

# TRANSFERÊNCIA DE CALOR E UMIDADE EM PAREDES NO VERÃO DE FLORIANÓPOLIS

N. Mendes, R. Lamberts e P.C. Philippi  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Mecânica  
E-mail: Nathan@lmpt.ufsc.br

## RESUMO

Estuda-se, neste artigo, a influência da umidade nas cargas de resfriamento, de paredes 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). Estuda-se, também, a influência de dias chuvosos e com forte radiação solar após um período de chuva em cargas térmicas e conteúdos de umidade.

## ABSTRACT

In this article, we study the humidity influence on cooling loads of walls subjected to rain, solar radiation, convection and phase change. The time dependence of moisture content and temperature profiles on the cooling loads is analyzed for different materials during a summer week in Florianópolis (hot/humid). We study also the influence of rainy days followed or not by a solar radiation period on thermal loads and moisture contents.

## INTRODUÇÃO

Em análise energética de edificações, 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 estrutura do edifício 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.

## MODELO MATEMÁTICO

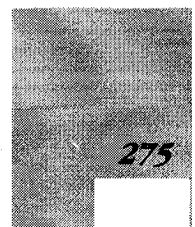
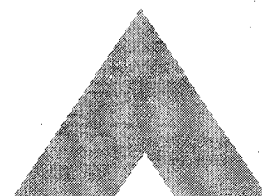
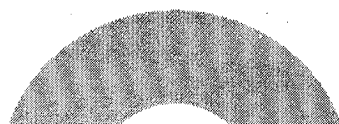
As equações diferenciais governantes para modelar o fenômeno de transferência de calor e umidade são dadas pelas equações (1) e (2) que foram derivadas através de balanços energético e mássico em um volume de controle de material poroso.

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  $\rho_l$  é o calor específico que é função de  $T$ . A variável  $\lambda$  é a condutividade térmica do meio na ausência de mudança de fase que normalmente depende muito de  $T$  e pouco de  $\theta$ . Os coeficientes  $D_T$ ,  $D_q$ ,  $D_{TV}$ ,  $D_{qV}$  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 ( $X=0$ )

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

CONSERVAÇÃO DA ENERGIA NA SUPERFÍCIE EXTERNA ( $X=0$ )

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

onde:  $h_{ext}$  = convecção de calor;  $\alpha q_r$  = radiação solar absorvida e  $Lh_{m,ext}$  = energia de mudança de fase.

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

### PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

As equações acima foram resolvidas com o método de volumes finitos proposto por Patankar (1980), com malha uniformemente espaçada e com o algoritmo de solução TDMA.

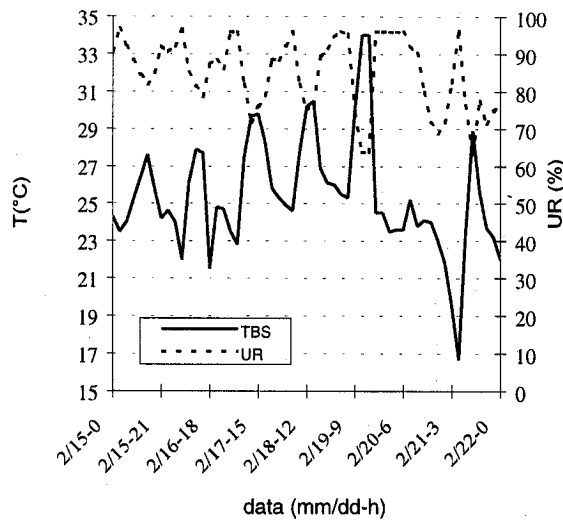


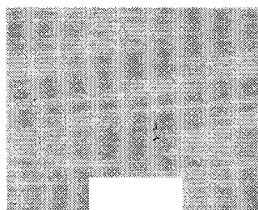
Figura 1. Clima de Florianópolis no período de análise (15 a 22 de fevereiro).

O arquivos climático horário (Figura 1) usado foi o TRY (Test Reference Year) de Florianópolis - SC. O ar do ambiente interno é 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.

