

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Estudo do Processo Acoplado de Transferência de Calor e
Umidade em Paredes Externas de Edificações**

Karen Gularte Peres

Porto Alegre – RS

1999

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Estudo do Processo Acoplado de Transferência de Calor e
Umidade em Paredes de Edificações**

Karen Gularte Peres

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração: Pesquisa e desenvolvimento de processos

Orientadores: Prof^a. Ligia D. F. Marczak, Dr. Eng.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Prof. Horácio Antônio Vielmo, Dr. Eng.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, novembro de 1999

Dissertação defendida e aprovada em 16 de novembro de 1999, pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

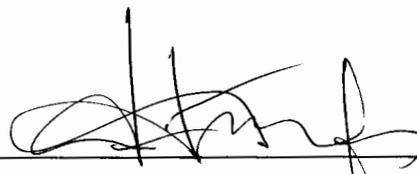
Banca Examinadora



Paulo Otto Beyer, Dr. Eng.



Keiko Wada, D.Sc.



Talita Furlanetto Mendes, Dr. Eng.

Professores Orientadores

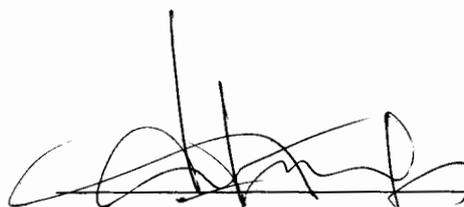


Ligia Damasceno Ferreira Marczak, Dr. Eng.



Horácio Antônio Vielmo, Dr. Eng.

Coordenadora do PPGEQ



Talita Furlanetto Mendes, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rodinei e Alda e irmãs Caroline e Karina, pelo amor e confiança;

Ao meu namorado Vinícius, pela paciência e compreensão;

À minha família e amigos, pelo carinho e pela torcida;

Aos meus orientadores e aos professores e funcionários dos departamentos de engenharia química e de engenharia mecânica da UFRGS pela sua dedicação;

À Ligia pela motivação e amizade;

Aos meus colegas de mestrado, pelo apoio e incentivo;

À CAPES e a FAPERGS pelo suporte financeiro.

ÍNDICE

	Pag.
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
SIMBOLOGIA	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - EQUAÇÕES GOVERNANTES PARA A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE MASSA EM MEIOS POROSOS NÃO SATURADOS	8
2.1 - Introdução	8
2.2 - Mecanismos Físicos de Transporte de Calor e Massa	9
2.3 - Modelo Fenomenológico para a Transferência simultânea de Calor e Massa em Meios Porosos Não Saturados	12
2.3.1 - Equações de Transporte	13
2.3.1.1 - Conservação da Massa	17
2.3.1.2 - Conservação da Energia	18
CAPÍTULO 3 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	21
3.1 - Introdução	21
3.2 - Equações Diferenciais Governantes	21
3.3 - Propriedades Termofísicas e Difusivas	25

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE SOLUÇÃO	29
4.1 - Introdução	29
4.2 - Metodologia de Solução Numérica do Problema	29
4.3 - Validação dos Resultados	30
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 - Introdução	34
5.2 - Parede Americana	35
5.3 - Parede Brasileira	43
5.3.1 - Condição de Contorno Convectiva.....	44
5.3.2 - Condição de Contorno Convectiva-Radiativa.....	52
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A - EQUAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES UTILIZADAS	66

