



Calibração e convergência do Método Transiente de Seções Finitas para Transwalls delgadas de diferentes espessuras.

Transient Heat Balance Model time-step calibration and convergence for different widths of thin transwalls.

Yuri Piffer

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Dpto. Arquitetura e Urbanismo - UFSC
Trindade
88040900 - Florianópolis, SC - Brasil
Correo: yuripiffer@hotmail.com

Saulo Güths

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Dpto Eng. Mecânica - UFSC
Trindade
88040900 - Florianópolis, SC - Brasil
saulo@lmpt.ufsc.br

Martin Ordenes Mizgier

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Dpto Arquitetura e Urbanismo - UFSC
Trindade
88040900 - Florianópolis, SC - Brasil
martin@arq.ufsc.br

Manuscript Code: 027

Date of Acceptance/Reception 06.07.2018/31.05.2018

Resumo

O presente trabalho analisa por ferramentas de programação o intervalos de tempo (Δt) adequado à simulação de transwalls delgadas pelo Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) e também avalia o número de repetições de um dia hipotético necessários para que a simulação encontre-se calibrada. A partir de dos dados de um dia climático hipotético, analisou-se o comportamento de quatro perfis de transwalls: 2mm, 10mm, 50mm e 100mm de lâmina de água entre vidros simples de 3mm. Variou-se o modelo de absorção da radiação entre duas opções, o intervalo de tempo de iteração e a temperatura inicial das seções adotadas. Os resultados apontaram que quanto maior a espessura da lâmina de água, menor é o ganho de calor no ambiente interno; que a calibração ocorre no terceiro dia de simulação para a amostra com seção de 100mm de lâmina de água e no segundo dia para as outras espessuras e que o intervalo de 0,5 segundos é suficiente para a convergência do MTSF.

Palabras claves: Método Transiente de Seções Finitas, transwall, balanço de energia em fachadas, transferência de calor em vidros.

Abstract

The present work analyzes suitable time-step intervals (Δt) and the number of hypothetical-day repetitions required for temperature calibration of thin transwalls using Transient Heat Balance Model (THBM) programing simulation. Considering a hypothetical climate condition day, the behavior of four transwall's profiles: 2mm, 10mm, 50mm and 100mm of water section inside two single 3mm clear float glass have been analyzed. Two different types of solar radiation absorbance models, time-steps for iteration and initial temperatures where tested. The results showed that increasing water's thickness reduces internal heat gain. Also, calibrated conditions have been achieved on the third day of simulation for the sample with 100mm water width and on the second day for all other thicknesses. Last but not least, the time-step interval of 0.5 seconds has proofed to be adequate for the THBM convergence.

Keywords: Transient Heat Balance Model, transwall, façade's energy balance, glazing heat transfer.

Introdução

A simulação computacional desempenha papel crucial na análise do comportamento de transferência de calor dos elementos envoltórios da construção civil. Softwares de análise integrada, como o EnergyPlus, permitem que a partir da modelagem de um ambiente construído com dados da geometria, arquivos climáticos e características de uso da edificação, simule-se o desempenho energético do ambiente por meio de inúmeros balanços energéticos simultaneamente. Entre os vários balanços realizados por estes softwares está o cálculo de transferência de calor. Devido à inexistência de um método analítico preciso e global para a análise da transferência de calor, emprega-se o Método Transiente de Seções Finitas (MTSF) para tais finalidades.

Define-se o MTSF como uma ferramenta de cálculo numérico que discretiza um material em questão em várias partes menores (seções) analisando-as por um dado período de tempo afim de caracterizar o fenômeno de transferência e armazenamento de calor em cada uma dessas partes. Suscintamente, este recurso matemático permite conhecer a temperatura de um dado ponto uma vez sabidas as temperaturas de pontos adjacentes num intervalo de tempo anterior e as condições de contorno. Conseqüentemente, este processo de simulação é condicionado pela espessura das seções (Δx), pelo intervalo de tempo (Δt) adotado e pelas condições de convergência numérica para que os resultados da simulação sejam confiáveis. O comportamento térmico de transwalls delgadas, que são vedações ou janelas transparentes com visual parecido à um pano de vidro, espectroseletivas e que utilizam delgadas lâminas de água ou soluções em suas cavidades (como um vidro sanduíche de “vidro-líquido-vidro”) pode também ser calculado pelo MTSF.