As propriedades dos materiais para o concreto celular aerado (CCA) foram obtidos de Cunha Neto (1992). As propriedades para o tijolo (TIJ) e argamassa (ARG) foram obtidos 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 precisão, adotou-se um passo de tempo de 30 segundos para simular uma parede de 10 cm de espessura. Assumiu-se para as condições iniciais valores médios de temperatura e umidade relativa entre os ambientes interno e externo. O programa foi executado para 45 dias antes da semana de análise, para reduzir fortemente efeitos das condições iniciais. O tempo de execução para uma parede de 50 nós em um computador 486 de 66 MHz foi de aproximadamente três horas para simular um período de 52 dias.

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 <sup>3</sup> ]	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.

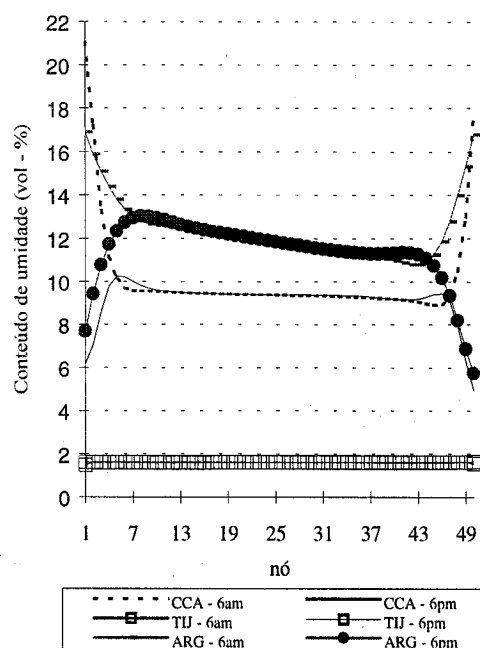
## RESULTADOS

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°)

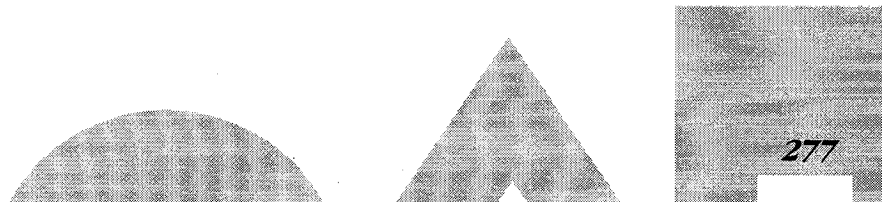
## DEPENDÊNCIA DO MATERIAL DA PAREDE

A Figura 2 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 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 2. Perfis de umidade calculados para 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 3 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).

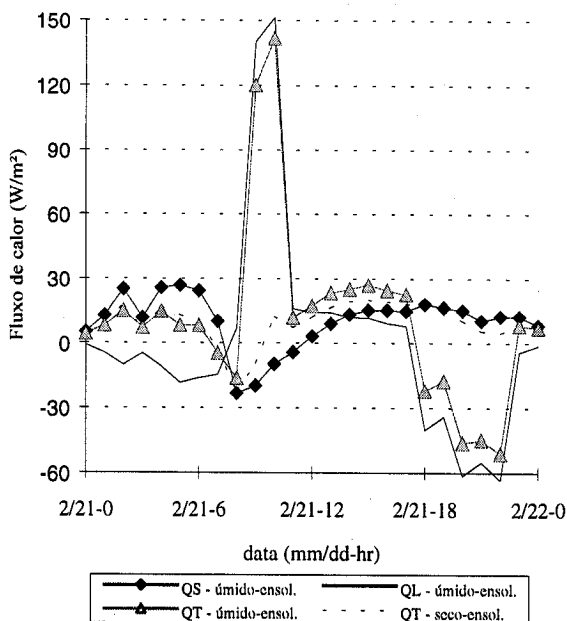


Figura 3. Fluxos de calor sensível (QS), latente (QL) e total (QT) para uma parede de CCA em 21 de fevereiro para os casos “úmido-ensolarado” e “seco-ensolarado”.

