

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA ATRAVÉS DE ESTRUTURAS POROSAS SOB CLIMAS QUENTES E ÚMIDOS

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET)

Laboratório de Sistemas Térmicos

Rua Imaculada Conceição, 1155

Curitiba – PR, 80.215-901 - Brasil

e-mail: nmendes@ccet.pucpr.br

Resumo

Estuda-se, neste artigo, a influência da umidade na transferência de calor através de estruturas porosas de edificações submetidas a condições de chuva, radiação solar, convecção e mudança de fase. Analisa-se a dependência com o tempo dos perfis de conteúdo de umidade e de temperatura e das cargas de resfriamento em paredes de diferentes materiais numa semana de verão em Florianópolis (quente/úmido). Investiga-se, também, a influência de dias chuvosos e com forte radiação solar após um período de chuva em cargas térmicas e conteúdos de umidade.

Palavras-chave: Transferência de Calor e Massa, Meios Porosos, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Em análise termoenergética de ambientes, normalmente, avalia-se condução de calor através de paredes desprezando-se o armazenamento e o transporte de umidade na estrutura porosa das paredes. Além do efeito no fluxo de calor, a umidade apresenta outras implicações, especialmente em climas quentes e úmidos onde é fato que a umidade pode causar danos à estruturas de edificações e pode promover o crescimento de fungos, afetando a saúde dos ocupantes.

Burch e Thomas (1991) desenvolveram o código MOIST para estudar paredes compostas sob condições não-isotérmicas. A condutividade térmica foi considerada constante e o programa é limitado a baixos conteúdos de umidade. Liesen (1994) usou a teoria de evaporação-condensação e o método do fator de resposta para desenvolver e implementar um modelo de transferência de calor e de massa no programa de simulação termoenergética IBLAST (Integrated Building Loads Analysis and System Thermodynamics). Os coeficientes de transporte desse programa foram todos considerados constantes.

Para análise do transporte de calor e umidade para altos conteúdos de umidade, utilizou-se um modelo dinâmico que evita restrições quanto ao conteúdo de umidade. Considerou-se, para as paredes, convecção, radiação solar e mudança de fase vapor/líquido. Nesse modelo, quantidades físicas como coeficientes de transporte de massa, condutividade térmica e calor específico, são variáveis e dependem da temperatura da parede e do conteúdo de umidade.

Este trabalho analisa cargas de resfriamento para três materiais diferentes: concreto celular aerado, tijolo e argamassa. A análise é realizada na semana de verão mais crítica do

clima de Florianópolis. Analisa-se, também, a influência em cargas de resfriamento e em níveis de umidade de parede para dois tipos de condições de chuva: chuva seguida por uma semana de céu limpo e chuva seguida por uma semana de céu encoberto.

2. MODELO MATEMÁTICO

As equações diferenciais governantes para modelar o fenômeno de transferência de calor e umidade através de um elemento poroso vertical são apresentadas pelas equações (1) a (4) que foram derivadas através de balanços de energia e de massa em um volume de controle de material poroso.

Equação da conservação da massa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Equação da conservação da energia

$$\rho_0 \cdot c_m \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{TV} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (2)$$

O parâmetro c_m é o calor específico que é função do conteúdo de umidade volumétrico θ . A variável λ é a condutividade térmica do meio na ausência de mudança de fase que normalmente depende muito de θ e pouco da temperatura T . Os coeficientes de transporte de umidade total (vapor e água) D_T , D_θ , e de vapor D_{TV} , $D_{\theta V}$, associados tanto a gradientes de temperatura como de conteúdo de umidade, são responsáveis pela transferência de umidade no interior do material poroso, segundo o modelo de Philip e De Vries (1957).

A superfície externa da parede é exposta à radiação solar, convecção de calor e mudança de fase. As equações de conservação associadas são as seguintes:

Conservação da massa na superfície externa ($x=0$)

$$-\left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{h_{m,ext}}{\rho_l} (\rho_{v,ext} - \rho_{v,x=0}) \quad (3)$$

Conservação da energia na superfície externa ($x=0$)

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} - L \rho_l \left(D_{TV} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = h_{ext} (T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r + L h_{m,ext} (\rho_{v,ext} - \rho_{v,x=0}) \quad (4)$$

onde: $h_{ext}(T_{ext} - T(0))$ = convecção de calor; αq_r = radiação solar absorvida; $h_{m,ext}(\rho_{v,ext} - \rho_{v,x=0})$ = energia de mudança de fase, ρ_l a massa específica da água na fase líquida e L , o calor latente de vaporização da água.