Por outro lado, o fenômeno de transferência de calor em uma transwall, além de envolver os três processos de trocas de calor de sistemas sólidos (condução entre os sólidos, convecção com as faces em contato com o ar e radiação entre as superfícies), engloba também o comportamento convectivo da água e a geração de energia no sistema por meio da absorção da radiação solar. A convecção da água, por sinal, deve ser calculada conforme as propriedades do líquido que variam de acordo com a temperatura da seção e das características da cavidade onde a água se encontra. Muito embora os softwares de simulação integrada sofram atualizações constantemente, estes ainda não permitem a modelagem de transwalls devido à complexidade entre o processo de absorção de radiação e transmissão de calor em fluidos com algoritmos diferentes do empregado para gases.

Uma alternativa para este tipo de cálculo são os CFD (Computational Fluid Dynamics) que, no entanto, também têm suas limitações. Uma delas é o fato de que as transwalls precisam ser calibradas- isto é, que a temperatura das seções no instante inicial sejam iguais sempre que simuladas sob um estímulo periódico de calor. Considerando-se que na primeira simulação de um dado modelo a temperatura das primeiras seções são estimadas pelo autor, é necessário que esse estímulo periódico de calor se repita (no caso deste artigo, a repetição se refere a um dia hipotético) até que a diferença de temperatura das primeiras seções entre dois dias consecutivos seja nula.

As ferramentas de CFD, então, por exigirem dos computadores processamento pesado de dados, sob cenários de vários dias de simulação, acarretam demasiadas horas de rodagem, tornando-se uma opção mais demorada para a análise de transwalls.

O modelo do MTSF pode ser avaliado por outras ferramentas que permitam iteração numérica, como planilhas e softwares de programação. No caso específico das transwalls delgadas, o pequeno espaçamento das cavidades exige que as distâncias entre os nós adotados nas seções do modelo (Δx) também tenham valores baixos. Por conseguinte, faz-se necessário que o intervalo de tempo entre as iterações (Δt) também seja reduzido a fim de atender as condições de convergência estabelecidas pelo número de Fourier (Fo). Valores baixos de Δx e Δt acarretam significativo aumento do número de iterações e tornam-se impraticáveis em planilhas eletrônicas (p.ex. Excel) as quais devem ser substituídas por softwares de programação. Todavia, mesmo simulações do MTSF em softwares de programação podem ser demoradas devido às interpolações das propriedades dos materiais, cálculo da convecção do fluido e iterações de transferência e calor. Justifica-se, portanto, a análise de um intervalo de tempo (Δt) conveniente que seja suficientemente pequeno para que haja convergência no MTSF em transwalls delgadas e que não seja demasiadamente pequeno afim de evitar o excesso do número de linhas referentes à somatória de iterações. É preciso também conhecer o número de dias de calibração necessários para transwalls delgadas com cavidades de diferentes espessuras para otimização do método.

Estado da arte

O processo de transferência de calor é, sem dúvidas, o assunto mais pesquisado e simulado por parte dos trabalhos já realizados de transwalls. A primeira modelagem de transwall realizada por Fuchs e McClelland (1979) considerou o uso de géis espessantes na água e o uso de baffles (compartimento transparente para reduzir a convecção). Os autores analisaram a transwall sem convecção tratando-a como o comportamento de um sólido. Para comparação, também foi feita uma ponderação da condução deste “sólido equivalente” aumentando seus valores de condução para estimar o comportamento de um fluido.

Shoda, Bansal e Ram (1983), Nayak (1987a, 1987b), Nisbet e Kwan (1987), Upadhya, Tiwari e Rai(1991) e Twari, Upadhya e Rai (1991) não utilizaram géis espessantes ou baffles e calcularam o processo convectivo do fluido na transferência de calor adotando um coeficiente de convecção (h) fixo.