RESUMO

O presente trabalho trata do fenômeno da transferência simultânea de calor e massa em meios porosos não saturados, especificamente em paredes de edificações. O conhecimento do comportamento térmico destas paredes é de grande importância no estudo do desempenho térmico de ambientes internos da edificação. Uma grande parte das pesquisas disponíveis nesta área avalia somente o fenômeno da troca de energia, desconsiderando os efeitos provocados pelo transporte de umidade no interior da parede. Este transporte influencia a transferência de calor pois tanto umidade quanto energia são transferidos devido à influência combinada de gradientes térmicos e de conteúdo de umidade. Neste contexto, situa-se o objetivo deste trabalho de investigar o efeito da inclusão do transporte de umidade no processo de transferência de calor e por consequência nos valores dos fluxos térmicos. O modelo clássico de Philip e de Vries para a análise do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos insaturados é utilizado; neste modelo as equações da conservação da massa e da energia são obtidas utilizando-se as leis fenomenológicas da difusão de massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) e calor (Lei de Fourier). As equações assim obtidas trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e massa, através de difusividades associadas a estes gradientes. As equações diferenciais governantes são resolvidas numericamente através do Método dos Volumes Finitos utilizando integração temporal totalmente implícita. Para a análise dos processos, dois tipos de parede são utilizadas. A primeira representa uma parede tipicamente americana, cujo comportamento térmico já foi investigado por outros autores e cujos resultados serviram para validar o método utilizado neste trabalho. A segunda parede tem a configuração de uma parede brasileira e foi o objeto principal da análise dos resultados apresentados. Para as duas configurações são assumidas trocas convectivas em ambos os lados da parede e também condição de impermeabilidade ao fluxo de massa. As expressões para as propriedades difusivas e termofísicas dos materiais que compõe as paredes foram retiradas da literatura. Os resultados são apresentados na forma de perfis de temperatura e conteúdo de umidade em função do tempo para as duas situações simuladas: processo térmico somente e processo acoplado de transporte de calor e umidade. Também são explorados os resultados referentes aos valores do fluxo de calor junto às faces externa e interna da parede para os dois processos investigados.

ABSTRACT

The present work studies the simultaneous heat and mass transfer phenomena in insaturated porous means, specifically in building walls. The knowledge of the thermal behavior of these walls is of great importance for the study of the building internal environment. A great part of the available research in this area evaluate only the heat transfer phenomena, ignoring the effects caused by the moisture transport inside the wall. This transport influences the heat transfer because as much moisture as energy is transferred due to the combined gradients of thermal and moisture content. The main objective of this work is to investigate the effect of the inclusion of the moisture transport in the heat transfer process and, as a consequence, in the thermal flow values. The classic model by Philip and De Vries for the analysis of the simultaneous heat and mass transfer in insaturated porous media is used. In that model, the mass and energy conservation equations are obtained using the fenomenological laws of mass diffusion (Darcy's law for the liquid phase and Fick's law for the phase vapor) and heat diffusion (Fourier's law). The governing equations are then recovered in such a way that the influence of the thermal and moisture content gradients are explicit in the heat and mass transport processes, through the difusivities associated to these gradients. The governing equations are numerically solved using the Finite Volume Method. In order to analyse the results, two types of wall are used. The first represents a typically american wall, whose thermal behavior was already investigated by others authors and whose results are used to validate the method used in this work. The second wall has the configuration of a brazilian wall and is the main object of analysis addressed here. For the two configurations, convective boundary conditions are assumed on both sides of the wall along with a condition of mass flow impermeability. The expressions for the thermophysics and difusivities properties of the materials that compose the walls were obtained by the literature. The results are presented in the form of temperature and moisture content profiles as a function of time for two simulated situations: thermal process and a coupled heat and moisture transport process. In addition, values of the external and internal heat flows are compared for the two processes investigated.

LISTA DE TABELAS

	Pag.
Tabela 3.1 - Temperatura Sol-Ar (°C)	23
Tabela 3.2 – Símbolos e dimensões para os grupos de variáveis utilizados.....	26
Tabela 4.1 - Propriedades térmicas da parede	32
Tabela 4.2 – Fluxo de calor (W/m^2) na fronteira interna ao longo do 4 ^o dia – comparação com a literatura –	33
Tabela 5.1 - Difusividades constantes e conteúdos iniciais de umidade	36
Tabela 5.2 - Fluxo de calor (W/m^2) na fronteira interna ao longo do 4 ^o dia – comparação entre processo térmico e processo acoplado –	38
Tabela A.1 - Expressões para as propriedades utilizadas para Argamassa	67
Tabela A.2 - Expressões para as propriedades utilizadas para o Tijolo	68

