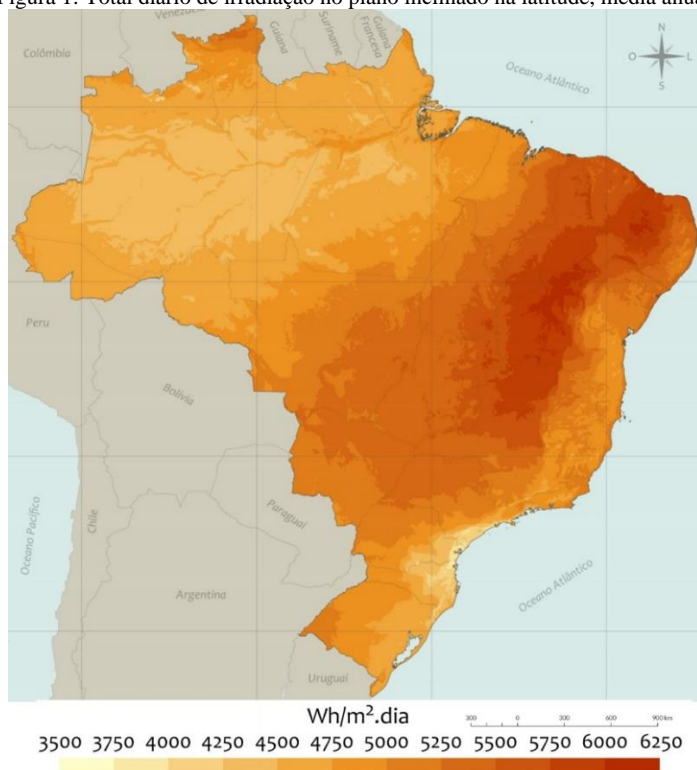
Um levantamento da distribuição do uso de eletricidade em edifícios apontado por Lamberts, Dutra e Pereira (2014) corroboram com os dados acima e mostram que no Brasil o setor residencial consome 24% de energia elétrica para banho, 27% para refrigeração, 14% para iluminação, 20% para ar condicionado e 15.5% para outros equipamentos residenciais havendo variações para cada região do país. Os mesmos autores mostram que o consumo elétrico em ambientes de uso comercial se distribui em 22% em luz artificial, 47% em ar condicionado e 31% em outros equipamentos e cargas enquanto que ambientes de uso institucional ou público utilizam 23% para iluminação artificial, 48% para

ar condicionado, 15% para equipamentos de escritório e 14% para outras cargas.

Percebe-se uma relevante parcela do consumo de eletricidade voltado a atender o condicionamento térmico e o suprimento de iluminação nos edifícios. Assim sendo, cabe ressaltar que as condições climáticas desempenham papel fundamental, seja no potencial de aquecimento e iluminação pelos raios solares ou devido às flutuações de temperaturas externas no condicionamento térmico. Consequentemente, as condições climáticas atuam sobre o consumo energético para conforto térmico e luminoso também.

O Brasil é privilegiado por sua posição geográfica que recebe altas taxas de incidência solar. Em boa parte do território nacional incide por volta de $5\text{kWh}/\text{m}^2.\text{dia}$, valor já expressivo, mas que alcança valores ainda mais elevados na região nordeste (INPE, 2017).

Figura 1: Total diário de irradiação no plano inclinado na latitude, média anual.



Isto posto, a radiação solar tem papel fundamental no desempenho energético das edificações por condicionar o ar ambiente, aquecer as superfícies dos edifícios e suprir luz natural. Enquanto não é possível controlar a temperatura do ar externo, pode-se permitir ou não a incidência direta de radiação sobre uma superfície do edifício por meio de decisões do projeto arquitetônico. Assim sendo, a decisão entre o uso de elementos opacos ou transparentes nas edificações deve se respaldar também no impacto energético e de condicionamento térmico, não se limitando apenas à estética projetual.

Tratando-se das questões térmicas no vidro, a radiação solar incidente em aberturas de vidro pode acarretar ganhos térmicos no ambiente interno levando ao efeito estufa, isto é, massiva parte da radiação entra no edifício sem conseguir ser dissipada para o exterior. Este fenômeno se justifica pelo fato de o vidro ser transparente aos raios de luz, mas opaco às ondas de calor (ou ondas do infravermelho longas).

Esta característica peculiar dos vidros de admissão da radiação solar direta, mas aprisionamento do calor tem alto impacto no conforto térmico de ambientes da construção civil. Assim, cabe uma pormenorização das características das aberturas, em especial da Porcentagem de Área de aberturas em Fachadas (PAF) e do Fator solar (F_{solar}) quando se trata de eficiência térmica em edificações.

Entende-se como PAF a razão entre a soma das áreas de abertura envidraçada, fechamentos transparentes ou translúcidos de cada fachada por sua área total. Ademais, o F_{solar} se caracteriza como a razão entre o ganho de calor transmitido a um ambiente através de uma abertura e a radiação solar incidente na mesma, portanto inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é reirradiada ou transmitida por condução ou convecção ao ambiente.

A maior parte das trocas de calor em um edifício acontecem na sua envoltória, ou seja, na cobertura e em suas fachadas (WESTPHAL, 2007). Além disso, tratando-se diretamente de aberturas nas fachadas, o F_{solar} e a PAF estão sempre entre os elementos mais sensíveis no consumo térmico das edificações de climas quentes (YILDIZ; ARSAN, 2011; WESTPHAL, 2007).

Quanto à proporção de aberturas, o estudo de Noh-Pat *et al* (2011) corroboram Yildiz e Arsan ao apontar que grandes proporções de aberturas em fachadas foram as maiores causadoras de desconforto térmico no ambiente interno do estudo conduzido. O trabalho de Santana e Ghisi (2007) apontou que a PAF foi o fator que mais influenciou no consumo energético da edificação avaliada.

Os estudos de Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010), de Yin *et al* (2012) e de Andreis *et al* (2014) relacionam diretamente o Fator Solar com o consumo energético para resfriamento, isto é, que quanto maior o F_{solar} for, maior será o consumo energético e vice-versa. Não obstante, Westphal (2007) argumenta que não é necessariamente linear o aumento entre o Fator solar e consumo energético, em especial quando se tende aos valores máximos e mínimos. Outro ponto mostrado por Andreis *et al* (2014) é que ao se comparar vidros com e sem controle solar, os vidros de controle permitem maiores aberturas e o consumo energético dos ambientes não se torna maior que o dos vidros sem controle solar e com menores aberturas.

Diferente do PAF e do F_{Solar} , a espessura do vidro em si tem pouca sensibilidade no condicionamento térmico do ambiente (MOTTA, 2007) – lembrando que a espessura de um vidro e o uso de vidros com várias camadas são condições distintas. Percebe-se, portanto, que a ampla variedade de vedações transparentes disponíveis no mercado se justificam pela complexidade de aproveitar a iluminação natural sem ameaçar o conforto térmico do ambiente.

Acerca da iluminação natural sob o viés de eficiência energética, cabe disponibilizar luz do sol como possibilidade de redução do consumo energético no interior do edifício quando é possível diminuir o consumo de luz artificial. Caso contrário a abertura não supre a demanda luminosa, mas permite maiores trocas térmicas com o ambiente externo e o vidro deve acirrar os ganhos térmicos. Por outro lado, é preciso entender também que caso ocorra desconforto visual por ofuscamento, ocorre um padrão de comportamento do usuário de interferir nas aberturas fechando cortinas ou acionando persianas. Uma vez modificadas as aberturas em momentos necessários e, provavelmente, acionada a iluminação artificial, o usuário não tenderá a voltar as aberturas para sua condição inicial e apagar as luzes assim que o problema cessar (PEREIRA, 1992; BOGO, 2007). Este novo cenário implica em ganho térmicos pelo vidro sem o suprimento de luz natural e agora gastos de eletricidade com iluminação, lembrando que as lâmpadas artificiais dissipam calor no ambiente interno e também contribuem para o aquecimento do mesmo (MAYHOUB; CARTER, 2011). Consequentemente, aberturas mal projetadas, seja pela errada proporção de aberturas ou pela decisão indevida de Fator Solar, podem provocar ganhos excessivos de calor no ambiente interno quando nas condições de irradiância (SALDANHA, 2012). Em outras palavras, as aberturas podem ser aliadas ou o desastre de um projeto.

Acerca da transmissão visível (T_{vis}) das aberturas, Bodart e Herde (2002) apresentam uma relação inversamente proporcional em que quanto

maior a transmissão no visível, menor é o consumo da iluminação artificial. Todavia, os mesmos autores atentam que uma vez atingido os 500 lux de iluminação no ambiente e acionada a economia de iluminação artificial, o aumento de transmissão no visível não soma benefícios luminosos, mas acarreta em consequências para o condicionamento térmico. Além do fato já exposto de que a iluminação natural tem potencial para reduzir o consumo energético dos edifícios como mostra os estudos de Souza (2006) e Didoné (2009) – é sabido a preferência dos usuários pela iluminação natural em detrimento da artificial ou até o fato de que os usuários podem apresentar melhor desempenho com luz natural em diversas atividades (IEA, 2000; BOYCE; HESHONG, 2003; GALASIU; VEITCH, 2006).

Justificado a atenção necessária às decisões projetuais de aberturas, tratando-se do clima brasileiro majoritariamente quente, aberturas de vidro expostas à radiação solar devem aquecer os ambientes e acirrar o desconforto por calor, ratificando a necessidade de cautela na exposição das aberturas do edifício ao sol. Assim sendo, reitera-se a necessidade de adoção cautelosa da Porcentagem de Aberturas na Fachada (PAF) e do Fator Solar (F_{solar}) de suas aberturas.

Especificamente sobre o Brasil, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apresentam a simulação pelo Analysis-BIO da porcentagem de horas no período diurno (entre 6h e 18h) em que a temperatura do ar, ao se encontrar próxima à faixa de conforto térmico possibilitaria ou não o emprego de aberturas na arquitetura com o intuito de avaliar a necessidade de sombreamento, o que se comprovou para boa parte das cidades brasileiras.

Tabela 1: Condição desejável de irradiação em aberturas.

Condição desejável de irradiação em aberturas.

Cidade	% de horas indesejáveis	% de horas desejáveis
Belém-PA	100	0
São Luiz-MA	100	0
Recife-PE	100	0
Fortaleza-CE	100	0
Natal-RN	99.7	0.3
Salvador-BA	98.6	1.4
Maceió-AL	98.2	1.8
Vitória-ES	89.8	9.1
Rio de Janeiro-RJ	89.5	10.5
Brasília-DF	73.8	22.6
Florianópolis-SC	69.9	25.6
Porto Alegre-RS	56.3	35
Curitiba-PR	37.3	48.1

FONTE: Lamberts, Dutra e Pereira (2014).

Do ponto de vista da arquitetura contemporânea emerge aqui um paradoxo entre a restrição do emprego de aberturas e a estética do edifício envidraçado. Por um lado, é sabido que a radiação direta é indesejada na maior parte de horas e cidades brasileiras. Por outro, a permeabilidade visual lançando mão de aberturas envidraçadas – um arquétipo postulado pela obra modernista de Mies Van der Rohe – ainda norteia as decisões projetuais sem indícios de que na prática a atenção dada ao conforto deverá suprimir o uso do vidro, mesmo em climas quentes.

Logo, a realidade climática respalda a necessidade de vidros com controle solar apontando que a temática de materiais transparentes em edificações não é assunto esgotado. Haja visto que, ou se abdica das aberturas ou são adotados materiais mais eficientes, é notório que a demanda de mercado impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias transparentes capazes de responder a estes desafios.

Há três questões a serem ponderadas no uso de vedações transparentes para climas quentes: a transparência visual em si (visibilidade), a redução do ganho de radiação que acarreta menor gasto com energia para condicionamento térmico e o aproveitamento da iluminação natural reduzindo o consumo de iluminação artificial (eficiência térmica).

Pretendendo atender às condições climáticas sob o viés da transparência como conjuntura inicial, resta equacionar o ganho de calor e da luz natural para o bom proveito de superfícies transparentes em edificações. Todavia, sendo os raios luminosos e infravermelhos provenientes da mesma fonte – a radiação solar – é fortuito desmembrar o espectro solar da radiação incidente de forma a suprimir os raios infravermelhos próximos sem barrar o espectro visível.

A esses materiais que transmitem em proporções diferentes a radiação solar em cada espectro é dado o nome de ‘materiais espectroseletivos’. No caso da construção civil, os materiais espectroseletivos se referem à objetos com capacidade de transmitir em maior parte as ondas do espectro luminoso, mas absorver ou refletir as ondas de calor – sendo a água e os vidros de desempenho alguns exemplos desses materiais. Não obstante, a água ainda dispõe de expressiva capacidade térmica, isto é, que a mesma se delonga por mais tempo em relação a outros materiais para variar sua temperatura sob um mesmo estímulo térmico. Por conseguinte, a água, além de barrar a radiação infravermelha e transmitir luz (assim como vidros de controle solar) ainda pode armazenar parte do calor que seria transmitido, atenuando os picos térmicos (independentemente de haver ou não atraso térmico).

A espectroseletividade, conforme a explicação molecular de Lima et al (2009) e Barbosa (2008), é a capacidade de absorver radiação no infravermelho próximo acarretando vibrações das moléculas, sem absorção de fóton de luz. Essa capacidade de absorção no I.V. é intrínseca do material e tem a ver com o formato das ligações moleculares ser capaz de proporcionar interação entre a radiação eletromagnética com os níveis vibracionais das moléculas. Em outras palavras, da condição de existência de momento de dipolo nas referidas ligações em que a vibração das ligações da molécula estejam na mesma frequência que o comprimento de radiação que se pretende absorver.

Ainda, os mesmos autores indicam que no I.V. próximo ocorrem absorções mais fracas que as observadas nas transições fundamentais (no I.V. médio e longo), o que recebe o nome de sobretom. Em termos ilustrativos, sobretom é a “reescapagem” no I.V. próximo de uma absorção bem mais forte “rebatida” do I.V. médio e longo. No infravermelho próximo ocorre também o fenômeno de bandas de combinação que é aproximadamente a soma ou diferença entre duas frequências da bandas fundamentais que interagem para sua formação.

Tanto o efeito de sobretom quanto o efeito de banda de combinação dificultam a distinção do que compõe o analito a partir de uma análise espectrométrica de infravermelho próximo e aponta como a temática não é trivial, além de ainda ser um campo relativamente recente para a ciência. Assim sendo, justifica-se a superficialidade da abordagem espectrométrica das pesquisas em transwall até o dado momento.

No quesito da aplicabilidade da água como elemento espectroseletivo, vários trabalhos nas últimas décadas se destinaram em pesquisar o uso de água na vedação de edifícios. Desde os primeiros experimentos no MIT (Massachusetts Institute of Technology) em 1947 com tambores de latão encheidos de água até os dias de hoje o assunto abrangeu pesquisas e pequenas empresas norte-americanas que comercializaram “water walls” – nome que se refere às fachadas com água em seu interior, mas com invólucro opaco (BAINBRIDGE, 2005). Das water walls resultaram também pesquisas de sistemas construtivos transparentes ou translúcidos com uso de água, as quais forma nomeadas transwalls e que são de interesse direto desta pesquisa.

Em suma, as pesquisas relacionadas às *transwalls* até o momento deram atenção em avaliar a aplicabilidade deste sistema em suprir calor para o ambiente interno de climas frios, comparando-os ao desempenho térmico de sistemas construtivos opacos com massa térmica. Nessas pesquisas as *transwalls* assumiram seções grossas – condizentes com uma parede – de aparência semitransparente ou colorida. Embora nestas

pesquisas já se aborda o efeito da massa térmica da água no atraso e atenuação térmica, houve pouca exploração fundamentada da capacidade espectroseletiva dos líquidos transparentes em admitir luz, mas absorver calor no sistema; do controle da convecção em sistemas delgados barrar o fluxo de calor para o ambiente interno; de *transwalls* delgadas que possam ser empregadas em janelas e não só paredes, e, principalmente, uma ausência de estudos abrangentes para regiões de clima quente.

Assim sendo, se *transwalls* delgadas por meio de líquidos espectroseletivos transparentes no espectro da luz visível, mas que absorvam calor, reduzirem o ganho de calor para o ambiente interno se obtém então um novo design de *transwall* apropriado para aberturas da construção civil em climas quentes que atua na espectroseletividade e atenuação térmica.

É importante para esta pesquisa sistemas transparentes no espectro visível provendo luz natural ao ambiente, mas controlando a passagem de calor. Ressalta-se, porém, que a temática do desempenho luminoso natural não será tratada qualitativamente na dissertação, apenas escolhidos sistemas com alta transmissão no visível. Também, o recorte do estudo exclui a abordagem estrutural e do ciclo de vida do sistema proposto, prestando atenção apenas em seu desempenho ótico e térmico devido ao breve tempo para execução de um mestrado.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

Definir os parâmetros térmicos e óticos para simulação de desempenho térmico de transwalls delgadas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a. Medir por espectrofotometria a seletividade espectral de diferentes líquidos transparentes;
- b. Elaborar modelos óticos de transferência de radiação em transwalls baseando-se na revisão bibliográfica;
- c. Comparar por meio dos dados obtidos pelo espectrofotômetro a precisão de resultados simulados pelos diferentes modelos óticos;
- d. Elaborar a relação de porcentagem de absorção solar e transmissão total por seção de material de diferentes modelos de transwall ao se considerar a variação do ângulo de incidência solar;
- e. Averiguar o impacto da imprecisão do índice de refração na refletância das faces e na transmissão e absorção total de transwalls;
- f. Elaborar modelos numéricos de seções finitas de transferência transiente de calor (MTSF) a partir de possíveis fenômenos de transferência de calor aplicáveis às transwalls;
- g. Analisar a sensibilidade das variáveis dependentes da simulação de uma transwall a partir de variações de configurações do modelo de transferência de calor;
- h. Avaliar o desempenho térmico de transwalls delgadas sob diferentes cenários climáticos.

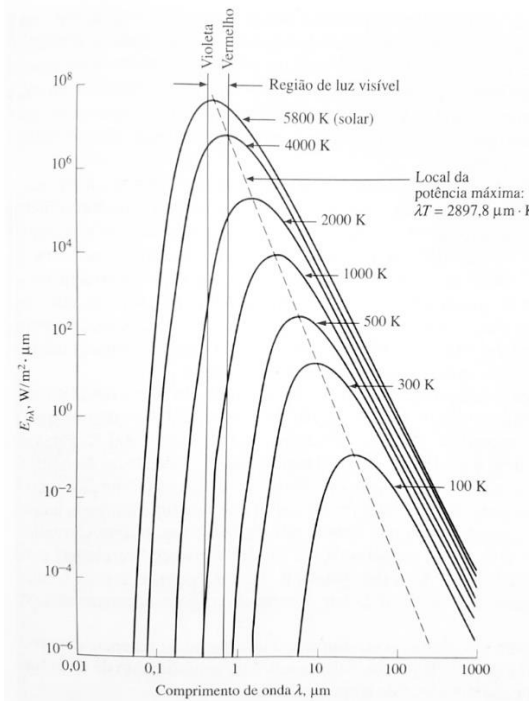
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATERIAIS TRANSPARENTES E IRRADIAÇÃO SOLAR

O sol transfere energia para a Terra por emissão de ondas eletromagnéticas. Essas ondas são emitidas pela superfície do astro que chega a temperaturas próximas de 5800K decorrentes de fusões do hidrogênio em seu núcleo. Corpos em temperaturas tão elevadas como o sol têm alto poder emissivo com pico no espectro visível e por isso geram luz. Já corpos a temperaturas mais baixas (como 300K, que é próximo à temperatura ambiente, por exemplo) concentram sua energia no espectro infravermelho (Figura 2) e sua emissão não pode ser vista a olho nu

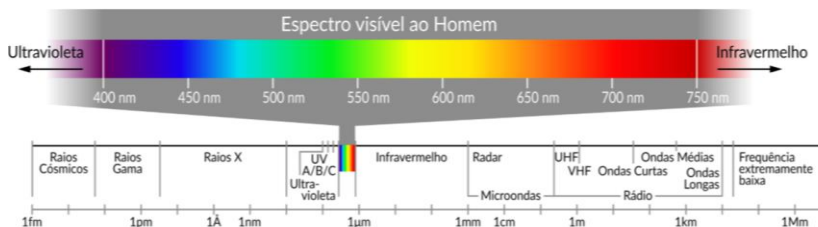
(Figura 3). Todos os corpos acima da temperatura de zero absoluto (0K) trocam energia por radiação em suas superfícies sem necessidade de matéria para se propagar e ocorre um balanço entre energia enviada e recebida (INCROPERA; DEWITT, 2008).

Figura 2: Poder emissivo de corpos negros pela temperatura superficial (K)



Fonte: adaptado de Çengel (2009)

Figura 3: Espectro da radiação eletromagnética



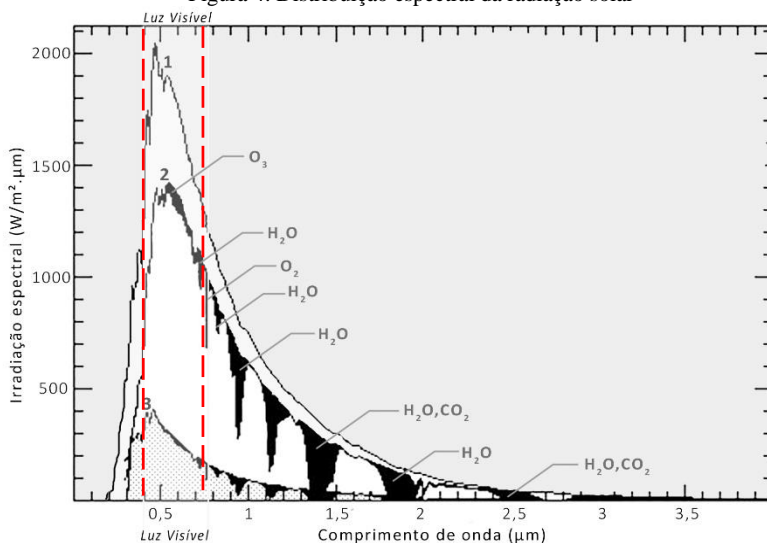
Fonte: INPE (2017)

Abre-se aqui uma pausa para explicar a faixa espectral. O espectro eletromagnético descreve a variação do comprimento das ondas de radiação a qual neste trabalho interessa a faixa intermediária englobando a luz (espectro visível) e o calor (espectro infravermelho) presentes na

Figura 3.

Quando a radiação solar ultrapassa a atmosfera terrestre, a existência de gases e vapores, como ozônio, oxigênio, água e gás carbônico, absorvem ou refletem parte da energia solar e a curva de radiação é atenuada em alguns espectros (Figura 4).

Figura 4: Distribuição espectral da radiação solar



Curva de radiação fora da atmosfera (1), Irradiância direta (2) e indireta (3) na superfície terrestre.

Fonte: Adaptado de Çengel (2007).

A distribuição da radiação solar na superfície da Terra é composta entre 1 a 5% por raios ultravioletas (290nm – 380nm), 41 a 45% de luz visível (380nm a 780nm) e 52 a 60% de infravermelho próximos e médios (780nm a 2500nm) conforme descreve Caram (2002). As variações entre as porcentagens se explicam por diferenças de localização, condições da camada de ozônio e condições atmosféricas. Para padronização, os valores absolutos de potência solar por comprimento de onda adotados neste trabalho utilizam os dados da ASTM G173-03 (2003).

A densidade do fluxo de energia solar medida numa superfície perpendicular à incidência dos raios se denomina constante solar. Devido às variações de distância do Sol em relação à Terra ao longo de um ano, a constante solar varia entre 1325W/m² a 1412W/m² sendo padrão adotada como 1366W/m² (INPE, 2017). Valores menores podem ser adotados ao se ponderar as condições atmosféricas e sazonais. A irradiação incidente sobre um vidro na vertical pode ser chamada de “irradiação na normal” e tem valores menores que a constante solar.

A interação entre os raios solares incidindo uma superfície acarreta em reflexão (R), absorção (A) e transmissão (T) dos mesmos, e a soma da porcentagem das partes é igual ao total da radiação incidente.

$$\text{Reflexão (R)} + \text{Absorção (A)} + \text{Transmissão(T)} = 1 \quad (1)$$

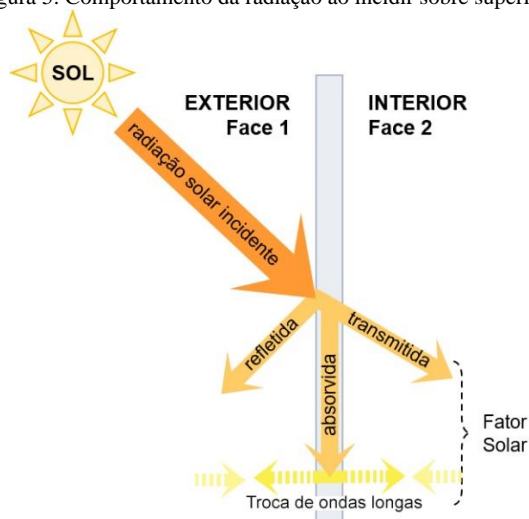
Partindo-se do pressuposto que não há transmissão em objetos opacos, os mesmos devem refletir parte dos raios e absorver outra parte respeitando a absorvidade característica da superfície. Uma vez absorvida e armazenada em forma de calor, a energia térmica poderá ser conduzida, trocada por meio de convecção ou irradiada novamente, agora apenas no espectro infravermelho devido à sua temperatura superficial próxima à 300K (ver Figura 2).

Diferente dos materiais opacos, superfícies transparentes transmitem uma porcentagem da radiação solar além de refletir e absorvê-la, transferindo diretamente uma parcela de energia para o interior do edifício, como mostrado na Figura 5.

Esse fenômeno de transmissão, reflexão e absorção acontece em porcentagens diferentes para cada faixa espectral e é justamente essa característica chamada de ‘espectroseletividade’ que diferencia o desempenho térmico de materiais os quais visualmente parecem ter transparência similares, mas se diferenciam em outros espectros. Há variações na própria espectroseletividade de materiais transparentes (p.ex. o vidro incolor e o verde) bem como é possível que materiais sejam transparentes no espectro visível, mas com relativa opacidade no

infravermelho curto (entre o fim do espectro visível e até o fim do espectro solar) controlando a passagem de calor.

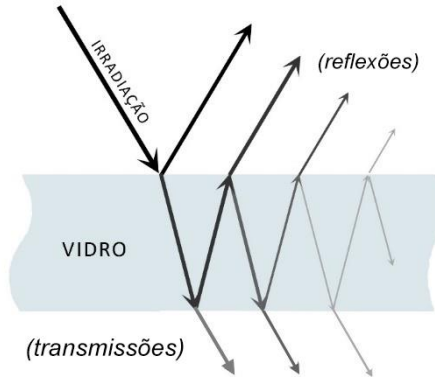
Figura 5: Comportamento da radiação ao incidir sobre superfícies transparentes.



Fonte: Adaptado da ABNT, 2011.

A radiação solar incidente – em caso de materiais transparentes e ocorrendo transmissão em todos os materiais– interage com todas as superfícies e nelas, devido às diferenças de índice de refração entre os materiais (e por onde é calculado os valores de refletância), parte da radiação é refletida para fora. Em outras palavras, toda vez que a radiação se depara com a diferença de índice de refração dos materiais sob uma certa angulação e condição de polarização da luz, o raio transmitido sofrerá difração (mudando seu ângulo de transmissão) e outra parte da energia sofrerá reflexão (no mesmo ângulo de incidência). É preciso salientar que essas reflexões acontecem inúmeras vezes até o raio se dissipar (ver Figura 6).

Figura 6: Múltiplas interreflexões em sistemas transparentes.



Outra característica marcante dos vidros é sua opacidade no infravermelho longo, portanto refletindo para o interior o calor gerado pelos objetos e pessoas dentro da edificação ao invés de transmitir para o ambiente externo, o que resulta no efeito estufa (CARAM, 2002).

2.2 TROCAS DE CALOR EM TRANSWALLS

O balanço térmico possibilita o domínio da entrada ou saída de calor em um dado volume de controle sob um recorte de intervalo de tempo. Em outras palavras, se permite – a partir da lei de conservação de energia – averiguar qual a energia armazenada em um volume preestabelecido. As trocas, ou seja, a energia que entra ou que sai, ocorrem por condução, convecção ou radiação. A energia armazenada é dependente da capacidade térmica do material e de seu volume. É possível também que ocorra geração de energia no volume de controle (p.ex. reações químicas exotérmicas, o que não ocorre nas transwalls).

A decorrência do tempo e da diferença de fluxo de calor em uma massa com capacidade térmica e volume específico podem acarretar atraso e atenuação térmica. Atraso térmico se refere à capacidade de delongar o tempo de transferência térmica de um ponto da matéria até outro. Atenuação térmica é a característica de reduzir o fluxo de energia na transferência de calor de um ponto até outro.

No caso dos fluidos é preciso admitir que o processo de trocas de calor é espacialmente descontínuo uma vez que a vibração térmica de um ponto (que é o calor) não é transferida apenas aos pontos de massa adjacentes como nos sólidos. Consequentemente, a convecção implica no aumento do processo de transferência de calor. O aumento da condução de calor de um fluido em relação à condutividade térmica (k) do mesmo

material sob condições sólidas resulta na condutividade térmica equivalente (k_{eq}). O aumento da transferência de calor em relação à quantidade de movimento no fluido pode ser expresso por números adimensionais obtidos empiricamente. No caso da convecção natural, o número de Nusselt assume o papel de coeficiente da condutividade térmica de uma material, transformando-a em condutividade equivalente.

Não obstante, o processo de transferência de calor em sistemas de transwall (isto é: condução, convecção e radiação entre fluidos e sólidos ao longo do tempo) não é um fenômeno simples e carece de solução analítica. Aplicam-se, então, métodos numéricos. Dentre os métodos disponíveis se tem as simulações por CFD (Computer Fluid Dynamics) que são mais complexas e se fundamentam nas equações de Navier-Stokes relacionando massa, aceleração e força. Uma segunda alternativa é o Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) uni ou bidimensional que a partir da diferença finita entre seções do material e do intervalo de tempo discretizados itera o balanço térmico entre as partes.

2.3 TRANSWALL: ESTADO DA ARTE

Conhecidos os fenômenos físicos que descrevem o uso da água em vedações da construção civil, apresenta-se aqui a história, avanços e rupturas nas pesquisas dedicadas a esse tema. Define-se de antemão a diferença de waterwall e transwall. As waterwalls (paredes de água, em português) são elementos construtivos opacos cheios de água. As transwalls são uma vertente das waterwalls, porém, com vedação translúcida ou transparente.

2.3.1 Waterwall

O Relatório Bainbridge (2005) aponta que o primeiro experimento de waterwall se deu por meio de um teste com barris pintados de preto e cheios de água posicionados atrás de vidro duplo em 1947 por Hoyt Hottel no MIT (Massachusetts Institute of Technology). Esperava-se gerar fluxo de calor para o ambiente interno durante a noite, porém o experimento não foi bem-sucedido por erros de projeto e vedação do sistema. Nesses 70 anos, são várias experiências práticas, teóricas e até de empresas comercializando diferentes modelos de waterwall, o que incentivou o melhoramento do sistema ao longo do tempo. Infelizmente o mesmo relatório conta que um dos motivos para o fracasso dos empreendimentos com waterwall foi a má vedação e corrosão do sistema construtivo sendo que hoje em dia o sistema não se encontra consolidado no mercado.

Figura 7: Exemplos de transwall e water wall já comercializados no passado.



À esquerda, transwall de tubos transparentes da Solar Components e à direita uma waterwall com invólucro de latão.

Fonte: Bainbridge (2005).

Em linhas gerais as waterwalls utilizaram como vedação latão, canos de PVC ou concreto, normalmente pintados de cores escuras, posicionadas no ambiente interno adjacentes às aberturas de vidro simples ou duplo exposto ao exterior.

As pesquisas que abordaram o tema sumariamente concluem que:

- O sistema permite atenuação térmica: a água utilizada em vedações sofre variações térmicas menos intensas que as do ambiente externo e/ou as flutuações térmicas do ambiente interno menores que a da água; (UPADHYA; TIWARI, 1991; TIWARI; UPADHYA; RAI, 1991; WU; LEI, 2016b, 2016c)
- Quanto maior a espessura da lâmina da água, menor é a flutuação térmica no ambiente interno em relação à temperatura externa (SODHA; BANSAL; RAM, 1983; WU; LEI, 2016b, 2016c);
- Em relação a outros sistemas de vedação opacos (p.ex. paredes trombe), as waterwalls tem a desejada capacidade de liberar mais calor para o ambiente interno durante a noite em climas frios por terem mais massa térmica (BALCOMB; HEDSTROM; McFARLAND, 1977; McFARLAND; BALCOMB, 1979; NAYAK; BANSAL; SODHA, 1983);

- As waterwalls apresentam menor fluxo de calor para o ambiente interior que as transwalls durante o período de irradiação solar (NAYAK, 1987a, 1987b);

A maioria dos experimentos utilizaram o MTSF unidimensional para calcular a transferência de calor das *waterwalls* tratando a movimentação da água no interior dessas câmaras por modelos convectivos equivalentes e desconsiderando a estratificação da água. Wu e Lei (2015a) modelaram uma câmara opaca com diferença de temperatura entre as paredes para averiguar o efeito convectivo da mesma, mas utilizaram ar e não água na cavidade. Foi simulado o modelo 2D e 3D utilizando cinco modelos RAN¹ (Reynolds Averaged Navier-Stokes) para a turbulência e com discretização ordinária para a radiação. Percebeu-se que a simulação do fenômeno de estratificação dentro da câmara é melhorada quando a simulação é tridimensional ou quando se considera a troca de radiação entre as faces internas da cavidade e que a diferença entre os resultados de medições e simulações numéricas deve-se pela negligência da radiação. Além disso, as bordas horizontais impactam no funcionamento da câmara – as quais são normalmente ignoradas – em especial quando não é computado a radiação entre faces internas. Ratifica-se, no entanto, que a modelagem usou ar e não água, como é apresentado pelo autor.

É interessante entender também que a convecção em um sistema opaco será diferente de outro com paredes transparentes. Enquanto no opaco apenas um lado é aquecido, no sistema transparente há aquecimento das camadas de água adjacentes ao vidro externo e do próprio vidro interno porque a radiação atravessará todo o sistema e haverá absorção de radiação em cada material. Há, portanto, a possibilidade do fluxo de calor para a água em duas direções (do vidro exterior e do vidro interior) ao mesmo tempo.

2.3.2 Transwall

A revisão bibliográfica desta dissertação aponta 13 trabalhos de transwalls encontrados em bancos de dados por meio de palavras chaves (transwall, water wall, parede de água, water façade, trombe water wall) e referências bibliográficas de trabalhos correlatos. Alguns artigos não foram incluídos ao estudo por se tratarem de documentos de comunicação interna entre McClelland e o governo dos Estados Unidos.

¹ Modelo standard k- ϵ , modelo da Renormalization group (RNG) k- ϵ , modelo realisable k- ϵ , modelo standard k- ω e modelo shear-stress transport (SST) k- ϵ .

Os trabalhos serão comparados por tabela em ordem cronológica. Além da coluna de ‘clima e época’, ‘objetivo do estudo’, ‘aparência’, ‘resultados e conclusões’ e ‘considerações e ponderações’ – que se auto explicam - a coluna de ‘absorção radiante’ explana os materiais considerados como absorvedores de calor, o ‘método’ explica a forma de cálculo, a ‘convecção no líquido’ detalha o fenômeno convectivo, a ‘absorção’ descreve como cada autor calculou a absorção de radiação, a ‘troca radiante’ comenta se houve consideração da troca de radiação entre as faces internas do vidro, as ‘propriedades termofísicas’ esclarecem se o autor utilizou propriedades constantes dos materiais ou se as propriedades modificaram-se de acordo com a temperatura do mesmo e as ‘comparações transparentes’ indicam trabalhos que compararam a transwall com outros sistemas transparentes. Expõe-se também se foi considerado o processo de múltiplas reflexões no comportamento ótico do sistema, se houve consideração da polarização da luz, quais os dados utilizados como coeficiente de extinção molar (k) e coeficiente de absorção molar (α).

Tabela 2: Estado da arte das transwalls: descrição dos estudos.

	CLIMA E ÉPOCA	OBJETO DE ESTUDO	ABSORÇÃO RADIANTE
-Fuchs, McClelland (1979)	Frio - (temp. constante) Região central dos EUA	Comparação entre <i>transwall</i> , parede trombe e ganho direto; comparação visual da <i>transwall</i> . (Cavidade da <i>transwall</i> = 15,2cm)	Vidro, água e trap
-Shoda, Bansal, Ram (1983)	Frio - (11 de janeiro) Boulder, EUA	(<i>transwall</i>) Análises de sensibilidade das espessuras da 1ª e 2ª lâmina de água e do trap material. (Cavidade = de 12cm a 20cm)	Vidro, água e trap
-Papersenos (1983)	Frio - 2 e 3 de Abril) Glasgow - Escócia	Modelagem de transwalls com diferentes condições de múltiplas reflexões. Modelos de convecção em <i>transwall</i> .	Vidro e água
-Nayak (1987a)	Frio - (17 de janeiro) ² Srimagar, Índia	Análise de sensibilidade da <i>transwall</i> ; comparação entre <i>transwall</i> e <i>water wall</i> de concreto. (Cavidade da <i>transwall</i> = de 10cm a 1m)	Vidro, água e trap
-Nayak (1987b)	Frio - (17 de janeiro) Srimagar ¹ , Índia	Comparação entre <i>transwall</i> , <i>water wall</i> de concreto e parede trombe. (Cavidade da <i>transwall</i> = de 20 a 30cm)	Vidro, água e trap (Meili metacrilato)
-Nisbet, Kwan (1987)	Frio - (anual) Oeste da Escócia, Sudoeste da Inglaterra	Análise da economia de energia utilizando sacos com água tingida para vedação de estufas. (Espessura de lâmina de água = 15cm)	Água com corante (Lissamine Red 3GX, 20ppm) (desconsidera o plástico)
-Upadhy, Tiwari, Rai (1991)	Frio - (17 de janeiro) ² Srimagar, Índia	(<i>transwall</i>) Análise de sensibilidade das espessuras da 1ª e 2ª lâmina de água e do trap material. (Cavidade da <i>transwall</i> = sempre 10cm)	Água e trap (desconsidera os vidros)
-Tiwari, Upadhy, Rai (1991)	Frio - (17 de janeiro) ¹ Srimagar, Índia	Comparação entre ganho direto, <i>water wall</i> , coletor de ar e <i>transwall</i> (Cavidade da <i>transwall</i> = 10cm)	Água e trap (desconsidera os vidros)
-Nisbet, Mithembu (1992)	Frio / Conforto Oeste da Escócia (março) Glasgow, Nice e Bruxelas (anual)	Validação do MTSF por testes em laboratório. Medição e simulação de três <i>transwalls</i> de 15cm: (água normal, água com corante e gel espessante + trap material traseiro). Simulação térmica de uma residência com <i>transwall</i> em Glasgow, Nice e Bruxelas. (Espessura da água pigmentada ou com espessante na <i>transwall</i> = 15cm)	Vidro, Água + corante (Lissamine Red 3GX, 20ppm) ou vidro de absorção solar (Pilkington's 41/60 Antisun Grey) + espessante (0,05% Carbodol 941)
-González (2007)	Frio / Conforto (dez 2012 a maio 2013) Muncie, EUA	Comparação entre ganho direto, parede trombe, <i>transwall</i> (tubos translúcidos), <i>sunspace</i> e <i>roof pond</i> (Não apresenta o diâmetro dos tubos)	Não detalha
-Xiangfeng, Tianxing (2011a)	-	Análise arquitetônica do potencial de uma <i>transwall</i> com compartimentação transparente para reduzir a convecção.	Água (em % de absorção)
-Xiangfeng, Tianxing (2011b)	Calor (verão) Pequim, China	Análise de sistema <i>transwall</i> com com compartimentação policarbonato controlando a convecção. (37,8cm de espessura total: água + policarbonato)	Água (extinção molar média) (negligência o policarbonato)
-Wu, Lei (2016c)	Conforto / Calor - (maio) Sydney, Austrália	Medição <i>in loco</i> de uma <i>transwall</i> e <i>water wall</i> de concreto, validação do MTSF e análise de sensibilidade por MTSF da espessura de água, extinção molar com corantes e pintura externa reduzindo a transmissão de radiação na <i>transwall</i> (Cavidade da <i>transwall</i> = de 10cm a 40cm)	Acrílico ³ , água ⁴ , sem e com corante (vermelho, verde ou azul a 200ppm) ou pintura externa (transmissão = 75% ou 50%)

² Embora o artigo possa não apresentar a data ou local dos dados climáticos, os mesmos são similares ao dia 17 de janeiro em Srimagar, Índia, apresentados por Nayak, 1987.

³ Adota o valor de absorção (α) do material e não de coeficiente de extinção molar que pode gerar erros nos resultados

⁴ Adota a média de extinção molar a qual deve ser modificada caso exista um material irradiado pelo sol antes da água e, assim, pode gerar erros nos resultados.

Tabela 3: Estado da arte das transwalls: métodos e parâmetros.

MÉTODO	CONVECÇÃO DO LÍQUIDO	ABSORÇÃO	TROCA RADIANTE	Propriedades TERMOFÍSICAS	Comparações TRANSPARENTES
-Fuchs, McClelland (1979)	MTSF ⁵ Modelo: géis espessantes e <i>barfite</i> ⁶ Convecção: anulada ou admite-se uma condução 'aumentada'	Por seção e λ^7	Faces em contato com o ar	Constantes	Com vidro duplo
-Shoda, Bansal, Ram (1983)	MTSF Modelo: sem controle de convecção Convecção: coeficiente "h" fixo	Por seção e λ	Não considera	Constantes	-
-Papersenos (1983)	Modelo: sem controle de convecção Convecção: calculada por Vetores	Por seção e λ	Não considera	Constantes	Outros vidros de absorção solar
-Nayak (1987a)	Modelo: sem controle de convecção Convecção: coeficiente "h" fixo	Por seção e λ	Não considera	Constantes	-
-Nayak (1987b)	Modelo: sem controle de convecção Convecção: coeficiente "h" fixo	Por seção e λ	Não considera	Constantes	-
-Nisbet, Kwan (1987)	Modelo: sem controle de convecção Convecção: coeficiente "h" fixo	Por seção e λ	Não considera	Não apresenta	-
-Upadhyay, Tiwari, Rai (1981)	Modelo: sem controle de convecção Convecção: coeficiente "h" fixo	Por seção e λ	Não considera	Constantes	-
-Tiwari, Upadhyay, Rai (1991)	Modelo: sem controle de convecção Convecção: coeficiente "h" fixo	Por seção e λ	Não considera	Constantes	Com vidro simples
-Nisbet, Mthembu (1992)	Modelo: géis espessantes ou sem controle de convecção Convecção: cálculo de Nusselt	Por seção e λ	Não considera	Não apresenta	-
-González (2007)	Não considera	Não considera	Não considera	Não considera	Com vidro duplo
-Xiangfeng, Tianxing (2011a)	Não trata	-	-	Constantes	-
-Xiangfeng, Tianxing (2011b)	Resistência equivalente + atraso e atenuação térmica ⁸ Modelo: uso de baffles ⁵ Convecção: cálculo de Nusselt para água entre 5 a 25°C	Extinção molar média	-	Constantes	-
-Wu, Lei (2016c)	Medições <i>in loco</i> (-/MTSF comparativo) Modelo: sem controle de convecção Convecção: cálculo de Nusselt	Extinção molar média ⁷ (poli-carbonato dado em % de absorção)	Faces em contato com o ar e água (troca radiante entre os vidros)	Constantes	-

Tabela 4: Estado da arte das transwells: propriedades óticas

Múltiplas REFLEXÕES	Polarição da LUZ	k (coeficiente de extinção molar)	α (coeficiente de absorção molar)
-Fuchs, McClelland (1979)	Reflexão no vidro externo em 30% da irradiação	Não apresenta	Não apresenta
-Shoda, Bansal, Ram (1983)	Não considera	O que se chama de k, é na verdade α	Chama de coeficiente de extinção (k)
-Papensenos (1983)	Nenhuma, reflexão de 1ª ordem e infinitas reflexões	Considera	Chama de coeficiente de extinção (k)
-Nayak (1987a)	Não considera	Não apresenta	Apresenta
-Nayak (1987b)	Não considera	Não apresenta	Apresenta
-Nisbet, Kwan (1987)	Reflexão de 1ª ordem	O que se chama de k, é na verdade α	Chama de coeficiente de extinção (k)
-Upadhyay, Tiwari, Rai (1991)	Não considera	Não apresenta	"Razão de fluxo solar absorvido por espessura final"
-Tiwari, Upadhyay, Rai (1991)	Não considera	Não apresenta	"Razão de fluxo solar absorvido Não apresenta"
-Nisbet (1992)	Reflexão de 1ª ordem	O que se chama de k, é na verdade α	Chama de coeficiente de extinção (k)
-Mithembu (2007)	-	-	-
-González (2007)	-	-	-
-Xiangfeng, Tianying (2011a)	-	-	-
-Xiangfeng, Tianying (2011b)	Não considera	-	-
-Wu, Lei (2016c)	Não considera	-	"Absorção do sistema final"

Tabela 5: Estado da arte das transwails: comparação dos resultados.