Nisbet e Mthembu (1992) realizaram o primeiro trabalho onde o coeficiente de convecção da água na cavidade foi calculado pelo número de Nusselt do fluido e não um valor preestipulado. Xiangfeng e Tiangxing (2011) também utilizaram o número de Nusselt para o cálculo da convecção da água, no entanto modelaram a transferência de calor da transwall por resistência equivalente e não por MTSF.

Wu e Lei construíram um protótipo e também simularam um sistema espesso de transwall na cidade de Sydney, Austrália para o qual foi necessário 7 dias de calibração da simulação (WU, LEI, 2016a). Ainda sobre o processo de modelagem de convecção, os mesmos autores simularam por CFD o comportamento do ar em cavidades com superfícies em temperaturas diferentes (WU, LEI, 2015a, 2015b) e o desempenho de uma transwall com faces opacas que são chamadas de waterwall (WU, LEI, 2016b). Wu e Lei admitem que há trocas radiantes entre as faces internas da transwall uma vez que este fenômeno foi observado nas modelagens de CFD em cavidades com ar anteriormente descritas. Todavia, os autores deste artigo admitem que a água, sendo opaca aos raios no comprimento infravermelho longo, não deverá permitir a troca radiante entre as faces do vidro e tal comportamento foi desconsiderado na aplicação do método descrito abaixo.

Todos os trabalhos anteriormente citados que calcularam a convecção líquida consideraram as propriedades termofísicas da água como constantes. É importante salientar também que estes estudos utilizaram-se de valores aproximados de absorção radiante o que pode acarretar valores imprecisos de fluxo térmico ainda que o modelo de transferência de calor esteja calibrado.

Materiais e Método

Características ambientais

Este estudo considera que os modelos de transwall avaliados são vedações de uma sala mantida à 23°C (temperatura do ar e das superfícies vizinhas) hipoteticamente orientadas para o Equador recebendo sol o dia inteiro. Foi adotado o mesmo cenário ambiental para todos os modelos simulados em que o sol nasce às 06hs e se põe às 18hs. O pico térmico externo acontece às 15hs com 35°C e a baixa térmica às 06hs com 26°C (ver gráfico 1).

A constante solar é de 1000W/m² e o ângulo solar é dado pelo cosseno inverso do produto do cosseno das duas parábolas: a parábola do ângulo no plano horizontal entre a posição do sol e a normal da transwall (relação azimutal) para a qual adotou-se 65° às 06hs, 0° ao meio-dia e 65° às 18hs e a parábola da altura solar tendo valores de 0° às 06hs, 80° ao meio-dia e 0° às 18hs (ver gráfico 2). A temperatura das superfícies externas vizinhas é dada pela mesma temperatura do ar externo para 50% de área do ângulo sólido em relação à exposição externa da transwall (referente ao entorno urbano) e 0°C como temperatura do céu para os outros 50% de área do ângulo sólido da abertura voltados ao céu. O índice de convecção do ar (h) tanto interno quanto externo foi mantido em 8. Admite-se que as aberturas são suficientemente grandes e desconsidera-se os efeitos de perda de calor pelas bordas da transwall.

Gráfico 1: Variação da temperatura externa ao longo do dia. Os autores, 2018.