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1 - Meio poroso praticamente seco	10
Figura 2.2 - Estado pendular de um meio poroso	10
Figura 2.3 - Meniscos da ponte de líquido formada entre dois grãos	11
Figura 2.4 - Estado funicular de um meio poroso	11
Figura 3.1 - Representação esquemática de uma parede genérica	22
Figura 3.2 – Grupo de variáveis para a argamassa	27
Figura 3.3 – Grupo de variáveis para o tijolo	27
Figura 4.1 - Representação esquemática da parede americana	31
Figura 5.1 - Fluxo de calor na fronteira interna para a parede americana	37
Figura 5.2 - Fluxo de calor na fronteira externa para a parede americana	39
Figura 5.3 – Distribuição de temperatura para o 5 ^o dia	40
Figura 5.4 - Distribuição de conteúdo de umidade para o 5 ^o dia	42
Figura 5.5 - Representação esquemática da parede brasileira	43
Figura 5.6 – Fluxo de calor na fronteira interna para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	45
Figura 5.7 – Fluxo de calor na fronteira externa para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	45
Figura 5.8 - Perfis de temperatura em função do tempo para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	47
Figura 5.9 - Perfis de conteúdo de umidade em função do tempo para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	48
Figura 5.10 - Distribuição de temperatura para o 16 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	49
Figura 5.11 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 2 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	50
Figura 5.12 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 4 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	50
Figura 5.13 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 8 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	51

Figura 5.14 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 16 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa constante	51
Figura 5.15 - Fluxo de calor na fronteira interna para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	52
Figura 5.16 - Fluxo de calor na fronteira externa para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	53
Figura 5.17 - Perfis de temperatura em função do tempo para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	54
Figura 5.18 - Perfis de conteúdo de umidade em função do tempo para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	55
Figura 5.19 - Distribuição de temperatura para o 16 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	56
Figura 5.20 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 2 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	57
Figura 5.21 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 4 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	58
Figura 5.22 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 8 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	58
Figura 5.23 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 16 ^o dia para a parede brasileira com temperatura infinita externa variável	59
Figura A.1 - Condutividade térmica efetiva para a Argamassa	69
Figura A.2 - Condutividade térmica efetiva para o Tijolo	69
Figura A.3 - Difusividade térmica para Argamassa	70
Figura A.4 - Difusividade térmica do vapor para Argamassa	70
Figura A.5 - Difusividade isotérmica para Argamassa	71
Figura A.6 - Difusividade isotérmica do vapor para Argamassa	71
Figura A.7 - Difusividade térmica para o Tijolo	72
Figura A.8 - Difusividade térmica do vapor para o Tijolo.....	72
Figura A.9 - Difusividade isotérmica para o Tijolo	73
Figura A.10 - Difusividade isotérmica do vapor para o Tijolo	73

SIMBOLOGIA

a	conteúdo volumétrico de ar
C	capacidade calorífica ($\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$)
c	calor específico ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
D_{atm}	difusividade molecular do vapor d'água no ar (m^2/s)
D_p	parcela relativa ao termo fonte da equação da energia ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
D_{Tl}	difusividade térmica do líquido ($\text{m}^2/\text{s}\cdot\text{K}$)
D_{Tv}	difusividade térmica do vapor ($\text{m}^2/\text{s}\cdot\text{K}$)
D_{T}	difusividade térmica total ($\text{m}^2/\text{s}\cdot\text{K}$)
$D_{\theta\text{l}}$	difusividade isotérmica do líquido (m^2/s)
$D_{\theta\text{v}}$	difusividade isotérmica do vapor (m^2/s)
D_{θ}	difusividade isotérmica total (m^2/s)
f	fator de resistência à difusão
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
h	entalpia (J/kg); coeficiente convectivo de troca térmica ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
h_{lv}	entalpia de vaporização (J/kg)
j	fluxo mássico ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
K_{H}	condutividade hidráulica (m/s)
k_*	condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
L_s	parcela relativa ao termo difusivo da equação da energia ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
P	pressão total (Pa)
p	pressão parcial (Pa)
R	constante dos gases ideais ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
R_{v}	constante do vapor d'água ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
S	grau de saturação
T	temperatura (K)
t	tempo (s)
w	umidade mássica percentual
x	coordenada espacial (m)