Neste período, observa-se 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.

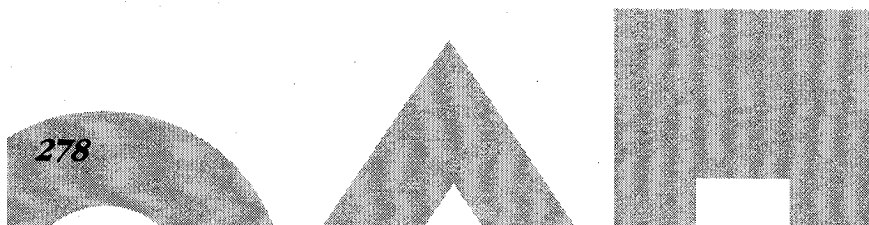
As diferenças básicas entre os casos “úmido” e “seco” são devido a uma combinação de efeitos de mudança de fase, que são presente para o “úmido” mas não para o “seco”, e massa térmica e condutividade térmica mais altas para o caso “úmido”. A noite, quando a temperatura externa diminui, a presença de 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 3 são observadas para os outros materiais (não mostrado).

## COMPARAÇÃO PARA DIA DE CÉU ENCOBERTO

A Figura 4 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 5 e 6).

A Figura 4 mostra que após 1pm a razão entre as cargas calculadas para os casos “chuvoso-nublado” (com  $q_{\text{médio}} = 12.5\%$  às 3pm) e “úmido-nublado” (com  $q_{\text{médio}} = 1.6\%$  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.



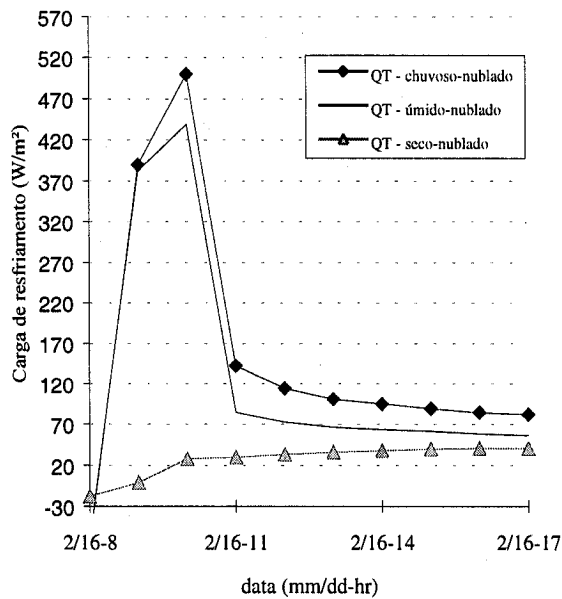


Figura 4. Comparação entre cargas de resfriamento de condução num dia encoberto para uma parede de tijolo nos casos “chuvoso”, “úmido” e “seco”.

### CARGA DE RESFRIAMENTO DIÁRIA E INFLUÊNCIA DE CHUVA E RADIAÇÃO SOLAR

A seguir, mostra-se, nas Figuras 5 e 6, cargas de resfriamento diárias para semanas de céu limpo e encoberto. 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.