	APARÊNCIA	RESULTADOS E CONCLUSÕES	CONSIDERAÇÕES e PONDERAÇÕES
-Fuchs, McCalliland (1979)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Comparada às paredes trombe, a <i>transwall</i> permite maior carga térmica diurna. O <i>trap material</i> armazena calor no centro, não superaquecendo os vidros externos. Menor convecção segura por mais tempo o calor no sistema. 	Já se sabia que é nos primeiros milímetros da água que a radiação solar é absorvida.
-Shoda, Bansal, Ram (1983)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Para clima frio, as lâminas externas perdiam mais calor; maiores lâminas de água reduzem a flutuação térmica. Lâminas delgadas passam mais calor nos horários de pico, mas retiram calor nos horários de menores temperaturas. 	-
-Papserenos (1985)	Transparente	<ul style="list-style-type: none"> • O aumento de reflexões diminui a taxa de absorção calculada. Os picos e vales de temperatura da <i>transwall</i> modelada são mais intensos que as modelagens. 	A modelagem aproxima-se das medições quando consideradas a tridimensionalidade da radiação solar. A condutividade equivalente é suficiente para representar a convecção.
-Nayak (1987a)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Comparada às <i>drum walls</i>, a <i>transwall</i> permite maior carga térmica diurna. Maiores lâminas de água reduzem a flutuação térmica e as lâminas externas perdem mais calor (clima frio) 	-
-Nayak (1987b)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Comparadas, a <i>transwall</i> permite maior carga térmica diurna, as <i>water walls</i> de concreto tiveram maior atenuação e atraso térmico, mas menos que a parede trombe. 	-
-Nisbet, Kwan (1987)	Colorida com distorção da imagem	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados obtidos a partir de diferentes espessuras da <i>transwall</i> e da concentração de corante não são tão dependentes da localização geográfica 	Desconsiderar as reflexões internas dos vidros pode negligenciar resultados (revisão de lit.)
-Upadhyay, Tiwari, Rai (1991)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Não foi possível obter conclusões coesas. 	Os resultados parecem ser incongruentes.
-Tiwari, Upadhyay, Rai (1991)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Não foi possível obter conclusões coesas. 	Os resultados parecem ser incongruentes.
-Nisbet, Mithembu (1992)	Semitransparente ou colorida	<ul style="list-style-type: none"> • A água com corante apresentou melhor atraso e atenuação térmica que a água com espessante + vidro de absorção solar na parede interna. 	Medições mostraram que não ocorre centrosimetria na câmara. Negligenciar a reflexão dos vidros internos deu diferença de resultados entre as medições e o MTSF.
-González (2007)	Semitransparente com distorção da imagem	<ul style="list-style-type: none"> • Mesmo com a alta massa térmica da água houve alta variação de temperatura na sala 	Os tubos tinham seção relativamente grande e não houve controle da convecção da água.
-Xiangfeng, Tianxing (2011a)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Por se tratar de um ensaio teórico, não apresenta resultados 	-
-Xiangfeng, Tianxing (2011b)	Semitransparente	<ul style="list-style-type: none"> • Os dados são calculados de forma errada e não são confiáveis 	-
-Wu, Lei (2016c)	Semitransparente ou colorida	<ul style="list-style-type: none"> • Os picos térmicos do ambiente interno diminuem o aumento da espessura da água e com a redução de transmissão nos vidros/acrilicos. O uso de corantes na água apresenta pouca sensibilidade para a transferência de calor no sistema. 	Adota trocas radiantes entre os vidros internos (a água é opaca a esse espectro); possivelmente erra na determinação da extinção molar dos corantes

Fuchs e McClelland (1979) são responsáveis por publicar o primeiro trabalho sobre *transwall*. O estudo era composto por um sistema duplo de vidro preenchido de água com uma chapa que absorvia radiação solar no meio da água chamada de “*trap material*”. Embora os resultados de desempenho térmico apresentados no artigo não sejam significantes se comparados aos trabalhos posteriores, o trabalho mostra que desde o início já se conhecia a capacidade da água em absorver boa parte da radiação solar em seus primeiros milímetros.

Shoda, Bansal e Ram (1983) utilizaram o mesmo perfil de seção de Fuchs e McClelland (1979) e fizeram uma análise de sensibilidade na transferência de calor variando a espessuras das lâminas internas da água. Viu-se que o aumento da espessura do *trap material* não resulta em aumento no ganho de calor e, ao contrário, reduz o fluxo térmico para o interior por ser o *trap* um material isolante. Conclui-se também que quanto maior a lâmina de água, menor é a variação do fluxo de calor e de temperatura.

A tese de doutorado de Papersenos (1983) caracteriza-se como um marco na pesquisa em transwalls. Por se tratar de um trabalho de doutorado e tendo a cabida abrangência, serão ressaltados apenas os pontos de maior relevância para esta dissertação. A pesquisa de Papersenos (1983) foi a primeira a apontar a importância de múltiplas reflexões – calculadas por ray tracing – afirmando que o aumento do número de reflexões calculadas diminui a transmissão total de uma transwall. Considerou-se a polarização da luz, foi calculado o processo convectivo na água por vetorização, foram realizadas medições in loco da transferência de calor as quais foram comparadas aos dados simulados. A modelagem ótica de infinitas reflexões não é apresentada por inteiro (para 4 faces e três materiais). Antes, o autor apresenta um esquema de cálculo, mas que não é diretamente aplicável à uma transwall inteira, não sendo possível replicar seu método. Percebe-se que vários pontos já esclarecidos por Papersenos (1983) não foram considerados nos trabalhos posteriores caracterizando uma ruptura do avanço no tema. Um dos possíveis motivos para tal realidade seja que não há publicações disponíveis de Papersenos além de sua tese nos bancos de dados científicos.

Há quatro trabalhos que utilizam o mesmo dia típico sendo dois trabalhos de Nayak (1987a, 1987b), Upadhy e Tiwari (1991) e Tiwari, Upadhy e Rai (1991) que, por esse motivo, serão analisados em conjunto. O dia adotado tem radiação e temperaturas baixas, chegando a quase -2°C.

As conclusões de Nayak (1987a, 1987b) corroboram comportamentos já apresentados por Sodha, Bansal e Ram (1989): que a

primeira lâmina de água (entre o vidro externo e o *trap material*) auxilia na perda de calor para o exterior (tendo em vista o clima frio em que o objetivo era o ganho de calor) reduzindo o fluxo de calor para o ambiente interno, que quanto maior a espessura da água, reduz-se o fluxo do calor para o ambiente interno, além de que todos os fechamentos com faces opacas apresentaram maior atraso e atenuação térmica que a *transwall*.

A conclusões de Upadhya, Tiwari e Rai (UPADHYA; TIWARI; RAI, 1991; TIWARI; UPADHYA, 1991) apresentam certa discrepância de resultados, possivelmente erro de consideração dos fenômenos Físicos, que não permitem elaborar uma explicação lógica do sistema.

O trabalho de Nisbet e Kwan (1987) pesquisou o uso de água em plásticos para vedar estufas de plantas em climas frios e liberar calor durante a noite. É o primeiro trabalho a utilizar soluções, neste caso corante vermelho, para aumentar a absorção molar da água. Exceto pela precursão no ensaio com pigmentos, outros tópicos abordados no trabalho como o estudo da correção da potência solar de acordo com o ângulo de incidência ao longo do ano e as comparações de desempenho da estufa com temperatura variante e fixa não serão focadas aqui.

Nisbet volta a estudar as *transwalls* com Mthembu (NISBET; MTHEMBU, 1992) introduzindo no MTSF o fenômeno da variação da convecção de acordo com a temperatura da água e naturalmente referenciando-se em Papersenos (1983), a quem Nisbet orientou no doutorado. Os autores ainda apresentam avanços na revisão bibliográfica no que se refere ao comportamento da água dentro da câmara e de sua absorção de radiação. Destaca-se que:

- As equações do MTSF são escritas de forma mais organizada e utilizando o número de Fourier;
- As medições feitas utilizaram uma transwall de tamanho reduzido (19cm x 24,5cm de altura com vidro com 6mm de espessura e 7,5cm de vão para a lâmina de água). A fonte de radiação era um projetor (12 120 V ELH Quartzline tungstênio-alógena utilizando 12 lentes de Fresnel) que irradiou por 2h a transwall e depois observou-se o comportamento de resfriamento da mesma sem a fonte de calor ligada. A comparação entre os resultados medidos e simulados indicou que houve diferença de transferência de calor do vidro interno ocasionado, possivelmente, pelo MTSF negligenciar as reflexões internas;

- Comparou-se o desempenho térmico de duas transwalls de 15cm sendo uma enchida de água e corante (3GX 40ppm) e a segunda tendo água com espessante para reduzir a convecção mais a substituição do vidro interno por um vidro de controle solar (10mm Pilkington´s 41/60 Antisun Grey). Percebeu-se que a água com espessante e vidro solar libera mais calor para o interior durante o dia enquanto que a água com corante tem melhor atenuação e atraso térmico, isto é, a água com corante tem maior inércia térmica).
- Os resultados das simulações de uma casa utilizando a transwall em três climas diferentes (Bruxelas, Nice e Glasgow) não serão descritos aqui por se referirem a climas frios.

González (2007) comparou vários tipos de aberturas, entre elas tubos transparentes cheios de água. Considerando que os tubos tinham diâmetro consideravelmente grande e que sua aplicação não diminuiu a flutuação térmica da sala, permite-se a interpretação de que maiores espessuras de água não reduzem o fluxo de calor se não houver restrição da convecção.

Os dois trabalhos de Xiangfeng e Tiangxing (2011a, 2011b), embora apresentem cálculos de transferência de calor equivocados, constroem a ideia de suprimir a convecção da água utilizando chapas verticais de material transparente (policarbonato) espaçadas dentro da água. O que se chama de negligência é o fato de que os cálculos de atraso e atenuação térmica parecem errados ao desconsiderarem o processo convectivo e por calcularem a radiação só na face externa. O trabalho ainda calcula o que González mostrou na prática e endossa que maiores espessuras de lâmina de água não necessariamente reduzirão a condução de calor como ocorria nos trabalhos que adotavam coeficiente de convecção da água fixo porque maiores lâminas do líquido aumentam a convecção.

Há cinco trabalhos recentes de Wu e Lei (WU; LEI 2015a, 2015b, 2016a, 2016b, 2016c) que exploram a temática do uso da água em paredes translúcidas e opacas por meio do MTSF, CFD e medições em climas quentes. Um de seus artigos em específico (WU; LEI, 2016c) se empenha em construir uma transwall e realizar medições in loco. As medições de transwalls foram feitas entre 4 e 31 de maio de 2015 em

Sidney, Austrália. Foi construída também uma waterwall com paredes de concreto que teve medições entre 27 de setembro e 15 de outubro de 2014. As duas medições utilizaram intervalos de 10 minutos para coleta dos dados. Validou-se o modelo pelos dados coletados em campo propiciando uma análise de sensibilidade da espessura da lâmina da água, absorção molar no líquido com o uso de corantes e redução na transmissão do acrílico utilizado. Além dos dados apresentados na tabela, explana-se a partir daqui as especificações do modelo físico medido, alguns dos critérios do cálculo por MTSF, os parâmetros utilizados nos experimentos com corante e a forma de comparar resultados.

O modelo físico da transwall (Figura 8) foi composto de seis chapas de acrílico tendo 25mm cada e a coluna central de água com lâmina de 10cm. O sistema foi aparafusado e depois colado com silicone e se encontrava sobre um dos prédios da Universidade de Sydney. Junto, foi construída uma waterwall com paredes de concreto. Os dois módulos tiveram as aberturas voltadas para o Equador, as câmaras tiveram dimensão de 2,4m x 1,2m e 1,2m de altura sendo que as outras paredes são feitas de alumínio e isolante térmico.

Mediu-se por termopar a temperatura da transwall e do ambiente interno da câmara em três alturas diferentes no eixo central sendo que na água ainda foi instalado um quarto termopar na altura central, mas deslocado para as proximidades da borda da fachada.

Figura 8: Modelo em escala real de transwall e waterwall de concreto.



Fonte: Wu e Lei (2016c)

Quanto ao MTSF, foram necessários 7 dias de para entrar em estado de convergência. Assim sendo, a partir do oitavo dia as simulações começaram a utilizar os dias corridos. A malha adotada de “11 + 11”, ou seja, cada material apresenta 11 seções, e o intervalo de 20 segundos

provou-se adequada e não apresentou dados mais precisos que uma malha mais detalhada de “21 + 21” a cada 5 segundos. A modelagem de Nusselt para a resistência equivalente da água considerou que o processo convectivo do líquido acontece sobre uma placa vertical e não numa câmara enclausurada, cabendo questionamentos. Essa modelagem de convecção sobre parede vertical será tratada nesta dissertação como “Nu2”.

Não é possível se certificar do argumento dos autores de que há troca radiante entre as paredes internas do acrílico – mesmo havendo diferenças menores que 8% entre os resultados medidos e simulados – por não haver um grupo de controle sem trocas radiantes. A troca radiante entre as paredes internas de uma câmara simulada pelos autores (WU; LEI, 2015b) utilizava ar e não água em seu interior e, sendo a água opaca à radiação infravermelha, não cabe a equiparação dos métodos.

O teste de sensibilidade das transwalls com paredes pintadas e com variação de espessura de lâmina de água mostraram que menor transmissão solar reduz o pico térmico do ambiente interno, mas não reduz a temperatura da transwall quando a mesma já estão baixa. Também, a redução da transmissão solar de 90% (situação “padrão” da transwall de acordo com os autores) para 45% atenua significativamente a temperatura da água sem, no entanto, modificar seu padrão de comportamento. Por fim, o aumento da espessura da lâmina de água reduziu significativamente os picos térmicos promovendo menores flutuações da temperatura da água.

Referente às transwalls com corante vermelho, verde e azul, há indícios que os dados estejam equivocados conforme os pontos que serão listados a seguir:

- A medição da transmissão e extinção molar da água sem e com corantes (todas tendo lâmina de 10cm) é feita com uma lâmpada alógena com temperatura de cor de 3200K. Não se conhece o espectro da lâmpada para averiguar sua similaridade ao espectro solar ou, ao menos, ponderá-los;
- Não se apresenta o material da cubeta de ensaio. Logo, a extinção molar apresentada para água, água com corante vermelho, verde e azul tem um segundo material não especificado e que deve interferir na absorção molar. Muito embora tal conhecimento não dificulte a comparação entre essas amostras em si, invalida a

utilização desses dados de extinção molar para outras espessuras ou em cavidades diferentes.

- Pelas medições, percebeu-se que em relação à absorção molar da água ($\alpha_{\text{água}} = 8,7\text{m}^{-1}$), o uso de corante vermelho na água tem um fator de aumento de 1.1; o uso de corante verde de 1.4 e do azul de 1.6, todos com 200ppm (partes por milhão) na Tabela 6. Para a lâmina de 10cm de água, houve um aumento de 58% de absorção para 75% quando se utiliza o corante azul que tem maior absorção.
- Torna-se difícil acreditar que o acréscimo na absorção solar promovido por corantes deverá ter pouco impacto no aquecimento da cavidade e do ambiente anterior como este artigo defende. Além de duvidosa, as conclusões de Wu e Lei contradizem as medições de Nisbet e Mthembu (1992)

Tabela 6: Absorção das amostras com corante de Wu e Lei (2016c)

Amostra	Fator de aumento ($\alpha_{\text{água}}$)	Cálculo de absorção $\alpha = 1 - (e^{L \cdot \eta})^{-1}$	Absorção da camada
Amostra: Água 10cm	-	$\alpha = 1 - (e^{0,1 \cdot 8,7})^{-1}$	58%
Amostra + corante vermelho a 200ppm	1,1	$\alpha = 1 - (e^{0,1 \cdot 8,7 \cdot 1,1})^{-1}$	61%
Amostra + corante verde a 200ppm	1,4	$\alpha = 1 - (e^{0,1 \cdot 8,7 \cdot 1,4})^{-1}$	70%
Amostra + corante azul a 200ppm	1,6	$\alpha = 1 - (e^{0,1 \cdot 8,7 \cdot 1,6})^{-1}$	75%

Fonte: Elaborado pelo autor com os dados de Wu e Lei (2016).

- Os autores utilizam um α médio que possivelmente negligencia resultados, como explicado a seguir. O valor da absorção molar média da transwall proposta é $\alpha_{\text{transwall}} = 2\text{m}^{-1}$. Para calcular o valor da absorção molar média da transwall com corantes os autores apenas multiplicam o $\alpha_{\text{transwall}}$ pelos fatores de aumento listados acima. Esta manobra negligencia o fato de que as camadas de acrílico na espessura da transwall podem modificar o

espectro transmitido até a água com corante e modificar o valor de $\alpha_{\text{transwall+corante}}$ sendo diferente do fator de aumento avaliado. Resumidamente, o uso da absorção molar média serve apenas para descrever com precisão condições com o mesmo espectro radiante, os mesmos materiais e espessuras e, conseqüentemente, não raro se torna um dado obsoleto.

Quanto à comparação dos resultados a partir da temperatura do ambiente interno e não do fluxo de calor pela *transwall* cabem alguns comentários. Os autores apresentam que na maioria dos dias a temperatura medida e simulada do ar no ambiente interno encontra-se bastante acima da temperatura ambiente externa ao longo do dia e levemente acima durante as noites. A partir desses dados, os autores comparam variações de *transwalls* por horas de desconforto por calor. Todavia, sendo que a área da *transwall* ocupa 50% da área do piso e que todas as paredes do container de medição apresentam isolamento térmico pesado e sem ventilação, os dados de temperatura interna não são pertinentes para a comparação de conforto. Em outras condições de paredes, as *transwalls* poderiam contribuir para resfriamento e não aquecimento do ambiente e, portanto, camuflar seu desempenho quando são apresentadas em temperatura e não em fluxo de calor.

2.4 CONCLUSÕES DO REFERENCIAL TEÓRICO

Diante da imprescindibilidade de controlar o ganho térmico e aproveitar a luz natural do sol em climas quentes e da necessidade de consumo consciente de eletricidade nas edificações, pesquisas direcionadas ao comportamento de vidros e outros dispositivos para aberturas na arquitetura são de inquestionável importância.

A disponibilidade de produtos com alta transmissão visível sem distorção de cor justificam a atenção que deve ser dada ao estudo da absorção molar na faixa do infravermelho próximo sem interferir na luz, como as transwalls fazem.

Aponta-se a necessidade de mais estudos avaliando compostos químicos transparentes e com alta absorção entre 800nm e 1500nm, além da água, para serem utilizados em transwalls.

Há também a necessidade de uma comparação entre as modelagens óticas de transwalls utilizadas para que se compare os métodos e bases de dados empregadas e situe o estado da arte no tema. É preciso também validar tais modelagens a partir de medições em laboratório, o que permitirá um modelo ótico como referência para futuros estudos.

Conhecida a complexidade da modelagem de transferência de calor quando envolve o fenômeno convectivo e da absorção de radiação, o uso do Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) parece pertinente aos modelos de transwalls. Cabe avaliar a imprecisão das modelagens de transferência de calor para transwalls e, a partir da devida análise da imprecisão dos modelos do MTSF, permite-se averiguar o atraso e atenuação térmica de transwalls delgadas com diferentes espessuras.

A partir da revisão de literatura das publicações sobre transwalls, percebe-se pouca simulação e experiência em campo do desempenho das mesmas para climas quentes ou/e de seções delgadas. Também, não há nenhuma experimentação com o uso de outros líquidos que tenham coeficiente de absorção molar maior que o da água no espectro do infravermelho próximo, havendo apenas experiências com corantes que absorvem luz.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo de materiais e métodos é dividido em três etapas e nove subetapas de execução da pesquisa (ver Figura 9).

- **ETAPA I - Medições no espectrofotômetro** (2 subetapas): construção de protótipos e medição no espectrofotômetro da transmissão e reflexão no espectro solar de líquidos possivelmente espectroseletivos. Os dados de ensaio da água são posteriormente utilizados como referência para validação da etapa II.

- **ETAPA II – Método e modelagem de absorção de radiação em transwalls** (3 subetapas): Identificação das porcentagens de absorção da radiação da água de acordo com diferentes métodos e modelos de absorção de radiação utilizados. Os resultados de absorção óptica da água são posteriormente utilizados na simulação térmica de transwalls na etapa III.

- **ETAPA III – Método e modelagem de transferência de calor em transwalls** (4 subetapas): avaliação do desempenho térmico de diferentes configurações de transwall em cenários ambientais, métodos e modelos de absorção de radiação solar e modelos de transmissão de calor diferentes.

Figura 9: Fluxograma da execução da pesquisa.



ETAPA I:

A subetapa '*I.1. Seleção de líquidos espectroseletivos*' implica na identificação de líquidos transparentes e espectroseletivos (com absorção entre 800nm e 2500nm). A adoção desta etapa é decorrente de um ensaio prévio com piranômetro realizado no início do mestrado onde se observou que uma solução de água salina reduzia a transmissão solar em relação à água sem solutos, mas mantinha-se transparente.

A subetapa '*I.2 Testes no espectrofotômetro*' inclui a construção de protótipos (cubetas) apropriadas aos ensaios no espectrofotômetro disponível; medição da transmissão e reflexão solar dos líquidos levantados na subetapa anterior, além da caracterização do vidro utilizado nos protótipos.

ETAPA II:

A subetapa '*II.1 Comparação dos métodos de absorção solar e precisão dos dados de entrada*' implica na simulação por quatro métodos óticos distintos de absorção de radiação para um cinco grupos de dados de coeficiente de absorção molar (α) e índice de refração (n) da água, ar e vidro levantados da bibliografia. Os quatro métodos testados são: método sem reflexão; apenas com reflexão externa; reflexão de primeira ordem e reflexão de segunda ordem. Os resultados simulados na etapa II.1 são comparados aos resultados medidos (etapa I.2) para avaliar a precisão dos valores atribuídos à água a partir dos diferentes métodos de modelagem.

A subetapa '*II.2 Comportamento de transmissão solar com variação angular*' implica na simulação ótica utilizando o melhor modelo da etapa II.1, agora com variação angular da irradiância. São elaborados gráficos e tabelas com a porcentagem de absorção radiante a cada 1mm de seção de transwall para lâminas de água de 2mm, 10mm, 50mm e 100mm em amostras com vidro duplo de 3mm. Varia-se o ângulo de radiação incidente entre 0° e 89.9° com discretização a cada 5°.

Os resultados ainda são separados em dois grupos: tabelas com absorção por seção (onde cada milímetro de água absorve radiação como se fosse um sólido) e por média (para a qual a porcentagem total de absorção de radiação na água é distribuída uniformemente para cada milímetro de água –homogeneizando a absorção de radiação no sistema – de forma a corrigir o fenômeno de difusividade térmica intrínseco da água).

A subetapa '*II.3 Incerteza do índice de refração (n) no método de absorção*' avalia o impacto da imprecisão do índice de refração nas simulações de absorção de radiação nas transwalls. A partir de 3 grupos

de índice de refração e suas variações, é possível examinar o impacto de incertezas tanto na refletância, quanto na absorção e transmissão total da transwall.

A ETAPA II utiliza planilha de Excel e o software MatLab para realizar as simulações.

ETAPA III

A subetapa '*III.1 Calibração e convergência do MTSF*' averigua a coerência de intervalos de tempo (Δt) destinados às simulações de transwalls delgadas pelo Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) quando os intervalos entre "nós" (Δx) são de 1mm. Avalia-se também o número de repetições de simulação de um mesmo dia hipotético necessários para que as simulações encontrem-se em estado de convergência para as configurações de 2mm, 10mm, 50mm e 100mm de lâmina de água.

A subetapa '*III.2 Análise de sensibilidade: grupos A, B, C, D*' –em que o grupo A e B se referem a transwalls com 2mm de lâmina de água e os grupos C e D a transwalls com 100mm de lâmina de água –apresenta como doze distintos modelos de simulação para transwall podem divergir no resultado das variáveis dependentes (balanço térmico e Fator solar equivalente) a partir das mesmas variáveis independentes adotadas.

A subetapa '*III.3 Dependência da variação angular*' compara o desempenho energético de transwalls que adotam modelos de absorção de radiação com e sem dependência angular. Utilizam-se dois cenários de uma fachada norte para as quatro configurações de transwall (2mm, 10mm, 50mm e 100mm) com condições amenas de temperatura, pouca influência da convecção externa e irradiação na normal com mesmo valor, diferindo apenas a altura solar em cada um dos casos.

Por fim, a subetapa '*III.4 Análise de desempenho por orientação solar: cenários 1, 2 e 3*' avalia o desempenho das quatro configurações de transwalls (2mm, 10mm, 50mm e 100mm de lâmina de água) sob diferentes condições solares (orientação norte, leste, oeste e sem incidência solar) e cenários externos (temperatura externa do ar, das superfícies, do céu, ângulo e irradiação na normal).

A Etapa III utiliza o software MatLab para realização dos cálculos.

O desenvolvimento do Capítulo III: Materiais e Métodos é alternado em duas partes: (a) 'Descrição dos materiais e métodos' que tem como objetivo listar os dados e formulações utilizados na referida etapa e (b) 'Desenho dos experimentos' que descreve como os materiais

e métodos listados anteriormente foram confrontados afim de alcançar os objetivos da referida pesquisa. Recomenda-se a leitura do glossário para maior clareza aos nomes utilizados ao longo do capítulo.

3.1 ETAPA I: DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS

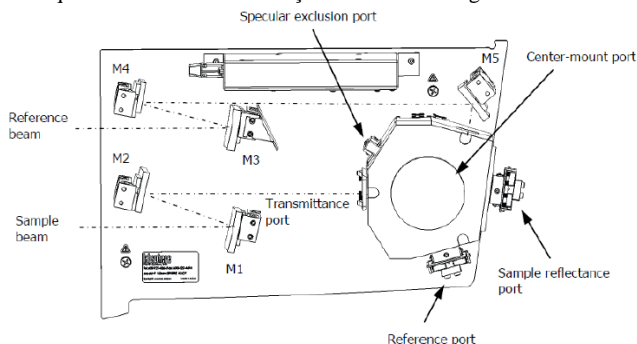
3.1.1 Espectrofotômetro: equipamento, funcionamento e protocolo de uso

O espectrofotômetro é um equipamento que mede a transmissão e reflexão de uma amostra para intervalos de faixa de espectro eletromagnético. O aparelho utilizado para avaliar a transmissão da radiação solar por amostras transparentes foi o Lambda 1050 da PerkinElmer com um módulo de medição de esfera integradora de 150mm do Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) em Florianópolis-SC. O mesmo se enquadra no tipo de espectrofotômetro UV-VIS-NIR, ou seja, que mede o espectro ultravioleta, visível e infravermelho próximo (entre 300 a 2500nm). Mediu-se a transmissão e reflexão frontal por amostra com incidência radiante no ângulo normal. Depois, em uma planilha do Excel já obtidos a reflexão e transmissão por comprimento de onda, pondera-se a potência solar e calcula-se a transmissão, reflexão e absorção solar por comprimento de onda de acordo com a Norma ASTM E903.

O manual especifica como características do equipamento o range de operação entre 175nm a 3300nm, resolução no ultravioleta e no visível menor ou igual a 0.05nm e no infravermelho próximo menor ou igual a 0.20nm. A precisão do comprimento de onda é de ± 0.080 nm para o ultravioleta e visível e ± 0.300 nm para o infravermelho próximo. O equipamento utiliza lâmpada de tungstênio e de deutério.

As luzes emitem o raio que deve rebater nos espelhos (M1, M2, M3, M4 e M5 da Figura 10) até chegar na amostra a ser medida. Os espelhos, que se movem, são cobertos por grelhas holográficas que refletem diferentes espectros de acordo com o ângulo de incidência do raio e assim é filtrado o comprimento de onda. Depois, com radiação já afinada em um comprimento de espectro específico, o raio incidente sobre a amostra é transmitido ou refletido e a espera integradora, por ter detectores de radiação integrados à sua parede interna, quantifica o montante de energia recebida (ver Figura 10).

Figura 10: Esquema do módulo de medição com esfera integradora do Lambda 1050.



Fonte: Sphere Accessories: User's Guide – PerkinElmer 2010.

As medições seguiram o protocolo de uso apontado no trabalho realizado por Marinovski (2010) e Marinovski et al (2013): o equipamento atende aos requisitos da Norma ASTM E903 por medir o espectro entre 300 e 2500nm, utilização de fonte de luz artificial, calibração através de padrões (neste caso foi utilizado o Spectralon® com 100% de refletância em teoria), amostra em contato direto e totalmente cobrindo o orifício da abertura da esfera integradora.

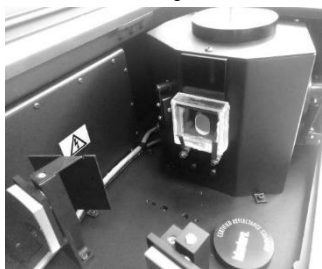
O equipamento foi acionado sempre 20 minutos antes do seu uso, calibrado pelo Spectralon® certificando-se que as tampas estavam fechadas em todas as medições. Adotou-se o intervalo de espectro de 5 em 5nm. A Figura 11 e Figura 12 apresentam fotos do equipamento em uso.

Figura 11: Espectrofotômetro modelo Lambda 1050.



Fonte: Manual PerkinElmer.

Figura 12: Amostra posicionada dentro do espectrofotômetro.



O autor

3.2 ETAPA I: DESENHO DOS EXPERIMENTOS

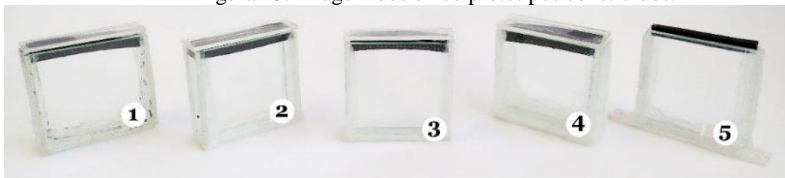
3.2.1 (Subetapa I.1) Seleção de líquidos possivelmente espectroseletivos

A subetapa I.1 engloba revisão de literatura voltada à espectrometria no infravermelho próximo e assessoramentos com especialistas no tema (professores e pesquisadores do Departamento de Química da UFSC) para a seleção de líquidos com possibilidade de filtrar radiação solar mesmo sendo transparentes. Para a primeira abordagem no tema, será pesquisado o assunto nas bases de dados de artigos indexados na bibliografia de espectrometria, bem como escolhidos os líquidos escolhidos em conjunto com professores e pesquisadores do Departamento de Química da UFSC.

3.2.2 (Subetapa I.2) Testes no espectrofotômetro

Para a construção dos protótipos de teste no espectrofotômetro utilizou-se vidro simples 3mm nas faces externas por onde o raio do aparelho atravessa (frontal e traseira). As paredes laterais foram executadas com policarbonato, coladas com cola de silicone e tampadas com uma borracha. Os cinco protótipos (Figura 13) têm altura e comprimento de 50mm sendo que os protótipos 1, 2, 3 e 4 têm 10mm de vão interno e o protótipo 5 tem 2mm.

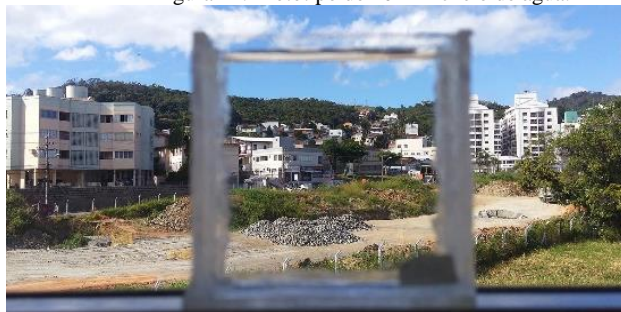
Figura 13: Imagem dos cinco protótipos construídos.



Vão	10mm	10mm	10mm	10mm	2mm
esp. total	16mm	16mm	16mm	16mm	8mm

Todos os protótipos quando preenchidos de líquido transparente apresentaram comportamento especular, permitindo a nítida visualização de um lado ao outro (ver Figura 14).

Figura 14: Protótipo de 10 mm cheio de água.



Todos os líquidos foram ensaiados em protótipos de 10mm de vão e apenas uma amostra de água destilada foi ensaiada no protótipo de 2mm. Também são ensaiados os protótipos vazios (vidro duplo). Os resultados de transmissão e reflexão de cada amostra são ponderados pela potência da radiação solar para cada comprimento de onda de acordo com os dados da ASTM G173-03 (2003). Por fim, encontra-se a absorção total da amostra que é o restante de energia não transmitida ou refletida.

3.3 ETAPA II: DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS

3.3.1 Cálculo das interreflexões em sistemas transparentes de múltiplas faces

Listam-se a seguir as fórmulas de ray tracing para o cálculo das interreflexões em sistemas transparentes de quatro faces de acordo com as equações apresentadas por Pfrommer et al (1995) com substituição do índice de refração complexo n' (que adota a parte imaginária da absorção molar na reflexão) pelo índice de refração comum n . A partir de avaliações prévias, percebeu-se a insignificância para este trabalho do número imaginário para lâminas delgadas de água.

O cálculo de transmissão de radiação em dado comprimento de onda (λ) a partir de um dado caminho (d) a ser percorrido pelo raio dentro de uma matéria a qual tem coeficiente de extinção molar (k) pode ser calculada na base 10 ou na base natural (a depender do material) expressa-se pela Lei de Beer-Lambert [eq. (2)]. A absorção (A) na referida matéria – já desconsiderando os processos de interação nas faces (as refletâncias) – calcula-se pela diferença da transmissão (τ) [eq. (3)].

Lista-se também o cálculo do coeficiente de absorção molar (α) para substâncias homogêneas [eq. (4)]; o método de cálculo para a distância (d) percorrida pelo raio em dado material com espessura (l) a

partir da angulação do raio em relação à normal [eq. (5)]; a angulação propriamente dita formada entre o raio e a normal em um segundo material (θ_2) a partir do ângulo incidente do primeiro material (θ_1) e das diferenças de índice de refração (n_1 / n_2) [eq. (6)] e a refletância entre dois materiais com índice de refração diferentes a partir de um ângulo de incidência e de um comprimento de onda [eq. (7)]. A refletância é calculada pela média da polarização da luz e pode haver diferença de refletância de acordo com o sentido ($\rho_{1 \rightarrow 2}$ pode ser diferente de $\rho_{2 \rightarrow 1}$).

Equação de Beer-Lambert:

$$\tau_{(\lambda,k,d)} = 10^{-\alpha \cdot d} \text{ ou } \exp^{-\alpha \cdot d} \quad (2)$$

Absorção resultante:

$$A = 1 - \tau \quad (3)$$

Coefficiente de absorção molar:

$$\alpha_{\lambda,k} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (4)$$

Distância percorrido em um meio (d) em relação à espessura (l):

$$d = \sec(\theta) \cdot l \quad (5)$$

Angulação resultante da transmissão de um raio entre materiais com índice de refração diferentes:

$$\theta_2 = \arcseno \left[\frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen}(\theta_1) \right] \quad (6)$$

Refletância calculada pela média de polarização da luz:

$$\rho_{(\lambda,\theta)_{1 \rightarrow 2}} = 0.5 \left[\left(\frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right)^2 + \left(\frac{n_2 \cos(\theta_1) - n_1 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_2) + n_2 \cos(\theta_1)} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Onde:

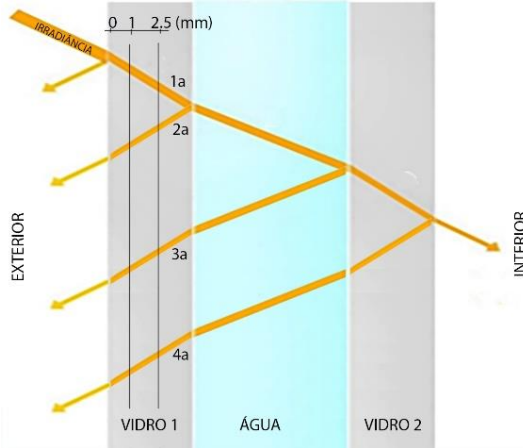
τ	Transmissão de uma amostra (adimensional)
λ	Comprimento de onda (nm)
k	Coefficiente de extinção molar (m^{-1})
d	Distância percorrida por um raio em uma espessura l de dado material (m)
l	Espessura do material (l)
α	Coefficiente de absorção molar (m^{-1})
A	Absorção de uma amostra (adimensional)
θ	Ângulo formado entre a normal e o raio dentro do material
n	Índice de refração de dado material (adimensional)
$\rho_{a \rightarrow b}$	Refletância de um raio dentro do material 'a' incidindo em 'b'

São apresentados quatro métodos de cálculos para balanço de radiação solar (absorção, reflexão e transmissão) para as amostras. Todos os métodos destinam-se a amostras com três materiais e quatro faces de refletância necessariamente. Este trabalho de mestrado não utilizou o método da ISO 15099-2003 com infinitas reflexões por dificuldade de programação. O modelo da ISO 15099-2003 é teoricamente mais preciso porque considera todas as reflexões que ocorrem nas faces de uma transwall utilizando o método de matrizes enquanto o equacionamento de uma transwall por ray tracing, para o qual cada interreflexão recebe uma equação analítica específica, negligencia algumas reflexões ocorridas para simplificação do cálculo uma vez que em vários comprimentos de onda a transmissão de radiação visível da água é total, ou seja, 100%, e este fato pode desestabilizar o método de matrizes.

O desenvolvimento das fórmulas de ray tracing se baseou no trabalho de Papersenos (1983), Nisbet e Mthembu (1992) e de Pfrommer et al (1995). A referência da fórmula da seção específica da transwall se encontra ao lado direito do número da equação em **italico e negrito**, bem como na figura referente ao método (Figura 16 até Figura 19 e Tabela 7 até Tabela 10).

São listados o cálculo separado de todos os raios que atravessam os materiais da transwall, além dos raios refletidos para o exterior ou transmitidos para o interior. Assim sendo, para o cálculo da absorção isolada de radiação em uma dada seção da transwall, é necessário utilizar as fórmulas referentes àquela seção. Se existe alguma outra seção que absorveu radiação antes da seção de interesse, é necessário fazer a diferença entre as partes. Por exemplo na Figura 15, para se conhecer a radiação absorvida na seção entre 1 e 2.5mm é preciso calcular por meio das equações de radiação dos raios 1a, 2a, 3a e 4a a somatória de radiação absorvida de 2.5mm de espessura (0 a 2.5mm) menos a somatória de radiação absorvida em 1mm (0 a 1mm).

Figura 15: Processo de cálculo de absorção das seções de transwall.



No **método 1** (Figura 15 e Tabela 7) não se consideram as reflexões e apenas as transmissões são consideradas;

Figura 16: Método 1 de absorção de radiação.

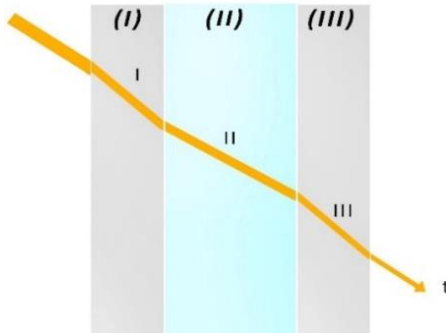


Tabela 7: Método 1: Sem reflexão.

Absorção no 1° vidro	Ref.	Eq.
$I (1 - \exp(-\alpha_I d_I))$	(I)	(8)
Absorção na água		
$I \exp(-\alpha_I d_I) (1 - \exp(-\alpha_{II} d_{II}))$	(II)	(9)
Absorção no 2° vidro		
$I \exp(-\alpha_I d_I) \exp(-\alpha_{II} d_{II}) (1 - \exp(-\alpha_{III} d_{III}))$	(III)	(10)
Transmissão		
$I \exp(-\alpha_I d_I) \exp(-\alpha_{II} d_{II}) \exp(-\alpha_{III} d_{III})$	(t)	(11)

No **método 2** (Figura 17 e Tabela 8) apenas a reflexão externa é considerada além das transmissões de cada material;

Figura 17: Método 2 de absorção de radiação.

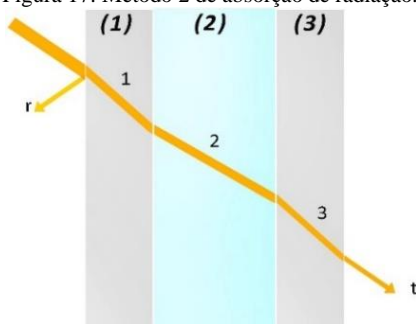


Tabela 8: Método 2: Sem reflexão.

	<i>Ref.</i>	Eq.
Absorção no 1° vidro		
$(I - \rho_{x1}) (1 - \exp(-\alpha_1 d_1))$	(1)	(12)
Absorção na água		
$[(I - \rho_{x1}) \exp(-\alpha_1 d_1) (1 - \exp(-\alpha_2 d_2))]$	(2)	(13)
Absorção no 2° vidro		
$[(I - \rho_{x1}) \exp(-\alpha_1 d_1) \exp(-\alpha_2 d_2) (1 - \exp(-\alpha_3 d_3))]$	(3)	(14)
Reflexão externa		
$(I \rho_{x1})$	(r)	(15)
Transmissão		
$(I - \rho_{x1}) \exp(-\alpha_1 d_1) \exp(-\alpha_2 d_2) \exp(-\alpha_3 d_3)$	(t)	(16)

No **método 3** (Figura 18 e Tabela 9) ocorrem reflexões de primeira ordem em todas as faces, isto é, que um raio muda seu sentido de propagação uma vez e depois sai do sistema de transwall direcionando-se para o exterior (reflexão externa) ou para o interior do edifício (transmissão).

Figura 18: Método 3 de absorção de radiação.

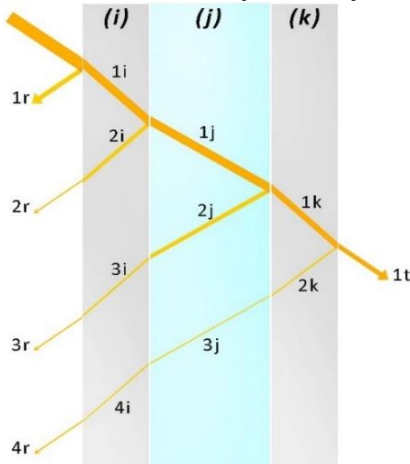


Tabela 9: Método 3: Reflexões de 1ª ordem.