Símbolos Gregos

α	fator de tortuosidade, difusividade térmica (m^2/s)
ε	porosidade
ϕ	umidade relativa
Φ	potencial total de umidade (m)
λ	condutividade térmica efetiva (W/m.K)
μ	viscosidade dinâmica (Pa.s)
ν	fator do fluxo de massa
θ	conteúdo volumétrico de umidade (%)
ρ	massa específica (kg/m^3)
ψ	potencial de sucção (m)
ζ	fator de aumento para o coeficiente D_{Tv}
∇	operador nabla

Sub-Índices

a	ar
g	mistura gasosa
i	inicial
l	líquido
sat	saturação
v	vapor
0	estado de referência

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Uma ampla variedade de processos industriais, agrícolas e de produção de energia envolvem a transferência simultânea de calor e massa em meios porosos insaturados. Como exemplos podem ser citados a secagem e umidificação de materiais porosos, a análise da alteração do solo em função do conteúdo de umidade, a utilização do solo como dissipador ou isolante de energia em tubulações ou cabos elétricos aterrados e o estudo do comportamento higratérmico de materiais de construção civil para predição de conforto e consumo energético dos ambientes.

O desempenho térmico das paredes de uma edificação, que apresentam um comportamento não-estacionário, tem participação importante no comportamento térmico dos ambientes internos da mesma, influenciando aspectos como conforto térmico e dimensionamento dos sistemas de climatização. Uma grande parte das pesquisas disponíveis sobre transferência de calor em paredes utiliza apenas a Lei da Conservação da Energia, equação de Fourier, para o cálculo do balanço térmico através do domínio avaliado. Na literatura, encontram-se poucas referências com relação à resolução de problemas aplicados ao estudo de conforto térmico considerando-se o efeito do transporte de massa associado ao transporte de energia em paredes de edificações. Este fato motivou o interesse no desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é investigar o processo de transferência de calor em uma parede de edificação considerando o efeito simultâneo do transporte de umidade.

Uma vez que o fenômeno em estudo é uma particularização do fenômeno mais geral da transferência simultânea de calor e massa em meios porosos, a seguir será apresentado um breve histórico dos principais trabalhos nesta área.

Henry Darcy (1856) utilizando um meio poroso saturado, deu origem à equação básica da migração de umidade. Esta equação relaciona o fluxo volumétrico de líquido com o gradiente de pressão hidrostática através de um coeficiente chamado condutividade hidráulica.

Buckingan (1907) verificou que para um meio poroso não saturado a pressão da água é mais baixa que a pressão atmosférica e introduziu o conceito de potencial de sucção, que está relacionado à capacidade do meio poroso de reter líquido.

Childs e Collis-George (1950) assumiram que o potencial de sucção dependia somente do conteúdo de umidade e definiram a difusividade do líquido como função única desta variável. Sob estas condições, a partir do princípio da conservação da massa, obtiveram a equação básica para o movimento da água em um meio poroso em regime transiente na ausência de gradientes térmicos.

Os primeiros a modelar macroscopicamente a migração de umidade em meios porosos não saturados foram Luikov (1954) e Philip e De Vries (1957). Nestes trabalhos foram utilizadas as leis fenomenológicas da difusão de massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) e calor (Lei de Fourier) nas equações de balanço de massa e energia. O modelo teórico proposto mostra explicitamente a influência da temperatura nos processos de transferência de massa e suas equações são especialmente adaptadas para a complexa geometria dos poros e incluem a possibilidade de interação entre as fases líquida e vapor do meio.

Logo a seguir, De Vries (1958) generalizou o modelo de Philip e De Vries, dando distinção especial às variações de conteúdo de umidade nas fases líquido e vapor. Considerou que os transportes de energia e de massa ocorrem devido à influência combinada da gravidade e de gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Além disso, analisou a interação entre o transporte de calor e massa em regime permanente.