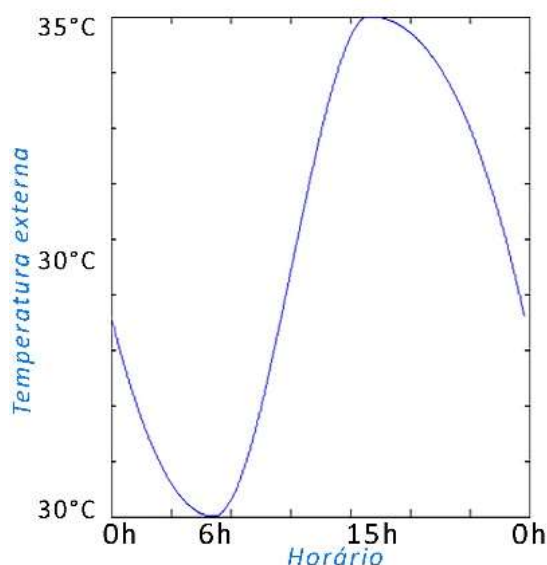
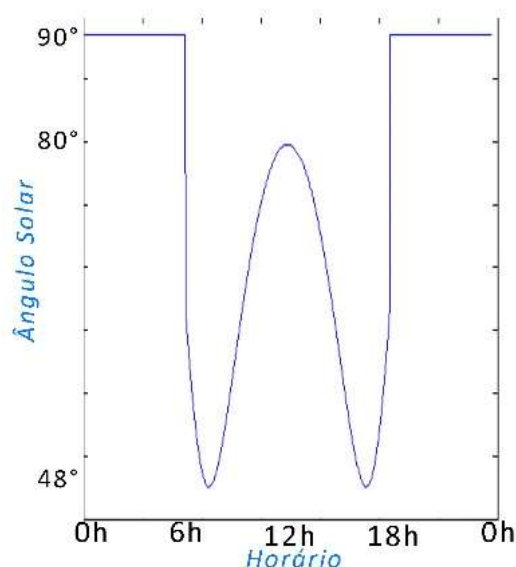


Gráfico 2: Variação do ângulo solar ao longo do dia. Os autores, 2018.



Equações do MTSF

São dadas 7 seções, cada uma delas com fenômenos de transferência de calor característicos, de forma a representar o comportamento das transwalls. Os cálculos aplicados às seções 2, 4 e 6 referentes às partes de meio de cada material, devem ser repetidos quantas vezes necessário de forma que a soma de intervalos de seções (Δx) resulte na espessura final do material a ser simulado. As seções 1, 3, 5 e 7 caracterizam as faces de materiais em contato com a matéria adjacente e é onde as trocas superficiais são calculadas. (ver figura 1 e tabela 1).

Figura 1. Ilustração das seções adotadas do Método Transiente de Seções Finitas. Os autores, 2018.

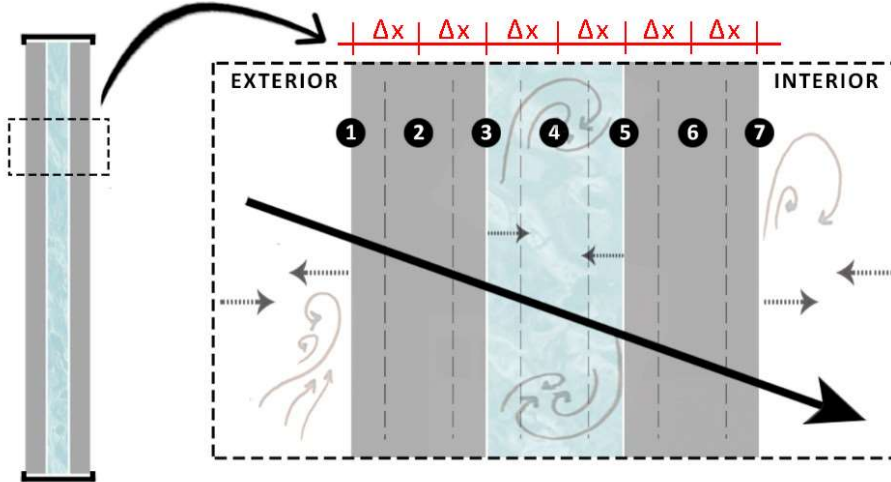


Tabela 1. Equações adotadas para cada seção do Método Transiente de Seções Finitas. Os autores, 2018.