Para a face interna, derivam-se equações semelhantes omitindo apenas o termo de radiação solar.

3. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

As equações acima foram resolvidas com o método de volumes finitos, utilizando como dados de entrada, o arquivo climático horário TRY (Test Reference Year) da cidade de Florianópolis – SC. O ambiente interno foi considerado condicionado a 23°C e 60% de umidade relativa durante as horas de trabalho. Assume-se, ao desligar o condicionador de ar

às 5 pm, que as condições internas igualam-se às externas linearmente em cinco horas. Ao religar o condicionador de ar às 8 am, assume-se que o recinto atinge as condições de conforto em 2 horas. Esta hipótese, reduz mudanças bruscas no fluxo de calor, introduzindo um carácter mais realístico na simulação.

As propriedades dos materiais para o concreto celular aerado (CCA) foram obtidas de Cunha Neto (1992). Já para o tijolo (TIJ) e argamassa (ARG) obteve-se de Perrin (1985). Os dados disponíveis desses materiais permitem que todos os coeficientes de transporte sejam modelados como uma função do conteúdo de umidade. As propriedades básicas dos materiais usadas na simulação são apresentadas na Tabela 1. Para se ter maior precisão, adotou-se um passo de tempo de 30 segundos para calcular os campos de temperatura e de conteúdo de umidade em 50 nós de uma parede de 10 cm de espessura. O programa foi executado para simular sete semanas antes do período de análise, para evitar efeitos das condições iniciais. Nas simulações, as paredes são compostas de um único material, sem pintura ou qualquer outra barreira ao vapor.

Tabela 1: Propriedades básicas dos materiais (estado seco).

Propriedade	CCA	TIJ	ARG
densidade [kg/m ³]	385	1900	2050
porosidade	0.25	0.29	0.18
Condutividade térmica [W/m-K].	0.085	0.985	1.92
Calor específico [J/kg-K]	1000	950	932

De acordo com Bogle et al. (1984), dependendo da intensidade da chuva, um conteúdo médio de umidade de até 20% em volume tem sido registrado para paredes de tijolo. Adota-se esse conteúdo de umidade como conteúdo inicial para representar o efeito de chuva ocorrida nas semanas precedentes a semana de análise. Esse conteúdo de 20% é assumido igualmente para todos os materiais. Na verdade, essa simulação representa um processo semi-natural de secagem após uma forte chuva. Não poderia ser chamado de natural devido à presença de condicionadores de ar que forçam a secagem do lado interno da parede.

4. RESULTADOS

Neste trabalho, designa-se simulação considerando a presença da umidade na parede como simulação “úmida”, com absorção de chuva como “chuvosa” e sem umidade na parede como “seca”. Os casos com e sem radiação solar são indicados por “ensolarado” e “nublado”, respectivamente. Para o caso “ensolarado”, assume-se a fachada sul para a parede, representando uma situação mais crítica do ponto de vista migração de umidade em Florianópolis (latitude -27.5°).

Dependência do material da parede

A Figura 1 mostra perfis simulados de conteúdo de umidade (simulação "úmida") para paredes com os três diferentes materiais às 6am e 6pm em 20 de fevereiro. Aqui, o nó 1 está na superfície externa da parede e o nó 50 na interna. Observa-se uma variação significativa no conteúdo de umidade com o tempo para uma profundidade de aproximadamente 1.5 cm de cada face da parede, mas há pouca variação para os nós mais internos.

O alto conteúdo de umidade no nó 50 no início da manhã implica uma alta transferência de calor latente quando o condicionador de ar é ligado. A parede de ARG mostra o maior o conteúdo de umidade médio ao passo que no início da manhã a parede de CCA apresenta o

maior pico em conteúdo de umidade. Em contraste, a parede de tijolo mostra pouquíssima variação em profundidade ou tempo porque o tijolo tem uma estrutura peculiar com um alto número de poros grandes, o que inibe a fixação de umidade por capilaridade.