Absorção no primeiro vidro	Ref.	Eq.
$i' = (I - \rho_{xi}) (1 - \exp(-\alpha_i d_i))$		(17)
i'	(1i)	(18)
$i' \rho_{ij} \tau_i \tau_i^x$	(2i)	(19)
$i' (1 - \rho_{ij}) \rho_{jk} (1 - \rho_{ji}) \tau_i \tau_j^2 \tau_i^x$	(3i)	(20)
$i' (1 - \rho_{ij}) (1 - \rho_{jk}) \rho_{kx} (1 - \rho_{kj}) (1 - \rho_{ji}) \tau_i \tau_j^2 \tau_k^2 \tau_i^x$	(4i)	(21)
Absorção na água		
$j' = (I - \rho_{xi}) (1 - \exp(-\alpha_j d_j))$		
$j' (1 - \rho_{ij}) \tau_i$	(1j)	(22)
$j' (1 - \rho_{ij}) \rho_{jk} \tau_i \tau_j \tau_j^x$	(2j)	(23)
$j' (1 - \rho_{ij}) (1 - \rho_{jk}) \rho_{kx} (1 - \rho_{kj}) \tau_i \tau_j \tau_k^2 \tau_j^x$	(3j)	(24)
Absorção no 2º vidro		
$k' = (I - \rho_{xi}) (1 - \exp(-\alpha_k d_k))$		(25)
$k' (1 - \rho_{ij}) (1 - \rho_{jk}) \tau_i \tau_j$	(1k)	(26)
$k' (1 - \rho_{ij}) (1 - \rho_{jk}) \tau_i \tau_j \tau_k \rho_{kx} \tau_k^x$	(2k)	(27)
Reflexão externa		
$(I \rho_{xi})$	(1r)	(28)
$I (1 - \rho_{xi}) \tau_i^2 \rho_{ij} (1 - \rho_{xi})$	(2r)	(29)
$I (1 - \rho_{xi}) (1 - \rho_{ij}) \rho_{jk} (1 - \rho_{ji}) (1 - \rho_{ix}) \tau_i^2 \tau_j^2$	(3r)	(30)
$I (1 - \rho_{xi}) (1 - \rho_{ij}) (1 - \rho_{jk}) \rho_{kx} (1 - \rho_{kj}) (1 - \rho_{ji}) (1 - \rho_{ix}) \tau_i^2 \tau_j^2 \tau_k^2$	(4r)	(31)
Transmissão		
$I (1 - \rho_{xi}) (1 - \rho_{ij}) (1 - \rho_{jk}) (1 - \rho_{kx}) \tau_i \tau_j \tau_k$	(1t)	(32)

No **método 4** (Figura 19 e Tabela 10) ocorrem reflexões de segunda ordem em todas as faces, isto é, que um raio muda o sentido de propagação duas vezes e depois sai do sistema de transwall direcionando-se para o exterior (reflexão externa) ou para o ambiente interior (transmissão).

Figura 19: Método 4 de absorção de radiação.

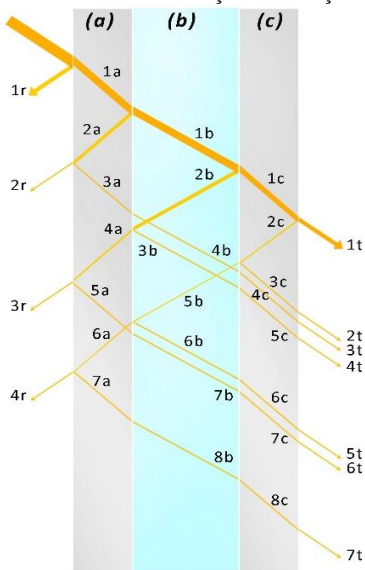


Tabela 10: Método 4: Reflexões de 2ª ordem.

Absorção no 1º vidro	Ref.	Eq.
$A' = [(I - \rho_{xa}) (1 - \exp(-\alpha_a d_a))]$		
A'	(1a)	(33)
$A' \rho_{ab} \tau_a \tau_a^x$	(2a)	(34)
$A' \rho_{ab} \rho_{ax} \tau_a^2$	(3a)	(35)
$A' (1 - \rho_{ab}) \rho_{bc} (1 - \rho_{ba}) \tau_a \tau_b^2 \tau_a^x$	(4a)	(36)
$A' (1 - \rho_{ab}) \rho_{bc} (1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} \tau_a^2 \tau_b^2$	(5a)	(37)
$A' (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) (1 - \rho_{ba}) \tau_a \tau_b^2 \tau_c^2$	(6a)	(38)
$A' (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) (1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} \tau_a^2 \tau_b^2 \tau_c^2$	(7a)	(39)
Absorção na água		
$B' = (I - \rho_{xa}) (1 - \exp(-\alpha_b d_b))$		(40)
$B' (1 - \rho_{ab}) \tau_a$	(1b)	(41)
$B' (1 - \rho_{ab}) \rho_{bc} \tau_a \tau_b \tau_b^x$	(2b)	(42)
$B' (1 - \rho_{ab}) \rho_{bc} \rho_{ba} \tau_a \tau_b^2$	(3b)	(43)
$B' \rho_{ab} \rho_{ax} (1 - \rho_{ab}) \tau_a^3$	(4b)	(44)
$B' (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) \tau_a \tau_c^2 \tau_b \tau_b^x$	(5b)	(45)
$B' (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) \rho_{ba} \tau_a \tau_b^2 \tau_c^2$	(6b)	(46)

$$B'(1 - \rho_{ab})^2 \rho_{bc}(1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} \tau_a^3 \tau_b^2 \quad (7b) \quad (47)$$

$$B'(1 - \rho_{ab})^2 (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} (1 - \rho_{cb})(1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} \tau_a^3 \tau_b^2 \tau_c^2 \quad (8b) \quad (48)$$

Absorção no 2º vidro

$$C' = (I - \rho_{xa}) (1 - \exp(-\alpha_c d_c)) \quad (49)$$

$$C'(1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \tau_a \tau_b \quad (1c) \quad (50)$$

$$C'(1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} \tau_a \tau_b \tau_c \tau_c^x \quad (2c) \quad (51)$$

$$C'(1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} \rho_{cb} \tau_a \tau_b \tau_c^2 \quad (3c) \quad (52)$$

$$C' \rho_{ab} \rho_{ax} (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \tau_a^3 \tau_b \quad (4c) \quad (53)$$

$$C'(1 - \rho_{ab}) \rho_{bc} \rho_{ba} (1 - \rho_{bc}) \tau_a \tau_b^3 \quad (5c) \quad (54)$$

$$C'(1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc})^2 \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) \rho_{ba} \tau_a \tau_b^3 \tau_c^2 \quad (6c) \quad (55)$$

$$C'(1 - \rho_{ab})^2 \rho_{bc} (1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} (1 - \rho_{bc}) \tau_a^3 \tau_b^3 \quad (7c) \quad (56)$$

$$C'(1 - \rho_{ab})^2 (1 - \rho_{bc})^2 \rho_{cx} (1 - \rho_{cb})(1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} \tau_a^3 \tau_b^3 \tau_c^2 \quad (8c) \quad (57)$$

Reflexão externa

$$(I \rho_{xa}) \quad (1r) \quad (58)$$

$$(I - \rho_{xa}) \tau_a^2 \rho_{ab} (1 - \rho_{bc}) \quad (2r) \quad (59)$$

$$(I - \rho_{xa})(1 - \rho_{ab}) \rho_{bc} (1 - \rho_{ba}) (1 - \rho_{ax}) \tau_a^2 \tau_b^2 \quad (3r) \quad (60)$$

$$(I - \rho_{xa})(1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \rho_{cx} (I - \rho_{cb})(1 - \rho_{ba}) (1 - \rho_{ax}) \tau_a^2 \tau_b^2 \tau_c^2 \quad (4r) \quad (61)$$

Transmissão

$$T' = (I - \rho_{xa}) (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) (1 - \rho_{cx}) \tau_a \tau_b \tau_c \quad (62)$$

$$T' \quad (1t) \quad (63)$$

$$T' \rho_{cx} \rho_{cb} \tau_c^2 \quad (2t) \quad (64)$$

$$T' \rho_{ab} \rho_{ax} \tau_a^2 \quad (3t) \quad (65)$$

$$T' \rho_{bc} \rho_{ba} \tau_b^2 \quad (4t) \quad (66)$$

$$T' \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) \rho_{ba} (1 - \rho_{bc}) \tau_b^2 \tau_c^2 \quad (5t) \quad (67)$$

$$T' \rho_{cb} (1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} (1 - \rho_{ab}) \tau_a^2 \tau_b^2 \quad (6t) \quad (68)$$

$$T' \rho_{cx} (1 - \rho_{cb}) (1 - \rho_{ba}) \rho_{ax} (1 - \rho_{ab}) (1 - \rho_{bc}) \tau_a^2 \tau_b^2 \tau_c^2 \quad (7t) \quad (69)$$

Onde:

I Irradiância externa (W);

τ^x Transmissão da espessura restante do material ($1 - d$) necessária para o cálculo de absorção nas primeiras partes discretizadas de um material quando o raio está refletindo no sentido contrário à irradiância externa.

3.4 ETAPA II: DESENHO DOS EXPERIMENTOS

3.4.1 (Subetapa II.1) Comparação dos métodos de absorção solar e precisão dos dados de entrada

A subetapa II.1 destina-se a avaliar os resultados de absorção e transmissão de radiação a partir de diferentes bases de dados e modelos óticos de transwalls utilizando como referência os trabalhos já realizados com transwall. Os resultados simulados são comparados aos resultados ensaiados no espectrofotômetro ou aos dados da tabela de vidros IGDB

do OPTICS 6.0 (LBL, 2013) afim de apontar o método e a base de dados mais coerente para simulações de transwall.

Calcula-se a absorção da irradiação solar por seção de material (sejam os vidros ou o líquido) pelos quatro métodos anteriormente descritos (Método 1, 2 3 e 4) com incidência de radiação normal para 2mm, 10mm e 50mm de lâmina água (e vidros externos de 3mm). A subetapa permite comparar os resultados de transmissão total (Tt) e Absorção total (At) a partir dessa variação de quatro métodos distintos, inclusive utilizados em trabalhos anteriores, conforme a Tabela 11 apresenta.

Além das diferenças de método de modelagem da absorção de radiação, foram utilizadas entradas de dados (coeficiente de absorção e índice de refração do vidro no Gráfico 1 e da água no Gráfico 2) distintas para comparar qual seria mais precisa para a modelagem de transwall.

Foi adicionado às referências o coeficiente de absorção molar (α) e índice de refração (n) do vidro apresentados na literatura de Rubín (1985) e da água presentes na literatura de Hale e Querry (1973), Palmer e Williams (1974) e Segelstein (1981) por serem dados mais precisos do que os utilizados até então nos trabalhos de transwall os quais utilizam valores médios para bandas de comprimento de onda. Todos os dados foram interpolados linearmente entre 300nm e 2500nm a cada 5nm.

Tabela 11: Métodos de cálculo da absorção de radiação e trabalhos relacionados.	
Método de Cálculo	Descrição e autores que utilizam método parecido:
Método 1 (Figura 16)	Sem reflexões <ul style="list-style-type: none"> • <i>Shoda, Bansal e Ram (1983)</i> • <i>Nayak (1987^a, 1987^b)</i> • <i>Upadhyya, Tiwari e Rai (1991)</i> • <i>Tiwari, Upadhyya e Rai (1991)</i> • <i>Wu e Lei (2016c)</i>
Método 2 (Figura 17)	Adoção da reflexão externa apenas <ul style="list-style-type: none"> • <i>Fuchs e McClelland (1977)</i>
Método 3 (Figura 18)	Adota reflexão de 1^a ordem <ul style="list-style-type: none"> • <i>Papersenos (1983)</i> • <i>Nisbet, Kwan (1987)</i> • <i>Nisbet, Mthembu (1992)</i>
Método 4 (Figura 19)	Adota reflexão de 2^a ordem <ul style="list-style-type: none"> • <i>Nenhum dos trabalhos da bibliografia (escrita pelo autor da dissertação)</i>

Gráfico 1: comparação do coeficiente de absorção molar (α) por comprimento de onda do vidro simples (escala logarítmica).

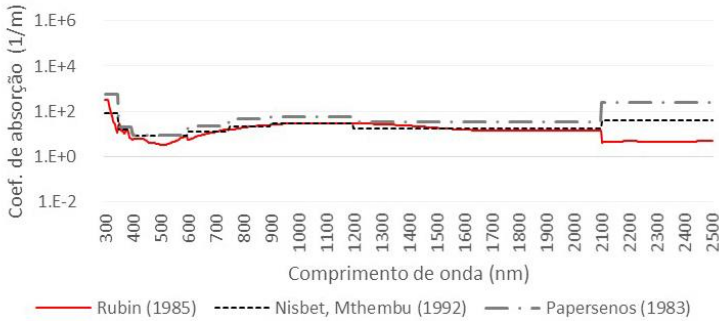
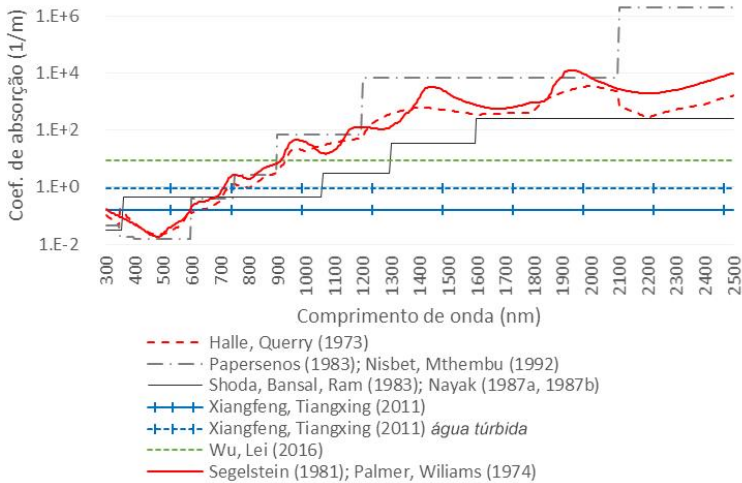


Gráfico 2: comparação do coeficiente de absorção molar (α) por comprimento de onda da água (escala logarítmica).



Tanto no caso dos dados de coeficiente de absorção do vidro, mas em especial no coeficiente de absorção da água, percebem-se diferenças gritantes e a falta de convergência de valores adotados pelos autores tendo como referência a mesma matéria.

Alguns autores nomearam o coeficiente de absorção molar (α) como coeficiente de extinção molar (k) e, conforme a equação (4) na página 62, os dois valores são necessariamente deferentes. Portanto, para evitar confusões, α e k são tratados distintamente neste trabalho, sendo os dois gráficos apresentados anteriormente referentes ao coeficiente de

absorção molar (α). Fuchs e McClelland (1977) não apresentam os valores de absorção no intervalo de radiação adotado, Upadhy, Tiwari, Rai (1991) e Tiwari e Upadhy (1991) apresentam a absorção por espessura de lâmina de água (não trazem os dados do coeficiente de absorção por comprimento de onda separadamente). Por tais razões estes dados foram desconsiderados.

Os dados levantados foram divididos em 5 grupos (A, B, C, D e E) por proximidade dos valores de α e n para sistematização da análise das simulações (

Tabela 12). Os dados omissos, quando ocorreram, foram substituídos pelos dados de Rubin (1985) ou Segelstein (1981) / Palmer e Williams (1974). Os casos omissos são marcados com um asterisco (*).

Especificamente os dados omissos do C utilizam a tabela de índice de refração de Papersenos (1983) porque Nisbet e Mthembu (1982) se referenciam a este trabalho ao longo de seu artigo. Os dados D e E servem como referência de valores mais precisos da água os quais nunca foram utilizados nos trabalhos de transwall anteriormente realizados. Por fim, Rubin (1985) não apresenta valores de α do vidro para 300nm e 305nm, os quais foram substituídos pelos valores de 310nm do mesmo autor.

Tabela 12: Tabela de apresentação da base da dados óticos.

Absorção vidro (α)	Absorção Água (α)	(n) vidro	(n) água
Base de dados A: <i>(Baseados em Shoda et al e Nayak)</i>			
Rubin (1985)*	Shoda et al (1983), Nayak (1987a; 1987b)	Rubin (1985)*	Segelstein (1981), Palmer e Williams (1974)*
Base de dados B: <i>(Baseados em Papersenos)</i>			
Papersenos (1983)	Papersenos (1983)	Papersenos (1983)	Papersenos (1983)
Base de dados C: <i>(Baseados em Nisbet e Mthembu)</i>			
Nisbet, Mthembu (1992)	Nisbet, Mthembu (1992)	Papersenos (1983)*	Papersenos (1983)*
Base de dados D: <i>(Baseados em Hale e Querry)</i>			
Rubin (1985)	Hale, Querry (1973)	Rubin (1985)	Hale, Querry (1973)
Base de dados E: <i>(Baseados em Segelstein e Palmer e Williams)</i>			
Rubin (1985)	Segelstein (1981), Palmer e Williams (1974)	Rubin (1985)	Segelstein (1981), Palmer e Williams (1974)

Uma vez que os quatro métodos de absorção de radiação solar (Método 1, 2 3 e 4) com os 5 grupos de dados (A, B, C, D e E) são realizados, é possível comparar os resultados simulados e os resultados de ensaios no espectrofotômetro para lâminas de água de 2mm e 10mm (subetapa I.2) afim de avaliar a precisão dos métodos e dados.

3.4.2 (Subetapa II.2) Comportamento de transmissão solar com variação angular

A subetapa II.2 tem como objetivo apresentar a absorção por seção de material e a transmissão e absorção total da transwall quando varia-se o ângulo de incidência da irradiância.

Para essa etapa é adotado o método e o grupo de dados simulados na subetapa anterior que apresente maior precisão (relação entre simulações e dados medidos ou tabelados). Os cálculos são realizados para irradiância externa entre o ângulo normal até a perda total da potência do raio pela lei do cosseno (entre 0° e 89.9°) discretizada a cada 5° e as decorrentes mudanças de ângulo na transmissão do raio entre materiais com índice de refração diferentes [eq. (6)].

Além destes gráficos que apresentam o comportamento de absorção e transmissão de radiação nas transwalls, são elaboradas tabelas com estes dados que serão inseridas no Método Transiente de Seções Finitas da Etapa III. São dois tipos de tabelas: uma com a absorção exatamente como apresentada pelas simulações óticas e chamadas de “modelo com absorção por seção” e outro grupo onde a absorção por seção de água é substituída por um valor médio de todas essas absorções de forma a assimilar o efeito da difusividade térmica da água e para o qual se dá o nome de “modelo com absorção média”.

3.4.3 (Subetapa II.3) Incerteza do índice de refração (n) no método de absorção

Enquanto é possível determinar o coeficiente de absorção de soluções não tabeladas ao conhecer-se o coeficiente de extinção molar e a concentração da amostra, não há uma relação analítica para a mudança do índice de refração a partir da concentração de dada solução química. Assim sendo, a subetapa II.3 destina-se a avaliar o impacto que a imprecisão do índice de refração (seja por dados menos precisos ou devido ao uso de soluções) pode ocasionar na absorção e transmissão total de uma amostra. A subetapa, portanto, permite caracterizar a sensibilidade da imprecisão do índice de refração (n) no método ótico das transwalls.

São escolhidas três amostras hipotéticas de fluidos com índice de refração (n) distintos para a análise do impacto da variação de n na reflexão, absorção e transmissão total em protótipos de transwall. Adotou-se o n médio de cada material (neste momento não importando a precisão do valor de n em relação ao comprimento de onda). Seguidamente, os índices são variados entre um intervalo preestabelecido e avalia-se a sensibilidade da imprecisão de n nos resultados de reflexão, absorção e transmissão total das amostras.

O ar, a água e o iodeto de metileno são usados como referência e índice de refração médio para as amostras hipotéticas. Das três amostras escolhidas, o ar representa um índice de refração baixo característico de vários vapores e gases; a água representa o índice de refração abaixo do vidro numa faixa típica para alguns álcoois e soluções e o iodeto de metileno representa um índice de refração mais elevado que o do vidro. Todos os materiais são transparentes e, muito embora o iodeto de metileno se decompõe com a luz tomando cor, os exemplos são apenas hipotéticos e visam avaliar o impacto da variação do índice de refração em diferentes faixas de valores.

Simulam-se vinte valores diferentes de n : dez variações no valor de 0.01 para números maiores e dez para menores que o estabelecido como referência de n , exceto do ar que todas as variações adotadas foram para valores maiores devido à incoerência do uso de índices de refração abaixo de 1 para transwalls. A análise foi feita para o ângulo de incidência de 0° , 45° , 70° e $89,9^\circ$ (Tabela 13). Nesta subetapa adotam-se dois contextos hipotéticos de transmissão do líquido (20% e 90%). O índice de refração do vidro é mantido em 1.517 e sua transmissão é de 90%. O modelo de transwall aqui se refere a um sanduíche ‘vidro-fluido-vidro’ não importando a espessura de cada material uma vez que as transmissões já foram dadas.

Tabela 13: Índice de refração dos materiais analisados e suas variações.

Referência	Índice de refração médio(n)	Variação do n	Contexto	
			1	2
Ar	1	(1 a 1.2)	$\tau=90\%$	$\tau=20\%$
Água	1.333	(1.233 a 1.433)	$\tau=90\%$	$\tau=20\%$
Iodeto de Metileno	1.737	(1.637 a 1.837)	$\tau=90\%$	$\tau=20\%$
Vidro	1.517	Não varia	$\tau=90\%$	$\tau=90\%$

Fonte: Engineering Tool Box (2018).

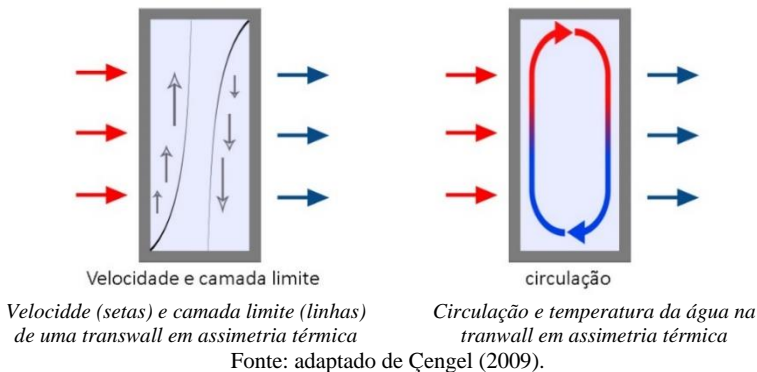
3.5 ETAPA III: DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E MÉTODOS

3.5.1 Transferência de calor em transwalls

Além do fenômeno descrito na etapa II de absorção de radiação ao longo das seções – fenômeno comum entre materiais como vidros, acrílicos e a água – é necessário considerar o processo de transferência de calor na transwall. Há um aumento de complexidade neste processo uma vez que as transwalls englobam o efeito de convecção na água dentro de câmaras enclausuradas.

Há uma característica bastante particular da convecção em câmaras enclausuradas com paredes verticais em temperaturas diferentes que é a centrossimetria convectiva. Nas condições descritas, Bejan (1993, 1995) aponta que ocorre uma camada limite ascendente de um lado e uma descendente de outro, o que deve fazer o fluido circular pelas bordas e manter seu centro fora da movimentação caso as camadas limites não se sobreponham (ver Figura 20). O efeito de diferença de temperatura (ΔT) descrito acima, resultante do aquecimento em um lado e o resfriamento no outro, deverá sofrer modificações e desarranjar a centrossimetria caso existam outras fontes de calor no fluido, como a absorção de irradiação no líquido, trocas radiantes entre as paredes internas se o fluido for transparente à radiação infravermelha longa ou aquecimento das bordas inferiores e superiores.

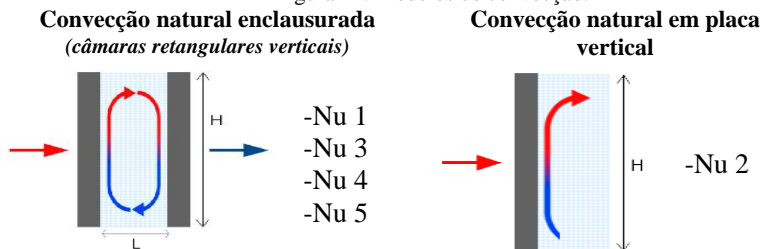
Figura 20: Centrossimetria de fluidos em câmara verticais.



Para o cálculo da condução equivalente da água sob processo de convecção, pondera-se sua condutividade térmica (que tem valor tabelado para dada temperatura) pelo número de Nusselt (Nu). Sabendo-se que os modelos de Nusselt são empíricos, adotam-se cinco modelos para este trabalho, quatro de convecção natural enclausurada em câmaras

retangulares verticais e um de convecção natural e livre em superfície vertical (Figura 21) conforme apresentado em outras literaturas, uma vez que não existe modelo de Nusselt elaborado especificamente para transwalls.

Figura 21: Modelos de convecção.



Fonte: adaptado de Çengel (2009).

O método de cálculo e o range de aplicabilidade de cada modelo são apresentados abaixo entre as equações (70) e (77):

Nusselt (modelo 1):

[quando $10 < H/L < 40$; $1 < Pr < 20$; $10^4 < Ra_L < 10^7$]

$$Nu = 0.42 Ra_L^{1/4} Pr^{0.012} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.3} \quad (70)$$

Nusselt (modelo 2):

[Para toda faixa do número de Rayleigh]

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/5}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{16}\right]^{9/27}} \quad (71)$$

Nusselt (modelo 3):

[quando $1 < H/L < 2$; $\frac{Ra_L Pr}{0.2 + Pr} > 10^3$; qualquer n° de Prandtl]

$$Nu = 0.18 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_L\right)^{0.29} \quad (72)$$

Nusselt (modelo 4):

[quando $2 < H/L < 10$; $Ra_L < 10^{10}$; qualquer n° Prandtl]

$$Nu = 0.22 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_L\right)^{0.28} \left(\frac{H}{L}\right)^{-1/4} \quad (73)$$

Nusselt (modelo 5):

[quando $1 < H/L < 40$; $1 < Pr < 20$; $10^6 < Ra_L < 10^9$]

$$Nu = 0.46 Ra_L^{1/3} \quad (74)$$

*Nusselt 2 provém de Wu e Lei (2016c)

**Nusselt 3 e 4 provém de Berkovsky e Polevikov (1977) apud Çengel (2009)

***Nusselt 1 e 5 provém de MacGregor e Emery (1969) apud Çengel (2009)

A condutividade equivalente e os outros números necessários para calcular Nusselt são dados a seguir da equação (75) até (77):

Condutividade equivalente da água:

$$k_{eq} = k_{\text{água}} Nu \quad (75)$$

Número de Prandt:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (76)$$

Número de Rayleigh:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (77)$$

Onde

Nu	<i>Número de Nusselt (adimensional)</i>
Ra	<i>Número de Rayleigh do comprimento característico (adimensional)</i>
Pr	<i>Número de Prandt (adimensional)</i>
Gr	<i>Número de Grashof (adimensional)</i>
H	<i>Altura da câmara de água (m)</i>
L	<i>Largura da câmara de água (m)</i>
c_p	<i>Calor específico do material analisado (J/Kg.K)</i>
μ	<i>Viscosidade cinemática (m²/s)</i>
α	<i>Difusividade térmica (m²/s)</i>
k_{eq}	<i>Condutividade equivalente da água (W/mK)</i>
$k_{\text{água}}$	<i>Condutividade sem convecção da água (W/mK)</i>
g	<i>Aceleração gravitacional (m/s²)</i>
β	<i>Coefficiente de expansão volumétrica (1/K)</i>
ν	<i>Viscosidade cinemática do fluido (m²/s)</i>
T_s	<i>Temperatura de superfície (K)</i>
T_∞	<i>Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (K)</i>

As propriedades térmicas do vidro (Tabela 14) são referentes à temperatura de 25°C enquanto as propriedades da água (Tabela 15) são interpoladas linearmente entre 0° a 80°C.

Tabela 14: Propriedades termofísicas do vidro.

Temperatura	ρ	c	k	μ
<i>K/°C</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>J/Kg.K</i>	<i>W/m.k</i>	<i>Kg/m.s</i>
298 / 25	2530	840	1	-

Fonte: Çengel (2009).

Tabela 15: Propriedades termofísicas da água.

Temperatura	ρ	c	k	μ	Pr	β
<i>K/°C</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>J/KgK</i>	<i>W/mK</i>	<i>Kg/ms</i>	-	<i>1/K</i>
273 / 0	999.8	4217	0.651	0.001792	13.5	-6.8E-05
278 / 5	999.9	4205	0.571	0.001519	11.2	0.000015
283 / 10	999.7	4194	0.58	0.001307	9.45	0.000733
288 / 15	999.1	4185	0.589	0.001138	8.09	0.000138
293 / 20	998	4182	0.598	0.001002	7.01	0.000195
298 / 25	997	4180	0.607	0.000891	6.14	0.000247
303 / 30	996	4178	0.615	0.000798	5.42	0.000294
308 / 35	994	4178	0.623	0.00072	4.83	0.000337
313 / 40	992.1	4179	0.631	0.000653	4.32	0.000337
318 / 45	990.1	4180	0.637	0.000596	3.91	0.000415
323 / 50	988.1	4181	0.644	0.000547	3.55	0.000451
328 / 55	985.2	4183	0.649	0.000504	3.25	0.000484
333 / 60	983.3	4185	0.654	0.000467	2.99	0.000517
338 / 65	980.4	4187	0.659	0.000433	2.75	0.000548
358 / 80	961.1	4201	0.673	0.000333	2.08	0.00067

Fonte: Çengel (2009).

Assume-se nesta pesquisa que a complexidade de forma da câmara de uma transwall (sendo apenas uma câmara enclausurada) e os efeitos de borda do sistema (vedações laterais) não justificariam um método de cálculo mais complexo que o Método Transiente de Seções Finitas unidimensional, o qual foi adotado.

Os apêndices A, B e C trazem o processo detalhado do cálculo de balanço térmico, processos convectivos naturais e do método transiente de seções finitas.

-Apêndice A: Balanço Térmico (página 170)

-Apêndice B: Processos Convectivos Naturais (página 173)

-Apêndice C: Método Transiente de Seções Finitas (página 176)

Para o Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) de transwalls utiliza-se o método explícito (dependente das temperaturas na seção no instante anterior) e são apresentados sete nós distintos com seus respectivos cálculos. Os nós também podem ser repetidos quantas vezes seja necessário para completar a espessura do material, uma vez que o intervalo entre nós (Δx) adotado neste estudo é de 1mm.

Como apresentado na Figura 22, os nós 1 e 7 consideram convecção do ar externo e condução no vidro; os modelos 2, 4 e 6 consideram apenas condução sendo que no caso do modelo 4 a condução é equivalente devido ao processo convectivo da água. Os nós 3 e 5 apresentam três modelos de troca de calor sendo eles o modelo padrão (apenas processo de convecção com as faces da água e condução, T3 ou T5), modelo com troca radiante de I.V. longo entre as faces de vidro (T3-RAD ou T5-RAD) como se não houvesse massa com absorção de radiação entre eles (p.ex. a água) e modelo com o dobro de massa de vidro para compensar a perda inevitável de metade da massa da última seção de vidro em contato com a água, fato que é ocasionado pelo equacionamento do MTSF (T3-DOBRO ou T5-DOBRO). A Tabela 16 apresenta as referidos cálculos por nó que vão da equação (78) até (88).

Todas as seções absorvem irradiação conforme o modelo de absorção de radiação com reflexões de segunda ordem e dependência angular (o qual já foi apresentado anteriormente).

Figura 22: Seções do Método Transiente de Seções Finitas.

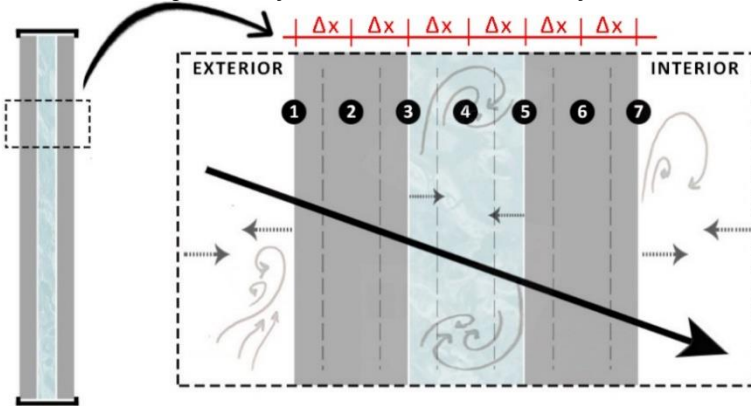


Tabela 16: Equações do MTSF.

$$T_1^{t=i+1} = 2F_{O_v} \left\{ Bi_{ext}(T_{ar_{ext}} - T_1) \right. \quad (78)$$

$$+ \frac{\Delta x}{k_v} \left[0,5 \sigma \varepsilon (T_{c\u00e9u}^4 - T_1^4)(T_{viz_{ext}}^4 - T_1^4) \right. \\ \left. + A \right] - (T_1 - T_2) \left. \right\} + T_1$$

$$T_2^{t=i+1} = F_{O_v} \left[T_1 + T_2 \left(-2 + \frac{1}{F_{O_v}} \right) + T_3 + \frac{\Delta x}{k_v} A \right] \quad (79)$$

$$T_3^{t=i+1} = 2F_{O_v} \left\{ (T_2 - T_3) - Bi_L(T_3 - T_4) + \frac{\Delta x}{k_v} A \right\} + T_3 \quad (80)$$

$$T_{3-RAD}^{t=i+1} = 2F_{O_v} \left\{ (T_2 - T_3) - Bi_L(T_3 - T_4) + \frac{\Delta x}{k_v} (-\sigma \varepsilon (T_3^4 - T_5^4) \right. \\ \left. + A) \right\} + T_3 \quad (81)$$

$$T_{3-DOBRO}^{t=i+1} = F_{O_v} \left\{ (T_2 - T_3) - Bi_L(T_3 - T_4) + \frac{\Delta x}{k_v} A \right\} + T_3 \quad (82)$$

$$T_4^{t=i+1} = F_{O_L} \left[T_3 + T_4 \left(-2 + \frac{1}{F_{O_L}} \right) + T_5 + \frac{\Delta x}{k_L} A \right] \quad (83)$$

$$T_5^{t=i+1} = 2F_{O_v} \left\{ Bi_L(T_4 - T_5) + \frac{\Delta x}{k_v} A - (T_5 - T_6) \right\} + T_5 \quad (84)$$

$$T_{5-RAD}^{t=i+1} = 2F_{O_v} \left\{ Bi_L(T_4 - T_5) + \frac{\Delta x}{k_v} (\sigma \varepsilon (T_3^4 - T_5^4) + A) \right. \\ \left. - (T_5 - T_6) \right\} + T_5 \quad (85)$$

$$T_{5-DOBRO}^{t=i+1} = F_{O_v} \left\{ Bi_L(T_4 - T_5) + \frac{\Delta x}{k_v} A - (T_5 - T_6) \right\} + T_5 \quad (86)$$

$$T_6^{t=i+1} = F_{O_v} \left[T_5 + T_6 \left(-2 + \frac{1}{F_{O_v}} \right) + T_7 + \frac{\Delta x}{k_v} A \right] \quad (87)$$

$$T_7^{t=i+1} = 2F_{O_v} \left\{ (T_6 - T_7) - Bi_{int}(T_7 - T_{ar_{int}}) \right. \\ \left. + \frac{\Delta x}{k_v} (-\sigma \varepsilon (T_7^4 - T_{int}^4)) \right\} + T_7 \quad (88)$$

Onde:

$F_{O(\)}$ Número de Fourier de um dado material;

$Bi_{(\)}$ Número de Biot de um dado material;

Δx	Distância entre os nós analisados (m);
Δt	Intervalo de tempo adotado (s);
$T_{(i)}^{t=i+1}$	Temperatura do instante posterior (K);
$T_{(i)}$	Temperatura do instante anterior (K);
$k_{(i)}$	Condutividade ou condutividade equivalente (para os líquidos) do material;
$\sigma \varepsilon$	Constante de Boltzmann multiplicada pela emissividade de material;

Como condições de borda, foram criados três modelos de temperatura externa tendo eles pico e vale térmico às 15h e 6h consecutivamente. Utilizou-se de interpolação cúbica de forma que a temperatura no início e fim do dia (0h) fossem as mesmas, bem como a garantia de que as máximas e mínimas não ultrapassassem os valores designados.

- Modelo 1 – "Verão": Temperatura máxima de 35°C e mínima de 26°C;
- Modelo 2 – "Verão ameno": Temperatura máxima de 26°C e mínima de 21°C;
- Modelo 3 – "Inverno ameno": Temperatura máxima de 21°C e mínima de 18°C.

Para o cálculo de temperatura de céu foram utilizadas as equações apresentadas pelo Engineering Reference do EnergyPlus (2018) para os três modelos de temperatura externa (modelo 1, 2 e 3) sob nenhuma nebulosidade ($N=0$).

Os modelos de temperatura externa e temperatura de céu são apresentados no Gráfico 3 e utilizam as equações (89) até (91).

Temperatura superficial do céu

$$T_{c\acute{e}u} = \left(\frac{Hor_{IR}}{\sigma} \right)^{1/4} \quad (89)$$

Intensidade I.V. horizontal

$$Hor_{IR} = \varepsilon_{c\acute{e}u} \sigma \text{Temperatura}_{\text{bulbo seco}}^4 \quad (90)$$

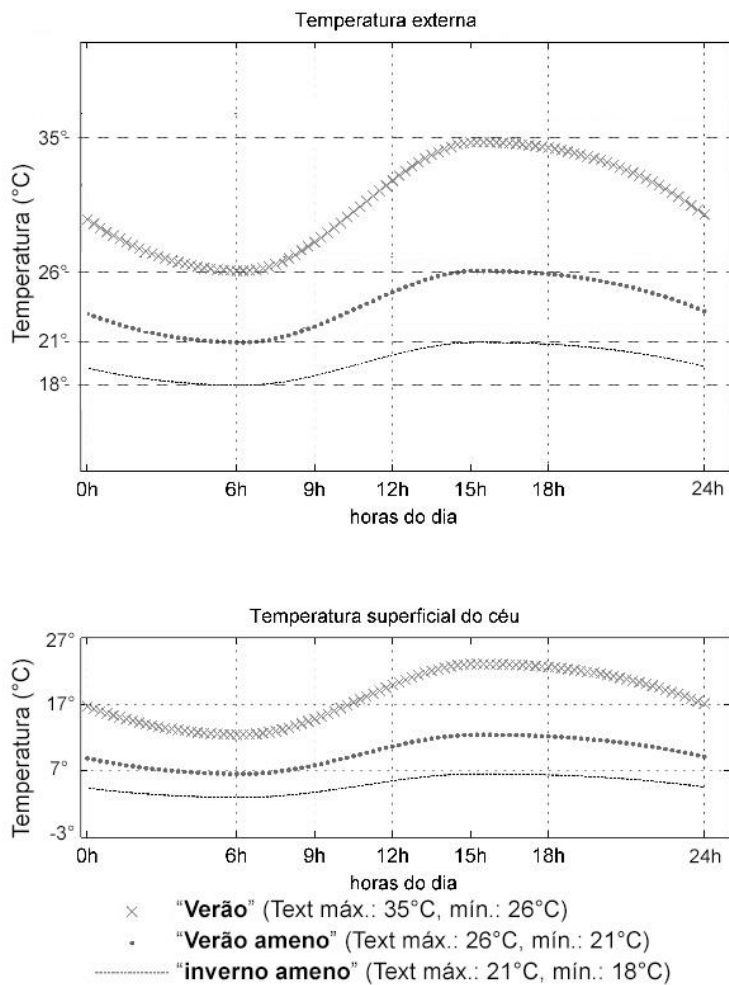
Emissividade do céu

$$\varepsilon_{c\acute{e}u} = (0.787 + 0.764 \ln(\text{Temperatura}_{\text{bulbo seco}} / 273)) (1 + 0.224N - 0.035N^2 + 0.00028N^3) \quad (91)$$

Onde

$T_{c\acute{e}u}$	Temperatura do céu (K)
Hor_{IR}	Intensidade I.V. horizontal ($Wm^{-2}K^{-4}$)
σ	Constante de Stepan-Boltzmann
$\varepsilon_{c\acute{e}u}$	Emissividade do céu (adimensional)
N	Nebulosidade do céu (de 0 a 1)

Gráfico 3: Modelos de temperatura externa e temperatura de céu.

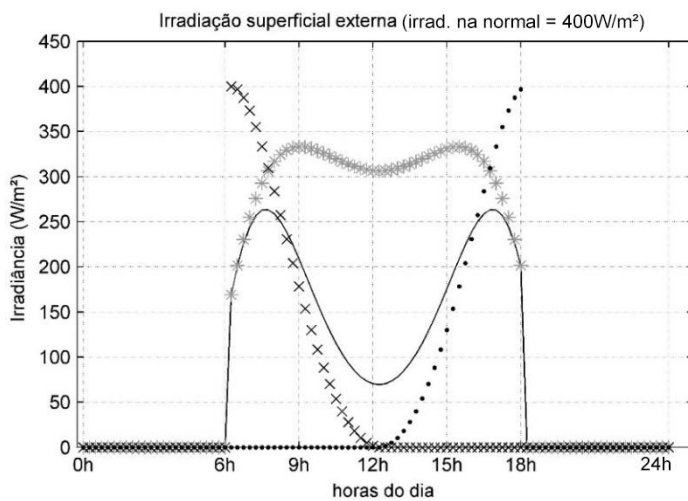
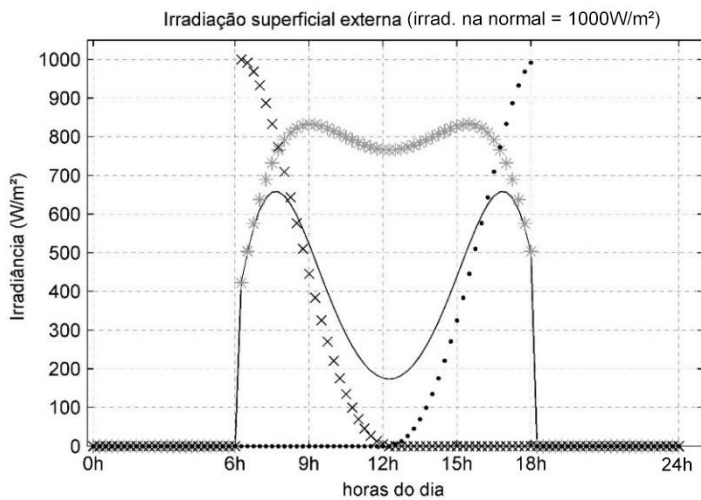


De forma a simular o posicionamento do sol, foram modelados quatro tipos de ângulos solares totalmente hipotéticos, dois referentes à uma fachada voltada ao Equador (ang. solar 1 e 2) e que neste trabalho será chamada de ‘orientação norte’ com irradiação ao longo de todo o dia; uma para a fachada leste (ang. solar 3) com irradiação no período da manhã e outro para oeste (ang. solar 4) com irradiação vespertina. Considera-se que o nascer e pôr do sol acontecem às 6h e 18h respectivamente. Os quatro modelo de ângulo solar são ainda simulados para uma constante de 1000W/m^2 e outra de 400W/m^2 , resultando em oito modelos de irradiação (ver Tabela 17 e Gráfico 4).

Tabela 17: Tabela de ângulos solares.

	06:00h	12:00h	18:00h
“Norte, sol a pino” (Ângulo Solar 1)	$\Theta_{\text{horizontal}} = 65^\circ$ Altura solar = 0°	$\Theta_{\text{horizontal}} = 0^\circ$ Altura solar = 80°	$\Theta_{\text{horizontal}} = 65^\circ$ Altura solar = 0°
“Norte, sol inclinado” (Ângulo Solar 2)	$\Theta_{\text{horizontal}} = 65^\circ$ Altura solar = 0°	$\Theta_{\text{horizontal}} = 0^\circ$ Altura solar = 40°	$\Theta_{\text{horizontal}} = 65^\circ$ Altura solar = 0°
“Leste” (Ângulo Solar 3)	$\Theta_{\text{horizontal}} = 0^\circ$ Altura solar = 0°	$\Theta_{\text{horizontal}} = 0^\circ$ Altura solar = 90°	-
“Oeste” (Ângulo Solar 4)	-	$\Theta_{\text{horizontal}} = 0^\circ$ Altura solar = 90°	$\Theta_{\text{horizontal}} = 0^\circ$ Altura solar = 0°

Gráfico 4: Modelos de ângulo solar.



- * "Norte, sol a pino" Ang. solar 1 (altura solar máx: 80°)
- × "Norte, sol inclinado" Ang. solar 2 (altura solar máx: 40°)
- × "Leste" Ang. solar 3
- "Oeste" Ang. solar 4

3.6 ETAPA III: DESENHO DOS EXPERIMENTOS

3.6.1 (Subetapa III.1) Calibração e convergência do MTSF

Para o teste de calibração e convergência dos resultados utilizando o Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) foram modelados dez casos de transwall apresentados na Tabela 18. O objetivo da avaliação da convergência é identificar a quantidade de dias necessários para que os resultados do balanço térmico diário se repetissem (dias para entrar em estado de convergência). Utilizaram-se quatro espessuras de lâmina de água (2mm, 10mm, 50mm e 100mm) com dois modelos de absorção de radiação (por média ou por seção). Averigua-se também a precisão do intervalo de tempo entre cálculo (Δt) e a convergência a partir de diferentes temperaturas iniciais das seções de água.