T_1	$T_1^{t=i+1} = 2F_{o_v} \left\{ Bi_{ext}(T_{ar_{ext}} - T_1) + \frac{\Delta x}{k_v} [0,5 \sigma \epsilon (T_{c\u00e9u}^4 - T_1^4)(T_{viz_{ext}}^4 - T_1^4) + A] - (T_1 - T_2) \right\} + T_1$	(1)
T_2	$T_2^{t=i+1} = F_{o_v} \left[T_1 + T_2 \left(-2 + \frac{1}{F_{o_v}} \right) + T_3 + \frac{\Delta x}{k_v} A \right]$	(2)
T_3	$T_3^{t=i+1} = 2F_{o_v} \left\{ (T_2 - T_3) - Bi_L(T_3 - T_4) + \frac{\Delta x}{k_v} A \right\} + T_3$	(3)
T_4	$T_4^{t=i+1} = F_{o_L} \left[T_3 + T_4 \left(-2 + \frac{1}{F_{o_L}} \right) + T_5 + \frac{\Delta x}{k_L} A \right]$	(4)
T_5	$T_5^{t=i+1} = 2F_{o_v} \left\{ Bi_L(T_4 - T_5) + \frac{\Delta x}{k_v} A - (T_5 - T_6) \right\} + T_5$	(5)
T_6	$T_6^{t=i+1} = F_{o_v} \left[T_5 + T_6 \left(-2 + \frac{1}{F_{o_v}} \right) + T_7 + \frac{\Delta x}{k_v} A \right]$	(6)
T_7	$T_7^{t=i+1} = 2F_{o_v} \left\{ (T_6 - T_7) - Bi_{int}(T_7 - T_{ar_{int}}) + \frac{\Delta x}{k_v} (-\sigma \epsilon (T_7^4 - T_{int}^4)) A \right\} + T_7$	(7)
$F_{o_{\circ}}$	Número de Fourier de um dado material;	
Bi_{\circ}	Número de Biot de um dado material;	
Δx	Distância entre os nós analisados (m);	
Δt	Intervalo de tempo adotado (s);	
$T_{\circ}^{t=i+1}$	Temperatura do instante posterior (K);	
T_{\circ}	Temperatura do instante anterior (K);	
k_{\circ}	Condutividade ou condutividade equivalente (para os líquidos) do material;	
$\sigma \epsilon$	Constante de Boltzmann multiplicada pela emissividade do material;	

As propriedades do vidro foram mantidas constantes enquanto as propriedades da água foram interpoladas conforme as temperaturas da seção no dado instante. Tanto os dados do vidro como os da água se referenciam em Incropera e Dewitt (1996). O número de Nusselt (Nu) utilizado na modelagem é descrito abaixo, de acordo com Çengel (2007), calculado a partir do número de Rayleigh (Ra), número de Prandtl (Pr) e da relação de altura pela largura da cavidade (H/L):

$$Nu = 0,42Ra^{0,25} Pa^{0,012} H/L^{-0,3} \quad (8)$$

Os dados da absorção de radiação solar por seção da transwall já haviam sido anteriormente calculados pelos autores e foram adotadas duas formas de cálculo para este trabalho:

- *Seção*, que considera o valor exato de radiação solar absorvida por cada seção empregada no MTSF de acordo com a espessura da lâmina de água e de vidro a partir do ângulo solar e
- *Média*, empregando-se que a água, a qual tem alta difusividade térmica, deve manter sua temperatura homogênea em toda a lâmina de água e supostamente uma modelagem mais precisa considerará uma absorção média da radiação solar em todo o fluido ponderando-se apenas o ângulo de incidência da radiação.

Amostras analisadas

Para manter o número de Fourier dentro das condições indicadas para convergência, adotou-se no MTSF o espaçamento entre seções (Δx) de 1mm e o intervalo de tempo (Δt) de meio segundo (0,5s) totalizando 172800 linhas de iterações por dia para cada amostra. Foi testado também um modelo com intervalo de tempo de um quarto de segundo (0,25s) totalizando 345600 linhas para certificação da convergência do modelo anteriormente descrito com 0,5s de intervalo.

Todas as amostras têm vidro frontal e traseiro de 3mm e foram simuladas amostras com cavidade de 2mm, 10mm 50mm e 100mm de água. Cada uma testada para absorção por 'seção' e 'média'.