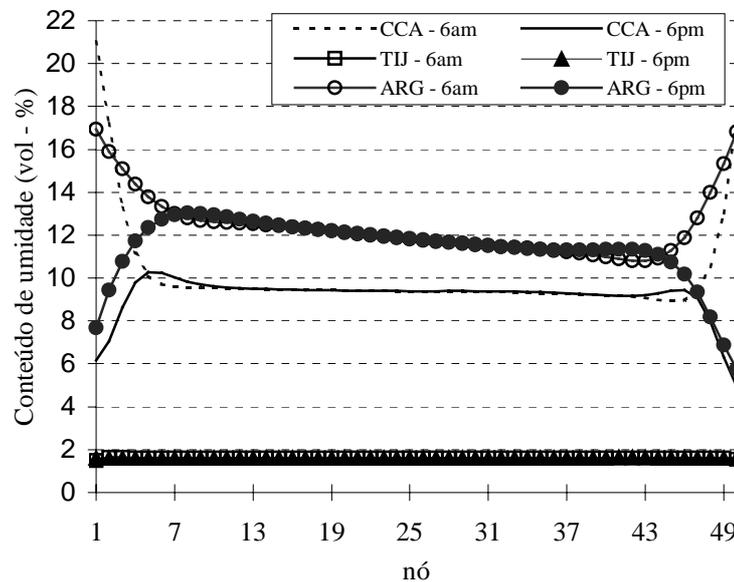


Figura 1: Perfis de umidade obtidos em simulações do tipo “úmida” em paredes de 10 cm de espessura para CCA, TIJ e ARG às 6am e 6pm em 20 de fevereiro em Florianópolis.

Comparação para dia ensolarado

A Figura 2 compara fluxos de calor total, latente e sensível em 21 de fevereiro para as simulações "úmido-ensolarado" e "seco-ensolarado" de uma parede de CCA. Quando o condicionador de ar é ligado de manhã cedo, o fluxo de calor latente aumenta substancialmente devido à baixa umidade relativa do ar do recinto imposta pela máquina. Leva-se aproximadamente 3 horas para atingir uma condição estável para o ar interno (8-11am).

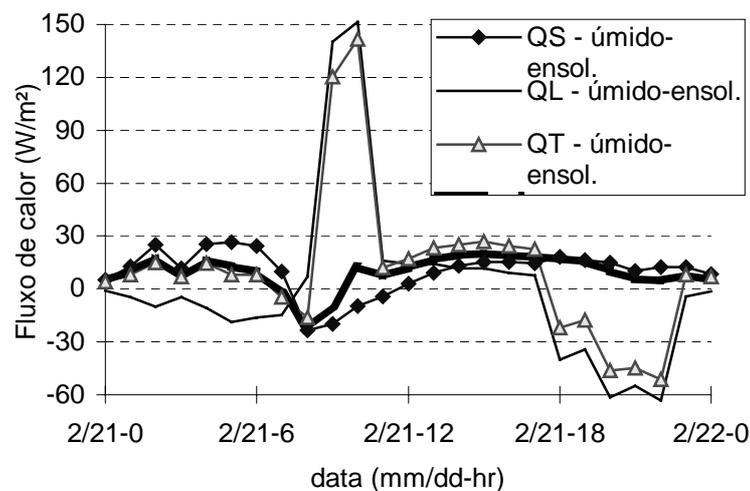


Figura 2: Fluxos de calor sensível (QS), latente (QL) e total (QT) para uma parede de CCA em 21 de fevereiro para os casos "úmido-ensolarado" e "seco-ensolarado".

Neste período das 8 às 11 da manhã, foi observado uma maior diferença entre as simulações com e sem migração de umidade já que o condicionador de ar seca o ar interno a uma umidade relativa de 60%. Às 5 pm, quando a máquina é desligada, o ar interno perde umidade para a parede.

As diferenças básicas entre os casos "úmido" e "seco" são devido a uma combinação de efeitos de mudança de fase, que são presente para o "úmido" mas não para o "seco", e massa térmica e condutividade térmica mais altas para o caso "úmido". A noite, quando a temperatura externa diminui, a presença de uma maior massa térmica provoca um atraso na diminuição da temperatura da superfície interna da parede; entretanto, a condutividade térmica e os efeitos de mudança de fase são mais altos fazendo com que a temperatura da superfície interna diminua mais rapidamente, o que faz com que a carga sensível calculada para o caso "úmido-ensolarado" seja menor do que aquela calculada para o caso "seco-ensolarado". Se isto não tivesse acontecido, a diferença na carga total calculada com esses dois casos seria ainda maior. Curvas semelhantes a essas da Figura 2 são observadas para os outros materiais (não mostrado).