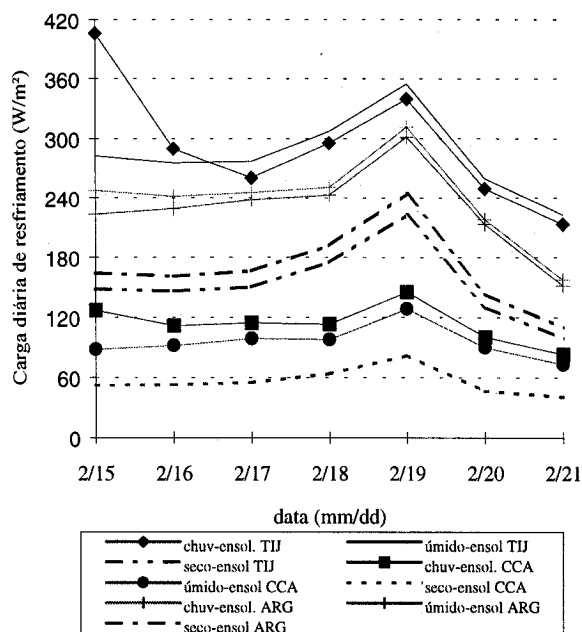
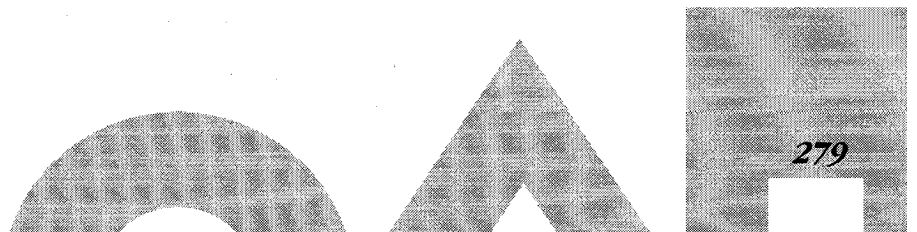


Figura 5. Cargas diárias de resfriamento associadas à condução de calor através de paredes de TIJ, ARG e CCA numa semana ensolarada para os casos “chuvoso”, “úmido” e “seco”.



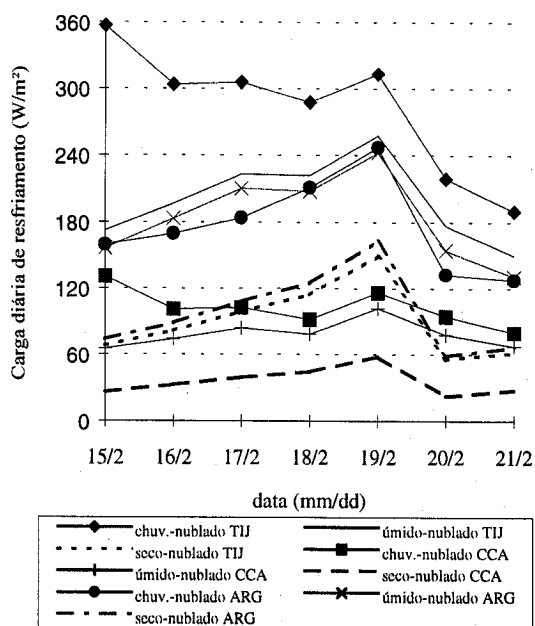


Figura 6. Cargas diárias de resfriamento associadas à condução de calor através de paredes de TIJ, ARG e CCA numa semana de céu encoberto para os casos "chuvoso", "úmido" e "seco".

Observa-se que o caso "chuvoso" nem sempre apresenta a maior carga de resfriamento. Isto é devido ao surgimento de um gradiente hídrico 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.

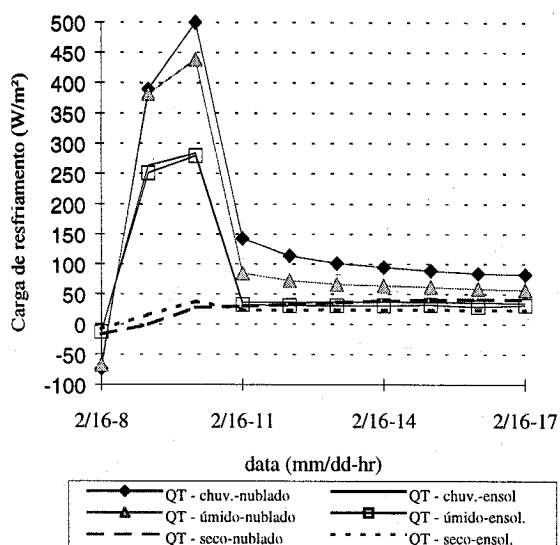


Figura 7. Comparação entre cargas de resfriamento para condições de céu limpo e coberto para uma parede de CCA em 16 de fevereiro, com os casos "chuvoso", "úmido" e "seco".