A temperatura inicial adotada para as seções foi próxima à 23°C, exceto um das amostras de 10mm de cavidade foi testada com temperatura inicial próxima à 7°C de forma a verificar se a mudança da temperatura inicial causaria alguma anomalia dos resultados finais do balanço de energia estando o modelo já calibrado.

A relação entre a altura e largura (H/L) da câmara do fluido na transwall foi mantida no valor de 40 para as quatro lâminas de água simuladas.

Todas as simulações foram rodadas até que a perda e ganho de calor pela transwall do dia posterior fosse igual ao do dia anterior, indicando calibração.

Tabela 2. Lista de amostras simuladas. Os autores, 2018

Amostra	Espessura da Lâmina de água	Temperatura inicial das seções empregada	Modelo de absorção de radiação solar	Δt
A1	2 mm	~23°C	Por seção	0,5s
A2	10 mm	~23°C	Por seção	0,5s
A3	50 mm	~23°C	Por seção	0,5s
A4	100 mm	~23°C	Por seção	0,5s
B1	2 mm	~23°C	Média	0,5s
B2	10 mm	~23°C	Média	0,5s
B3	50 mm	~23°C	Média	0,5s
B4	100 mm	~23°C	Média	0,5s
C	10 mm	~7°C	Por seção	0,5s
D	10 mm	~23°C	Por seção	0,25s

Resultados

Os resultados simulados e apresentados nas tabelas 3, 4 e 5 mostram coerência do comportamento físico das transwalls. Quanto maior a espessura da lâmina de água, menor é o ganho de calor para o ambiente interno. Os valores baixos de perda de calor observados para o ambiente externo já eram esperados uma vez que a temperatura externa manteve-se em 100% do tempo acima da temperatura interna e a taxa de radiação incidente ao longo de todo o dia era alta.

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 e provam que há diferença do balanço de energia de acordo com a modelo de absorção adotada. Outras análises podem ser feitas em relação ao comportamento térmico das transwalls, mas ultrapassam o escopo deste artigo que é a calibração e a adoção de um intervalo de tempo (Δt) coerente.

Os dados de calibração mostram que todas as amostras de 2mm, 10mm e 50mm, independente do modelo de absorção solar e da temperatura inicial, já estavam calibradas 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 calibrar-se, 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 utilizando-se de temperaturas iniciais das seções bastante diferentes, o MTSF, em condição de calibração, resulta nos mesmos resultados.

Os resultados A2 e D que comparam duas lâminas de 10mm de água nas mesmas condições, mas usando Δt diferentes certificam que o intervalo de meio segundo para seções de 1mm em modelos de transwall são suficientes.

Tabela 3. Tabela A: simulações com o modelo de absorção da radiação solar por SEÇÃO, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,5s. Os autores, 2018

	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° dia	3,1564	0,0013	2,855	1,5841E-1	2,4731	0	2,3015	3,2616E-5
2° dia	3,1560	0,0013	2,8252	1,5571E-4	2,4736	0	2,3024	0
3° dia	3,1560	0,0013	2,8252	1,5571E-4	2,4736	0	2,3025	0
4° dia	-	-	-	-	-	-	2.3025	0

Tabela 4. Tabela B: simulações com o modelo de absorção da radiação solar por MÉDIA, temperatura inicial das seções próximas à 23° e Δt de 0,5s. Os autores, 2018

	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° dia	3,1647	0,0013	2,8353	1,5841E-4	2,4768	0	2,3034	3,2616E-5
2° dia	3,1644	0,0013	2,8350	1,5570E-4	2,4775	0	2,3047	0
3° dia	3,1644	0,0013	2,8350	1,5570E-4	2,4775	0	2,3048	0
4° dia	-	-	-	-	-	-	2,3048	0

Tabela 5. (C) Simulação com temperatura inicial das seções próximas à 7°C, modelo de absorção da radiação solar 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 0,25s. Os autores, 2018

	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	1,5839E-4
2° dia	2,8252	1,5571E-4	2,8253	1,5569E-4
3° dia	2,8252	1,5571E-4	2,8253	1,5569E-4

Discussão e conclusões

Este artigo confirma 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 que simulações com 3 dias de calibragem, e não 7 dias como utilizado em outros trabalhos de transwalls, terão coerência quando analisadas espessuras de lâmina de água entre 2 a 100mm.