Comparação para dia de céu encoberto

A Figura 3 compara cargas de resfriamento num dia nublado para uma parede de tijolo nos casos: "chuvoso-nublado", "úmido-nublado" e "seco-nublado". A ausência de ganho de radiação solar aumenta a influência da umidade nas cargas de resfriamento uma vez que há menos evaporação para fora da superfície externa e, portanto, a parede permanece mais úmida. Naturalmente, quanto mais molhada estiver a parede maior será a diferença entre os casos "úmido" e "seco". (Isto também é observado na análise de consumo de energia apresentada nas Figuras 4 e 5).

A Figura 3 mostra que após 1pm a razão entre as cargas calculadas para os casos "chuvoso-nublado" (com $\theta_{\text{médio}}=12.5\%$ às 3pm) e "úmido-nublado" (com $\theta_{\text{médio}} = 1.6\%$ às 3pm) é quase constante (~ 1.5). Uma vez que o condicionamento de ar intermitente não é levado em conta, a diferença entre os casos "seco" e "úmido" ou "chuvoso" tende a diminuir, porque a transferência de calor latente para o interior é reduzida

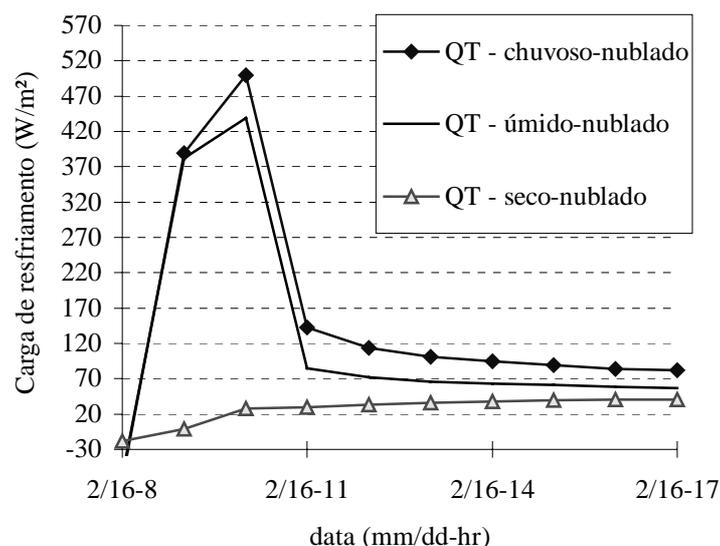


Figura 3: Comparação entre cargas de resfriamento de condução num dia encoberto para uma parede de tijolo nos casos "chuvoso", "úmido" e "seco".

Carga de Resfriamento diária e Influência de Chuva e Radiação Solar

A seguir, mostra-se, na Figura 4, cargas de resfriamento diárias para semanas de céu limpo. Nota-se que a parede de tijolo apresenta a maior carga de resfriamento, exceto para o caso “seco” que é para a parede de argamassa; isso ilustra efeitos de migração de umidade em paredes porosas.