Todos os modelos adotam:

- Temperatura interna (do ar e de superfície) mantida a 23°C;
- Temperatura externa modelo 1 “Verão” (máx. 35°C, mín. 26°C) – [p. 81];
- Ângulo solar modelo 1 “Norte com sol à pino” ; irradiação na normal de 1000W/m² - [p.83];
- Coeficiente de convecção externo e interno de 8 W/m²K;
- Modelo de Nusselt 1 - [p. 75];
- Relação entre altura e largura (H/L) da cavidade de água de 40;
- Propriedades termofísicas da água variáveis –[p. 77];
- Propriedades do vidro constantes a 25°C;
- Intervalo de espaço (Δx) de 1mm;
- Modelos padrões de nós de transferência de calor (T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7) não havendo troca radiante entre as faces internas dos vidros, nem dobro de massa – [p. 79];
- Método de absorção de radiação com refletância de 2^a ordem e com dependência angular – [p. 67];
- Modelo de absorção por seção ou absorção média para 2mm, 10mm, 50mm e 100mm de lâmina de água.

Admite-se que as aberturas são suficientemente grandes e desconsidera-se os efeitos de perda de calor pelas bordas da transwall sendo o fluxo de calor unidimensional e bidirecional. Todas as temperaturas iniciais do grupo de modelos I e II e o caso IV foram setadas para valores próximos de 23°C. No caso III utiliza-se a temperatura inicial das seções próximo a 7°C para analisar a convergência de balanço térmico a partir de temperaturas iniciais divergentes. Para as amostras do grupo I, II e o caso III aplica-se o intervalo de tempo (Δt) de 0.5s No caso IV avalia-se o aumento na precisão de resultados reduzindo o intervalo de tempo de 0.5s para 0.25s.

Tabela 18: Lista de casos simuladas.

Caso	Espessura da Lâmina de água	Temperatura inicial das seções empregada	Modelo de absorção de radiação solar	Δt
I1	2 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Por seção	0,5s
I2	10 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Por seção	0,5s
I3	50 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Por seção	0,5s
I4	100 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Por seção	0,5s
II1	2 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Média	0,5s
II2	10 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Média	0,5s
II3	50 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Média	0,5s
II4	100 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Média	0,5s
III	10 mm	$\sim 7^{\circ}\text{C}$	Por seção	0,5s
IV	10 mm	$\sim 23^{\circ}\text{C}$	Por seção	0,25s

3.6.2 (Subetapa III.2) Análise de sensibilidade: grupos A, B, C, D

Nesta etapa é realizada a análise de sensibilidade dos modelos de cálculo de transferência de calor (MTSF) se avaliando as divergências entre os resultados de temperatura por seção de material, balanço térmico e Fator solar equivalente para transwalls setadas com os mesmos parâmetros. A etapa permite avaliar como parâmetros de simulação que não são variáveis independentes podem modificar os resultados obtidos.

Aplicam-se 12 parâmetros distintos de MTSF para amostras de transwall e estes são avaliados nos quatro grupos: Grupo de casos A e B com lâmina de água de 2mm e grupo de casos C e D com lâmina de água de 100mm. Os grupos A e C representam cenários de verão e os grupos B e D, cenário de inverno ameno. Cada grupo tem uma configuração de MTSF base, a qual foi escolhida pelo autor como a mais próxima do fenômeno Físico e cada uma das outras configurações de MTSF variam um quesito do MTSF base.

A setagem para os quatro casos bases (1A, 1B, 1C e 1D) apresenta as referidas configurações:

- Intervalo de tempo de simulação (Δt) de 0.5s e intervalo de espaço (Δx) de 1mm;
- Temperatura interna (do ar e superficial) mantida a 24°C ;
- Propriedades termofísicas da água variáveis -[p. 77];
- Propriedades do vidro constantes a 25°C ;
- Modelo de Nusselt 1- [p. 75];
- Convecção externa (hext) de $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ e interna (hint) de $8 \text{ W/m}^2\text{K}$;

- Dependência angular e absorção média adotadas como modelo de absorção de radiação (calculados a partir de reflexões de segunda ordem nos vidros);
- Modelos padrões de nós de transferência de calor (T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7) - [p. 79];
- Temperatura por seção sem homogeneização da temperatura da água nem duplicação da massa do vidro em contato com a água.

Cada grupo de casos teve características de condições climáticas e cavidades da câmara diferentes. Os grupos A e B se destinam a avaliar o suposto comportamento de transwalls delgadas atuando como pano de vidro em fachadas e os grupos C e D avaliam seções espessas e baixas de água.

Grupo de casos A

- Lâmina de água de 2mm;
- Relação de altura por largura da lâmina de água (H/L) de 500;
- 2 dias para entrar em estado de convergência (avaliação dos dados do terceiro dia simulado);
- Ângulo solar 2 com irradiação na normal de 1000W/m^2 - [p.83];
- Temperatura externa modelo 1 (máx. 35°C , mín. 26°C) - [p. 81].

Grupo de casos B

- Lâmina de água de 2mm;
- Relação de altura por largura da lâmina de água (H/L) de 500;
- 2 dias para entrar em estado de convergência (avaliação dos dados do terceiro dia simulado);
- Ângulo solar 1 com irradiação na normal de 400W/m^2 - [p.83];
- Temperatura externa modelo 3 (máx. 21°C , mín. 18°C) - [p. 81].

Grupo de casos C

- Lâmina de água de 100mm;
- Relação de altura por largura da lâmina de água (H/L) de 10;
- 3 dias para entrar em estado de convergência (avaliação dos dados do quarto dia simulado);
- Ângulo solar 2 com irradiação na normal de 1000W/m^2 - [p.83];
- Temperatura externa modelo 1 (máx. 35°C , mín. 26°C) - [p. 81].

Grupo de casos D

- Lâmina de água de 100mm;
- Relação de altura por largura da lâmina de água (H/L) de 10;
- 3 dias para entrar em estado de convergência (avaliação dos dados do quarto dia simulado);
- Ângulo solar 1 com irradiação na normal de 400W/m^2 - [p.83];
- Temperatura externa modelo 3 (máx. 21°C , mín. 18°C) - [p. 81].

A partir do casos base (1A, 1B, 1C e 1D), todos os grupos tiveram as modificações pontuais no modelagem do MTSF e que configuram os casos nomeados de 2 a 12 conforme listado abaixo. O grupo de casos A ainda teve um 13º caso para o qual se adotaram as configurações do caso base 1A, mas no modelo de temperatura externa 3 (máx. 21°C, mín. 18°C). Em outras palavras, é a mesma setagem do caso base descrito anteriormente, mas com uma modificação pontual do MTSF para testar a sensibilidade desses parâmetros. A nomenclatura do caso e a modificação adotada a partir do caso base são listadas a seguir:

- **(caso 2)** Utiliza-se o modelo de Nusselt 2 ao invés do 1;
- **(caso 3)** Utiliza-se o modelo de Nusselt 3 ao invés do 1;
- **(caso 4)** Utiliza-se o modelo de Nusselt 4 ao invés do 1;
- **(caso 5)** Utiliza-se o modelo de Nusselt 5 ao invés do 1;
- **(caso 6)** Propriedades da água constantes a 25°C;
- **(caso 7)** Modelo de absorção de radiação por seção;
- **(caso 8)** Modelo que utiliza os nós T3-RAD e T5-RAD, com troca de radiação entre os vidros nas faces em contato com a água (substitui os modelos T3 e T5);
- **(caso 9)** Temperatura do céu constante à -15°C (258K);
- **(caso 10)** Modelo que utiliza os nós MTSF T3-DOBRO e T5-DOBRO, com massa do vidro em dobro nesta seção para compensar a perda de massa necessário para o método transiente de seções finitas (substitui os modelos T3 e T5);
- **(caso 11)** modelo com homogeneização da temperatura da água a cada cálculo;
- **(caso 12)** Modelo com negligência do fenômeno de convecção da água (água “sólida”).

3.6.3 (Subetapa III.3) Dependência da variação angular

Para avaliar a dependência da variação angular na precisão dos resultados dos modelos de absorção radiante foram simuladas as quatro espessuras de lâmina de água (2mm, 10mm, 50mm e 100mm) sub duas condições: com e sem variação angular. Simula-se o modelo de absorção de radiação com variação angular entre 0° e 89.9° e outro modelo com absorção constante no ângulo normal (0°), ambos com modelo de absorção média tanto para o ângulo solar 1 quanto para o 2.

Utilizam-se os dados da água com propriedades termofísicas variáveis (p. 77), vidro com propriedades constantes a 25°C, modelo de temperatura externa 2 “Verão ameno” (máx. 25°C, mín. 21°C), relação H/L de 40, convecção externa e interna de 8 W/m²K. Os resultados são

apresentados em Fator solar equivalente e horário e em fluxo para o ambiente interno comparados à irradiância externa.

3.6.4 (Subetapa III.4) Análise de desempenho por orientação solar: cenários 1,2 e 3

Afim de comparar o desempenho de diferentes configurações de transwalls para orientações e cenários climáticos distintos, simulam-se as quatro espessuras de lâmina de água (2mm, 10mm, 50mm e 100mm) para quatro condições de fachada (sem incidência solar e orientação norte, leste, oeste) em três cenários climáticos externos.

Orientação solar

- Ângulo solar 2 “Fachada norte, sol inclinado”;
- Ângulo solar 3 “Fachada leste”;
- Ângulo solar 4 “Fachada oeste”;
- Sem incidência de radiação solar.

Cenários ambientais

- Cenário 1: irradiação na normal de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e variação de temperatura externa modelo 1 “Verão”;
- Cenário 2: irradiação na normal de $400\text{W}/\text{m}^2$ e variação de temperatura externa modelo 1 “Verão”;
- Cenário 3: irradiação na normal de $400\text{W}/\text{m}^2$ e variação de temperatura externa modelo 3 “Inverno ameno”.

As configurações de simulação assemelham-se à setagem dos casos base da subetapa III.2, mas com relação H/L no valor de 40, convecção externa de $15\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ e interna de $8\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Os resultados são apresentados em balanço energético e Fator solar equivalente.

4 RESULTADOS

A apresentação dos resultados obedece a ordem das etapas listadas no método.

- **Etapa I:** resultados da espectrometria dos protótipos de transwall;
- **Etapa II:** resultados comparativos da modelagem ótica das transwalls e
- **Etapa III:** resultados da modelagem de transferência de calor em transwalls.

Ao longo do processo de execução do método proposto, ocorreram algumas peculiaridades e que serão explicadas a seguir para tornar o entendimento dos resultados mais fluido. Foram realizados 413 casos de simulação e ensaios (Tabela 19).

Tabela 19: Número de simulações ou ensaios por etapa.

	Subetapa .1	Subetapa .2	Subetapa .3	Subetapa .4
Etapa I	-	14 ensaios	-	-
Etapa II	64 simulações	74 simulações	120 simulações	-
Etapa III	32 simulações	49 simulações	16 simulações	44 simulações

Fonte: O autor.

Os resultados das medições no espectrofotômetro e parte da modelagem ótica pode ser plotado pelo Excel e apresentam melhor resolução de imagem. Já os gráficos relacionados ao desempenho térmico precisaram ser tratados no MatLab devido ao volume de dados tratados (cada dia de simulação da etapa III no MatLab exigiu 172800 linhas de iteração com propriedades interpoladas) e, conseqüentemente, há uma limitação na qualidade gráfica das peças.

As amostras de Isopropanol, Água salobra, solução de NH_4Cl e de polietilenoglicol da etapa I.2 que são listadas na Tabela 14 foram danificadas e coube substituir o valor da porcentagem de reflexão total destes protótipos pelo valor referente à água destilada com mesma espessura de líquido. Tais casos recebem um asterisco na Tabela 20.

Os gráficos de Fluxo de calor e Fator Solar equivalente da Etapa III, embora calculados no intervalo de meio segundo, são plotados adotando o valor pontual obtido de 15 a 15 minutos. A integral do balanço térmico é calculada com intervalo de 1 segundo.

4.1 (Subetapa I.1) Seleção de líquidos possivelmente espectroseletivos

Diante da dificuldade de encontrar literatura detalhada de líquidos transparentes com absorção no Infravermelho próximo; a partir de um experimento que constatou redução na transmissão da irradiação solar de uma solução salina em relação à água natural com o uso de um piranômetro no início deste mestrado e por recomendações provenientes do Departamento de Química da UFSC, escolheu-se as seguintes amostras para teste no espectrofotômetro para este primeiro experimento de espectrofotometria de transwalls:

Amostras de água:

- Água destilada;
- Água encanada de Florianópolis, SC;
- Água encanada de Foz do Iguaçu, PR;

Soluções em água:

- Água salobra (NaCl, 20% de concentração);
- Sal de amônia (NH₄Cl, 20% de concentração);
- Polietilenoglicol (10% de concentração);
- Amostras de álcoois:
- Metanol;
- Etanol;
- Isopropanol;

Ácidos:

- Ácido acético.

Todas as misturas químicas utilizaram compostos para análise (P.A.), foram preparadas no Departamento de Química da UFSC e envazadas corretamente, exceto o isopropanol (P.A.) que foi comprado em farmácia. O escolha da água de Foz do Iguaçu-SC e de Florianópolis-PR se deu pela praticidade de coleta.

4.2 (Subetapa I.2) Testes no espectrofotômetro

A Tabela 20 apresenta os dados de transmissão visível (T_{vis}) e solar (T_{solar}) medidos no espectrofotômetro no ano de 2017 (o mês e o dia encontram-se na tabela). A reflexão frontal e traseira das amostras apresentou valores idênticos, implicando que os resultados de transmissão independem do lado da transwall analisado. Os resultados ainda são comparados ao vidro Azuria (IGDB 5039) e ao vidro verde (IGDB 3024).

Tabela 20: Amostras ensaiadas.

AMOSTRA	data	T _{vis}	T _{solar}
Vidro simples (3mm)	31/03	90,3%	84,8%
Protótipo vazio (10 mm vão)	17/03	81,8%	72,5%
Protótipo vazio (2 mm vão)	31/03	81,8%	72,5%
Água destilada (10 mm)	31/03	88%	64,1%
Água encanada de Florianópolis (10 mm)	17/03	87,8%	63,8%
Água encanada de Foz do Iguaçu (10 mm)	31/03	88%	64%
*Água destilada (2 mm)	06/04	87,9%	68,9%
Ácido Acético (10 mm)	06/04	85,8%	65,6%
Etanol (10 mm)	06/04	87,4%	64,7%
Metanol (10 mm)	06/04	87,4%	65%
*Isopropanol (10 mm)	06/04	87,7%	65,9%
*Água salobra (NaCl, 20% conc.) (10 mm)	06/04	88,1%	64,3%
*Solução NH ₄ Cl (20% conc.) (10 mm)	06/04	86,8%	63,2%
*Polietilenoglicol (10% conc.) (10 mm)	06/04	90,4%	66%
Vidro verde (IGDB 3024) **	-	52,9%	79,8%
Azuria 12mm (IGDB 5039) **	-	18,7%	48,5%

Observação: Todas as amostras líquidas foram medidas entre dois vidros simples 3mm;

**Adotou-se a reflexão da água no protótipo com 10mm de vão;*

*** Obtido pelo Optics (LBNL, 2007)*

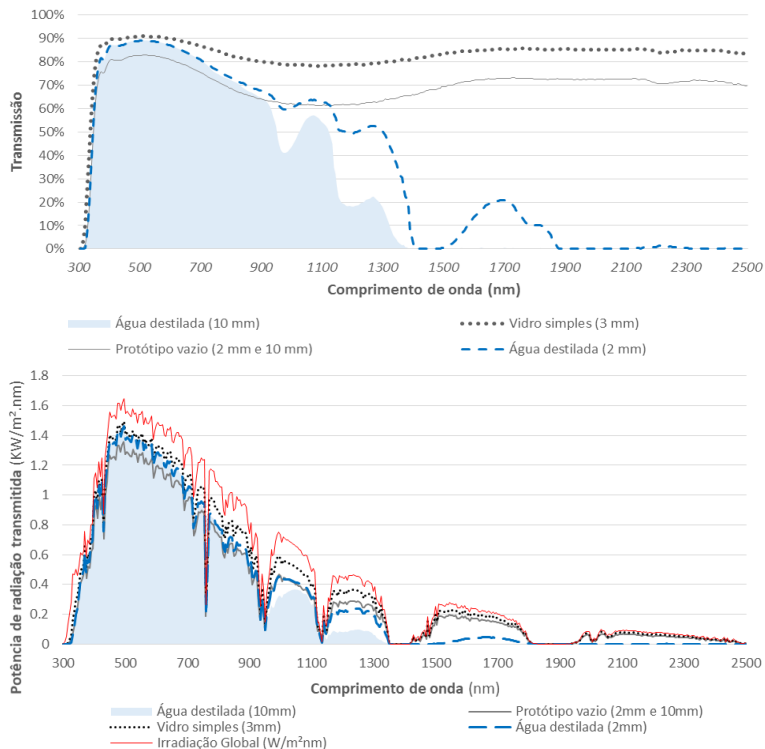
A Tabela 20 e o Gráfico 5 revelam uma característica bastante peculiar de que um sistema de configuração de ‘vidro – água – vidro’ transmite mais luz que ‘vidro – ar – vidro’ (vidro duplo). O vidro simples apresentou alta transmissão de radiação em todo o espectro solar com pico no espectro visível (como já conhecido). O vidro duplo (protótipo vazio) apresentou uma curva muito parecida, porém, com menor transmissão. Não houve diferença entre a transmissão do protótipo vazio variando-se a espessura do vão de ar.

Curiosamente, a transmissão de radiação da água no espectro visível é mais alta que a do vidro duplo e margeou, pelos testes no espectrofotômetro, a curva do vidro simples mesmo tendo o protótipo de água mais matéria para absorver radiação. A explicação para este fenômeno se deve às múltiplas reflexões que ocorrem dentro deste sistema a partir da diferença de refração entre vidro-ar e vidro-água e à baixa absorção de radiação da água no espectro visível (que tende a zero em alguns comprimentos de onda e quando a espessura da lâmina de água é delgada).

Enquanto a água transmite mais no espectro visível, sua absorção reduz drasticamente a transmissão no I.V. próximo, anulando a transmissão em vários comprimentos de onda quando utilizada a lâmina com 10mm de água. Percebe-se também no Gráfico 5 que mesmo a lâmina de 2mm já

apresenta intensa redução da transmissão em vários comprimentos de onda do infravermelho.

Gráfico 5: Transmissão solar (a) e potência de radiação solar transmitida (b) de amostras de vidro e água.



O Gráfico 6 e Gráfico 7 mostram que todos os líquidos testados apresentaram substancial redução na transmissão de radiação I.V., porém nenhuma amostra absorve mais que a água nesta faixa espectral. As soluções apresentadas no gráfico Gráfico 7 ocasionam pouca modificação na curva de transmissão da água. O fato expõe que os compostos químicos adicionados à água não absorvem no comprimento da radiação solar uma vez que não apresentaram picos maiores que a água.

Gráfico 6: Transmissão solar das amostras de álcoois e ácido acético.

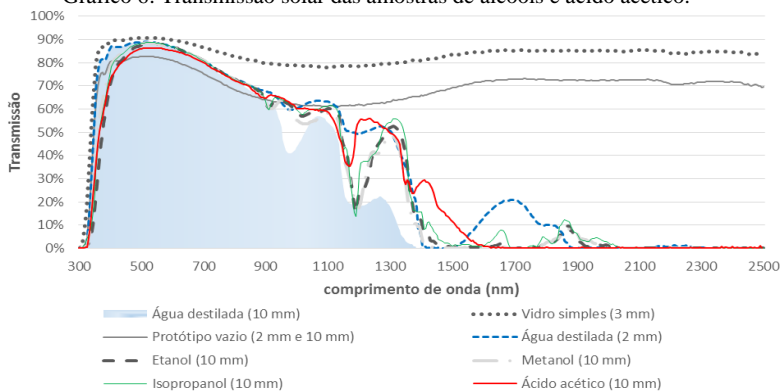


Gráfico 7: Transmissão solar de soluções aquosas.

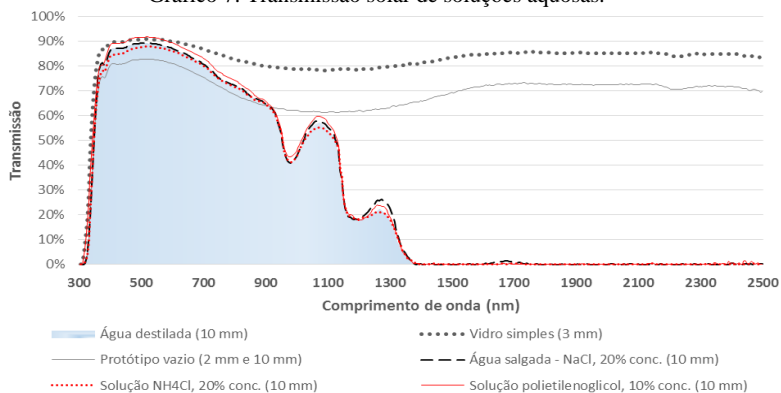
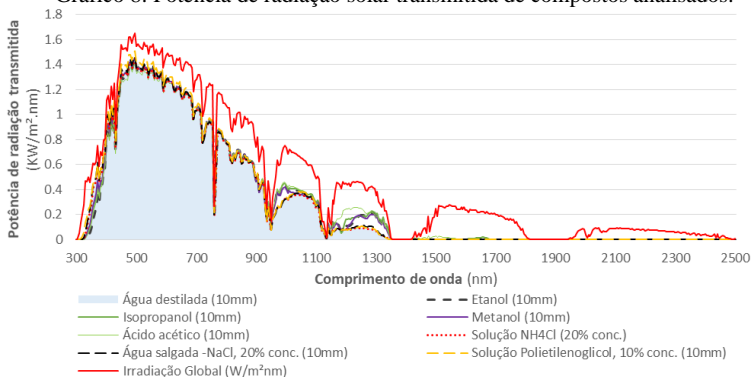
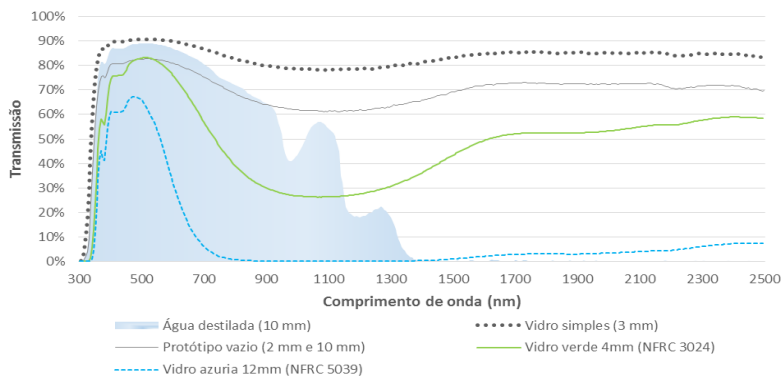


Gráfico 8: Potência de radiação solar transmitida de compostos analisados.



O Gráfico 9 compara a espectroseletividade da lâminas de água de 10mm com o vidro verde 4mm o o vidro Azuria 12mm.

Gráfico 9: Transmissão solar dos vidros comparativos.



Fonte: O autor e dados do software OPTICS 6.0 (LBNL, 2013)

Em relação ao vidro verde 4mm, a água tem melhor desempenho e consegue transmitir mais luz (88% contra 52.8%) e passar menos raios infravermelhos (64% contra 79.8% de transmissão solar), além de não apresentar coloração. Quando comparada ao vidro Azuria 12mm (com 18.7% de T_{vis} e 48,5% de T_{solar}), a água apresenta pior desempenho na passagem de calor, porém, permite-se uma ampla discussão da efetiva contribuição de um vidro com apenas 18.7% na passagem de luz, mesmo tendo alta espectroseletividade. Não obstante, há outros vidros que poderiam ser comparados, mas estes dois apresentados permitem elucidar o potencial de passagem de luz e redução de calor de transwalls com água.

4.3 (Subetapa II.1) Comparação dos métodos de absorção solar e precisão dos dados de entrada

A partir deste tópico são apresentados os resultados das simulações óticas das transwalls.

Do Gráfico 10 ao Gráfico 12 são apontadas as diferenças dos resultados de absorção para transwalls com 2, 10 e 50mm de lâmina de água variando-se os métodos de reflexão entre método sem reflexão (1, plotado em azul); método apenas com reflexão externa (2, plotado em vermelho); método com interreflexões de primeira ordem (3, plotado em cinza) e método com interreflexões de segunda ordem (4, plotado em amarelo). Os quatro métodos – e substancialmente os métodos 1, 2, 3 – apresentam resultados muito próximos. Percebe-se uma tendência de a reflexão de segunda ordem (método 4) reduzir a absorção dos protótipos de transwall, exceto para a base de dados 3 onde o primeiro vidro absorve

mais com o aumento das interreflexões. Todas as bases de dados óticas de vidro e água (A, B, C, D e E, disponíveis na página 71) corroboram o fato de a primeira camada de água absorver significativamente mais energia que as camadas seguintes. Há uma diferença, no entanto, na suavização da absorção de energia nas camadas posteriores à primeira camada quando utilizam-se bases de dado com intervalo de banda menores e mais precisos (D e E).

Enquanto o método implica em pequenas mudanças de porcentagem de absorção e transmissão das amostras, a mudança da base de dado tem impacto mais significativo nos resultados e pode ser vista ao comparar-se os gráficos de absorção (Gráfico 10 ao Gráfico 12) ou pelas tabelas de absorção e transmissão total (Tabela 21 até Tabela 23)

A absorção de radiação na água é caracterizada por uma curva logarítmica. Por mais que as amostras deste trabalho com 2mm de água – que têm apenas 2 pontos de plotagem da curva de absorção – resultem em uma relação linear, uma discretização mais detalhada das seções provavelmente substituiria o comportamento linear pelo logarítmico.

Gráfico 10: Absorção solar por seção (2mm água) – Métodos 1, 2, 3 e 4 vs. Bases de dados A, B, C, D e E.

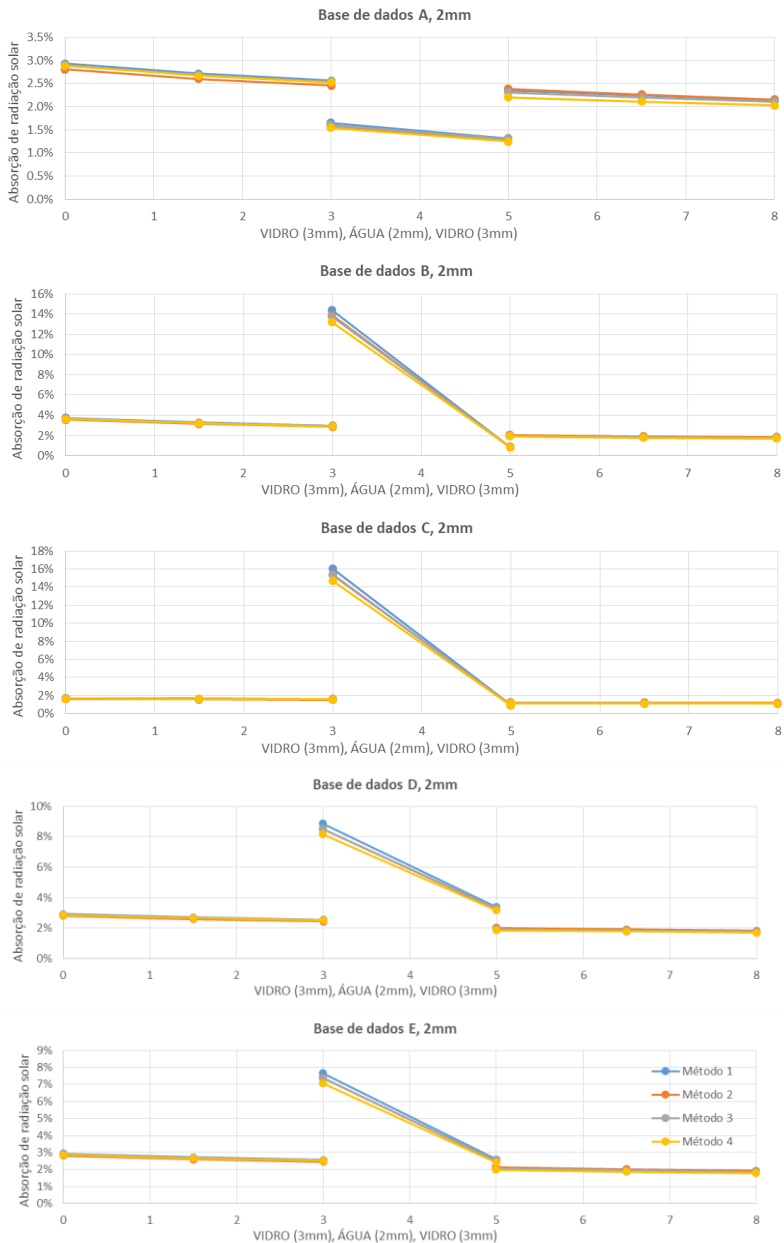


Gráfico 11: Absorção solar por seção (10mm água) – Métodos 1, 2, 3 e 4 vs. Bases de dados A, B, C, D e E.

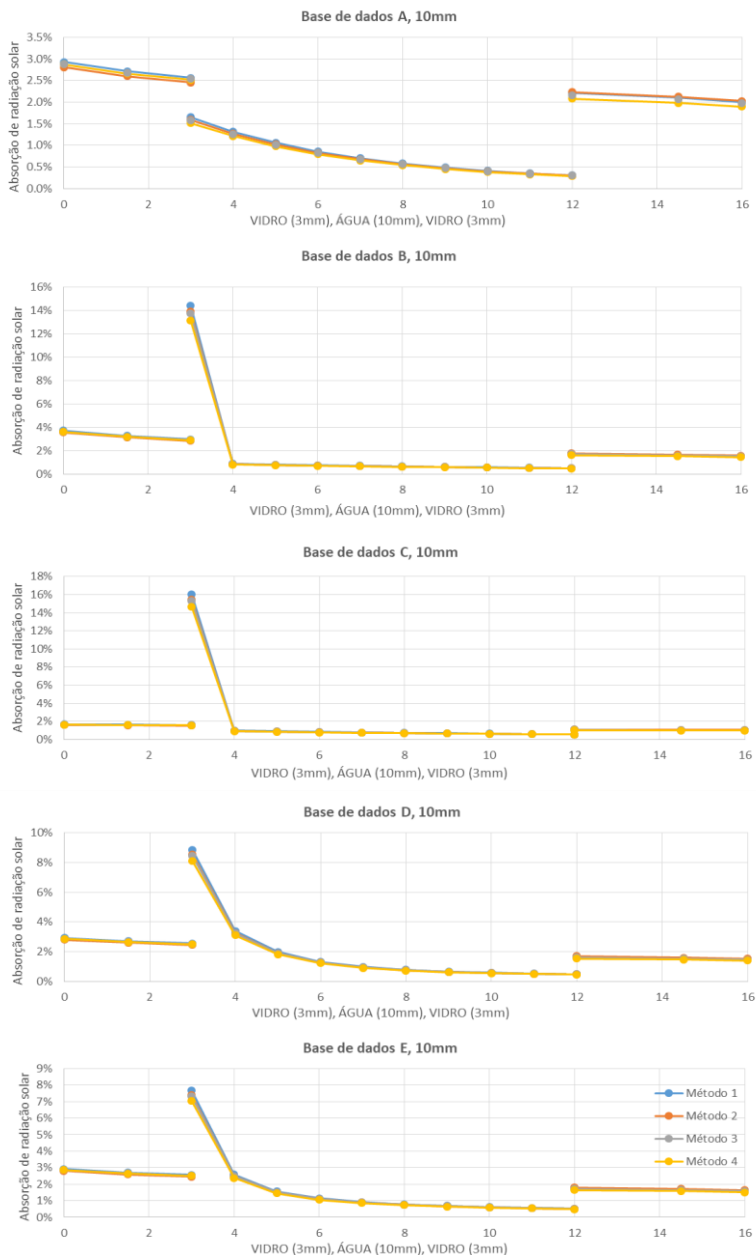
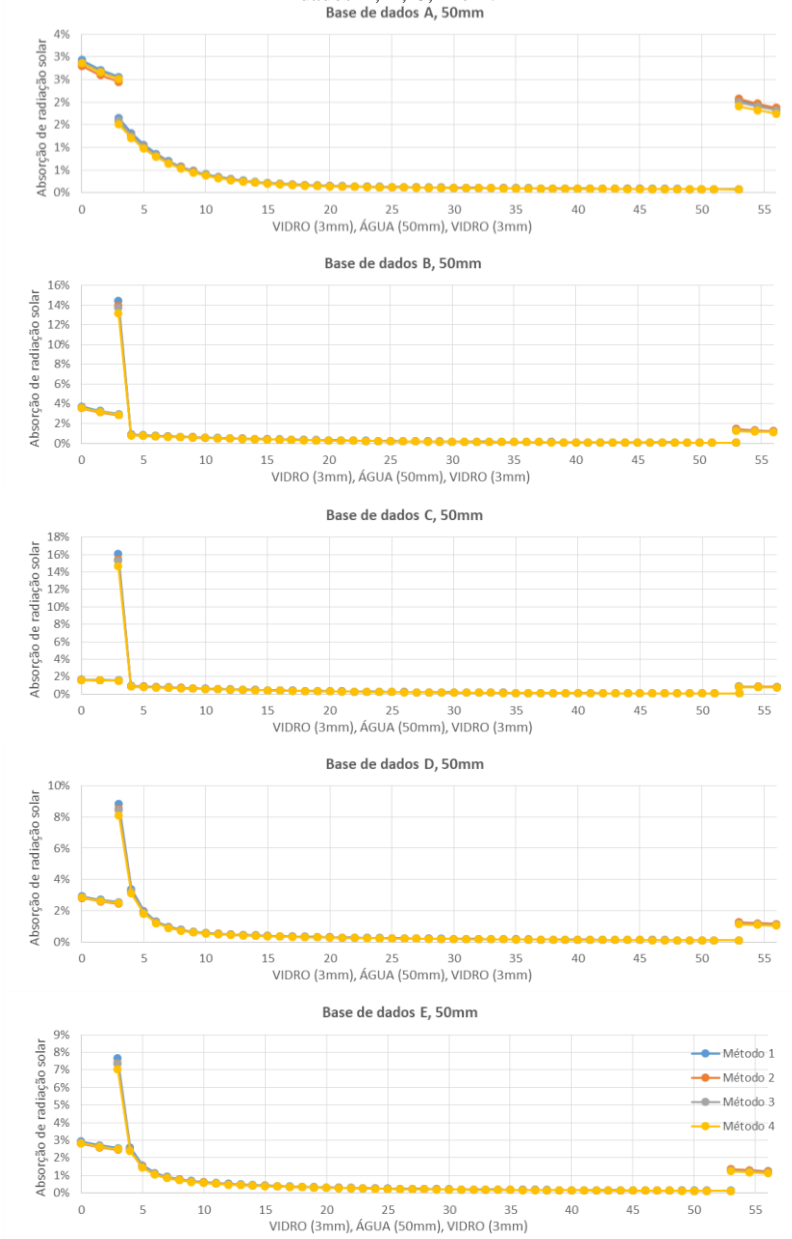


Gráfico 12: Absorção solar por seção (50mm água) – Métodos 1, 2, 3 e 4 vs. Bases de dados A, B, C, D e E.



A comparação entre as cinco bases de dado com método 4 (interreflexões de 2ª ordem) para 2, 10 e 50mm de água em relação às medições no espectrofotômetro de 2mm e 10mm de lâmina de água apontam que majoritariamente os dados da base de dados E chegam mais próximos aos resultados de medições (quanto mais cinza o grifo na Tabela 21 e Tabela 22, mais distante dos valores medidos). Apenas na amostra de 2mm de água o método 3 (interreflexões de 1ª ordem, Tabela 21) se aproximou mais que o método 4 na transmissão solar (0.25% de diferença), fato que poderia ser apresentado como variação de resultados da medição no espectrofotômetro e não invalida o argumento apresentado anteriormente. A Tabela 23 apresenta os resultados para a lâmina de 50mm sem os grifos em cinza uma vez que não houve medição no espectrofotômetro para essa lâmina de água. Ainda, a precisão dos resultados do método 4 pode ser averiguada pela Tabela 24 a qual apresenta os dados de absorção e transmissão do vidro duplo comparados aos resultados amostrados no espectrofotômetro e com a base de dados do IGDB.

Tabela 21: Absorção e Transmissão solar (2mm) – Métodos vs. Base de dados

	Absorção solar 2mm				Transmissão solar 2mm			
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4
A	17.90%	17.51%	17.64%	17.20%	82.10%	78.60%	74.57%	74.30%
B	30.90%	30.11%	29.96%	29.05%	69.10%	66.23%	62.96%	62.73%
C	25.42%	24.61%	24.60%	23.74%	74.58%	71.48%	67.96%	67.72%
D	26.09%	25.40%	25.42%	24.65%	73.91%	70.74%	67.11%	66.87%
E	24.42%	23.79%	23.83%	23.13%	75.58%	72.34%	68.63%	68.38%
			Medição:	21.50%			Medição:	68.90%

Tabela 22: Absorção e Transmissão solar (10mm) – Métodos vs. Base de dados

	Absorção solar 10mm				Transmissão solar 10mm			
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4
A	22.23%	21.68%	21.74%	21.13%	77.77%	74.44%	70.62%	70.37%
B	35.33%	34.39%	34.20%	33.11%	64.67%	61.98%	58.92%	58.71%
C	30.63%	29.62%	29.63%	28.55%	69.37%	66.48%	63.20%	62.98%
D	32.37%	31.46%	31.36%	30.33%	67.63%	64.72%	61.38%	61.17%
E	30.31%	29.47%	29.41%	28.48%	69.69%	66.70%	63.27%	63.04%
			Medição:	28.00%			Medição:	64.10%

Tabela 23: Absorção e Transmissão solar (50mm) – Métodos vs. Base de dados

	Absorção solar 50mm				Transmissão solar 50mm			
	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4
A	26.58%	25.87%	25.91%	25.12%	73.42%	70.27%	66.66%	66.42%
B	41.80%	40.63%	40.27%	38.93%	58.20%	55.78%	53.03%	52.84%
C	38.20%	36.90%	36.75%	35.38%	61.80%	59.22%	56.31%	56.11%
D	39.56%	38.41%	38.16%	36.84%	60.44%	57.83%	54.84%	54.64%
E	38.07%	36.97%	36.77%	35.52%	61.93%	59.26%	56.20%	56.00%

Tabela 24: Absorção solar (vidro duplo 3mm) – (Rubin,1985).

Absorção solar (vidro duplo 3mm)				
Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Medição (espectrofotômetro): <u>13.79%</u>
15.18%	14.89%	14.97%	14.88%	SHGC (IGDB): <u>16.87%*</u>
Transmissão solar (vidro duplo 3mm)				
Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Medição (espectrofotômetro): <u>72.48%</u>
84.82%	81.20%	71.26%	71.50%	SHGC (IGDB): <u>70.33%</u>

* Diferença do total pela transmissão e reflexão frontal solar

Fonte: O autor e tabela IGDB (pelo software OPTICS 6.0).

O aumento da espessura da lâmina de água (de 2mm a 10mm) apresentou melhor precisão dos resultados simulados quando comparados em relação aos ensaios espectrofotométricos. Mesmo assim, a maior diferença de resultados para a transwall – que ocorreu na amostra de 2mm de água – foi de 23.13% para 21.50% (diferença de 1.63%).

A comparação para um sistema de vidro duplo (Tabela 24) entre os dados simulados pelo método 4 e base de dados de Rubin (1985) para resultados ensaiados no espectrofotômetro e a base de dados da NFRC apontam que o resultado da modelagem simulada (14.88%) fica entre o resultado de absorção pelo método de ensaio (com 13.79%) e a apresentada na base de dados NFRC (16.87%) sendo a maior diferença o valor de 1.99% entre a simulação e os dados da NRFC e 1.09% entre a simulação e o ensaio no espectrofotômetro. O mesmo padrão se repete para a transmissão, ainda com menor diferença de resultados que a absorção (<1.99%).

Utilizando-se as simulações com dados E e o método 4, as amostras com 2mm, 10mm e 50mm de água (Tabela 21 até Tabela 23) em relação ao vidro duplo (Tabela 24) reduzem em 2.6%, 7.4% e 15.5% a transmissão solar. Embora a absorção de 50mm de água é o dobro da lâmina de 10mm, os dados comparados da Tabela 22 e 23 apontam a perda de potência em absorver radiação para lâminas maiores de água em relação às primeiras seções do líquido, muito embora lâminas maiores

absorverão mais ou tanto quanto uma lâmina com espessura inferior (nunca haverá redução de absorção com lâminas maiores do mesmo líquido). Comparativamente há um aumento de 5 vezes a espessura entre as lâminas de 2mm para 10mm enquanto que a redução da transmissão solar em relação ao vidro simples aumenta apenas em 2.8 vezes. Entre as lâminas de 2mm e 50mm ocorre o aumento de 25 vezes a espessura do líquido, mas apenas o dobro da redução da amostra de 10mm (5.96 vezes).

É possível ainda apontar que:

- A espectrometria das transwalls com água apresentam transmissão muito elevada no espectro visível, como mostrado na etapa I.2. Assim sendo, um certo vidro pode ter o mesma transmissão solar da transwall, mas é possível que o desempenho ótico da transwall ainda seja mais espectroseletivo;
- A transmissão solar pode não ser um bom dado de comparação para desempenho térmico de um ambiente por desconsiderar a radiação de onda longa e, por isso, cabe a avaliação do fator solar equivalente apresentado nas próximas subetapas.

4.4 (Subetapa II.2) Comportamento de transmissão solar com variação angular

As quatro configurações de transwall (2mm, 10mm, 50mm e 100mm de água apresentadas no Gráfico 13 até o Gráfico 16) são simuladas para a variação de 0° a 89.9° do ângulo de incidência de radiação externa. Calcula-se o ângulo de radiação incidente e a distância percorrida em cada transição de material de acordo com o índice de refração por seção. Os dados de absorção apresentam-se por seção de 1mm de material para 0°, 25°, 50°, 75° 85° e 89.9° e os dados de transmissão apresentam-se por variação angular de 0 a 89.9° para a espessura completa da transwall.

Observa-se em todas as amostras o comportamento de que entre 0° e até próximo de 65° em relação á normal, a absorção das quatro configurações de transwall apresentam valores constantes.

É preciso considerar que, com a variação angular, aumenta-se a distância percorrida pela radiação dentro dos materiais e, conseqüentemente, ocorre maior absorção de radiação por volta de 45° a 60°. Por outro lado, por volta dos 65° a transmissão (e conseqüente absorção dos materiais posteriores ao primeiro vidro) é reduzida pela maior refletância do vidro externo.

Gráfico 13: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 2mm de água.

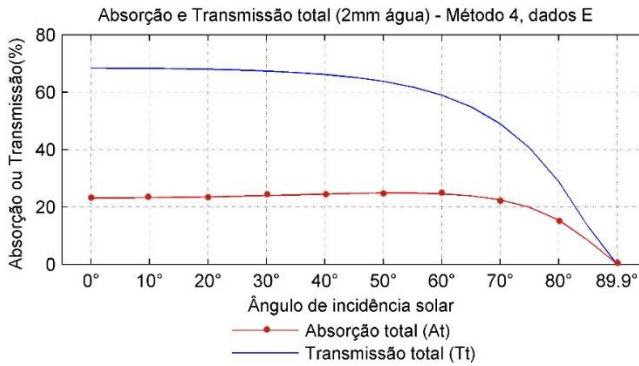
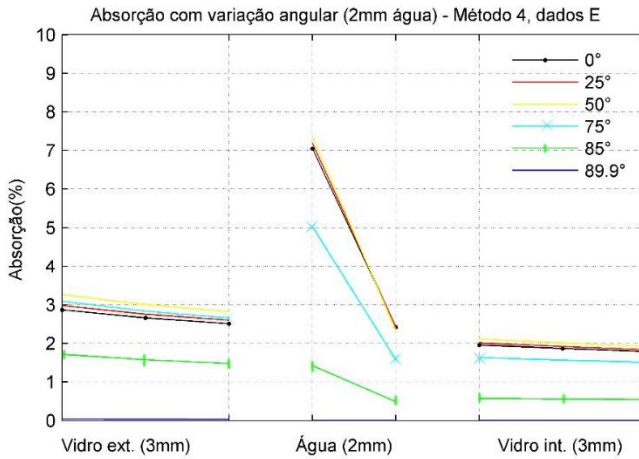


Gráfico 14: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 10mm de água.