Mesmo que o balanço térmico resultante tenha sido igual quando o dado de entrada para a primeira temperatura das seções foi diferente (caso A2 e C), recomenda-se que a entrada de dados fique próxima da temperatura externa nas seções mais próximas ao exterior e mais próximas à temperatura interna nas seções mais próximas ao interior no primeiro instante de simulação (meia-noite) afim de evitar o aumento dos dias de calibração.

A calibração e certificação do intervalo de tempo aqui realizados permite que novos passos nesta pesquisa sejam trilhados, como uma análise de sensibilidade dos parâmetros das transwalls delgadas e a comparação de dados medidos com dados simulados por este modelo a partir dos registros climáticos coletados.

Agradecimentos

CAPES

Agradecemos à CAPES-Brasil (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela financiamento para o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, agradecemos ao Lucas Carrilho Pessoa, o 'Rajej', que incansavelmente auxiliou nas dúvidas de programação do MatLab. Rajej, muito obrigado!

Referencias

- Cengel, Yunus A. (2007) *Mecánica dos fluidos: fundamentos e aplicações*. São Paulo: McGraw Hill. xxv, 816 p. ISBN 9788586804588.
- Fuchs, R.; McClelland, J.f. (1979) Passive solar heating of buildings using a transwall Structure. *Solar Energy*, [s.l.], v. 23, n. 2, p.123-128. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(79\)90112-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(79)90112-9).
- Incropera, Frank P.; DeWitt, David P. (1996) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, c. xxiii, 886 p. ISBN 9780471304609.
- .
- Nayak, J. (1987a) Thermal performance of a water wall. *Building and Environment*, vol. 22, 1, 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. (1987b) Transwall versus trombe wall: relative performance studies. *Energy Conversion & Management*, Vol. 27, No. 4, 1987, páginas 389-393. DOI: 10.1016/0196-8904(87)90117-8
- Nisbet, S.; Kwan, C. (1987) The application of the transwall to horticultural glasshouses. *Solar Energy*, [s.l.], v. 39, n. 6, p.473-482, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x\(87\)90054-5](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092x(87)90054-5).
- 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).
- Sodha, M.s.; Bansal, N.k.; Ram, Sant. (1983) Periodic analysis of a transwall: A passive heating concept. *Applied Energy*, [s.l.], v. 14, n. 1, p.33-48, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619\(83\)90026-0](http://dx.doi.org/10.1016/0306-2619(83)90026-0).
- Tiwari, G.n.; Upadhyay, M.; Rai, S.n. (1991) Relative thermal performances of south walls in winter. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 17, n. 4, p.313-320, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90013-s](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(91)90013-s).
- Upadhyay, M.; Tiwari, G.n.; Rai, S.n. (1991) Optimum distribution of water-wall thickness in a transwall. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 17, n. 2, p.97-102, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90002-k](http://dx.doi.org/10.1016/0378-7788(91)90002-k).
- Wu, T; Lei, C. (2015a) On numerical modelling of conjugate turbulent natural convection and radiation in a differentially heated cavity. *Energy and Buildings*, Volume 91, dez. 2015, páginas 454-466. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.113>
- Wu, T; Lei, C. (2015b) 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*. DOI: 10.1615/ICHMT.2015.IntSympAdvComputHeatTransf.560
- Wu, T; Lei, C. (2016a) Thermal modelling and experimental validation of a semi-transparent water wall system for Sydney climate. *Solar Energy*, volume 136, páginas 533-546. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.026>.
- WU, T; LEI, C. (2016b) CFD simulation of the thermal performance of an opaque water wall system for Australian climate. *Solar Energy*, volume 133, ago. 2016, páginas 141-154