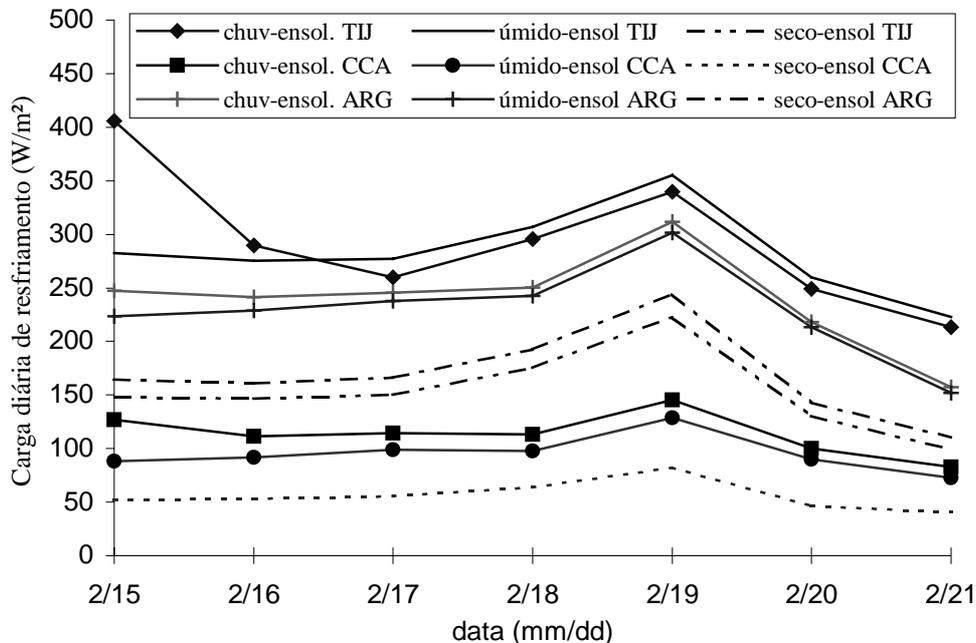


Figura 4: Cargas diárias de resfriamento associadas à condução de calor através de paredes de TIJ, ARG e CCA numa semana ensolarada para os casos “chuvoso”, “úmido” e “seco”.

Observa-se que o caso "chuvoso" nem sempre apresenta a maior carga de resfriamento. Isto é devido ao surgimento de um gradiente de conteúdo de umidade negativo, ou porque a carga sensível é reduzida devido a uma diminuição no gradiente de temperatura. Para o caso "chuvoso", adotou-se um conteúdo médio de umidade de 20% no início da semana, o que conduz a uma maior carga latente.

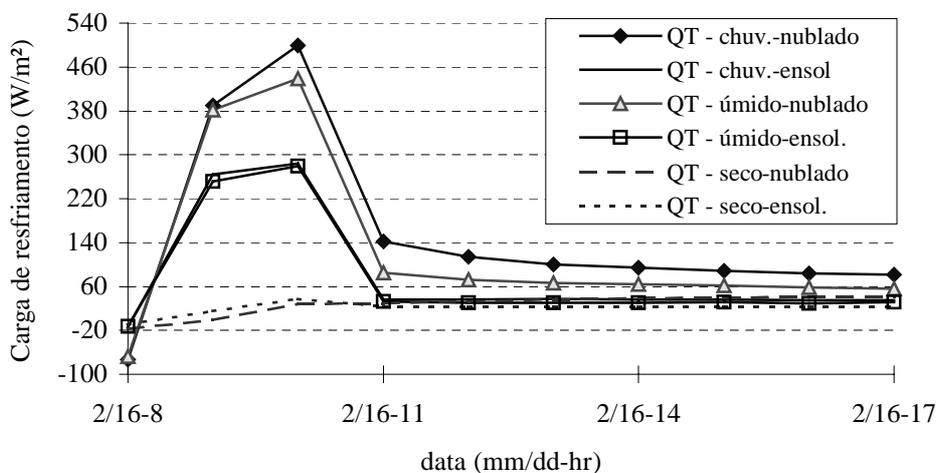


Figura 5: Comparação entre cargas de resfriamento para condições de céu limpo e coberto para uma parede de CCA em 16 de fevereiro, com os casos “chuvoso”, “úmido” e “seco”.

O efeitos de radiação solar e conteúdo de umidade na transferência acoplada de calor e massa em materiais porosos é exibido na Figura 5, que mostra as cargas de resfriamento (sensível e latente) para uma parede de CCA para condições de céu limpo e encoberto. Nota-se que a radiação solar tem pouca influência: mesmo que a radiação solar provoque maiores temperaturas na superfície externa, as cargas de resfriamento são menores do que aquelas estimadas para condições de céu encoberto. Isto deve-se, principalmente, aos efeitos de mudança de fase na superfície interna.

A Tabela 2 fornece os erros relativos no cálculo do uso de energia de resfriamento quando se despreza umidade. As paredes de argamassa apresentam os menores erros.

Tabela 2. Erro relativo (%) em cargas diárias de resfriamento confrontando os casos “seco” e “úmido” ou “chuvoso” para uma semana ensolarada e para uma de céu coberto de 15/2 a 21/2.