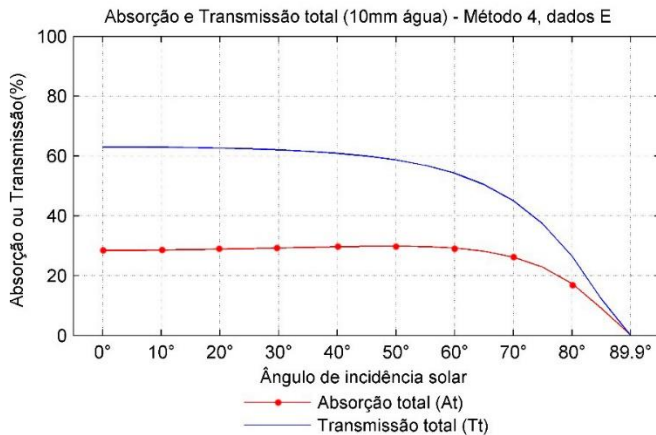
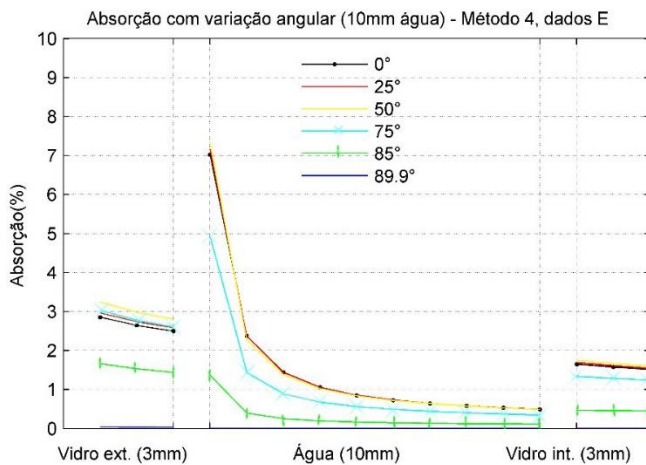


Gráfico 15: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 50mm de água.

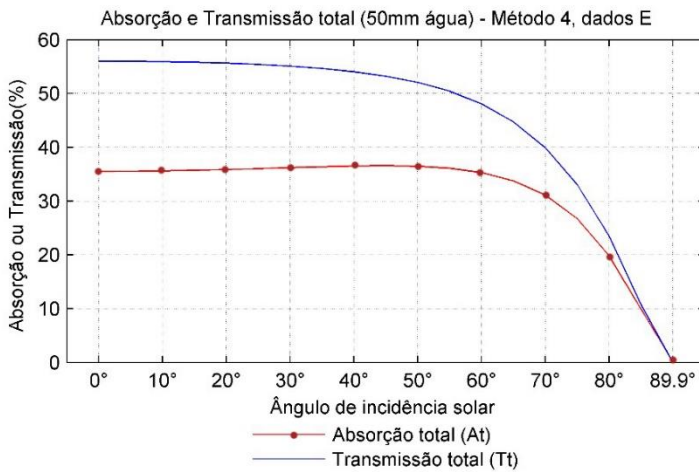
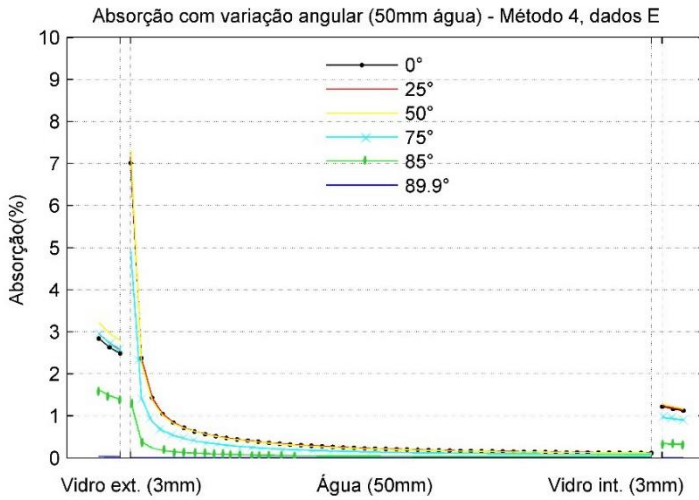
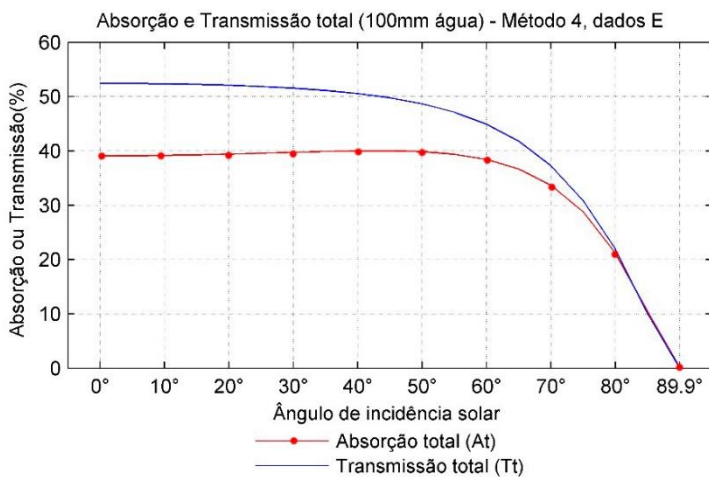
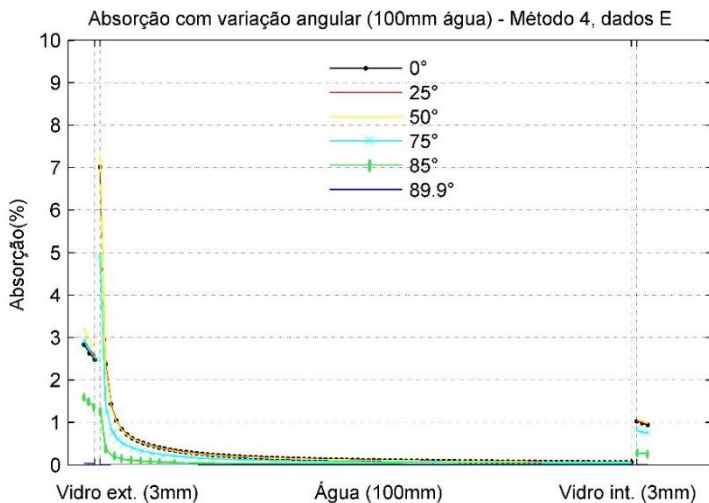


Gráfico 16: Absorção e transmissão solar de radiação com variação angular – 100mm de água.



É possível afirmar que a transmissão e absorção são sistematicamente divergentes entre a faixa de 0° e 65° em relação à faixa de 65° e 89.9° de incidência de radiação. Há, portanto, razões significativas para considerar a variação angular na simulação de transwalls (ver tópico 4.8 para comparar o efeito na carga térmica de simulações com e sem considerar a variação angular).

Os resultados desta subetapa salientam os dados da subetapa anterior e mostram o pico de absorção da água na sua primeira seção e a perda de potencial de absorção com o aumento de espessura da água (ver Tabela 25). Enquanto até 50mm de lâmina de água percebe-se redução de transmissão solar significativa. Entre 50mm e 100mm – o maior aumento de lâmina de água – têm-se apenas 2.65pp de redução de transmissão (ver Tabela 25).

Tabela 25: Absorção e Transmissão total a 0° de incidência solar (%).

	Método 4, dados E e incidência normal (0°)			
	2mm	10mm	50mm	100mm
Transmissão total (Tt)	68.38	63.04	56	52.45
Absorção total (At)	23.13	28.48	35.53	39.09

4.5 (Subetapa II.3) Incerteza do índice de refração (n) no método de absorção

Do Gráfico 17 até o Gráfico 19 apresentam-se as refletâncias (ρ) para os três grupos de índices de refração (ar, água e iodeto de metileno), além do vidro, analisados de acordo com suas variações descritas no método (entre 1-1.2; 1.233-1.433; 1.637-1.837 descritos na Tabela 13). Todas as simulações utilizam o método ótico 4 de reflexões de segunda ordem. É esperado que quanto maior o ângulo de incidência, maior a refletância para um dado n. Em cada uma das amostras, a refletância tende a aumentar quando maior a diferença entre os índices de refração dos materiais.

No caso da refletância entre o vidro e os líquidos, os maiores valores foram obtidos para o $n=1.233$ com 1% de refletância em 0° e 2.5% para 89.9° . No caso do $n=1.837$ a refletância para o ângulo de 0° foi de 0.9% e 1.1% para 89.9° . Comparando-se $n=1.233$ com o $n=1.433$, tem-se uma diferença de 0.9% da refletância em 0° e 2.4% para 89.9° . Entre $n=1.637$ e $n=1.687$ a diferença para 0° é de 0.7% e para 89.9° é de 1%.

Já no caso da refletância entre vidro-ar e variações do índice de refração do ar as refletâncias são maiores. A menor refletância com incidência a 0° é de 1,3% para $n=1.2$ e 4.2% para $n=1$. Com o aumento da angulação a refletância cresce substancialmente e apenas mantém-se

abaixo de 5% quando n está entre 1.01 e 1,2 para 45° . A diferença entre a refletância entre 0° e $89,9^\circ$ para $n=1$ é de 94.7% e para $n=1.2$ é de 2%.

No caso dos dois líquidos, as refletâncias tem valores médios baixos ainda que o ângulo de incidência seja elevado e, exceto para os índices de refração com valores abaixo do n da água e com ângulo de incidência alto, todas as variações do índice de refração resultam em mudanças da refletância insignificantes. A relação vidro-ar é mais sensível: tanto a mudança do valor do índice de refração quanto a angulação podem causar resultados bastante diferentes de refletância.

Gráfico 17: Refletância para a variação do índice de refração entre 1.233 e 1.433.

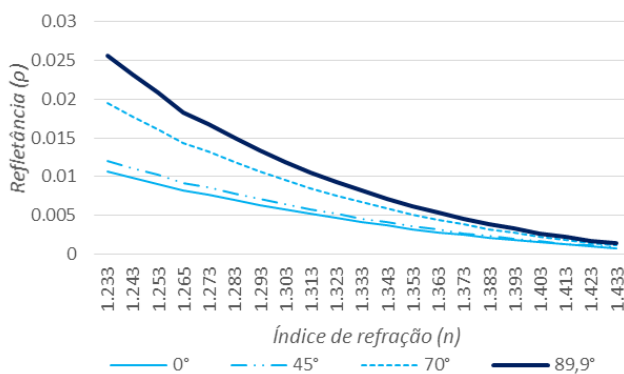


Gráfico 18: Refletância para a variação do índice do refração entre 1.637 e 1.857.

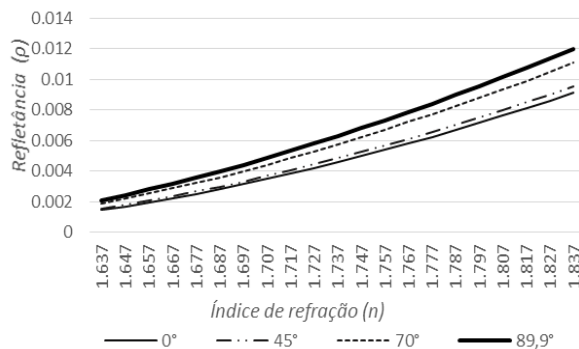
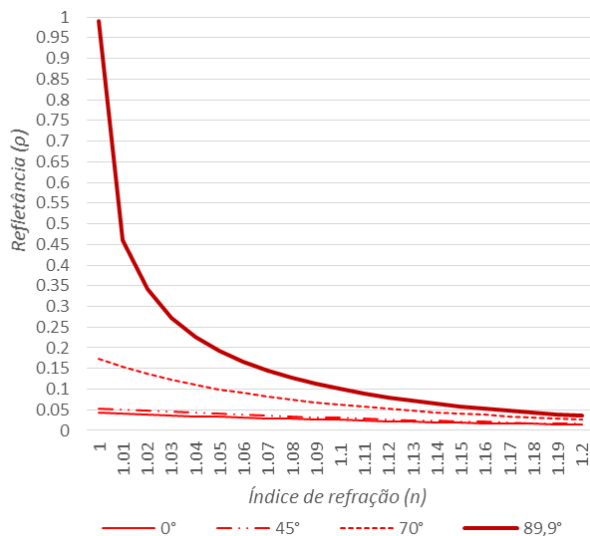


Gráfico 19: Refletância para a variação do índice de refração entre 1 e 1.2.



A absorção (A_t) e transmissão (T_t) total dos protótipos ‘vidro-líquido-vidro’ são apresentadas do Gráfico 20 ao Gráfico 27 e O Gráfico 28 e Gráfico 29 apresentam o protótipo de ‘vidro-gás-vidro’.

A pequena diferença de refletância quando variaram-se os índices de refração entre 1.233-1.433 ou entre 1.637-1.837 apontados anteriormente também resultam em mudanças pequenas na resultado final de transmissão e absorção das amostras. As maiores diferenças entre os resultados para $n=3.233$ e 3.433 foram de 1.9% e 1.96% com angulação de 89.9° para a absorção total com $\tau=90\%$ e $\tau=20\%$ respectivamente e 1.44% e 0.34% com ângulo de 70° para a transmissão total com $\tau=90\%$ e $\tau=20\%$ respectivamente. Para n entre 1.637 e 1.837 as maiores diferenças entre os resultados foram de 0.77% e 0.8% com angulação de 89.9° para a absorção total com $\tau=90\%$ e $\tau=20\%$ respectivamente e 0.96% e 0.22% com os ângulos de 0° e 45° para a transmissão total com $\tau=90\%$ e $\tau=20\%$ respectivamente.

Gráfico 20: Absorção total do protótipo com amostra em que n varia de 1.233 a 1.433.

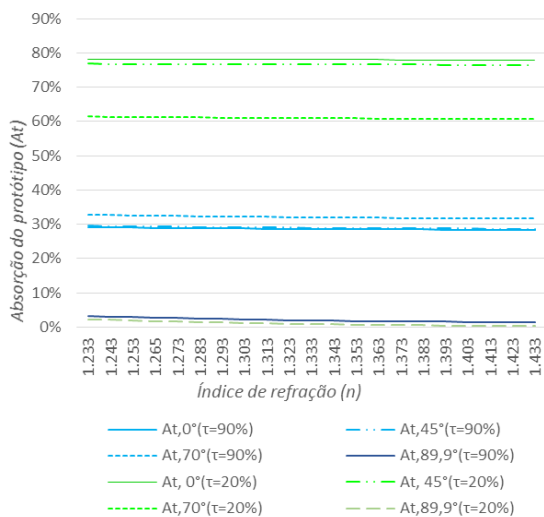


Gráfico 21: Transmissão total do protótipo com amostra em que n varia de 1.232 a 1.432.

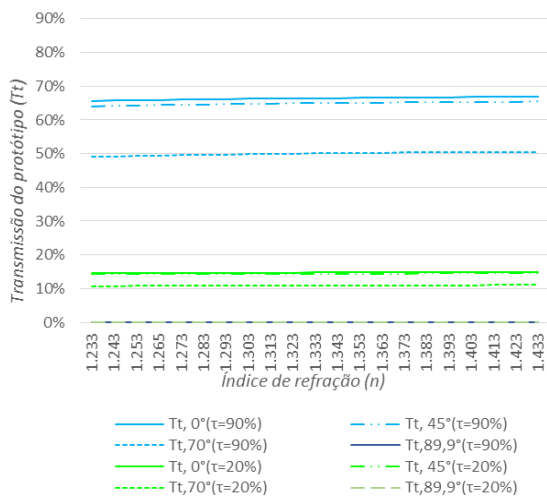


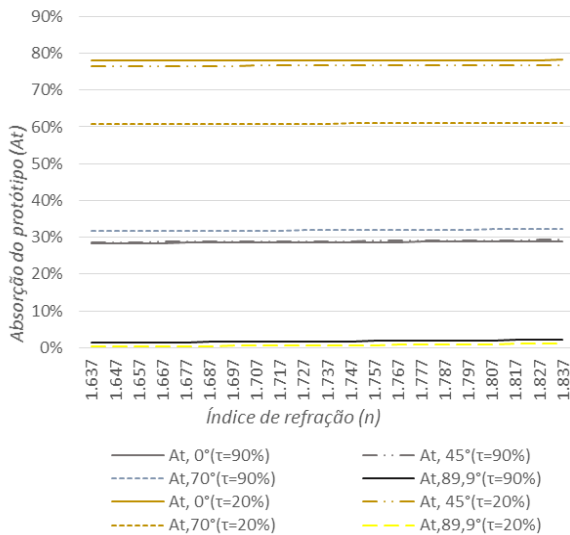
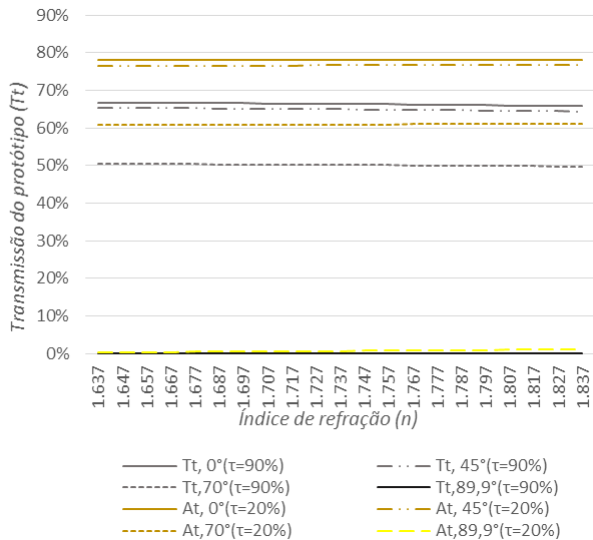
Gráfico 22: Absorção total do protótipo com amostra em que n varia de 1.637 a 1.837.Gráfico 23: Transmissão total do protótipo com amostra em que n varia de 1.637 a 1.837.

Gráfico 24: Absorção total do protótipo com amostra em que n varia de 1 a 1.2.

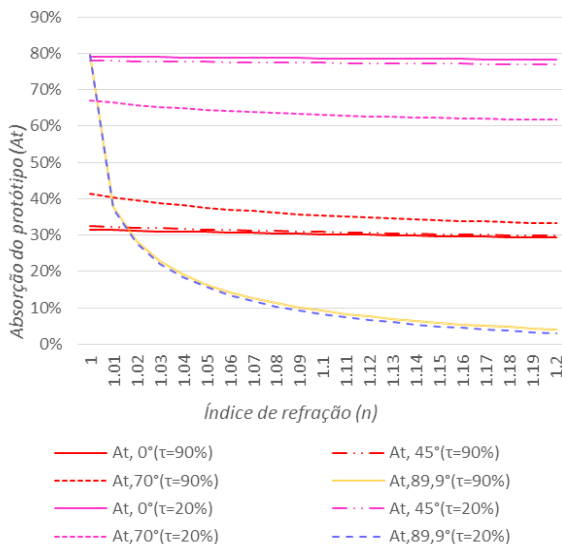
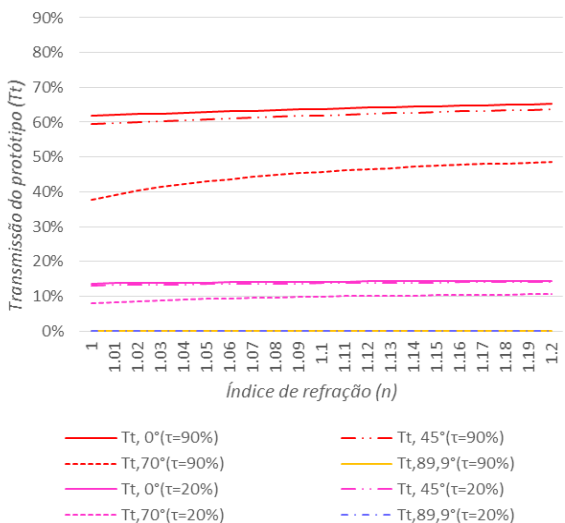


Gráfico 25: Transmissão total do protótipo com amostra em que n varia de 1 a 1.2.



A transmissão (T_t) e absorção (A_t) total do protótipo com as amostras de n entre 1 e 1.2 tem comportamento peculiar, assim como ocorre na refletância. A diferença entre resultados de n igual a 1 e 1.2 é de 2.14% para absorção total com $\tau=90\%$ e 2.71% e 1.08% para $\tau=20\%$ e diferença de transmissão total de 3.45% para $\tau=90\%$ e 0.9% para $\tau=20\%$, todos com ângulo de incidência de 0° .

Para o ângulo de 45° com a mesma comparação de n tem-se que a diferença de absorção total com $\tau=90\%$ é de 2.71% e 1.08% para $\tau=20\%$ e a diferença de transmissão total de 4.28% para $\tau=90\%$ e 1% para $\tau=20\%$.

Para o ângulo de 70° analisou-se separadamente o comportamento quando o índice de refração varia de 1 a 1.1 e depois entre 1.1 e 1.2. Para n variando entre 1 e 1.1, a diferença de absorção total com $\tau=90\%$ é de 6.06% e 4.5% para $\tau=20\%$ e a diferença de transmissão total foi de 8.13% para $\tau=90\%$ e 1.96% para $\tau=20\%$. Para n variando entre 1.1 e 1.2, a diferença de absorção total com $\tau=90\%$ é de 2.2% e 1.37% para $\tau=20\%$ e a diferença de transmissão total foi de 2.79% para $\tau=90\%$ e 0.67% para $\tau=20\%$.

A curva de absorção total quando o ângulo incidente é de 89.9° para ar-vidro é bastante peculiar e pode ser explicada pelo fato de que a alta reflexão quando n tende a 1 faz com que o raio que atravessou o primeiro vidro sofra novamente reflexão na face entre o vidro e o vazio interno do protótipo, acarretando que o raio seja absorvido no primeiro vidro. A discrepância de valores ao longo da variação de n é notória no Gráfico 24 e dispensa a apresentação dos valores absolutos.

Os resultados apontam que a variação no índice de refração do ar é bastante sensível nos resultados de transmissão e reflexão total, mesmo com incidência à 0° .

4.6 (Subetapa III.1) Calibração e convergência do MTSF

Os resultados simulados (Tabela 26 até Tabela 28) mostram coerência do comportamento Físico das simulações. Quanto maior a espessura da lâmina de água, menor é o ganho de calor para o ambiente interno.

A diferença de ganho de calor entre os modelos com absorção por 'seção' e 'média' é vista entre os dados apresentados nas tabelas A e tabela B (Tabela 26 e Tabela 27) e provam que há diferença do balanço de energia de acordo com a modelo de absorção adotada.

Os dados de convergência mostram que todas as amostras de 2mm, 10mm e 50mm, independente do modelo de absorção solar e da temperatura inicial, já convergiam no segundo dia de simulação uma vez que apresentam os mesmos resultados no dia seguinte (terceiro dia).

Apenas as amostras com 100mm de lâmina de água necessitaram um terceiro dia de simulação para convergir, todavia a diferença de resultado entre o segundo e terceiro dia para estes casos foi ínfima.

A comparação entre os modelos A2 e C comprovam que mesmo para as temperaturas iniciais das seções bastante diferentes, o MTSF, quando em estado convergente, resulta nos mesmos resultados. Os resultados A2 e D que comparam duas lâminas de 10mm de água nas mesmas condições, mas adotando Δt diferentes certificam que o intervalo de meio segundo para seções de 1mm em modelos de transwall é suficiente.

Tabela 26: (A) simulações com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,5s.

DIA	2mm água (A1)		10mm água (A2)		50mm água (A3)		100mm água (A4)	
	kWdia/m ²		kWdia/m ²		kWdia/m ²		kWdia/m ²	
	Ganho	Perda	Ganho	Perda	Ganho	Perda	Ganho	Perda
1°	3.1564	0.0013	2.855	0.1584	2.4731	0	2.3015	0
2°	3.1560	0.0013	2.8252	0.0001	2.4736	0	2.3024	0
3°	3.1560	0.0013	2.8252	0.0001	2.4736	0	2.3025	0
4°	-	-	-	-	-	-	2.3025	0

Tabela 27: (B) simulações com o modelo de absorção da radiação solar por MÉDIA, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,5s.

DIA	2mm água (B1)		10mm água (B2)		50mm água (B3)		100mm água (B4)	
	kWdia/m ²		kWdia/m ²		kWdia/m ²		kWdia/m ²	
	Ganho	Perda	Ganho	Perda	Ganho	Perda	Ganho	Perda
1°	3.1647	0.0013	2.8353	0.0001	2.4768	0	2.3034	0
2°	3.1644	0.0013	2.8350	0.0001	2.4775	0	2.3047	0
3°	3.1644	0.0013	2.8350	0.0001	2.4775	0	2.3048	0
4°	-	-	-	-	-	-	2.3048	0

Tabela 28: (C) Simulação com temperatura inicial das seções próximas à 7°C, modelo de absorção da radiação por SEÇÃO e Δt de 0.5s e (D) Simulação com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0.2s.

	10mm de água (C)		10mm água (D)	
	kWdia/m ²		kWdia/m ²	
	Ganho	Perda	Ganho	Perda
1° dia	2.8248	0.0136	2.8256	0.0001
2° dia	2.8252	0.0001	2.8253	0.0001
3° dia	2.8252	0.0001	2.8253	0.0001

Confirma-se a precisão dos resultados do MTSF para transwalls delgadas e com propriedades da água variáveis utilizando o intervalo de tempo de meio segundo, bem como certifica-se que simulações com 3

dias para convergência, e não 7 dias como utilizado em outros trabalhos de transwalls, terão coerência quando analisadas espessuras de lâmina de água entre 2 a 100mm.

4.7 (Subetapa III.2) Análise de sensibilidade: grupos A, B, C, D e variações

A partir das variações dos grupos A, B, C e D (Tabela 29) são apresentados as temperaturas de cada um dos casos (Gráfico 26 até Gráfico 38), gráfico e a tabela de balanço energético, bem como o Fator solar equivalente (Gráfico 39 e Tabela 30).

Tabela 29: Casos da Análise de Sensibilidade da subetapa III.2

Casos	Variações a partir da modelagem base											
	- MODELAGEM BASE	- Nu2 substitui Nu1	-- Nu3 substitui Nu1	-- Nu4 substitui Nu1	-- Nu5 substitui Nu1	- Propriedades termofísicas da água constantes (25°C)	- Absorção de radiação na água por seção e não média	- Consideração de troca radiante entre os vidros	- Temperatura superficial do céu constante a -15°C	- Consideração de massa dupla do vidro em contato com a água	- Temperatura da água homogênea	- Negligência do efeito convectivo da água
1A, 1B, 1C e 1D	X											
2A, 2B, 2C e 2D	X											
3A, 3B, 3C e 3D		X										
4A, 4B, 4C e 4D			X									
5A, 5B, 5C e 5D				X								
6A, 6B, 6C e 6D					X							
7A, 7B, 7C e 7D						X						
8A, 8B, 8C e 8D							X					
9A, 9B, 9C e 9D								X				
10A, 10B, 10C e 10D									X			
11A, 11B, 11C e 11D										X		
12A, 12B, 12C e 12D											X	

O grupo A se refere a uma lâmina de água de 2mm, relação altura/espessura (H/L) de 500, 2 dias para convergência, ângulo solar 2 “Norte com sol inclinado”, irradiação na normal de 1000W/m² e modelo de temperatura externa 1 “Verão”.

O grupo B repete as configurações do grupo A, com as exceções do ângulo solar 1, irradiação na normal de 400W/m² e modelo de temperatura externa 3.

O grupo C tem 100mm de lâmina de água, H/L de 10, 3 dias para entrar em estado de convergência, ângulo solar 2, irradiação na normal de 100W/m^2 e temperatura externa modelo 2.

O grupo D repete as configurações do grupo C com as exceções do ângulo solar 1, irradiação na normal de 400W/m^2 e temperatura externa modelo 3. Ressalta-se, porém que os casos A, B, C e D da subetapa III.2 não têm relação alguma com os grupos de dados da etapa II.1.

Os casos 1 referem-se à modelagem base; do caso 2 ao 5 varia-se apenas o modelo de Nusselt empregado (utilizando como base o caso 1); o modelo 6 mantém as propriedades da água constantes em 25°C ; o modelo 7 se diferencia do caso base por adotar o modelo de absorção de radiação por seção e não por média; o caso 8 admite trocas radiantes entre os vidros dentro da transwall; o caso 9 impõe temperatura de superfície do céu constante em -15°C ; o caso 10 dobra a massa da seção de vidro em contato com a água; o caso 11 homogeniza a temperatura da água e o caso 12 trata a água como um sólido.

O eixo das ordenadas de cada figura representa o decorrer do dia e deve ser analisado de cima (começo do dia) para baixo (fim do dia). O eixo das abcissas apresenta as seções de material do ambiente externo (esquerda) para o ambiente interno (direita). As temperaturas são plotadas em graus Celsius por uma escala de cor padrão para todos os gráficos. Posterior à apresentação dos gráficos, são tecidos comentários por grupo de casos (A, B, C e D).

Gráfico 26: Temperaturas por seção ao longo do dia (1A, 2mm).

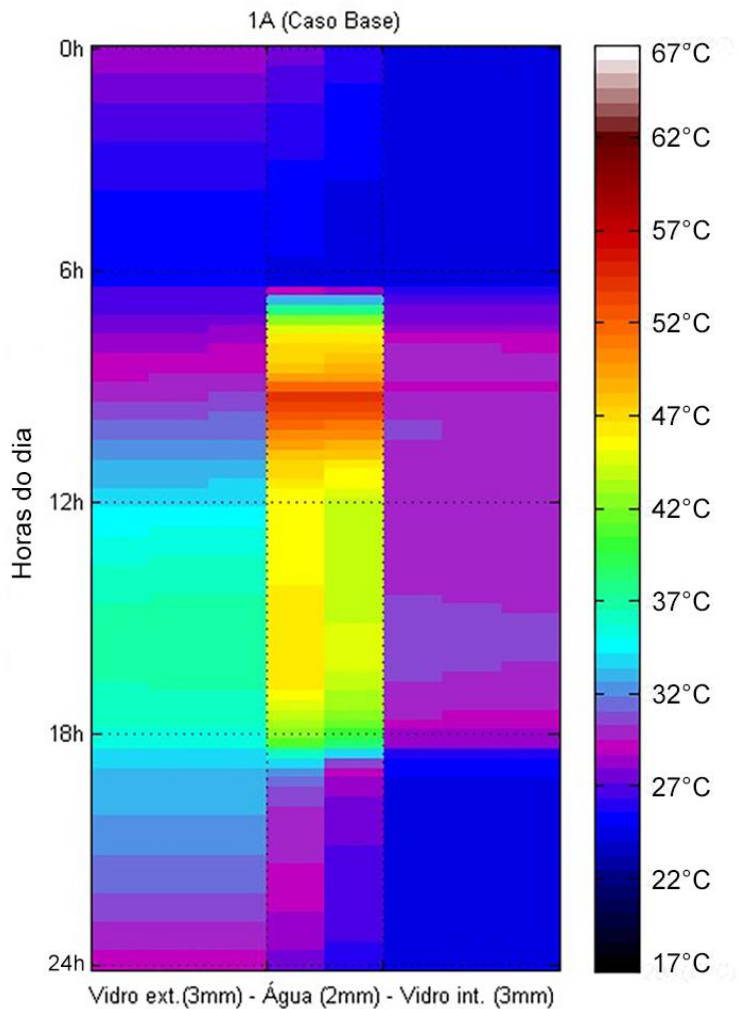


Gráfico 27: Temperaturas por seção ao longo do dia (1A – frio até 6A, 2mm).

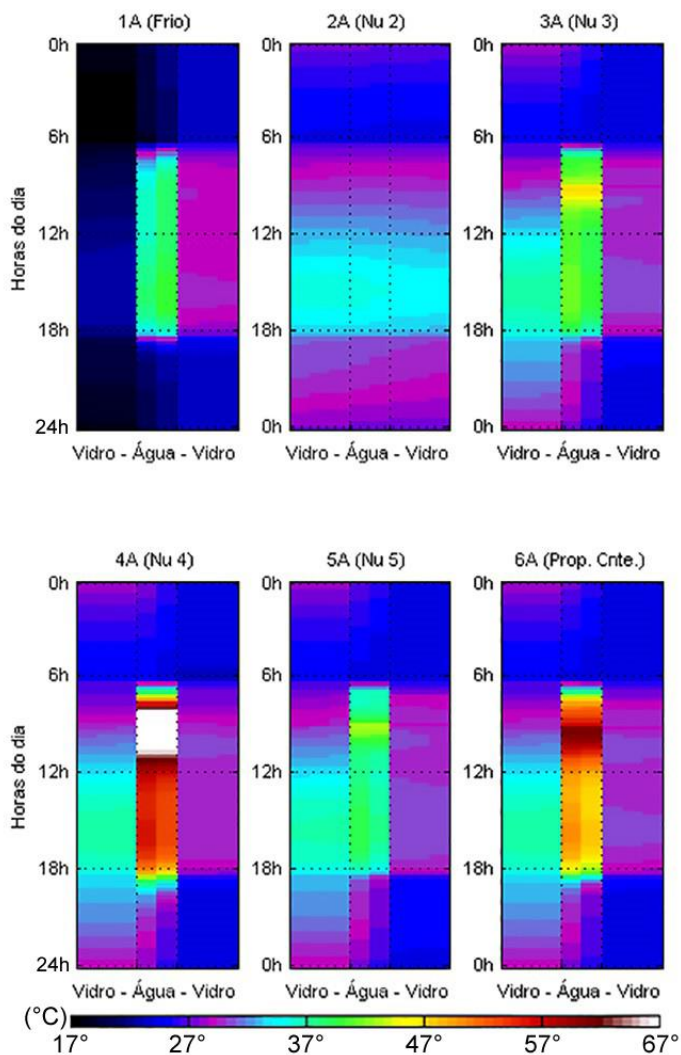


Gráfico 28: Temperaturas por seção ao longo do dia (7A – 12A, 2mm).

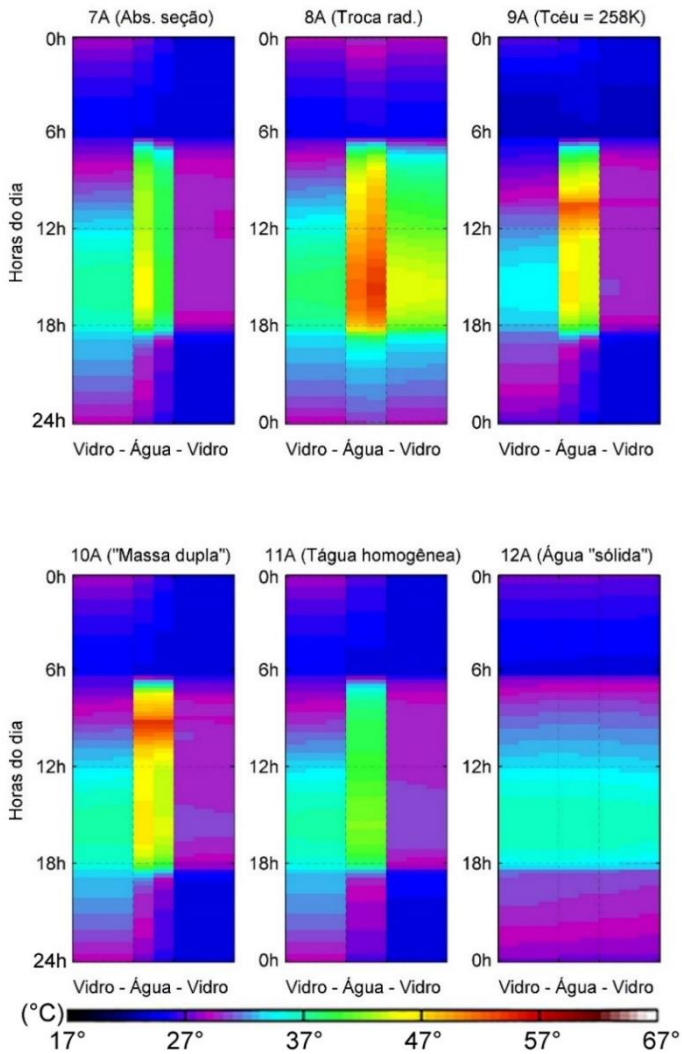


Gráfico 29: Temperaturas por seção ao longo do dia (1B – 6B, 2mm).

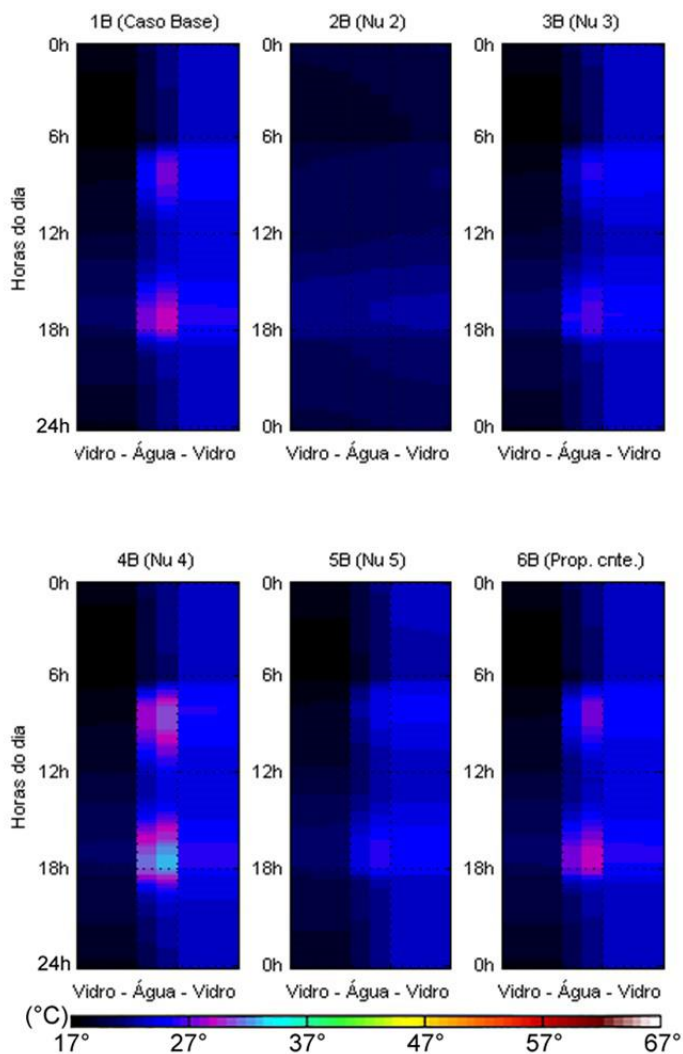


Gráfico 30: Temperaturas por seção ao longo do dia (7B – 12B, 2mm).

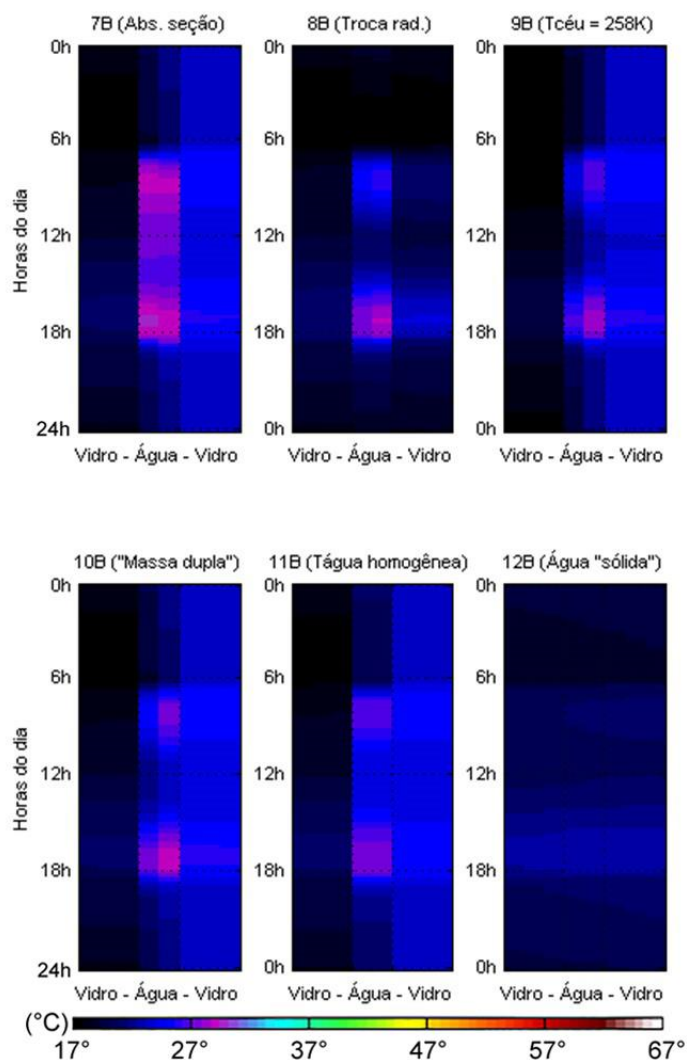


Gráfico 31: Temperaturas por seção ao longo do dia (1C – 3C, 100mm).

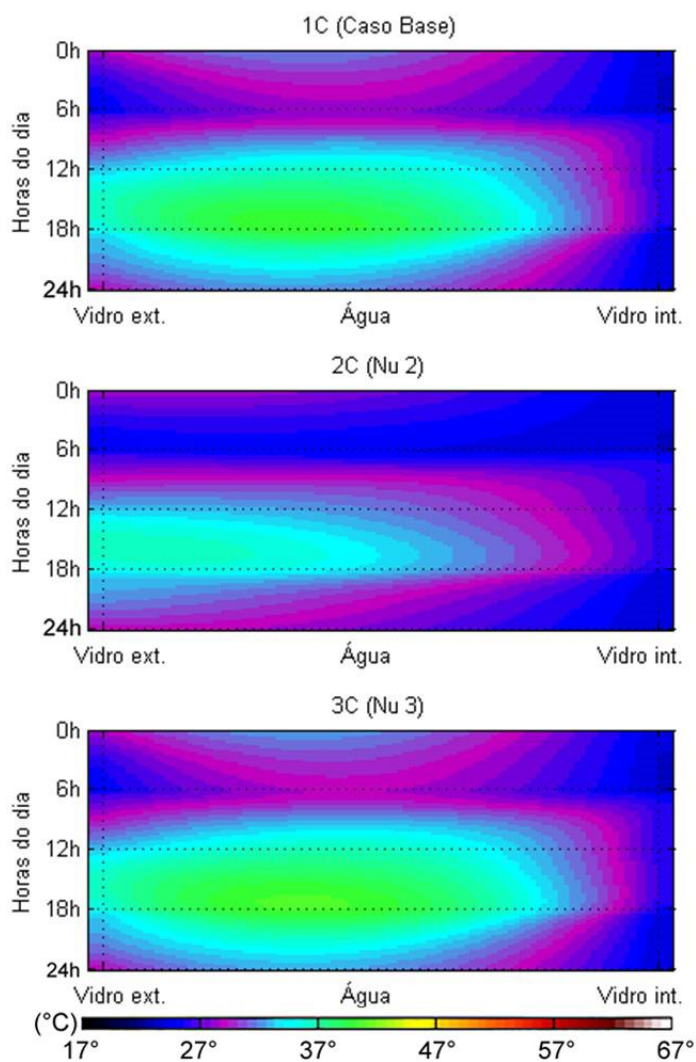


Gráfico 32: Temperaturas por seção ao longo do dia (4C – 6C, 100mm).