Cary (1963, 1966) e Cary e Taylor (1962a, 1962b) utilizaram a termodinâmica dos processos irreversíveis para formular o fenômeno, a fim de distinguir os diversos fenômenos elementares irreversíveis e por em evidência as leis fenomenológicas que os regem. Obtiveram assim, equações macroscópicas de massa e energia com coeficientes que devem ser medidos experimentalmente para cada sistema.

Jury (1973) comparou os modelos de Philip e De Vries e de Cary e Taylor e apresentou resultados experimentais para algumas das propriedades do primeiro modelo. Luikov (1975) apresentou uma revisão dos principais trabalhos realizados por autores soviéticos no campo da modelagem matemática do fenômeno de transferência de calor e massa em meios porosos capilares.

Hartley (1977), Couvillion (1981) e Hartley e Couvillion (1986) investigaram o mesmo fenômeno considerando a variação das propriedades difusivas do meio com a temperatura e o conteúdo de umidade.

Eckert e Faghri (1980,1986) utilizaram o modelo de Philip e De Vries para analisar o fenômeno através de uma formulação paramétrica. Tal formulação foi validada por Damasceno Ferreira (1987) e Damasceno Ferreira e Prata (1989, 1990) para uma classe específica de gradientes térmicos impostos ao meio e conteúdos iniciais de umidade.

Crausse (1982) e Crausse et al. (1987) verificaram a validade do modelo de Luikov e Philip e De Vries para toda a faixa de teores de umidade através de comparação dos resultados experimentais e simulação numérica. Shah et al. (1984), através de um modelo simplificado e unidimensional, determinaram experimentalmente os coeficientes de transferência de calor e massa em solos úmidos. Vafai e Whitaker (1986) investigaram a transferência simultânea de calor e massa acompanhada de mudança de fase em materiais porosos utilizados como isolantes. A análise quantificava o acúmulo e migração de umidade nestes materiais, dando ênfase aos processos de mudança de fase e seus efeitos sobre os perfis de temperatura, conteúdo de umidade, massa específica do vapor e pressão de vapor.

Udell (1985) conduziu uma análise unidimensional da transferência de calor e transferência de massa em estado estacionário para meios porosos saturados, levando em consideração os efeitos de capilaridade, gravidade e mudança de fase. Sob condições estacionárias, o autor identificou zonas distintas no meio, contendo somente a fase vapor ou somente a fase líquida ou ambas as fases.

Hartley (1987) fez uma revisão das considerações utilizadas para o estudo da transferência simultânea de calor e umidade aplicando o fenômeno à secagem de solos úmidos. As equações básicas do transporte de massa e energia do modelo de Philip e De Vries foram detalhadamente apresentadas e discutidas. Além disso, foram comentadas as propriedades de transporte, inclusive sob o ponto de vista experimental.

Motakef e El-Masri (1986) investigaram analiticamente a transferência simultânea de calor e massa unidimensionalmente em um meio poroso. Os autores obtiveram expressões analíticas para os perfis de temperatura, concentração de vapor, taxa de condensação e conteúdo de líquido, sendo também identificada a localização da região de condensação.

Nasrallah e Perre (1988) deduziram um modelo de transferência de calor e massa em meios porosos a partir da teoria de Whitaker, considerando o efeito da pressão dos gases. Foi feito um estudo teórico e unidimensional da transferência de calor e da transferência de massa durante a secagem do meio e calculados a evolução de temperatura, conteúdo de umidade, pressão e para dois materiais diferentes: tijolo e madeira.

Burow e Weigand (1990) desenvolveram uma solução aproximada para a condução transiente de calor unidimensional em um sólido semi-infinito, tendo como temperatura em sua superfície uma função harmônica do tempo.

Shapiro e Motakef (1990) investigaram analiticamente a transferência unidimensional e não-estacionária de calor e massa com mudança de fase em um meio poroso. Além disso, demonstraram que para uma ampla classe de problemas a taxa de movimento da zona molhada pode ser desacoplada das mudanças transientes na temperatura e o processo estacionário pode ser reduzido a quasi-estacionário no domínio do tempo.