Data	Semana ensolarada						Semana de céu encoberto					
	“Seco” Vs. “úmido”			“Seco” Vs. “chuvoso”			“Seco” Vs. “úmido”			“Seco” Vs. “chuvoso”		
	TIJ	CCA	ARG	TIJ	CCA	ARG	TIJ	CCA	ARG	TIJ	CCA	ARG
15/2	47.55	40.58	26.49	63.50	58.76	33.57	60.68	60.36	52.81	80.99	80.24	53.78
16/2	46.88	42.21	29.60	49.45	52.64	33.35	58.39	56.60	51.54	73.06	68.23	47.61
17/2	45.71	44.12	30.05	42.15	51.76	32.13	55.61	53.93	48.59	67.63	62.26	41.19
18/2	42.83	34.89	20.84	40.62	43.75	23.23	48.44	44.01	39.93	60.15	52.15	40.84
19/2	37.23	36.16	19.06	34.41	43.43	21.62	41.90	43.17	32.66	52.17	50.15	33.96
20/2	49.71	48.04	32.86	47.64	53.53	34.36	68.55	71.48	61.93	74.62	76.46	55.59
21/2	55.50	44.07	27.32	53.51	50.84	29.96	58.95	59.49	49.12	67.59	65.72	47.89
média	46.49	41.44	26.60	47.33	50.67	29.75	56.07	55.58	48.08	68.03	65.03	45.84

Comparando-se resultados médios extraídos (Tabela 2), observou-se que a diferença entre os casos "seco" e "úmido" ou "chuvoso" é maior para paredes de tijolo.

5. CONCLUSÕES

O modelo apresentado aqui permite o cálculo de transferência de calor tanto sensível como latente através de paredes porosas em edificações. Mostrou-se que a desconsideração dos fenômenos associados a presença de umidade podem provocar grandes erros no cálculo de transferência de calor por condução. Os erros são maiores de manhã quando condicionadores de ar são ligados, provocando uma alta carga latente devido a grande quantidade de umidade a ser retirada da parede.

Observa-se, através da Tabela 2, que em uma semana ensolarada, o caso “úmido” apresenta um erro médio de 27% para uma parede de argamassa e máximo de 46% para o tijolo. Esses erros são maiores em uma semana de céu encoberto já que o conteúdo de umidade é mais elevado, com um erro médio mínimo de 48% para argamassa e máximo de 56% para o tijolo.

Foi mostrado quantitativamente como paredes num clima quente e úmido secam e geram um fluxo de calor latente alto com o acionamento de condicionadores de ar e também, como a umidade na parede é reacumulada quando o sistema é desligado.

Em conclusão, demonstrou-se a importância de incorporar a transferência acoplada de calor e massa em programas de simulação termoenergética de edificações para estimar com maior precisão cargas de resfriamento e, como consequência, as condições para avaliação de conforto térmico em recintos.

6. REFERÊNCIAS

- Bogle, A., McMullan, J.T. and Morgan, R., 1984, “An Experimental Examination of the Effects of Rainfall on the Heat Loss from a Red Brick Wall”, Energy Research, Vol. 8, 1-18.
- Burch, D.M. and Thomas, W.C., 1991, “An Analysis of Moisture Accumulation in Wood Frame Wall Subjected to Winter Climate”, NISTIR 4674, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg-MD, USA.
- Cunha Neto, J. A. B., 1992, “Transport d'Humidité em Matériau Poreux en Présence d'un Gradient de Température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire”, Thèse de Docteur, 194p., Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Liesen, R.J., 1994, “Development of a Response Factor Approach for Modeling the Energy Effects of Combined Heat and Mass Transfer with Vapor Adsorption in Building Elements”, Ph.D. thesis, Mechanical Engineering Department, University of Illinois, USA.
- Patankar, S.V., 1981, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
- Perrin, B., 1985, “Etude des Transferts Couplés de Chaleur et de Masse dans des Matériaux Poreux Consolidés non Saturés Utilisés en Génie Civil”, Thèse Docteur d'Etat, 267p, Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse, France.
- Philip, J. R. and De Vries, D. A., 1957, “Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients”, Transactions of the American Geophysical Union. V.38, n.2, p.222-232.