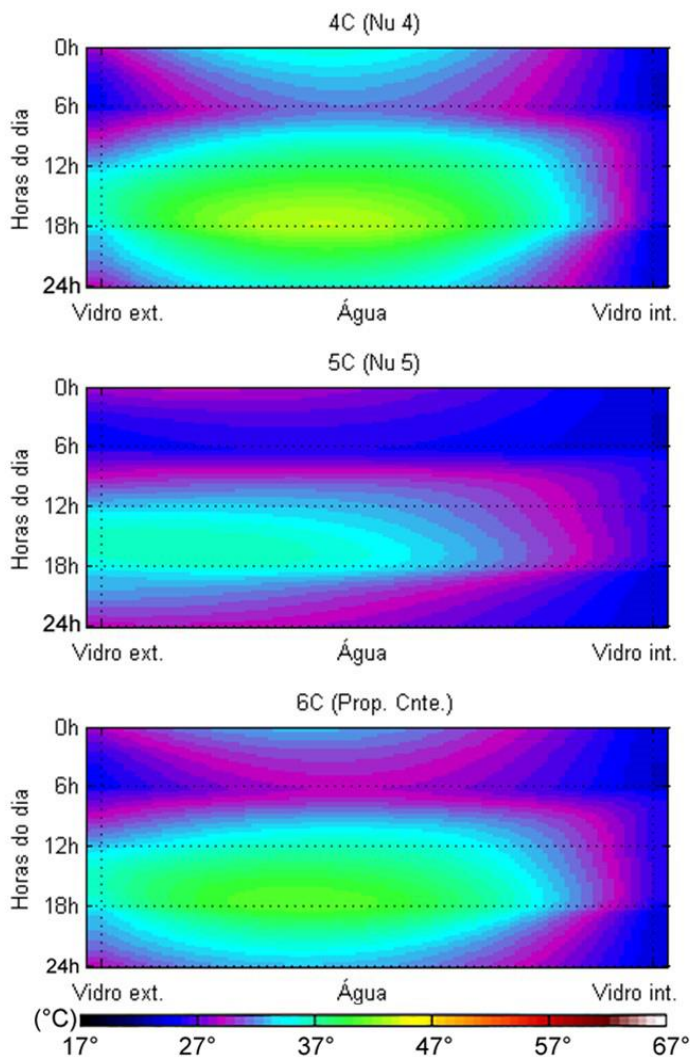


Gráfico 33: Temperaturas por seção ao longo do dia (7C – 9C, 100mm).

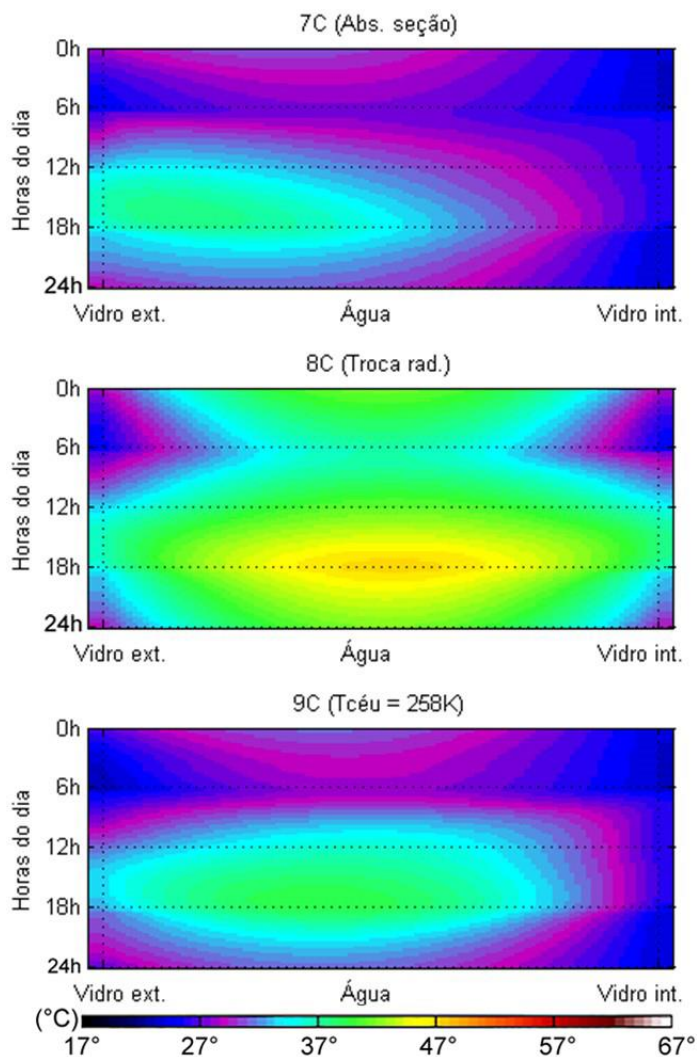


Gráfico 34: Temperaturas por seção ao longo do dia (10C – 12C, 100mm).

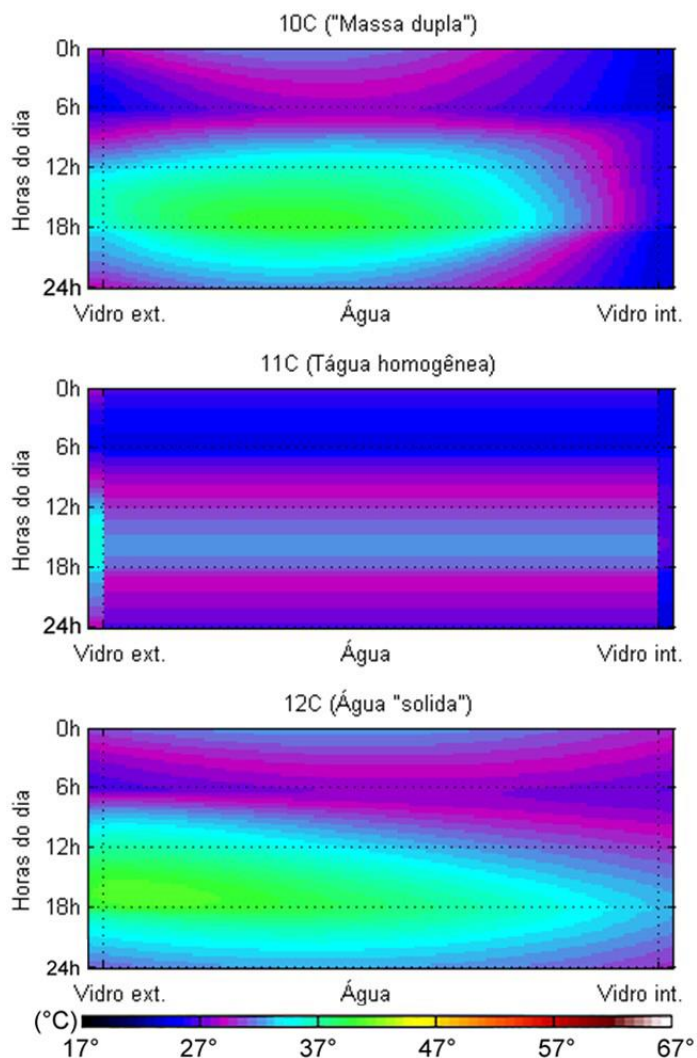


Gráfico 35: Temperaturas por seção ao longo do dia (1D – 3D, 100mm).

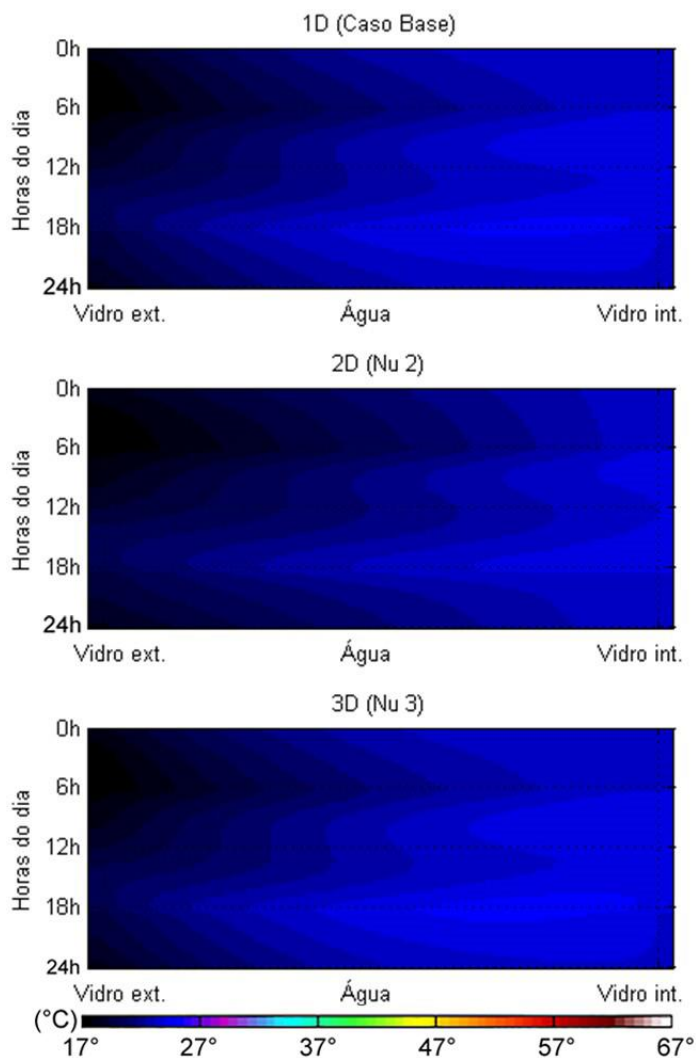


Gráfico 36: Temperaturas por seção ao longo do dia (4D – 6D, 100mm).

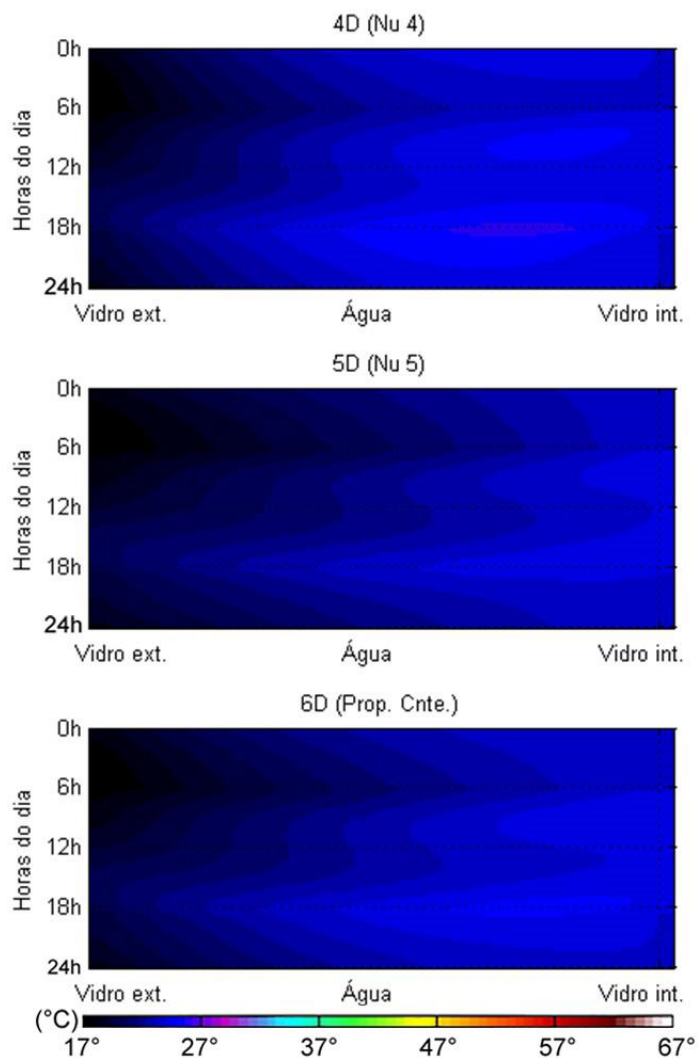


Gráfico 37: Temperaturas por seção ao longo do dia (7D – 9D, 100mm).

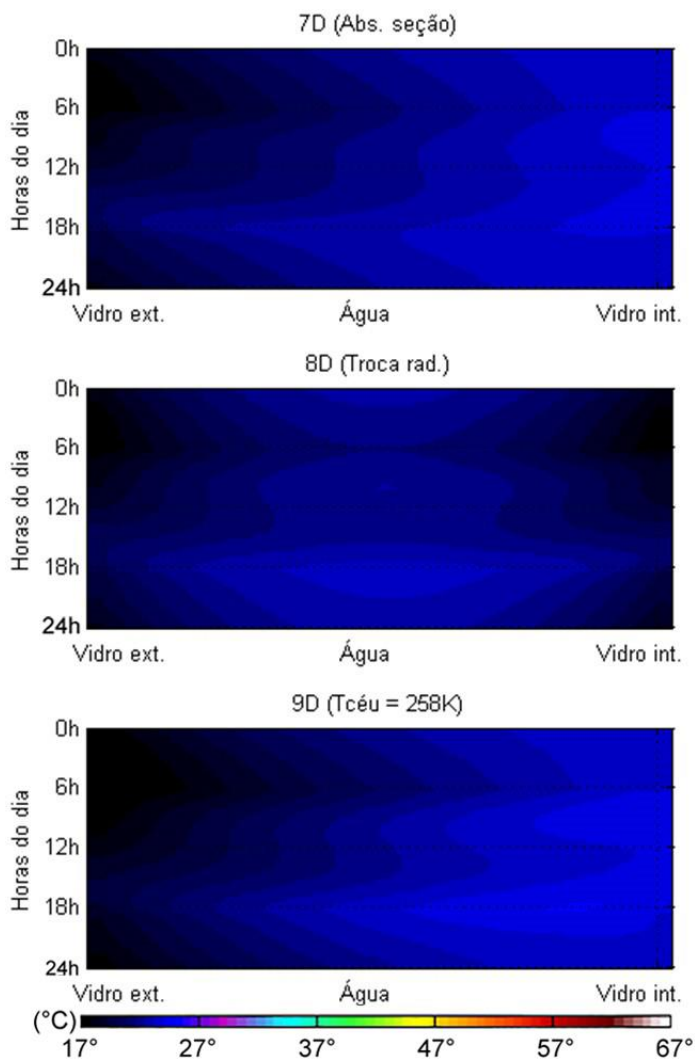
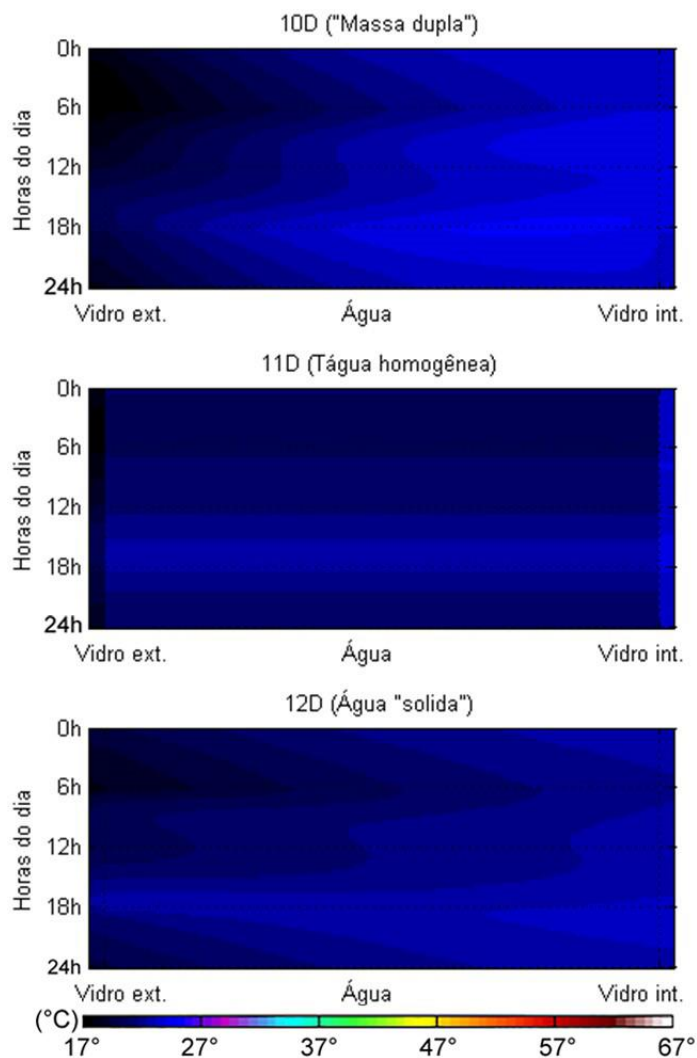


Gráfico 38: Temperaturas por seção ao longo do dia (10D – 12D, 100mm).



Afim de não apresentar uma análise apenas descritiva das temperaturas por seção dos 49 casos plotados anteriormente, os comentários tecidos à seguir comparam os resultados de todos os casos, mas são tecidos por ordem de importância de fenômeno Físico observado e não por ordem numérica.

Para os casos do GRUPO A (lâmina de água de 2mm, temperatura externa 1 “Verão”), aponta-se que:

- O modelo 8A (troca radiante entre os vidros internos) apresenta as maiores temperaturas na superfície de vidro em contato com o ambiente interno. Levar em conta o fenômeno de envio de calor do face interna do vidro externo diretamente para a face interna do vidro interno por troca radiante se mostra de alta sensibilidade nos resultados de temperatura do vidro interno;
- O caso 2A (Nusselt 2) e 12A (água “sólida”) apresentaram os menores picos de temperatura na água, todavia as temperaturas do vidro interno ao longo da noite são mais altas que dos outros casos (o 8A também apresenta temperaturas mais elevadas durante a noite). Ressalta-se o impacto de modelagem inadequada da convecção no perfil de temperatura das transwalls. O Nusselt 2 (convecção em face vertical e não em câmara) no caso 2A e a negligência da convecção no caso 12A dificultam a perda de calor durante a noite visto que, sem o processo convectivo, é mais difícil dissipar calor;
- A temperatura de céu fixa em -15°C (caso 9A) não reduziu a temperatura da água e, como já dito, o caso 2A e 12A tiveram menores temperaturas. Todavia, as temperaturas do vidro externo do caso 9A foram mais baixas. De qualquer forma, embora haja diferenças de temperatura do vidro externo entre estes dois, a temperatura da água do caso 9A é muito semelhantes ao caso base 1A. O fato pode ser explicado pela alta capacidade térmica que a água incrementa no sistema (diferente de vidros duplos);
- O uso de equações de Nusselt diferentes (casos 1A, 2A, 3A, 4A e 5A) muda significativamente a temperatura da água ao longo do dia, mas tem pouco impacto no vidro interno sendo o caso 2A é uma exceção a qual pode ser explicado pelo modelo Nusselt 2 não ser adequado à câmaras. Entre os quatro modelos de Nusselt,

o quarto (4A) foi o que apresentou picos de temperatura da água mais altos (acima de $67^{\circ}\text{C}/340\text{K}$). Percebe-se que diferentes modelos de Nusselt para câmaras enclausuradas (1A, 3A, 4A e 5A) podem impactar na temperatura da água, mas podem ser irrelevantes na troca de calor com o ambiente interno;

- Considerando-se que a cor vermelha representa temperaturas próximas aos 60°C , permite-se dizer que mesmo quando a água atinge temperaturas bastante acima da faixa de conforto humano (casos 1A, 4A, 6A, 8A e 10A) – e que costumar gerar desconforto térmico quando vidros sem controle de emissividade atingem a mesma temperatura – o aumento da temperatura da água não acarreta necessariamente maior fluxo de calor para o ambiente interno uma vez que não diretamente aquece o vidro interno. É imprescindível, no entanto, a realização de simulações com a temperatura interna da sala variável e não constante em 24°C para confirmar este fenômeno;
- Os casos 1A (caso base), 9A (temperatura constante do céu) e 10A (massa dupla do vidro) também são muito parecidos e apontam pouca interferência da temperatura do céu e da massa do vidro, mesmo em casos bastante delgados de transwalls. Por outro lado, percebe-se que a diferença de temperatura externa (caso 1-frio) muda bastante o perfil de temperatura do sistema.

Para os casos do GRUPO B (lâmina de água de 2mm, temperatura externa 3 “Inverno ameno”), aponta-se que:

- O comportamento de reduzir os picos de temperatura da água dos modelos 2A e 12A (Nusselt 2 e a água “sólida”) entre os casos de calor com 2mm de lâmina de água (grupo A) se repete nos casos 2B e 12B, agora acarretando a redução de temperatura do vidro interno ao longo da noite. Observa-se novamente o impacto de uma modelagem convectiva inapropriada nos resultados de temperatura das seções;
- A troca radiante entre os vidros (modelo 8B) neste grupo de simulação tem impacto significativo em reduzir a temperatura do vidro interno (aproximando-se do comportamento 2B e 12B comentados anteriormente). Mais uma vez, a troca radiante

acentua a interferência da temperatura do vidro externo no vidro interno, como no grupo A.

Para os casos do GRUPO C (lâmina de água de 100mm, temperatura externa 1 “Verão”), aponta-se que:

- O caso 8C (com troca radiante entre os vidros) apresenta os picos de temperatura com valores mais elevados, aquece mais rápido o centro da massa de água de forma simétrica, como se houvessem fontes de calor vindas dos dois vidros. É também o sistema com maiores temperaturas de vidro interno. Repete-se o impacto da consideração da troca radiante na modelagem;
- O modelo 4C (Nu4) apresenta os maiores picos de temperatura de água abaixo do caso 8C (troca radiante);
- O maior atraso térmico da água – isto é, a maior intervalo de tempo para que uma temperatura mais elevada na água margeando o vidro externo seja percebida na bordas do vidro interno – ocorre no modelo 12C (água sólida). Vê-se que o comportamento sólido não apenas atrasa a chegada de calor, mas também a perda de calor. Consequentemente, o modelo sólido se apresenta entre os de mais altas temperaturas de vidro interno perdendo apenas para o modelo de troca radiante. Percebe-se novamente a alta discordância de resultados entre o modelo que negligencia a convecção e os outros modelos que consideram o número de Nusselt;
- A água com distribuição de calor homogênea (12C) é quem apresenta os picos térmicos mais baixos – fato que se explica pela utilização de toda a capacidade térmica do volume de água para distribuir o mesmo montante de calor incidente;
- O caso 2C e 5C têm curvas de temperatura muito parecidas, assim como o caso 1C e 3C. Isso aponta uma tendência de comportamento similar entre estes modelos de Nusselt para lâminas grossas de água e o impacto negativo do uso de equações de Nusselt para convecção livre em face vertical ao invés de convecção em câmaras enclausuradas passa a ter menor influência;
- As variações do modelo base com propriedades constantes (6C), absorção por seção (7C), baixa temperatura de céu (9C) e “massa

dupla” da seção de vidro em contato com a água (10C) tiveram desempenho muito parecido ao caso base (1C) e demonstram variações de modelo de pouco impacto no cenário C;

- As temperaturas do vidro interno são muito similares para todos os modelos com exceção do 8C (troca radiante) e 12C (água sólida);

Para os casos do GRUPO D (lâmina de água de 100mm, temperatura externa 3 “Inverno ameno”), aponta-se que:

- O grupo de casos D reforça a tendência de comportamento avaliado nos grupos anteriores;
- Novamente o modelo com troca radiante entre os vidros (8D) foi o que mais destoou do comportamento de temperatura dos outros modelos analisados. Este, além de apresentar centrossimetria de temperatura, ainda acentua o efeito da temperatura externa no vidro interno durante a noite (seja para aquecer ou resfriar), como visto também nos grupos A, B e C.

Embora a temperatura das seções da transwall são importantes para compreender como cada modelagem de MTSF pode acarretar resultados diferentes, há maior interesse em se conhecer o balanço térmico e o Fator solar equivalente dos casos analisados para poder distingui-los no que tange a eficiência térmica. O e a Tabela 30 apresentam o balanço térmico e o Fator Solar equivalente (F_{solar}) de um dia de simulação para os casos do grupo A, B, C e D. Em seguida, do Gráfico 40 ao Gráfico 43 apresenta-se o fluxo de calor na face do vidro exposto ao ambiente interno dos quatro casos base (1A, 1B, 1C e 1D) por fonte separada (transmissão solar direta, troca radiante de infravermelho longo entre o vidro e as superfícies internas do ambiente, trocas por convecção e fluxo térmico total, além da irradiação externa).

Quando analisados o balanço térmico apresentado Gráfico 39 e o Fator solar equivalente que consta na Tabela 30, comprova-se os pontos indicados nos gráficos de temperatura (Gráfico 26 ao Gráfico 38).

Há similaridade entre os valores nos balanços térmicos, exceto quando considerado a troca radiante entre os vidros (8A, 8B, 8C e 8D), a água como comportamento sólido (12A, 12B, 12C e 12D) e o segundo modelo de Nusselt para seções delgadas de água (2A e 2B). Nos casos das três exceções descritas (modelo 8, 12 e 2), acentua-se a influência do comportamento da temperatura externa no balanço térmico, seja

aumentando o fluxo de calor em dias quentes, seja retirando calor do ambiente interno quando o ar externo se encontra em temperaturas mais baixas.

Ressalta-se a discordância do modelo com troca radiante e a média dos demais modelos tanto nas condições de calor (grupos A e C) quanto de temperatura amena (grupos B e D), bem como a discordância de resultados observados nos cenários de temperatura amena (grupos B e D) para a negligência do processo convectivo da água (caso 12B e 12D) e do processo convectivo sem considerar o enclausuramento da câmara no caso 2B.

Utilizando o grupo A como exemplo, a média de balanço térmico entre os modelos 1A, 3A, 4A, 5A, 6A, 7A, 9A, 10A e 11A foi de 6.369 kWdia. O caso 2A apresentou balanço de 6.727kWdia, o caso 12A 6.827kWdia e o 8A apresentou 7.458kWdia. Portanto, observa-se uma diferença de mais de 1kWdia entre a média dos casos com comportamento de desempenho térmico parecido e o caso discrepante 8A. No Gráfico 39 e Tabela 30 podem ser observadas outras relações discrepantes, as quais são apresentadas sublinhadas na tabela.

Os resultados de balanço térmico e Fator solar equivalente ressaltam a necessidade de consideração adequada dos fenômenos Físicos envolvidos na transwall. Os mesmos servem para endossar o erro de:

- Assumir o processo de troca radiante entre vidros da transwall (casos 8A, 8B, 8C e 8D) uma vez que ao utilizar-se água, que é completamente opaca à radiação I.V. longa, não ocorre tal fenômeno;
- Negligenciar o fenômeno da convecção da água ao adotar a transwall como um sistema sólido, o que acarreta em erros na computação de calor ganho e também perdido do ambiente interno (casos 12A, 12B, 12C e 12D) e
- Assumir equações de convecção não adequadas às câmaras enclausuradas, especialmente quando a lâmina de água é delgada (2A e 2B).

Por outro lado, observou-se que a simplificação de entrada de dados no modelo térmico (propriedades termofísicas da água, modelo de absorção radiante, temperatura do céu, homogeneização da água e “massa dupla” do vidro) são pouco sensíveis.

Gráfico 39: Carga térmica por caso simulado (Grupos A, B, C e D).

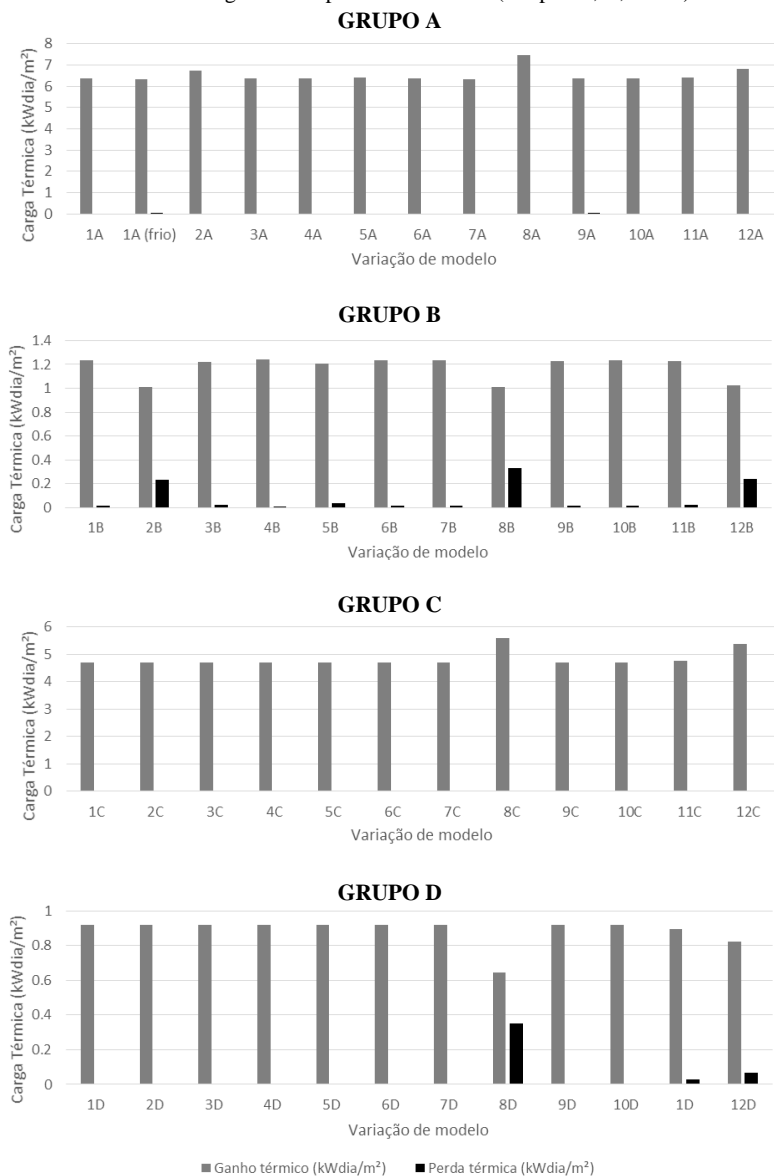


Tabela 30: Valores do balanço térmico e Fator Solar equivalente (Grupos A, B, C e D).

GRUPO A							
	1A	1A (frio)	2A	3A	4A	5A	6A
Balanço (kWdia/m ²)	6.368893	6.294381	<u>6.727164</u>	6.388532	6.352344	6.413123	6.373664
Fsolar	70.2%	69.3%	<u>74.1%</u>	70.4%	70.0%	70.6%	70.2%
	7A	8A	9A	10A	11A	12A	
Balanço (kWdia/m ²)	6.348205	<u>7.458483</u>	6.354833	6.368868	6.396661	<u>6.827615</u>	
Fsolar	69.9%	<u>82.2%</u>	70.0%	70.2%	70.5%	<u>75.2%</u>	

GRUPO B							
	1B	2B	3B	4B	5B	6B	
Balanço (kWdia/m ²)	1.218595	<u>0.780123</u>	1.197732	1.234885	1.172344	1.217845	
Fsolar	58.3%	<u>37.3%</u>	57.3%	59.1%	56.1%	58.3%	
	7B	8B	9B	10B	11B	12B	
Balanço (kWdia/m ²)	1.221618	<u>0.67928</u>	1.210484	1.218595	1.207194	<u>0.779937</u>	
Fsolar	58.5%	<u>32.5%</u>	57.9%	58.3%	57.8%	<u>37.3%</u>	

GRUPO C							
	1C	2C	3C	4C	5C	6C	
Balanço (kWdia/m ²)	4.693624	4.6997	4.693295	4.692572	4.696697	4.694381	
Fsolar	51.7%	51.8%	51.7%	51.7%	51.7%	51.7%	
	7C	8C	9C	10C	11C	12C	
Balanço (kWdia/m ²)	4.689029	<u>5.582886</u>	4.692894	4.693624	4.768172	<u>5.36906</u>	
Fsolar	51.6%	<u>61.5%</u>	51.7%	51.7%	52.5%	<u>59.1%</u>	

GRUPO D							
	1D	2D	3D	4D	5D	6D	
Balanço (kWdia/m ²)	0.92025	0.91517	0.92044	0.92090	0.91784	0.92020	
Fsolar	44.0%	43.8%	44.0%	44.1%	43.9%	44.0%	
	7D	8D	9D	10D	11D	12D	
Balanço (kWdia/m ²)	0.91922	<u>0.29503</u>	0.91982	0.92025	0.86390	<u>0.75672</u>	
Fsolar	44.0%	<u>14.1%</u>	44.0%	44.0%	41.3%	<u>36.2%</u>	

Do Gráfico 40 ao Gráfico 43, os quais apresentam a fluxo de calor para o ambiente interno por fonte, é notório o fato de que não há efeito de atraso térmico relevante no sistema, apenas atenuação térmica.

No caso 1A (Gráfico 40), com lâmina de água de 2mm e cenário térmico de calor, o somatório da convecção e troca radiante de ondas longas do vidro com o ambiente interno tem potência aproximada de 100W/m^2 ao longo da maior parte do dia, sendo o resto da energia provinda da radiação direta e que se apresentou acima de 500W/m^2 na maior parte do dia.

Nos casos 1B (Gráfico 41) e 1D (Gráfico 43), com lâmina de água de 100mm e temperatura externa de “Verão” no caso B e “Inverno ameno” no caso D, há pouco impacto do processo convectivo e de troca radiante, ressaltando-se a transmissão de radiação direta.

No fluxo de calor total do caso 1C (Gráfico 42), que representa uma transwall com lâmina de água de 2mm e cenário térmico ameno, a representatividade da convecção e troca radiante de ondas longas é bastante menor quando comparado ao caso 1A. Além do mais, a transmissão direta também tem uma queda aproximadamente de 100W/m^2 em relação ao caso 1A (onde atingia por volta de 500W/m^2 passa a atingir 400W/m^2).

Os resultados mostram que a pequena espessura de lâmina de água do caso 1A não só tem menor potência de redução da transmissão direta, mas acarreta ganhos térmicos por convecção e trocas radiantes com o ambiente interno.

Observa-se pelos resultados que as transwalls tem melhor aplicabilidade para situações com irradiância com taxas mais altas e por mais tempo devido ao fenômeno de atenuação solar.

Gráfico 40: Fluxo de calor por fonte (Caso 1A: “2mm, ‘Verão’”).

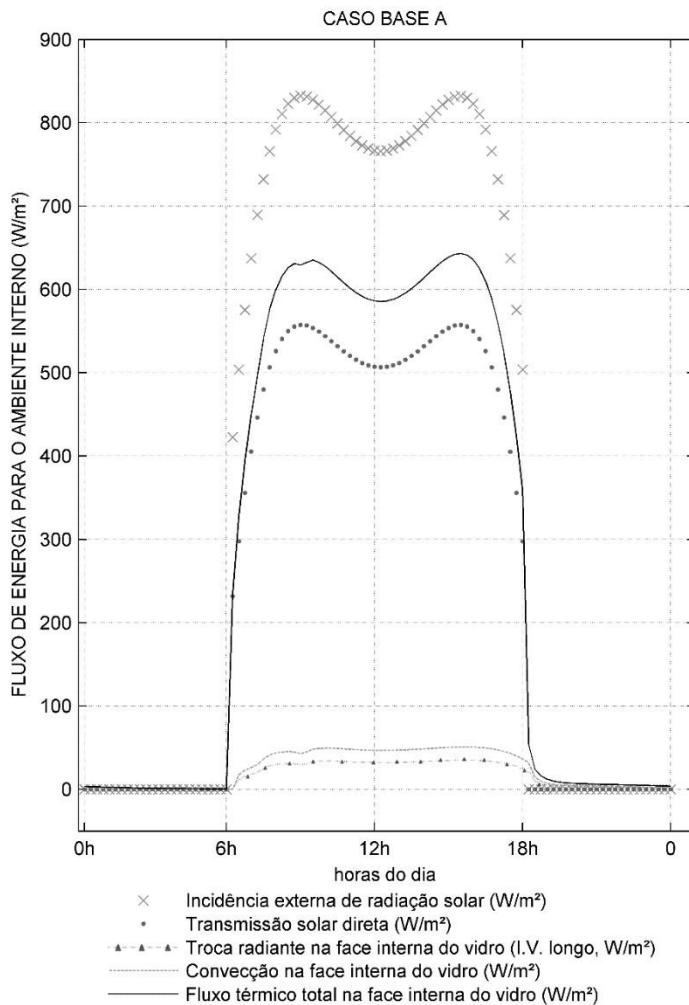


Gráfico 41: Fluxo de calor por fonte (Caso 1B: “2mm, ‘Inverno ameno’”).

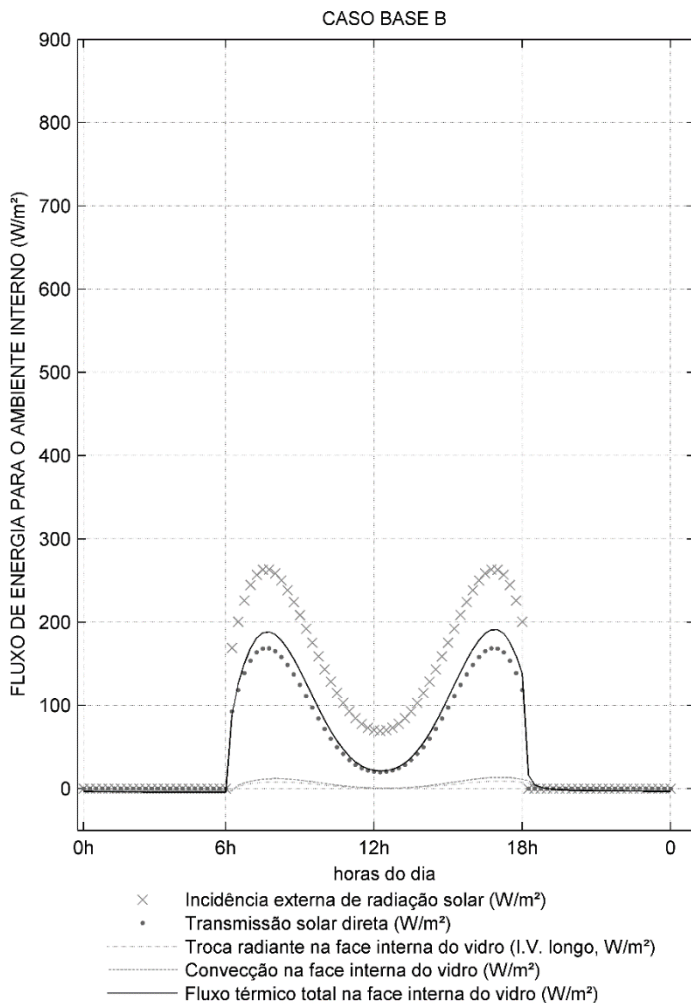


Gráfico 42: Fluxo de calor por fonte (Caso 1C: “100mm, ‘Verão’”).

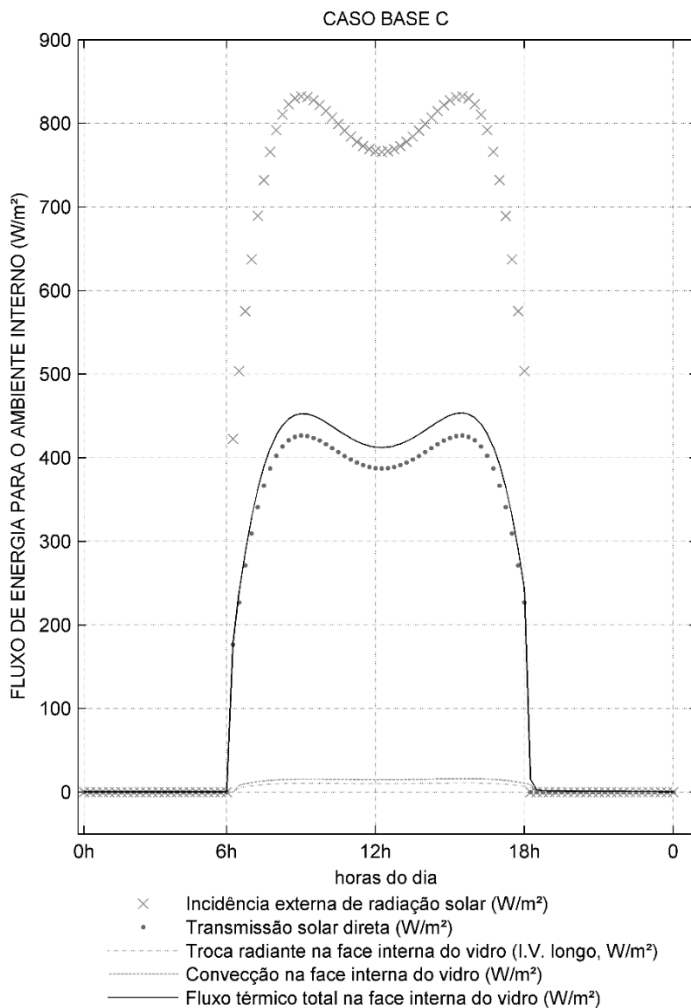
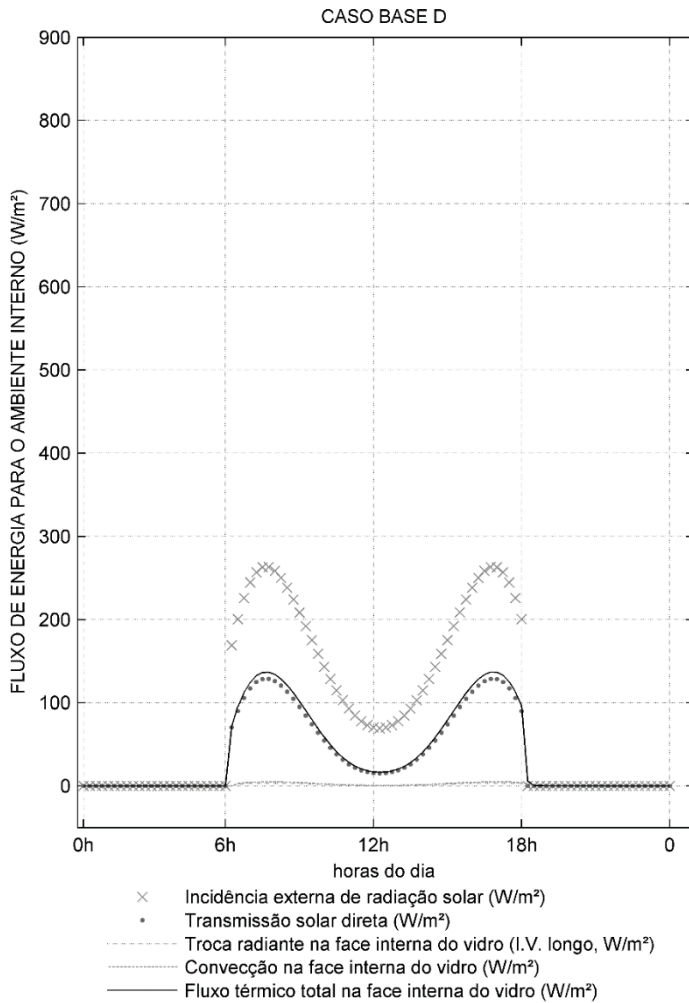


Gráfico 43: Fluxo de calor por fonte (Caso 1D: “100mm, ‘Inverno ameno’”).



Suscintamente, a análise de sensibilidade da etapa III.2 retrata que:

- Os modelos 8, 12 e 2 (troca radiante entre os vidros, negligência do efeito convectivo da água e modelo de Nusselt em placa vertical e não enclausurada) acarretam significantes diferenças no balanço térmico das transwalls avaliadas em relação aos outros modelos analisados. Tendo em vista que os referidos fenômenos Físicos são incoerentes para uma transwall, é fortune apontar que os outros modelos permitem maior confiabilidade mesmo antes de medições em campo;
- A mudança dos modelos de Nusselt (aparte do modelo 2) podem modificar substancialmente a temperatura da água, mas causam menor impacto no balanço térmico;
- As transwalls desempenham papel de atenuação térmica e não de atraso térmico (como a literatura revela para modelagens de transwalls espessas).

4.8 (Subetapa III.3) Dependência da variação angular

A análise da dependência da variação angular visa comparar o impacto no fluxo térmico para o ambiente interno e de balanço térmico entre dois grupos: “sem variação angular” - que adotam a absorção de radiação por material tabelada para o ângulo de incidência na normal (0°) e “com variação angular” - que considera o ângulo de incidência em cada material e, conseqüentemente, o aumento da distância percorrida pela radiação no meio e das refletâncias.