O efeitos de radiação solar e conteúdo de umidade na transferência acoplada de calor e massa em materiais porosos é exibido na Figura 7, 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.

Comparando-se resultados médios extraídos dos dados gerados para as Figuras 5 e 6, observou-se que a diferença entre os casos "seco" e "úmido" ou "chuvoso" é maior para paredes de tijolo.

As tabelas 3 e 5 do Apêndice fornecem os erros relativos no cálculo do uso de energia de resfriamento quando se despreza umidade. As paredes de argamassa apresentam os menores erros.

## 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.

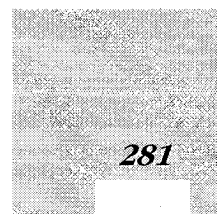
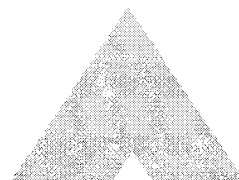
Observa-se, através das Tabelas 2 e 3, que em uma semana ensolarada, o caso "úmido" apresenta um erro médio de 27% para uma parede de argamassa e máximo de 46% para o tijolo. Esses erros são maiores em uma semana de céu encoberto já que o conteúdo de umidade é mais elevado, com um erro médio mínimo de 48% para argamassa e máximo de 56% para o tijolo.

Foi mostrado quantitativamente como paredes num clima quente e úmido secam e geram uma alta carga latente 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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bogle A., McMullan J.T. and Morgan R., "An Experimental Examination of the Effects of Rainfall on the Heat Loss from a Red Brick Wall", Energy Research, Vol. 8, 1-18, 1984.
- Burch D.M. and Thomas W.C., "An Analysis of Moisture Accumulation in Wood Frame Wall Subjected to Winter Climate", NISTIR 4674, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1991.
- Cunha Neto, J. A. B., "Transport d'humidité em matériau poreux en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire", Thèse de Docteur, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1992, 194p.
- Liesen, R.J., "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, 1994.
- Patankar S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1981.
- Perrin, B., "Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil", Thèse Docteur D'Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1985. 267p.
- Philip, J. R. and De Vries, D. A., "Moisture movement in porous materials under temperature gradients", Transactions of the American Geophysical Union. v.38, n.2, p.222-232, 1957.



## APÊNDICE

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

Data	“Seco” Vs. “úmido”			“Seco” Vs. “chuvoso”		
	TIJ	CCA	ARG	TIJ	CCA	ARG
2/15	47.55	40.58	26.49	63.50	58.76	33.57
2/16	46.88	42.21	29.60	49.45	52.64	33.35
2/17	45.71	44.12	30.05	42.15	51.76	32.13
2/18	42.83	34.89	20.84	40.62	43.75	23.23
2/19	37.23	36.16	19.06	34.41	43.43	21.62
2/20	49.71	48.04	32.86	47.64	53.53	34.36
2/21	55.50	44.07	27.32	53.51	50.84	29.96
média	46.49	41.44	26.60	47.33	50.67	29.75

**Tabela 3. Erro relativo percentual em cargas diárias de resfriamento confrontando os casos “seco” e “úmido” ou “chuvoso” para uma semana de céu encoberto de 15/2 a 21/2.**

Data	“Seco” Vs. “úmido”			“Seco” Vs. “chuvoso”		
	TIJ	CCA	ARG	TIJ	CCA	ARG
2/15	60.68	60.36	52.81	80.99	80.24	53.78
2/16	58.39	56.60	51.54	73.06	68.23	47.61
2/17	55.61	53.93	48.59	67.63	62.26	41.19
2/18	48.44	44.01	39.93	60.15	52.15	40.84
2/19	41.90	43.17	32.66	52.17	50.15	33.96
2/20	68.55	71.48	61.93	74.62	76.46	55.59
2/21	58.95	59.49	49.12	67.59	65.72	47.89
média	56.07	55.58	48.08	68.03	65.03	45.84