O Gráfico 44 e Gráfico 45 apresentam o fluxo de energia para o ambiente interno das quatro espessuras de água analisadas para o clima 2 de “Verão ameno” com o ângulo solar 1 (“Norte com sol à pino”) e 2 (“Norte com sol inclinado”) e comparando o desempenho com e sem dependência do ângulo solar na absorção de radiação ao longo do período de irradiância (6h até 18h). Posteriormente, esses dados são plotados em relação ao Fator solar equivalente (Gráfico 46) e a Tabela 31 apresenta o balanço térmico dos casos analisados e os pontos percentuais de diferença entre os mesmos.

O gráfico do fluxo de energia para o ambiente interno com a ângulo solar 2 aponta algumas oscilações do fluxo de calor em se tratando de lâminas de água com 2mm (o mesmo efeito já era observado no gráfico do Caso Base A). Vê-se também um inexpressivo envio de calor para o ambiente interno na transwall com 2mm nos minutos seguintes ao fim da incidência solar (18h), fenômeno inexpressivo nas outras espessuras de transwall. Também de baixa relevância para o balanço térmico, a lâmina de água de 100mm transfere uma quantidade baixa de energia para o ambiente interno ao longo da madrugada.

A curva do Fator solar equivalente ao longo do período solar (Gráfico 46), embora não seja constante, é proporcional à incidência de radiação pelo ângulo solar 1 e 2 sendo que no ângulo 1 há maior diferença entre o pico e vale de valores em relação ao ângulo 2.

A dependência angular mostrou reduzir a fluxo de calor para o ambiente interno. Os gráficos de fluxo de energia apontam que quanto menor o fluxo, maior a diferença entre o fluxo com e sem dependência angular. É perceptível também a discrepância de resultados do balanço energético em se tratando do ângulo solar 1, onde as quatro espessuras de água estão com mais de 20pp de diferença entre as simulações com e sem dependência angular. Conseqüentemente, prova-se indispensável a modelagem de variação angular na absorção da irradiação solar nas simulações de MTSF.

Gráfico 44: Comparação entre o fluxo de calor total com e sem variação angular (“Fachada Norte com sol a pino”).

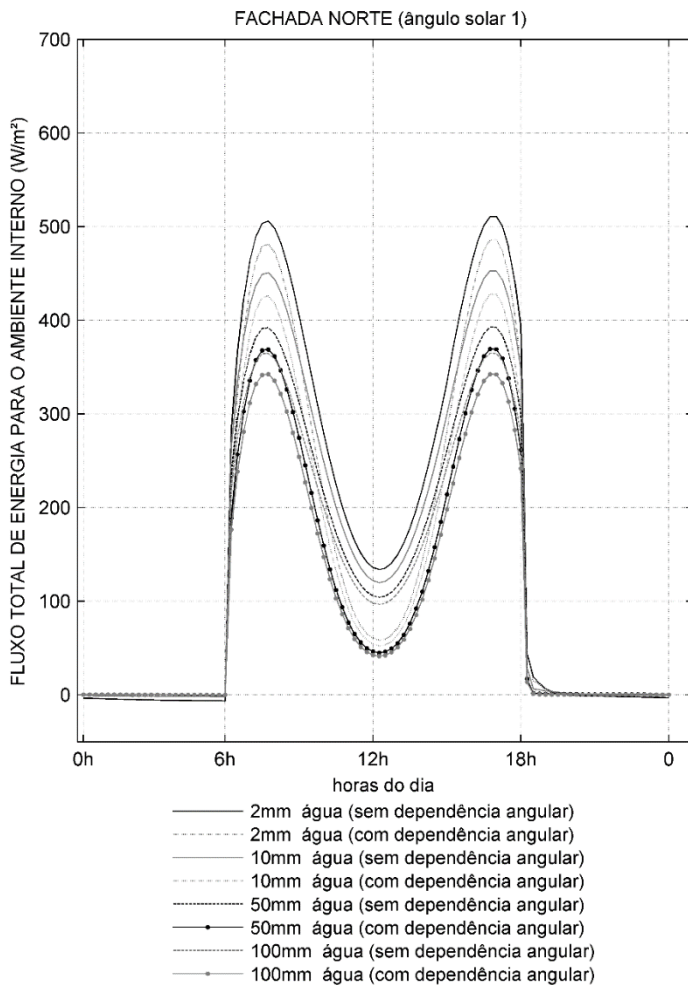


Gráfico 45: Comparação entre o fluxo de calor total com e sem variação angular (“Fachada Norte com sol inclinado”).

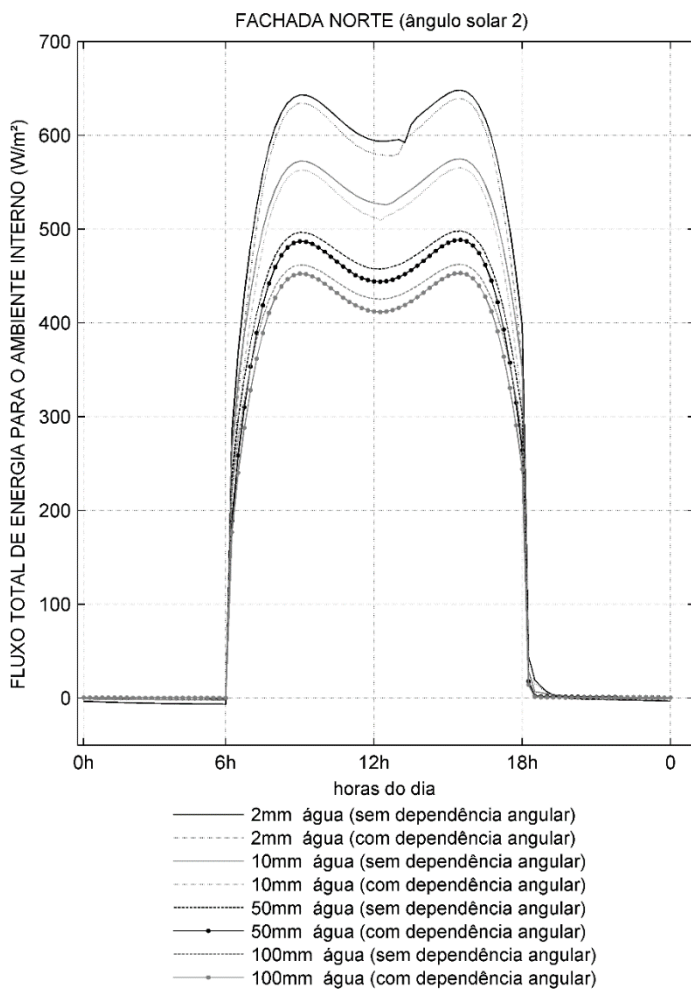


Gráfico 46: Fator solar equivalente ao longo do dia: análise da sensibilidade da variação angular para 2, 10, 50 e 100mm para fachadas “Norte com sol a pino” (ang. Solar 1) e “Norte com sol inclinado” (ang. Solar 2).

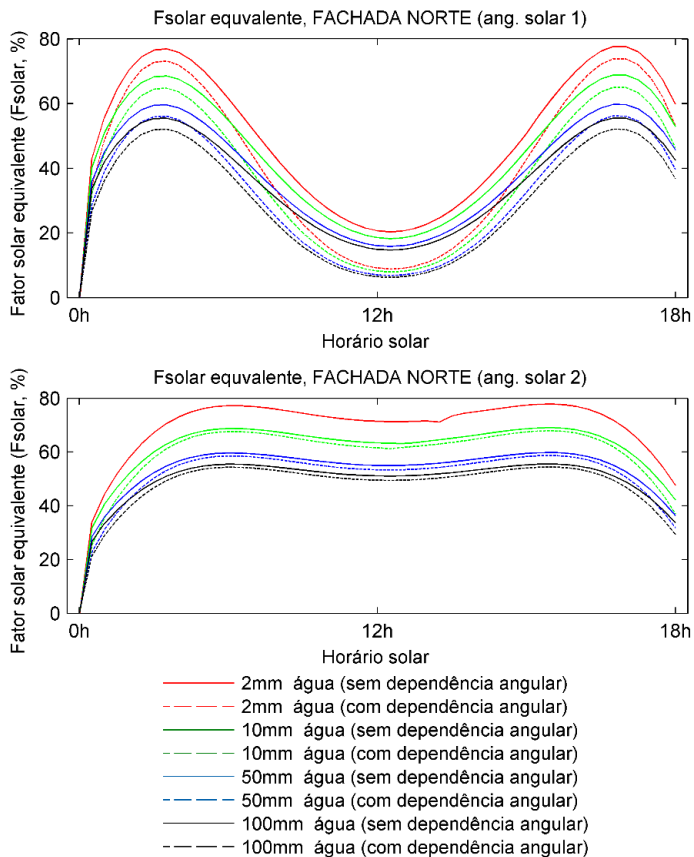


Tabela 31: Balanço de energia (dependência da variação angular).

Balanço (KWh/dia)	Ângulo solar 1				Ângulo solar 2			
	2mm	10mm	50mm	100mm	2mm	10mm	50mm	100mm
Sem dep. angular	3.73	3.40	3.00	2.80	6.53	5.93	5.22	4.87
Com dep. angular	3.10	2.82	2.47	2.30	6.31	5.72	5.03	4.69
Diferença (pp)	20	20	21	21	3	3	3	3

4.9 (Subetapa III.4) Análise de desempenho por orientação solar: cenários 1, 2 e 3

A subetapa III.4 apresenta como configurações análogas de transwall diferem em desempenho sob diferentes cenários climáticos.

Do Gráfico 47 ao Gráfico 52 são apresentados o fluxo total de calor para o ambiente interno das quatro espessuras analisadas (2mm, 10mm, 50mm e 100mm) para a orientação “Norte com sol inclinado”, “Leste”, “Oeste” (ângulo solar 2, 3 e 4) e também de uma transwall sem incidência solar. É plotado ainda a irradiância externa nestes gráficos. Utilizam-se três cenários:

- **Cenário 1** com irradiação na normal de 1000W/m² e temperatura externa modelo 1 “Verão”;
- **Cenário 2** com irradiação na normal de 400W/m² e temperatura externa modelo 1 “Verão” e
- **Cenário 3** com irradiação na normal de 400W/m² e temperatura externa modelo 3 “Inverno ameno”.

Em seguida a Tabela 32 expõe o balanço térmico destes casos e a Tabela 33 apresenta o Fator solar equivalente com o grifo de maior diferença entre resultados da mesma espessura e cenário. Os resultados são comentados por tópicos (atraso e atenuação térmica; Fator Solar equivalente; fluxo de calor sem incidência solar) para melhor compreensão.

Gráfico 47: Fluxo total, Cenário 1:
Irradiação na normal = 1000W/m^2 ; temperatura externa de “verão” para fachadas
“Norte com sol inclinado” (ang. solar 2) e “Leste” (ang. solar 3).

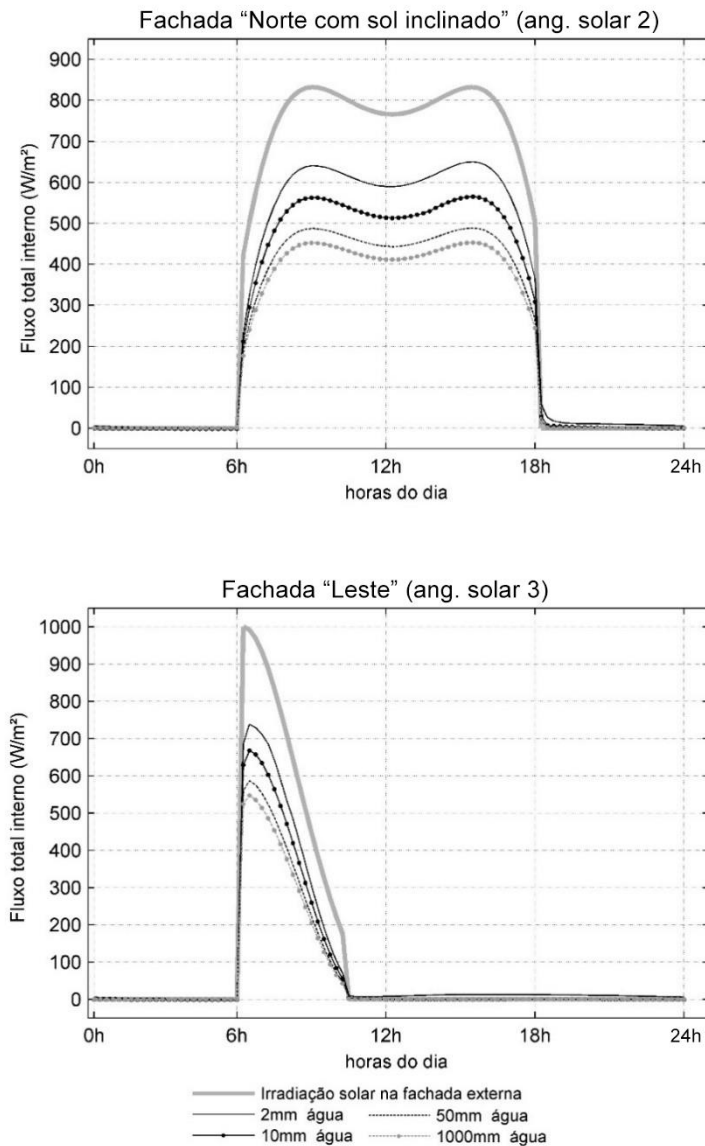


Gráfico 48: Fluxo total, Cenário 1
 Irradiação na normal = 1000 W/m^2 ; temperatura externa de “verão” para fachadas
 “Oeste” (ang. solar 4) e “sem incidência solar”

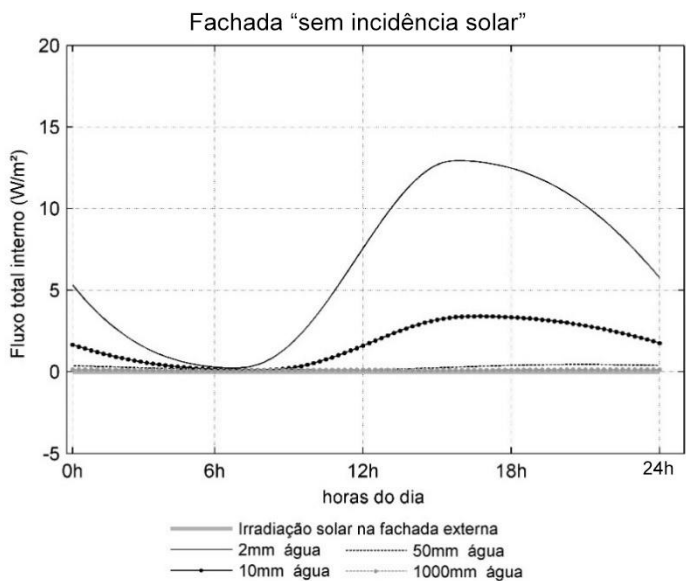
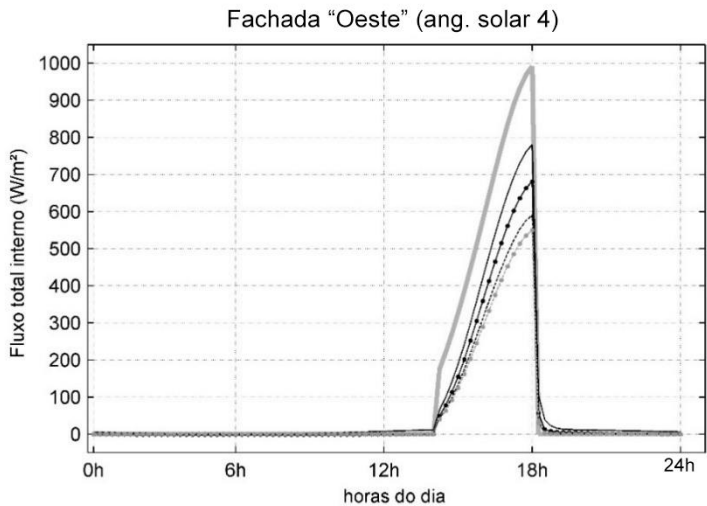


Gráfico 49: Fluxo total, Cenário 2
 Irradiação na normal =400W/m²; temperatura externa de “verão” para fachadas “Norte com sol inclinado” (ang. solar 2) e “Leste” (ang. solar 3).

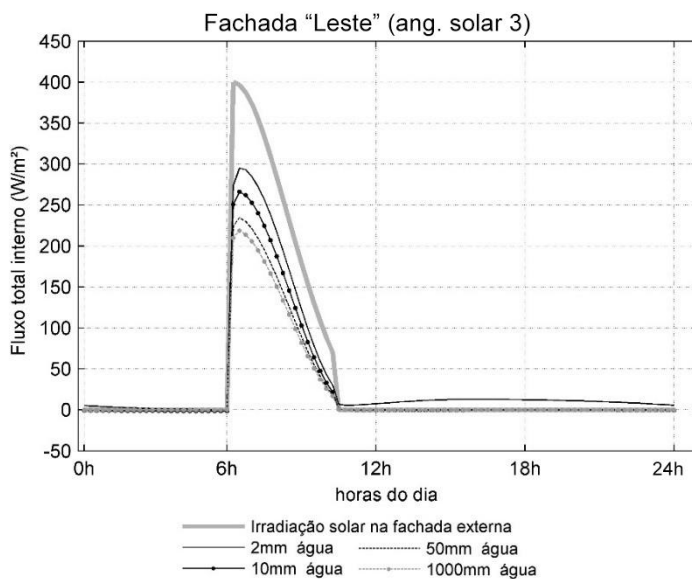
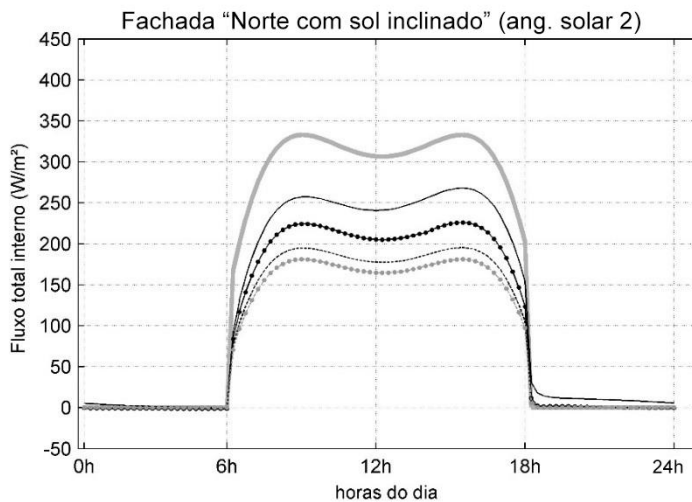


Gráfico 50: Fluxo total, Cenário 2
Irradiação na normal =400W/m²; temperatura externa de “verão” para fachadas
“Oeste” (ang. solar 4) e “sem incidência solar”

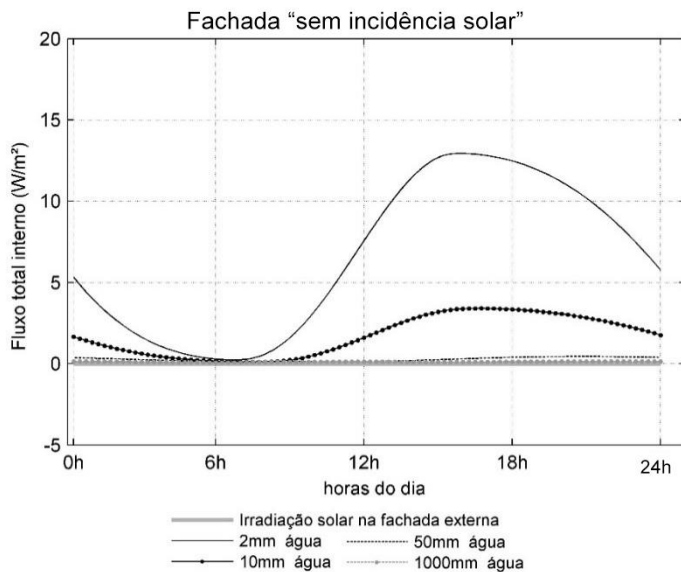
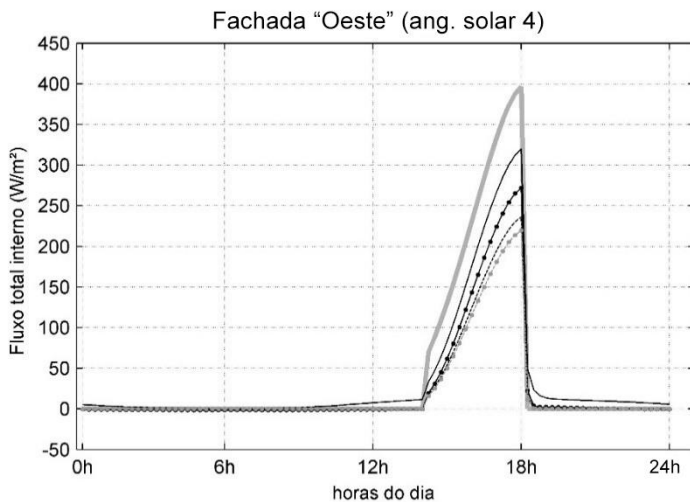


Gráfico 51: Fluxo total, Cenário 3
 Irradiação na normal = 400 W/m^2 ; temperatura externa de “inverno ameno” para fachadas “Norte com sol inclinado” (ang. solar 2) e “Leste” (ang. solar 3).

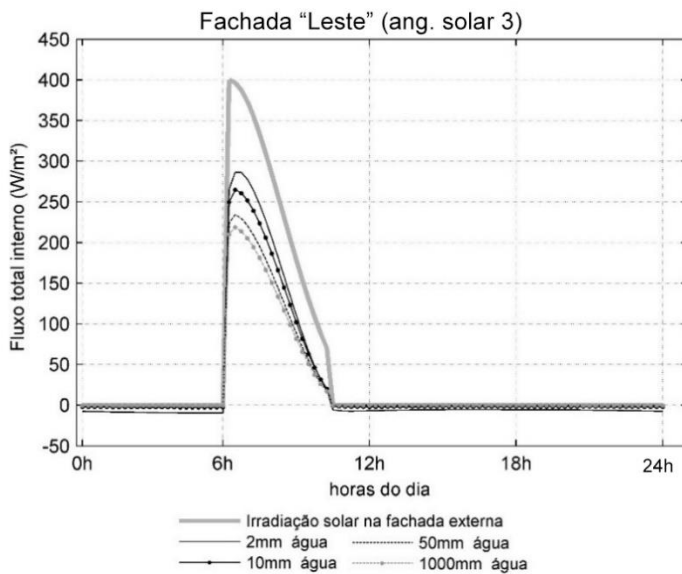
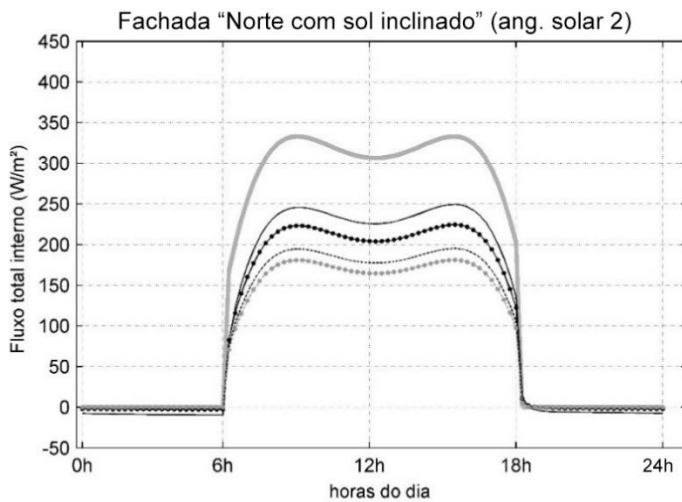


Gráfico 52: Fluxo total, Cenário 3
 Irradiação na normal = 400W/m^2 ; temperatura externa de “inverno ameno” para fachadas “Oeste” (ang. solar 4) e “sem incidência solar”

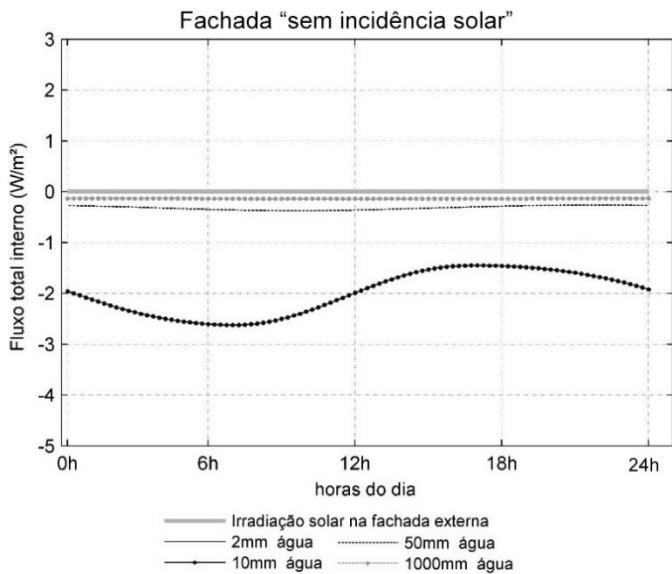
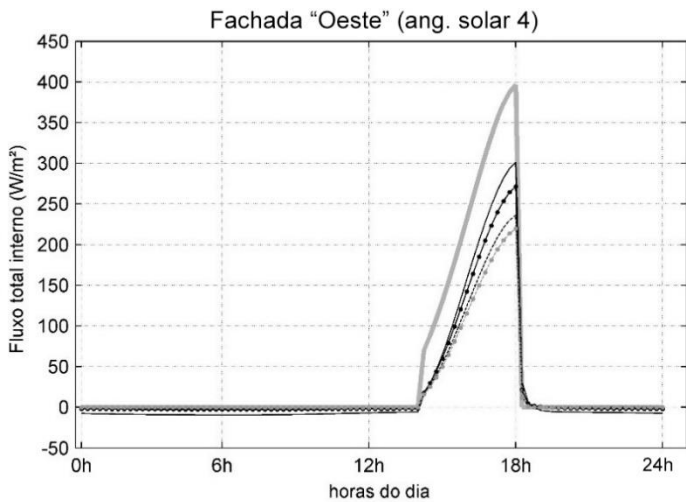


Tabela 32: Balanço térmico (Cenários 1, 2 e 3 para 2, 10, 50 e 100mm de água).

	2mm	10mm	50mm	100mm
		Cenário 1 (kWdia/m²)		
Norte	6.40	5.72	5.03	4.69
Leste	1.74	1.51	1.33	1.24
Oeste	1.74	1.51	1.33	1.24
Sem sol	0.062	0.016	0.0025	0.001
		Cenário 2 (kWdia/m²)		
Norte	2.59	2.28	2.012	1.87
Leste	0.73	0.60	0.53	0.49
Oeste	0.73	0.60	0.53	0.49
Sem sol	0.07	0.019	0.003	0.001
		Cenário 3 (kWdia/m²)		
Norte	2.46	2.27	2.01	1.87
Leste	0.60	0.58	0.53	0.49
Oeste	0.60	0.58	0.53	0.49
Sem sol	0.07	0.019	0.003	0.001

Tabela 33: Fator solar equivalente (Cenários 1, 2 e 3 para 2, 10, 50 e 100mm de água).

	2mm	10mm	50mm	100mm
		Cenário 1		
Norte	70.51%	63.11%	55.44%	51.68%
Leste	68.88%	59.89%	52.73%	49.15%
Oeste	68.91%	59.88%	52.72%	49.15%
Diferença*	1.63%	3.23%	2.72%	2.53%
		Cenário 2		
Norte	71.54%	63.01%	55.42%	51.67%
Leste	72.60%	59.55%	52.67%	49.13%
Oeste	72.63%	59.54%	52.67%	49.13%
Diferença*	1.06%	3.47%	2.75%	2.54%
		Cenário 3		
Norte	67.80%	62.65%	55.37%	51.65%
Leste	59.42%	58.22%	52.46%	49.04%
Oeste	59.44%	58.22%	52.46%	49.04%
Diferença*	8.38%	4.43%	2.91%	2.61%

* *Maior diferença absoluta entre as orientações*

A avaliação do atraso térmico e atenuação térmica aponta que os resultados reafirmam tendências encontradas nas subetapas anteriores. Para a face norte e oeste, ao fim da irradiação solar, o ganho térmico para

o ambiente interno cai drasticamente sem atraso térmico significativo nesse período e logo a curva do fluxo de calor total para o ambiente interno acompanha a curva do fluxo da fachada simulada sem radiação solar (anulando o efeito de fluxo de calor proveniente do aquecimento recebido da radiação solar). No cenário 3, esse fenômeno acontece ainda antes devido às menores temperaturas.

Nas fachadas leste é percebido um pequeno atraso térmico nos primeiros instantes de irradiação solar e que fisicamente pode ser explicado pelo armazenamento de calor na massa da água. Com atenção é possível perceber o mesmo efeito de atraso também nas primeiras horas de irradiação da fachada norte ao comparar-se a curva de fluxo solar entre o começo e o final do dia.

A avaliação do Fator solar equivalente (F_{solar}) aponta que:

- Exceto para a lâmina de 2mm de água no caso 3, há uma proximidade entre o F_{solar} para as três faces analisadas (norte, leste e oeste) quando sob mesmo cenário e espessura;
- Nota-se que o comportamento entre o F_{solar} de leste e oeste é muito parecido. Como as duas situações recebem o mesmo montante de energia por irradiância, o corte abrupto de incidência solar na máxima potência ao fim da manhã para leste e o início instantâneo de altas taxas de radiação no começo da tarde para oeste evidenciam a insignificância do atraso térmico em transwalls delgadas;
- Há também enorme proximidade entre o F_{solar} para as lâminas mais grossas de água (10mm, 50mm e 100mm) dos três cenários para cada orientação. Diferentemente, o caso com 2mm de água tem comportamento peculiar e diferenças mais acirradas de F_{solar} dependendo da orientação e cenário ambiental;
- O aumento da espessura da água reduz o F_{solar} , no entanto, sem relação linear. A Tabela 34 apresenta a diferença entre o F_{solar} dos casos analisados por valor absoluto (valores à esquerda) e pela relação de milímetro de água adicionado (valores à direita e em itálico). Exceto para o cenário 3 com 2mm, o aumento a cada milímetro de água da lâmina de 2mm para 10mm (8mm no total) reduz aproximadamente 1% do F_{solar} . Contrariamente, o aumento de 10mm para 50mm (40mm no total) reduz o F_{solar} a taxas menores que 0.2% por milímetro e de 50mm para 100mm (50mm no total) a taxa encontra-se abaixo de 0.1% por milímetro o que reduz drasticamente a utilidade de maiores massas de água;

Tabela 34: Redução do Fator Solar equivalente com o aumento da espessura da água (Cenários 1, 2 e 3).

	8mm (de 2 para 10mm)		40mm (de 10 para 50mm)		50mm (de 50 para 100mm)	
(Cenário 1)	% absoluta	% por mm	% absoluta	% por mm	% absoluta	% por mm
Norte	7.40%	0.92	7.67%	0.19	3.76%	0.08
Leste	9.00%	1.12	7.16%	0.18	3.57%	0.07
Oeste	9.04%	1.13	7.15%	0.18	3.57%	0.07
(Cenário 2)	% absoluta	% por mm	% absoluta	% por mm	% absoluta	% por mm
Norte	8.52%	1.07	7.59%	0.19	3.76%	0.08
Leste	13.05%	1.63	6.88%	0.17	3.54%	0.07
Oeste	13.09%	1.64	6.87%	0.17	3.54%	0.07
(Cenário 3)	% absoluta	% por mm	% absoluta	% por mm	% absoluta	% por mm
Norte	5.16%	0.64	7.28%	0.18	3.72%	0.07
Leste	1.20%	0.15	5.75%	0.14	3.42%	0.07
Oeste	1.23%	0.15	5.75%	0.14	3.42%	0.07

- Há uma tendência de o F_{solar} da fachada norte ser levemente mais alto que o das faces leste e oeste (exceto para o cenário 2 com 2mm de lâmina de água). A fachada norte passa mais horas com irradiação solar e consequentemente os raios de sol tem papel mais intenso no balanço térmico do ambiente interno que a influência da temperatura externa;

No cenário 2 com 2mm de água a participação da troca radiante e convecção na fachada leste e oeste é bem mais intensa no montante final de energia ganha (Tabela 35) e, portanto, o F_{solar} destas fachadas tornam-se levemente mais altos que o Fator solar da face norte. Os sinais negativos para ganho por troca radiante e por convecção do cenário 3 indicam que houve perda e não ganho de calor.

Tabela 35: Participação por tipo de fonte de calor no balanço energético (caso de 2mm de água).

	Transmissão solar direta	Ganho por troca radiante (I.V.)	Ganho por convecção
Cenário 1 (2mm)			
Norte	85.20%	6.00%	8.70%
Leste	81.17%	7.62%	11.21%
Oeste	79.23%	8.43%	12.34%
Cenário 2 (2mm)			
Norte	82.40%	7.10%	10.50%
Leste	72.85%	10.92%	16.23%
Oeste	70.46%	11.90%	17.63%
Cenário 3 (2mm)			
Norte	93.10%	2.70%	4.00%
Leste	114.13%	-5.63%	-8.50%
Oeste	115.40%	-6.12%	-9.28%

A avaliação do fluxo de calor para as fachadas sem incidência solar demonstram que espessuras delgadas de água permitem maiores flutuações térmicas (seja para ganho ou perda de calor). Quando aumenta-se a espessura da lâmina de água, o fluxo é atenuado ressaltando o papel da carga térmica da água. Mesmo assim, os fluxos de energia para fachadas não expostas ao sol mantêm-se baixos.

Os resultados expõem um padrão de F_{solar} aproximadamente de 50% para transwalls com 100mm de água, entre 52 e 55% para 50mm de água, entre 59 e 63% para 10mm de água. Não é possível determinar um padrão de Fator solar equivalente para lâminas com 2mm de água, expondo a necessidade de mais simulações para transwalls com lâminas de água muito delgadas.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os parâmetros óticos e térmicos necessários para avaliação do desempenho de transwalls delgadas, bem como uma avaliação do desempenho térmico – por meio de simulação – deste sistema construtivo para regiões de clima quente. Os estudos anteriores sobre transwalls se limitavam a sistemas espessos e que, na maioria dos casos estudados, adotavam condições ambientais externas típicas de regiões de clima frio; haviam consideráveis lacunas técnicas na modelagem ótica empregada, bem como simplificações grosseiras na modelagem térmica. Este trabalho de dissertação, portanto, sanou estas lacunas; validou o modelo ótico empregado, avaliou as incertezas dos modelos térmicos testados (sendo que foi utilizado Método Transiente de Seções Finitas unidimensional e bidirecional e não foi testado nenhuma simulação em CFD) e por fim simulou o desempenho térmico de transwalls delgadas com 2, 10, 50 e 100mm de lâmina de água entre vidro simples de 3mm para climas quentes a partir de um dos modelos térmicos com menor incerteza observada.

Para validar a modelagem ótica, foram realizadas medições no espectrofotômetro de transwalls delgadas com água. Aproveitou-se nesta etapa a disponibilidade do equipamento de laboratório e foram testadas também transwalls com outros compostos transparentes além da água para avaliar líquidos com espectroseletividade possivelmente mais alta que a água. Devido ao escopo temporal e científico da dissertação, e sendo que nenhuma das amostras testadas teve resposta espectroseletivamente melhor que o da água, a pesquisa de novos líquidos aplicáveis às transwalls foi interrompida após a primeira leva de testes que englobaram alguns álcoois, soluções e ácido acético. O estudo de modelagem ótica e térmica prosseguiu adotando a água como elemento de absorção da radiação solar nas etapas posteriores. As medições apontam para transwalls com 2mm de lâmina de água uma transmissão solar de 68.9% com transmissão visível de 87.9%. No caso de 10mm de lâmina de água, a transmissão solar foi de 64.1% e 88% de transmissão visível. Percebeu-se também que transwall com água transmitem taxas luminosas mais altas que vidro duplo vazio.

O fenômeno ótico das transwalls foi equacionado a partir da transmissão e absorção de cada material e das refletâncias entre as faces dos materiais ponderando-se os diferentes comprimentos de onda da radiação solar, considerando a polarização da luz e a angulação da radiação incidente em relação à perpendicular da transwall. Os modelos óticos para transwall já publicados anteriormente (sem reflexão, apenas

com reflexão externa e com interreflexão de primeira ordem) foram comparados à modelagem de interreflexão de 2ª ordem – formulação criada pelo autor desta dissertação – e às medições no espectrofotômetro de transwalls com água.

Os resultados óticos deste trabalho corroboram o potencial da água em absorver radiação solar fora do espectro visível em seus primeiros milímetros, validam o uso de água em transwalls mesmo com lâminas delgadas e apontam que a modelagem com interreflexão de 2ª ordem já é suficientemente precisa para representar um sistema ótico de três materiais, muito embora ainda caibam estudos com simulações mais acuradas envolvendo infinitas reflexões as quais possam ser ainda mais precisas nos resultados apresentados. Pelo método de interreflexão de 2ª ordem e com a base de dados mais precisa encontrada em bibliografia (Base E), constatou-se que uma transwall com 2mm de lâmina de água absorve 23.3% de radiação solar e transmite 68.38%; com 10mm de lâmina de água absorve 28.48% e transmite 63.04% e com 50mm de lâmina de água absorve 35.52% e transmite 56%.

Metodologicamente, é de suma importância a precisão dos dados óticos dos materiais e que adotem bandas pequenas de espectro solar (p.ex. 5mm). Os dados óticos simulados por outros autores sem precisão dos fenômenos Físicos de transferência de radiação em transwalls (transmissão e absorção de radiação equivocadas devido a coeficientes de absorção de radiação e índices de refração imprecisos) e sem validação com medições reais sob parâmetros confiáveis pode, inclusive, refutar os resultados e conclusões de várias publicações existentes. Ainda, uma avaliação da incerteza da refletância entre as faces vidro-líquido das transwalls e vidro-ar mostrou que uma entrada de dados para a refletância vidro-ar é substancialmente mais sensível que o valores errados para o índice de refração do líquido empregado na transwall. É preciso bastante cautela na adoção dos valores de índice de refração do ar, consequentemente.

A etapa de calibração e convergência do Método Transiente de Seções Finitas para a análise térmica da transwall apontou em relação a estudos anteriores menor necessidade de dias de simulação para alcançar convergência de resultados. Os resultados desta dissertação asseguram que são necessários três a quatro dias para atingir convergência de resultados enquanto as simulações de Wu e Lei (2016c) apontam o dobro do intervalo de dias para que o mesmo estado seja atingido. A certificação da validade de resultados simulados com intervalo de tempo para atingir convergência menor reduz substancialmente o tempo de simulação para transwalls, especialmente em computadores menos potentes.

A análise de sensibilidade dos modelos térmicos de transwall mostrou que diferentes modelagens apresentam divergências entre si das temperaturas diárias ao longo de uma seção de transwall, mas não necessariamente têm fluxo de calor para ambiente interno com taxas diferentes. Observou-se um fluxo de calor para o ambiente interno bastante similar para as modelagens que modificaram, em relação ao modelo base, a utilização de propriedades termofísicas constantes da água ao invés de propriedades que variam de acordo com a temperatura do fluido; a variação do modelo de absorção de radiação solar (de seção para média); a homogeneização da temperatura da água na câmara da transwall; a variação da massa das paredes de vidro; a temperatura do céu e a utilização de modelos convectivos de câmara enclausurada. Por outro lado, o uso de modelos convectivos não propícios para câmara enclausurada (como convecção natural em placa vertical ao invés de convecção natural enclausurada), a negligência do efeito convectivo da água (como admitido por FUCHS; MCCLELLAND, 1979) e, principalmente, a adoção de troca radiante entre as faces internas dos dois vidros da transwall (como adota por WU; LEI, 2016c) acarretam consideráveis modificações no balanço térmico do sistema e aumentam as incertezas do modelo.

Ainda que a interpolação das propriedades termofísicas dos materiais (água e vidro) teve pequeno impacto nos resultados de balanço térmico e no Fator solar equivalente, é cabível adotá-las sempre que possível para reduzir incertezas. Também, Não é recomendável desconsiderar a diferença na taxa absorção de radiação quando se varia o ângulo de irradiação uma vez que tal medida pode acarretar em significativa imprecisão dos resultados. É de extrema importância, conseqüentemente, a elaboração cuidadosa de uma matriz com valores de absorção de radiação com dependência angular para cada material (vidro e água neste caso) como dado de entrada para interpolação na simulação pelo MTSF.

A comparação de Fator solar equivalente para transwalls com 2mm, 10mm, 50mm e 100mm apontam que a proximidade dos resultados de Fator solar equivalente das amostras com espessura de lâmina de água acima de 10mm dão fortes indícios que o a modelagem de transferência de calor por MTSF é convergente e não precisa ser substituída por simulação CFD para estes casos. A afirmação se justifica na condição em que, mesmo sob cenários ambientais diferentes, o desempenho térmico foi muito parecido (em outras palavras, transwalls com mais de 10mm de água tem menor sensibilidade às variantes ambientais). A variação do Fator solar equivalente para 2mm de lâmina de água expõe que não é

possível determinar um padrão de Fator solar equivalente para lâminas com 2mm de água pelo MTSF uma vez que os resultados são consideravelmente discrepantes. A razão para tais diferenças pode ser a peculiaridade intrínseca de lâminas muito finas de água em transwalls bem como incapacidade do MTSF simular tais condições, sendo necessário recorrer à CFD.

O Fator solar equivalente avaliado a partir de três cenários ambientais distintos e para três orientações (leste, oeste, norte) e sem incidência solar variou entre 51.68% e 49.04% para 100mm de lâmina de água; entre 55.44% e 52.46% para 50mm de lâmina de água; entre 63.11% e 58.22% para 10mm de lâmina de água e apresentou demasiada variação para a lâmina de 2mm de água: entre 72.63% e 59.42%.

Por fim, as simulações realizadas apontam que as transwalls delgadas desempenham importante papel de atenuação térmica, sem gerar atraso térmico relevante e se sustentam como uma coerente opção de vedação para edifícios em climas quentes. O aumento da espessura da lâmina da água reduz, mas não linearmente, a transmissão de radiação do sistema e não há prejuízos à transmissão luminosa, muito pelo contrário, há ganho luminoso em relação ao vidro duplo comum e mantém se aspecto incolor da vedação.

Limitações da pesquisa

Diante do cronograma de um mestrado, houve pouco tempo para a análise de líquidos espectroseletivos além da água. Pelo mesmo motivo, não foi feita uma análise do ciclo de vida de uma transwall, bem como o controle da qualidade do líquido. Apenas foi testado no espectrofotômetro uma amostra de solução com polietilenoglicol que tem capacidade controlar a proliferação de fungos e observou-se que tal solução tem espectrometria parecida com a água comum/destilada e, conseqüentemente, seu uso em transwalls poderia garantir as condições iniciais da água sem incorrer em perda de capacidade ótica.

Quanto à precisão entre resultados de transmissão e absorção solar simulados em relação aos ensaiados no espectrofotômetro, os protótipos de água com 2mm e vazios (vidro duplo) apresentaram menor convergência se comparados ao protótipo com lâmina de água de 10mm. Supõe-se que os dados do vidro se tornam mais preponderantes nos resultados simulados de transwalls quando se reduz a espessura da lâmina de água e tal condição poderia explicar o aumento divergência entre resultados simulados e medidos. Tal padrão indica avaliar a precisão dos

dados do vidro utilizados na simulação e é possível que outra base de dados para vidros possa ser mais precisa que a utilizada neste trabalho.

Não foi possível reproduzir a modelagem ótica de ray tracing por série geométrica apontada por Papersenos (1983) porque tal modelo, em sua formulação completa, não constava em anexo na tese do referido autor. Seria proveitoso obter informações mais detalhadas sobre o método aplicado por Papersenos (1983) para modelar reflexões infinitas em sistemas de três materiais e quatro faces. É cabida, portanto, uma tentativa de contato com o autor.

Ressalta-se a importância da disponibilidade de equipamentos técnicos para o desenvolvimento desta pesquisa, como o espectrofotômetro que abrange todo o espectro solar, assim como a necessidade de computadores potentes.

Sugestões para trabalhos Futuros

Os avanços de futuras pesquisas de tranwalls delgadas serão apresentar soluções com melhor espectroseletividade mantendo a espessura delgada do sistema.

Neste trabalho não foi considerado o fenômeno de dissociação iônica das soluções (p.ex. a separação do Na e Cl na água) e, portanto, não foi medido a espectrometria de água com NaCl, mas sim a água com Na^+ e Cl^- . Logo, cabem ainda testes com as soluções da etapa I utilizando elementos que ajudem na manutenção da ligação molecular (p.ex. surfactantes).

Uma revisão de literatura mais detalhada incluindo uma análise sistemática da base de dados de coeficientes de absorção molar (já considerando suas dissociações na água) permitirá ampliar o grupo de líquidos transparentes que merecem ser ensaiados no espectrofotômetro;

Além da eficiência na espectroseletividade, é imprescindível uma análise de ciclo de vida desses líquidos sob intempéries ambientais para uma aplicação efetiva dos mesmos em transwalls (p.ex. processos de precipitação, evaporação, corrosão, espectroscopia com o passar dos anos etc.).

É necessário uma revisão bibliográfica mais detalhada acerca do real benefício em vedações transparentes da transmissão de maiores taxas de luz e menores de calor no que tange o desempenho e conforto térmico e luminoso. Tal revisão terá o papel de elucidar pontos não abordados neste trabalho como a economia de consumo de energia elétrica, o impacto de ofuscamentos no desempenho ótico de transwalls e a comparação com outros vidros disponíveis no mercado.

Acerca da possível imprecisão da base de dados para vidro utilizada neste trabalho e advinda da literatura de Rubin (1985), é cabível avaliar se a substituição dos dados de índice de refração e coeficiente de absorção molar de Rubin (1985) por outro banco de dados resultaria em maior convergência de valores bem como ensaiar um protótipo com 50mm de água para mais dados comparativos.

É imprescindível a simulação do comportamento ótico das transwalls pelo método de matrizes recomendado pela ISO 15009-2003. Não obstante, a precisão de resultados obtida pelo método de reflexão de segunda ordem se comparados às medições espectrofotométricas validam os resultados obtidos em simulação desta dissertação.

Ainda cabe um estudo das mesmas condições térmicas simuladas neste trabalho, mas sem temperatura interna fixa para avaliar o impacto deste parâmetro no desempenho simulado das transwalls.

É imprescindível realizar medições em campo das transwalls analisadas e, a partir dados ambientais e de transferência de calor coletados, validar a modelagem térmica pelo MTSF ao comparar os resultados coletados e simulados sob mesmas condições ambientais. Em condições de baixa convergência desses resultados simulados por MTSF e as medições em campo, caberá certamente recorrer às simulações CDF para avaliar o desempenho do sistema de transwall.

REFERÊNCIAS

ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. **Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros**. XV Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, n. 1, p. 926–935, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.023**: Vidros revestidos para controle solar – requisitos, classificação e métodos para ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 18 p.

ASTM. **G173–03 Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances**: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Philadelphia, American Society of Testing Materials, 2003.

BAINBRIDGE, D. **A Water Wall Solar Design Manual**. 2005. Disponível em:
<<http://www.builditsolar.com/Projects/SpaceHeating/AWaterWallIntro.pdf>>
>

BALCOMB, J. D.; HEDSTROM, J. C.; McFARLAND, R. D. **Simulation analysis of passive solar heated buildings** - Preliminary results. Solar Energy, vol. 19, no. 3, 1977, p. 277-282. DOI: 10.1016/0038-092X(77)90071-8

BARBOSA, Luiz Claudio de Almeida. **Espectroscopia no infravermelho: na caracterização de compostos orgânicos**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2008. 189 p. ISBN 9788572692809 (broch.).

BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. 2nd ed. New York: J. Wiley, 1995. 623p. ISBN 0471579726

BEJAN, Adrian. **Heat transfer**. New York: John Wiley & Sons, c1993. xxiii, 675 p. ISBN 0471502901.

BODART, M.; HERDE, A. DE. **Global energy savings in offices buildings by the use of daylighting**. Energy and Buildings, v. 34, n. 5, p. 421–429, 2002.

BOGO, A. J. **Método para avaliação da admissão de luz natural através de aberturas com elementos de controle solar**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. 308 p.

BOYCE, P. **Human Factors in Lighting**. 2º ed.525p., Londres, Taylor & Francis, 2003.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional** – ano base 2016. Brasília, Governo Federal: 2017.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia-2030**. Brasília, Governo Federal: 2007.

CARAM, R. M. **Estudo e Caracterização de Fachadas Transparentes para Uso na Arquitetura: Ênfase na Eficiência Energética**. 2002. 189p. Texto (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CARVALHO, M.; LA ROVERE, E.; GONÇALVES, A. **Analysis of variables that influence electric energy consumption in comercial buildings in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 9, p. 3199 – 3205, dez. 2010.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2007

DIDONÉ, E. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edificios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

ENERGYPLUS. **EnergyPlus Engineering Reference**. EnergyPlus 8.9, 2018.

ENGINEERINGTOOLBOX. **Refractive Index for some common Liquids, Solids and Gases**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/refractive-index-d_1264.html>. Acesso em: abril de 2018.

GONZÁLEZ, Alfredo. **Analysis of the thermal performance and comfort conditions produced by five different passive solar heating strategies in the United States midwest**. *Solar Energy*, [s.l.], v. 81, n. 5, p.581-593, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.09.010>.

FUCHS, R.; MCCLELLAND, J.f.. **Passive solar heating of buildings using a transwall structure**. Solar Energy, [s.l.], v. 23, n. 2, p.123-128, 1979. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(79\)90112-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(79)90112-9).

GALASIU, A.; VEITCH, J. **Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review**. Energy and Buildings, v. 38, p. 728 – 724, 2006.

HESHONG, L. **Window and Offices: A study of Office Worker Performance and the Indoor Environment**. Heshong Mahone Group - Public Interest Energy Research - California Energy Commission. Fair Oaks: outubro 2003.

IEA (International Energy Agency). **Daylighting in buildings**. A source book on daylighting systems and components. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory, EUA, 2000.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008. 643 p.

INPE. **Atlas brasileiro de energia solar - 2ª Edição**. São José dos Campos, SP, 80 páginas, 2017.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética nas Edificações**. PW Editores. São Paulo, 2014. 366 p.

LBL. Software **OPTICS 6.0**. , 2013. U.S Department of Energy Office. Disponível em: <<http://www.lbl.gov/>>.

LIMA, K. et al. **Sensores óticos com detecção no infravermelho próximo e médio**. Quim. Nova, Vol. 32, No. 6, 1635-1643, 2009.

MARINOSKI, D. **Desenvolvimento de um calorímetro para determinação do fator solar de vidros e janelas**. 227p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MARINOSKI, D.; ORIGE, L.; GUESSER, A.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Análise comparativa de valores de refletância de superfícies opacas utilizando diferentes equipamentos de medição em laboratório**. Encontro

Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, Anais, Brasília, DF, 2013.

MAYHOUB, M. S.; CARTER, D. J. **The costs and benefits of using daylight guidance to light office buildings.** Building and Environment, v. 46, n. 3, p. 698-710. 2011.

McFARLAND, R.D.; BALCOMB; J.D. **Effect of design parameter changes on the performance of thermal storage wall passive systems.** Proceedings of the 3rd National Passive Solar Conference, 1979.

MOTTA, S. **Análise da influência do vidro das janelas sobre o consumo energético das edificações.** ENCAC. Anais. Ouro Preto, MG, 2007.

NAYAK, J. **Thermal performance of a water wall.** Building and Environment, vol. 22, 1, 1987 (1987a), páginas 83-90. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(87\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0360-1323(87)90045-X)

NAYAK, J. **Transwall versus trombe wall: relative performance studies.** Energy Convers. Mgmt Vol. 27, No. 4, 1987 (1987b), páginas 389-393. DOI: 10.1016/0196-8904(87)90117-8

NAYAK, J., BANSAL, N., SODHA, M. **Analysis of passive heating concepts.** Solar Energy 30, p. 51 – 59, 1983.

NISBET, S.k.; MTHEMBU, N.s. (1992) **Transwall modelling using effective conductivities.** Solar Energy, [s.l.], v. 49, n. 2, p.127-138, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(92\)90147-3](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(92)90147-3). NISBET, S.K.; KWAN, C.M. The application of the transwall to horticultural glasshouses. Solar Energy, 39 (6) (1987), páginas. 473-482. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(87\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(87)90054-5)

NOH-PAT, F. et al. **Thermal analysis for a double glazing unit with and without outdoor solar control film (SnS-CuxS) for using in hot climates.** Energy and Buildings, v.40, n.3, p.240-248, jan. 2008.

PALMER, Kent F.; WILLIAMS, Dudley. **Optical properties of water in the near infrared.** Journal Of The Optical Society Of America, [s.l.], v. 64, n. 8, p.1107-1150, 1 ago. 1974. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/josa.64.001107>.

PAPERSENOS, George, F. (1983) **The analysis of the transwall passive solar system**. 291p. Texto (PhD) – Universidade de Glasgow, Glasgow, Escócia.

PEREIRA, F. O. R. Luminous and Thermal Performance of Shading and Sunlighting Reflecting Devices. Building Science Unit School of Architectural Studies, University Of Sheffield, Sheffield, 1992. 301 p.

PFROMMER, P. et al. **The radiation transfer through coated and tinted glazing**. Solar Energy, [s.l.], v. 54, n. 5, p.287-299, maio 1995. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(94\)00132-w](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(94)00132-w).

RUBIN, M.. **Optical properties of soda lime silica glasses**. Solar Energy Materials, [s.l.], v. 12, n. 4, p.275-288, set. 1985. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0165-1633\(85\)90052-8](http://dx.doi.org/10.1016/0165-1633(85)90052-8).

SALDANHA, A. M. **Desempenho térmico e eficiência energética em edifício de escritório: análise do uso de fachadas de vidro diretamente expostas à radiação solar na cidade de Cuiabá-MT**. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso, 2012.

SANTANA, M.; GHISI, E. **Influência do percentual de área de janela na fachada e da absortância de paredes externas na cidade de Florianópolis**. ENCAC. Anais, Natal, RN, 2009.

SEGELSTEIN, D. **The complex refractive index of water**. (tese), University of Missouri–Kansas City, 1981.

SODHA, SM.S.; BANSAL, N.K.; RAM, S. **Periodic analysis of a Transwall: A Passive Heating Concept**. Applied Energy, volume 14, 1, maio 1983, páginas 33-48. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(83\)90026-0](https://doi.org/10.1016/0306-2619(83)90026-0)

SOUZA, M. **Impacto da luz natural no consumo de energia elétrica em um edifício de escritório em Florianópolis**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

TIWARI, G.N.; UPADHYA, N.; RAI, S.N. **Relative thermal performances of south walls in winter**. Energy and Buildings. Volume 17, 4, 1991, páginas 313-320. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90013-S](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90013-S)

UPADHYA, M.;TIWARI, G.N. **Optimum distribution of water-wall thickness in a transwall.** Energy and Buildings, Volume 17, 2, 1991, páginas 97-102. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90002-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90002-K)

WESTPHAL, F. **Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

WU, T; LEI, C. **A review of research and development on water wall for building applications.** Energy And Buildings, [s.l.], v. 112, p.198-208, jan. 2016 (2016a). Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.003>.

WU, T; LEI, C. **CFD simulation of the thermal performance of an opaque water wall system for Australian climate.** Solar Energy, volume 133, ago. 2016, (2016b) páginas 141-154

WU, T; LEI, C. **Comparison of various RANS models for conjugate turbulent natural convection with radiation in a cavity.** Proceedings of CHT-15, ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer. 2015 (2015b). DOI: 10.1615/ICHMT.2015.IntSympAdvComputHeatTransf.560

WU, T; LEI, C. **On numerical modelling of conjugate turbulent natural convection and radiation in a differentially heated cavity.** Energy and Buildings, Volume 91, dez. 2015, (2015a), páginas 454-466. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.113>

WU, T; LEI, C. **Thermal modelling and experimental validation of a semi-transparent water wall system for Sydney climate.** Solar Energy, volume 136, 15 out. 2016 (2016c), páginas 533-546. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.026>

XIANGFENG, L.; TIANGXING, S. **Conceptual Development of Transparent Water Storage Envelopes.** Architectural Science Review, volume 50, 1, 2011 (2011b).

XIANGFENG, L.; TIANGXING, S. **The development of Transparent Water Storage Envelopes (TWSE) through Theoretical Thermal and Optical Analyses.** Architectural Science Review, 2011 (2011a). Disponível em: <http://www.tandfonline.com/loi/tasr20>

YILDIZ, Y.; ARSAN, Z. D. Identification of the Building Parameters that Influence Heating and Cooling Energy Loads for Apartment Buildings in Hot-Humid Climates. *Energy and Buildings*, v. 36, n. 7, p. 4287- 4296, 2011.

YIN, R.; XU, P.; SHEN, P. Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy and Buildings*, v. 45, n. 0, p. 132–140, 2012.

APÊNDICE A – Balanço térmico

O apêndice A destina-se a explicar o processo de transferência de calor em meios sólidos e líquidos por meio de balanço de energia. O referencial teórico aqui exposto se baseia na literatura de Incropera e DeWitt (2008) e Çengel (2007).

O balanço de energia permite analisar o comportamento térmico de objetos pela lei da conservação da energia (primeira lei da termodinâmica). Esta enuncia que a partir da escolha de uma porção de matéria analisada dentro de um volume de controle, a única forma de haver ganho ou perda de energia térmica é se a mesma ‘atravessar’ o volume de controle. Assim sendo, a diferença do fluxo de energia térmica que entra no volume de controle menos o fluxo de energia térmica e mecânica que sai do mesmo em um intervalo de tempo é igual a energia térmica e mecânica armazenada na massa do volume de controle.

A transferência da energia térmica, ou seja, o fluxo de calor da maior para a menor temperatura entre a massa dos corpos, pode ocorrer por condução (interação entre sólidos), convecção (interação entre sólido e fluidos ou fluidos entre si) e por radiação (emissão de ondas eletromagnéticas de qualquer corpo acima da temperatura de 0 K).

A partir da Lei de Fourier, o fluxo de energia por condução se escreve:

$$q''_{cond} = k \frac{\Delta T}{L A} \quad ((92))$$

Onde:

q''_{cond}	Fluxo térmico por condução entre duas superfícies bidimensionais (W/m^2)
k	Condutividade térmica (W/mK);
ΔT	Diferença de temperatura entre as duas superfícies (K)
A	Área superficial (m^2)
L	Distância entre as duas superfícies (m)

O fluxo de energia por convecção depende do nível de movimentação do fluido nas adjacências da área analisada e pode ser descrito como:

$$q''_{conv} = A h \Delta T \quad ((93))$$

Onde:

q''_{conv}	Fluxo térmico de um fluido sob convecção e uma superfície de área 'A' (W/m^2)
h	Coefficiente de transferência térmica por convecção "h" do fluido (W/m^2);

O fluxo de energia por radiação depende da emissividade e da diferença de temperatura entre a superfície avaliada e sua vizinhança. Adotando-se que a vizinhança se comporte como um corpo negro, o fluxo pode ser descrito como:

$$q''_{rad} = \varepsilon A \sigma \cdot (T_{sup}^4 - T_{viz}^4) \quad (94)$$

Onde:

q''_{rad} Fluxo térmico por radiação entre uma superfície de área 'A' e as superfícies visíveis vizinhas (W/m²)

ε Emissividade do material de acordo com as propriedades superficiais (de 0 a 1)

σ Constante de Boltzmann, equivalente à 5,67 E-8 (W/m²K⁴)

T_{sup}^4 Temperatura superficial do material analisado à quarta potência (K)

T_{viz}^4 Temperatura superficial da vizinhança* à quarta potência (K)

A energia armazenada na matéria, resultando em sua temperatura, pode ser descrita como:

$$E_{armazenada} = \rho c \Delta T L A \quad ((95)$$

Onde:

$E_{armazenada}$ Energia armazenada na matéria em forma de calor (J)

ρ Densidade do material (kg/m³)

c Calor específico do material (J/Kg.K)

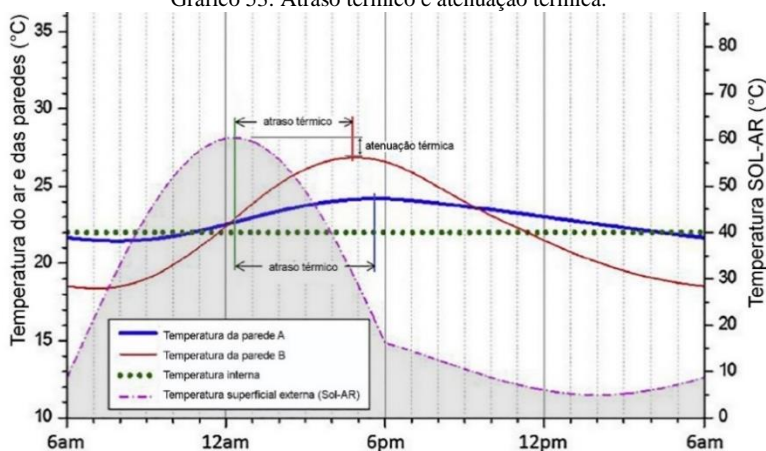
$L A$ Volume do material (m³)

Conhecidos os três fenômenos, percebe-se que qualquer anteparo com área 'A' e espessura 'L' deverá interferir na passagem de calor em seu meio de acordo com L, as propriedades do material e as condições de contorno. Essa transferência de calor pode ocorrer por dois regimes; o estacionário e o transiente.

Dá-se o nome de regime estacionário para o momento quando o fluxo de calor em um dado objeto não gera mais variação de temperatura na matéria sendo este estágio normalmente atingido depois de um período em que se mantêm as fontes de calor constantes. Por outro lado, no começo dos experimentos ou em condições em que as fontes de calor variam, tem-se o regime transiente pelo qual cada seção do material deverá armazenar ou perder uma porcentagem de calor ao longo do tempo de acordo com suas propriedades termofísicas e a diferença de temperatura até, talvez, atingir o regime estacionário em algum momento. Por exemplo, um parafuso metálico interno de uma máquina que recebe fluxo constante de calor e o transmite para uma dada peça desta máquina deverá ter regime estacionário de transferência de calor. Os elementos da construção expostos à intempéries comumente se enquadram no regime transiente.

Assim sendo, a partir do regime estacionário entende-se a serventia de objetos com massa térmica na edificação como forma de armazenar calor. Admitindo-se um exemplo onde o ambiente externo deverá esquentar ao longo do dia e tornar-se mais quente que o ambiente interno, objetos espessos ou com alta massa térmica comprometerão a passagem de calor entre o lado externo e a superfície interna da parede ocasionando atraso e atenuação térmica. O atraso térmico se define como a diferença de tempo entre o pico de temperaturas comparadas e a atenuação térmica é a diferença entre a energia do pico térmico de temperaturas comparadas.

Gráfico 53: Atraso térmico e atenuação térmica.



Fonte: adaptado de Wu e Lei (2015)

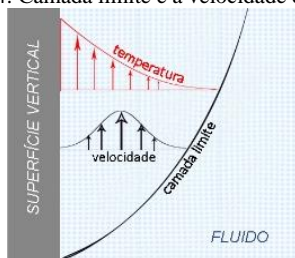
APÊNDICE B – Processos convectivos naturais

Enquanto nos sólidos a massa do objeto transfere calor sem mudar a ordenação de suas partículas, nos fluidos ocorre a movimentação das moléculas reorganizando suas posições e acarretando maior transferência de calor que nos sólidos. Em vista desta característica distinta, o apêndice B se destina a descrever a troca térmica entre um fluido em movimento sobre uma superfície.

É de interesse apenas o processo de convecção natural e não a convecção forçada uma vez que não haverá o uso de bombas ou ventiladores na *transwall*.

O fenômeno de convecção natural pode ser exemplificado admitindo uma condição típica de *transwall* em que a água está enclausurada e parada, por ora desconsiderando a transmissão de radiação solar direta entre dois vidros verticais. Havendo o aumento de temperatura no ambiente externo, o vidro deverá se aquecer e conduzir calor para a água. Depois, as moléculas de água deverão aquecer e se expandir (de acordo com o coeficiente de expansão volumétrica, β) tornando-se mais leves e pela força de empuxo subirão dando espaço para que outras moléculas que antes estavam mais distantes do vidro encostarem-se nele. Inicia-se então um fenômeno de movimentação ascendente nas proximidades do vidro dentro da água (ou descendente caso se tratasse de resfriamento e não aquecimento). A movimentação, no entanto, é freada pelas forças viscosas do fluido no contato com o vidro e com as moléculas adjacentes de água que estão paradas, sendo a maior velocidade observada no meio dessas duas “delimitações” (como na velocidade do Gráfico 54). Surge, assim, a camada limite que é a distância entre o corpo de água e a parede de vidro onde se observa a aceleração do fluido ocorrendo convecção.

Gráfico 54: Camada limite e a velocidade dos fluidos.



Fonte: adaptado de Çengel (2009).

Para efeito de cálculo, as equações que regem a convecção natural são relativizadas e resultam em números adimensionais apresentado a seguir. Esses números são empíricos, ou seja, parte-se do resultado de experimentos para depois serem modelados em formato de equação.

O Número de Grashof (Gr) representa a relação entre as forças de empuxo (decorrentes do aquecimento e ascensão das moléculas) e as forças viscosas (a capacidade de frear a movimentação no fluido pelo atrito em corpos de menor velocidade), que pode ser calculado como:

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} \quad (96)$$

Onde:

Gr_L	<i>Número de Grashof para o comprimento característico L (adimensional)</i>
g	<i>Aceleração gravitacional (m/s²)</i>
β	<i>Coefficiente de expansão volumétrica (1/K)</i>
T_s	<i>Temperatura da superfície (K)</i>
T_∞	<i>Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (K)</i>
L	<i>Comprimento característico da geometria (m)</i>
ν	<i>Viscosidade cinemática do fluido (m²/s)</i>

Números de Grashof baixos indicam convecção natural irrelevante e a transmissão de calor deverá ser majoritariamente por condução. Quando a convecção toma proporções maiores, é necessário reconhecer que há tanto condução quanto convecção no processo de transferência térmica. Para isso existe o Número de Nusselt (Nu) que relaciona a transferência de calor de convecção pela condução e pode ser calculado como:

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (97)$$

Onde:

Nu	<i>Número de Nusselt (adimensional)</i>
h	<i>Coefficiente de transferência térmica por convecção do fluido (W/m²K);</i>
L_c	<i>Comprimento característico da geometria (m)</i>
k	<i>Condutividade térmica do fluido (W/m.K);</i>

Sendo a condução do fluido modificada pelo efeito convectivo, é necessário calcular a condução equivalente (k_{eq}) do mesmo multiplicando-se os valores da condução em estado sólido pelo Número de Nusselt:

$$k_{eq} = k \cdot Nu \quad (98)$$

Para o cálculo do Número de Nusselt exige-se o coeficiente de transferência térmica 'h'. Tendo em vista a complexidade do fenômeno de movimentação do fluido (em decorrência de suas propriedades termofísicas, variação de temperatura, geometria e orientação em relação

à gravidade), uma solução analítica simples e abrangente que encontre 'h' ainda não é possível e a determinação de Nusselt é feita por estudos empíricos dependentes dos números de Grashof, Prandtl e Rayleigh para diferentes superfícies.

O Número de Prandtl (Pr) é a razão entre a difusividade da quantidade de momento e da difusividade molecular de calor, que pode ser escrito como:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (99)$$

O número de Rayleigh indica a preponderância da transferência de calor em um fluido por condução ou convecção e é o produto do Número de Grashof pelo Número de Prandtl, o qual é escrito como:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (100)$$

Onde:

- Pr *Número de Prandtl (adimensional);*
- Ra_L *Número de Rayleigh para o comprimento característico L (adimensional);*
- c_p *Calor específico do material analisado (J/Kg K);*
- μ *Viscosidade dinâmica (N s/m²)*
- α *Difusividade térmica (m²/s)*

APÊNDICE C – Método Transiente de Seções Finitas (MTSF)

O apêndice C se destina a explicar o Modelo Transiente de Seções Finitas (MTSF) utilizando o método explícito. A abordagem matemática de transferência e armazenamento de calor em materiais sólidos e líquidos ao mesmo tempo não poderia ser analítica devido à sua complexidade de dados. Logo, adota-se o Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) que faz uso da análise discretizada de tempo e de distância entre várias seções no interior do objeto para encontrar suas temperaturas.

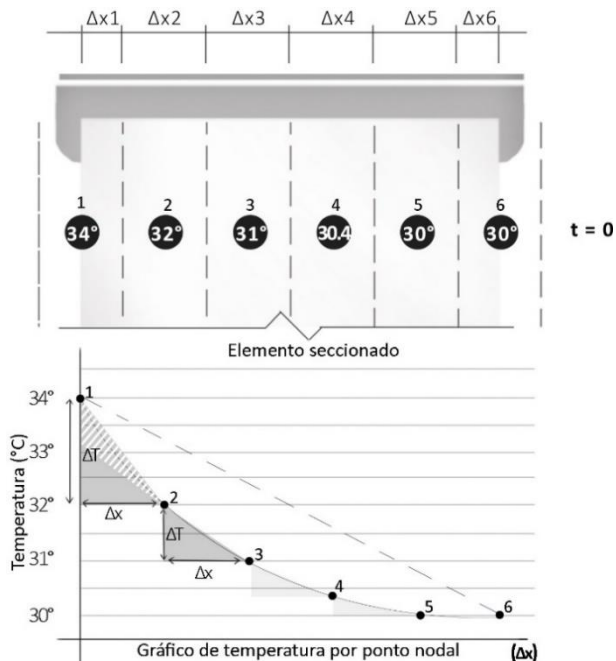
Resumidamente, o MTSF “fatia” um material analisado em várias outras partes menores a fim de caracterizar o fenômeno de transferência e armazenamento de calor em cada uma dessas seções fatiadas para compreender o comportamento do elemento no todo. Portanto quando menor o intervalo de tempo e de espaço adotado, maior a precisão. Ressalta-se que o modelo utilizado funciona em uma dimensão (e não três), portanto, havendo possíveis limitações.

Já dividido um elemento em várias seções, é necessário conhecer as temperaturas iniciais em todas as seções (condições iniciais) e a temperatura em duas seções ao longo de todo tempo (condições de contorno). Normalmente as duas temperaturas da condição de contorno em experimentos da construção civil, são as temperaturas externas e internas das paredes por serem mais fáceis de medir que um nó interno à parede. O local de referência dessas temperaturas é a posição mediana de cada seccionamento o qual recebe o nome de ‘ponto nodal’ ou ‘nó’. É preciso também conhecer a distâncias entre os nós (Δx), o intervalo de tempo adotado nos cálculos (Δt), as propriedades termofísicas dos materiais e os fenômenos de transferência de calor. O fluxo de calor que poderia ser escrito como a derivada da temperatura pela derivada da distância entre nós ($\frac{dT}{dx}$) simplifica-se para $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ por se tratar de um intervalo discretizado. Tal relação estabelece que quanto maior a variação de temperatura e menor for a distância entre os nós, maior é o fluxo de calor e vice-versa.

Analisando a transferência ou armazenamento de energia, quando o fluxo entre pontos subsequentes varia é sinal de que houve armazenamento ou perda de energia na seção sendo que a energia não desapareceu (Lei de conservação da massa) e sim, transformou-se, em aumento de temperatura da matéria. Por exemplo na Figura 23, tendo-se três nós consecutivos e havendo diferença entre os dois fluxos de calor que existirão ($\frac{\Delta T}{\Delta x_{1-2}} \neq \frac{\Delta T}{\Delta x_{2-3}}$), ou seja, o fluxo de calor entre os pontos T_1 até T_2 maior ou menor que o fluxo de calor entre os pontos T_2 até T_3 , a

diferença de fluxo de energia tornar-se-á aumento de temperatura no nó T_2 caso o fluxo entre T_2 - T_3 seja menor ou perda de energia no nó T_2 caso o fluxo de energia entre T_2 - T_3 seja maior que entre T_1 - T_2 .

Figura 23: Ganho de temperatura por fluxo unidirecional no ponto nodal.



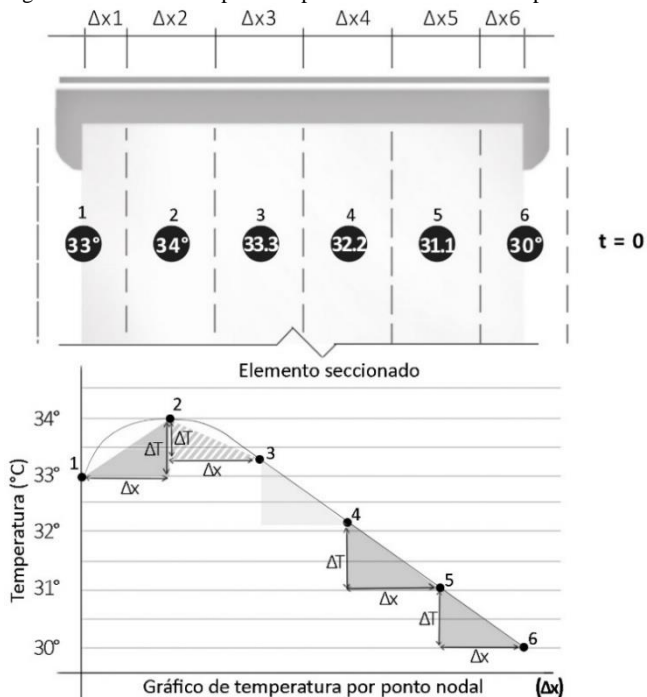
Fonte: O autor.

Analisando as seções da esquerda para a direita, a variação de fluxo de energia unidirecional entre os pontos 1 até 2 menos a variação entre os pontos 2 até 3 é positiva, logo, a energia na área hachurada será absorvida no material no instante seguinte. Caso a análise fosse da direita para a esquerda, o aumento da variação entre os pontos 1 até dois indicaria perda de energia, logo a temperatura do ponto nodal 2 baixaria. A linha reta pontilhada representa como seria um regime permanente mantendo-se as temperaturas 1 e 5.

A Figura 24 ainda apresenta o exemplo de variação bidirecional e unidimensional no ponto nodal T_2 onde há perda térmica por não haver diferença e sim a soma entre os fluxos negativos de T_1 - T_2 e T_2 - T_3 e o

ponto nodal T_5 representa a condição onde a temperatura do nó mantém-se a mesma por ser a diferença de fluxo igual a zero.

Figura 24: Perda de temperatura por fluxo bidirecional no ponto nodal.

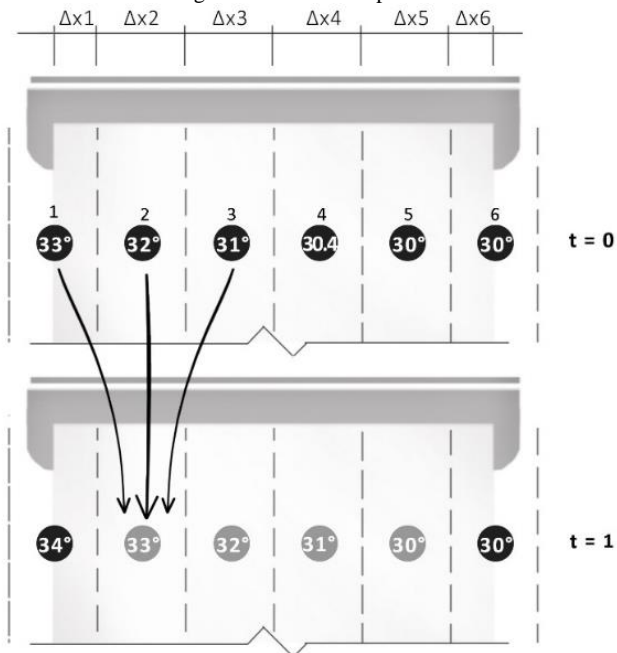


Fonte: O autor.

Analisando as seções da esquerda para a direita, a variação bidirecional de fluxo de energia entre os pontos 1 até 2 em relação aos pontos 2 até 3 resulta em um somatório de perda de energia e de armazenamento de calor no ponto 2. No ponto 5 tem-se o exemplo de que, não havendo diferença de variação de energia, a temperatura mantém-se a mesma.

O resultado da diferença de fluxo de energia deve ser computado como energia armazenada ou perdida na seção de análise, porém no instante seguinte. Para tal cálculo e, sendo que existe a variação temporal no fenômeno, é possível utilizar como referência tanto as temperaturas no instante anterior (método explícito) como as temperaturas no instante posterior (método implícito).

Figura 25: Método Explícito.



Fonte: O autor.

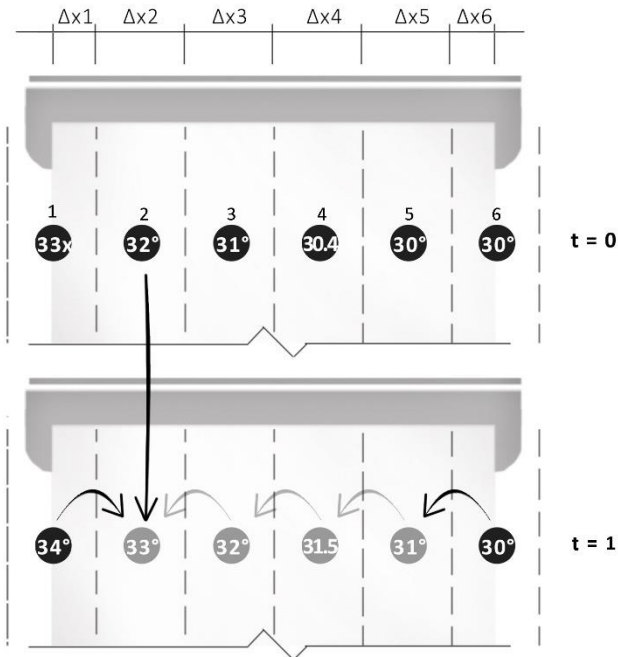
Método explícito para o ponto nodal 2:

No método explícito utiliza-se como referência as três temperaturas no instante anterior recaído o ganho ou perda de calor no ponto 2 no instante futuro, sendo uma aproximação por “diferença atrasada”.

Pontos pretos: temperaturas dadas

Pontos cinzas: temperaturas a serem calculadas

Figura 26: Método Implícito.



Fonte: O autor.

Método explícito para o ponto nodal 2:

O método implícito utiliza as temperaturas dos pontos adjacentes no instante futuro e a temperatura do ponto analisado no instante anterior, caracterizando uma “diferença avançada”. Destaca-se que para o cálculo por método implícito, a temperatura adjacente precisa estar no instante futuro e, como elas ainda não existem, devem ser calculadas simultaneamente por processo de iteração.

Pontos pretos: temperaturas dadas

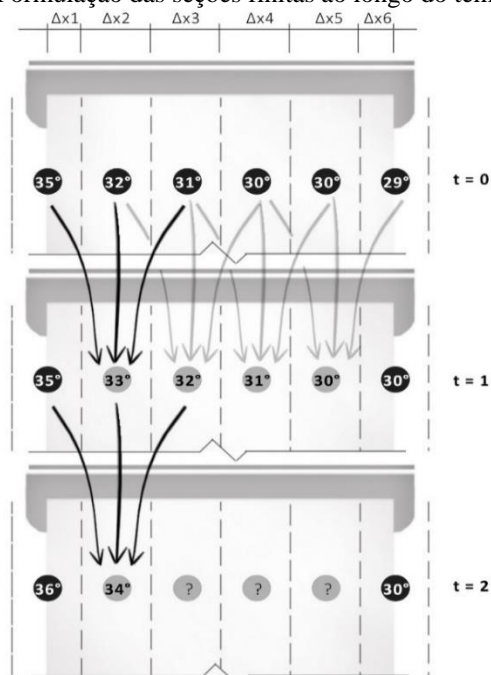
Pontos cinzas: temperaturas a serem calculadas

Sendo as seções finitas um método numérico e não analítico, variações muito bruscas entre os pontos devem desestabilizar o método. Assim, a escolha entre o método implícito ou explícito se dá pela relação de Δt , Δx e as propriedades do material adotado de forma que haja estabilidade no cálculo. Por exemplo, sendo a temperatura de $T1 = 290K$ e $T3 = 295K$, é esperado no instante seguinte que $T2$ esteja entre $290K$ e $295K$. Todavia, caso o Δt não for suficiente menor que o Δx , o impacto

de $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$ no cálculo do número de Fourier (F_0 , o qual será visto adiante) implicará em temperaturas fora do intervalo de 290 a 295K para o ponto T_2^{futuro} , o que é uma aberração e desestabiliza o cálculo. De forma a evitar tais erros confere-se o critério de convergência; uma primeira condição para que o método explícito funcione em que o número de Fourier por material tenha valores positivos e esteja abaixo de 0,5. Consequentemente, seções pequenas (p.ex. 1mm) deverão ter intervalos de tempo suficientemente menores para atender tais condições.

Além das exigências já apresentadas (condição inicial e condição de contorno, intervalo de tempo Δt e de espaço Δx), as propriedades termofísicas por cada seção devem ser constantes durante cada intervalo de tempo, os materiais isotrópicos e homogêneos e as superfícies externa e interna devem ser paralelas.

Figura 27: Formulação das seções finitas ao longo do tempo

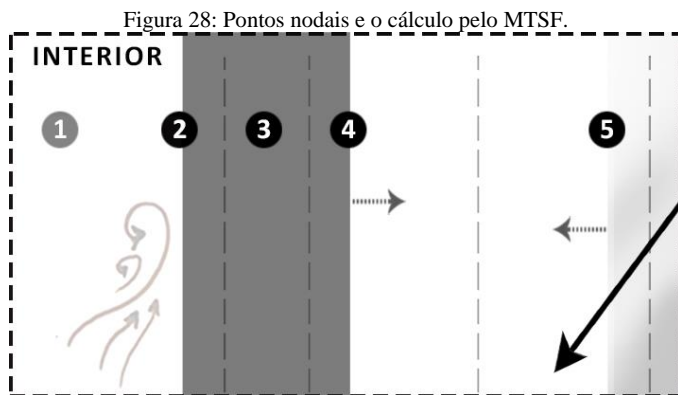


Fonte: elaborado pelo autor

Admitindo-se a condição de contorno (as temperaturas externas e internas ao longo do tempo) e dando-se as condições iniciais (temperaturas em $t = 0$), é possível calcular pelo método explícito a temperatura da seção no instante seguinte partindo das temperaturas no

instante anterior. Perceba que para se dispor do mesmo intervalo de espaço entre os pontos nodais, a espessura de massa na primeira e última seção (Δx_1 e Δx_6) é metade de Δx .

Na seção de Balanço térmico por pontos nodais: dedução a partir de um exemplo elabora-se a dedução das equações do MTSF pelo método explícito a partir de um caso hipotético com troca de radiação, convecção e condução. Uma vez explicado aqui como são elaboradas as equações por seções do MTSF, as mesmas serão apenas listadas no capítulo de Métodos para economizar tempo.



Fonte: O autor.

Assuma-se a condição de uma seção com seis pontos nodais e dois materiais (concreto do nó T2 a T4 e vidro do nó T5 e T6), que T1 seja a temperatura externa e ocorra troca de calor por convecção na face T2, que entre T4 e T5 exista vácuo e troca radiante entre o concreto e vidro, que o vidro sendo transparente transmita e absorva parte da radiação e que no ponto nodal T6 do vidro haja além da absorção da radiação, trocas radiantes com as superfícies vizinhas e convectivas

De acordo com a lei de conservação de energia a somatória do fluxo de energia que entra no volume de controle menos a somatória da energia que sai mais a energia gerada resulta na variação da energia armazenada:

$$\sum \dot{E}_{entra,seção} - \sum \dot{E}_{sai,seção} + \sum \dot{E}_{gerado,seção} = \Delta E_{armazenada,seção} \quad (101)$$

O balanço no ponto T_2 no instante futuro se escreve como:

$$convecção_{0-1} - condução_{2-3} = armazenamento_{seção2}; \quad (102)$$

$$hA(T_1 - T_2) - A \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_3) = A \rho c \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_2^{futuro} - T_2}{\Delta t} \right)$$

Havendo convecção entre T_1 e T_2 , condução entre T_2 e T_3 , sendo todas as temperaturas no instante anterior exceto T_2^{futuro} , sendo k , ρ e c referentes ao concreto e assumindo que a espessura de armazenamento de energia de T_2 é metade de Δx . A área “ A ” pode ser corta resultando em:

$$h(T_1 - T_2) - \frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_3) = \rho c \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_2^{futuro} - T_2}{\Delta t} \right)$$

Isolando-se T_2^{futuro} , a equação resulta em:

$$\frac{2\Delta t}{\Delta x \rho \cdot c} h(T_1 - T_2) - \frac{2\Delta t}{\Delta x \rho c} \frac{k_c}{\Delta x} (T_2 - T_3) + T_2 = T_2^{futuro}$$

A equação acima ainda pode ser simplificada utilizando-se o número de Fourier e o número de Biot os quais assumem valores diferentes de acordo com cada material e coeficiente “ h ” de convecção:

O número de Fourier se escreve como:

$$F_o = \frac{k\Delta t}{\Delta x^2 \rho c} \quad (103)$$

O número de Biot se escreve como:

$$Bi = \frac{\Delta x h}{k} \quad (104)$$

A equação referente à temperatura em T_2 no instante seguinte torna-se:

$$2 F_o Bi (T_1 - T_2) - 2 F_o (T_2 - T_3) + T_2 = T_2^{futuro} \quad (105)$$

A equação da temperatura no instante seguinte de T_3 que sofre apenas condução pode ser descrita como:

$$\text{condução}_{2-3} - \text{troca radiante}_{3-4} = \text{armazenamento}_{\text{seção}3}; \quad (106)$$

$$\frac{k}{\Delta x} (T_2 - T_3) - \frac{k}{\Delta x} (T_3 - T_4) = \rho c \Delta x \left(\frac{T_3^{futuro} - T_3}{\Delta t} \right)$$

Isolando-se T_3^{futuro} resulta em:

$$F_o (T_2 - T_3) - F_o (T_3 - T_4) - T_3 = T_3^{futuro}$$

A equação da temperatura no instante seguinte de T_4 que sofre condução do fluxo vindo de T_3 e troca de radiação com T_5 sem processo convectivo, uma vez que está no vácuo e imaginando que a radiação solar não chega até a superfície da parede T_4 , pode ser escrita como:

$$\text{condução}_{3-4} - \text{troca radiante}_{4-5} = \text{armazenamento}_{\text{seção}4}; \quad (107)$$

$$\frac{k}{\Delta x}(T_3 - T_4) - \varepsilon \sigma(T_4^4 - T_5^4) = \rho c \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_4^{\text{futuro}} - T_4}{\Delta t} \right)$$

Isolando-se T_4^{futuro} resulta em:

$$2F_o \left[(T_3 - T_4) - \frac{\Delta x}{k} (\varepsilon \sigma)(T_4^4 - T_5^4) \right] - T_4 = T_4^{\text{futuro}}$$

A equação da temperatura no instante seguinte de T_5 que sofre troca de radiação com T_4 , condução com T_6 a absorção de radiação de acordo com a espessura da seção e de absorção molar do objeto pode ser escrita como:

$$\text{troca radiante}_{4-5} - \text{condução}_{5-6} + \text{ganho solar}_5 = \text{armazenamento}_{\text{seção}5}; \quad (108)$$

$$\varepsilon \cdot \sigma(T_4^4 - T_5^4) - \frac{k}{\Delta x}(T_5 - T_6) + G \tau_{\Delta x} e^{-\alpha \Delta x} = \rho \cdot c \cdot \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_5^{\text{futuro}} - T_5}{\Delta t} \right)$$

Isolando-se T_5^{futuro} resulta em:

$$2F_o \left\{ \frac{\Delta x}{k} [(\varepsilon \cdot \sigma)(T_4^4 - T_5^4) + G \cdot \tau_{\Delta x} \cdot e^{-\alpha \Delta x}] - (T_5 - T_6) \right\} + T_5 = T_5^{\text{futuro}}$$

Onde:

- G Radiação solar global (W/m^2);
- $\tau_{\Delta x}$ Transmissão da radiação global até a seção analisada (adimensional)
- α Coeficiente de Absorção molar
- $e^{-\eta \cdot \Delta x/2}$ Exponencial da extinção molar multiplicado pela espessura da seção (que no caso do ponto nodal 5 é $\Delta x/2$)