Feita a análise dos modelos, passa-se agora a discutir a utilização deste modelos nas situações que envolvem a predição e avaliação do comportamento térmico de um ambiente de acordo com as condições às quais o mesmo está sujeito.

Usualmente apenas o efeito do transporte de energia é considerado no cálculo do campo térmico de uma edificação sob condições transientes. O método mais utilizado para este fim é o Método da Função de Transferência (ASHRAE Handbook, 1993).

Beyer et al. (1993) e Beyer e Vilhena (1994) propuseram uma outra formulação semi-analítica para o estudo deste processo transiente. Esta, quando comparada ao uso de métodos numéricos, apresenta o atrativo de não necessitar de incrementos seqüenciais no tempo e no espaço; a solução desejada, neste caso, pode ser obtida em qualquer instante de tempo.

Posteriormente, Beyer et al. (1995) compararam os resultados de sua formulação semi-analítica com os obtidos numericamente através do Método dos Volumes Finitos, atingindo boa concordância. Os autores levaram em consideração tanto a qualidade da solução quanto a facilidade de uso do método.

Em situações onde leva-se em conta o efeito da presença e do transporte de umidade para o cálculo do campo térmico, a solução, até o presente momento, somente pode ser obtida através de métodos numéricos devido ao forte acoplamento entre as duas equações governantes, equações da conservação da energia e da massa. Dentre os trabalhos conhecidos, citam-se os de

Burch e Thomas (1992) que desenvolveram uma análise unidimensional em uma parede de madeira multicomposta desconsiderando o efeito do calor latente devido à mudança de fase.

Cunningham (1992) forneceu uma solução analítica estacionária aproximada para a equação da difusão da umidade com condições de contorno periódicas de umidade e temperatura, na qual o fluxo de umidade é expresso através dos gradientes de temperatura e umidade. A solução é comparada a um modelo numérico. Os coeficientes difusivos são considerados variáveis e a condutividade térmica constante. O número de Fourier é assumido muito maior do que 1 para que o gradiente interno de temperatura seja linear mas periódico, em resposta às condições de contorno periódicas para temperatura.

Conforme discutido por Beyer et al (1996), Karagiozis e Kumaran analisaram o desempenho de barreiras impermeáveis à passagem do vapor em paredes, enquanto que Yik et al. desenvolveram um modelo simplificado para a análise do processo simultâneo de troca térmica com transferência de massa com evaporação-condensação em sistemas de ar condicionado.

Mendes et al. (1996), através de uma análise numérica, discutem os efeitos da simplificação de modelos dinâmicos de transferência acoplada de calor e de massa com propriedades e condições de contorno variáveis para quatro diferentes materiais de construção: concreto aerado, argamassa, tijolo e madeira.

Bouddour et al. (1998) modelaram a transferência de calor e transferência de massa em meios porosos úmidos na presença de evaporação/condensação usando o método de homogeneização da expansão assintótica para estruturas periódicas. A análise é iniciada a nível microscópico passando, posteriormente, a nível macroscópico. Os autores comentam amplamente a teoria de Philip e De Vries.

No que se refere ao estudo das propriedades, podem ser citados os trabalhos a seguir.

Perrin e Javelas (1987) apresentaram e analisaram as principais características do método de medida de umidade de materiais porosos, baseado na determinação da condutividade térmica aparente. Os coeficientes de difusão de umidade devido a gradientes de conteúdo de umidade e de temperatura foram medidos e utilizados no cálculo numérico de um experimento de secagem. Os materiais estudados foram tijolo e concreto, e os resultados obtidos foram comparados a resultados experimentais.

Wang e Fang (1988) desenvolveram um método para medir a difusividade mássica isotérmica como uma função do conteúdo de umidade, em relação a valores de referência de difusividade mássica média obtida através de modelos com propriedades constantes.

Wang e Yu (1988) propuseram um modelo para extrapolar as curvas de difusividades térmica e mássica para diferentes temperaturas e conteúdos de umidade, a partir de valores medidos de difusividades térmica e mássica para conteúdos de umidade de referência.

Masmoudi e Prat (1991) simularam numericamente o processo de transferência de calor e transferência de umidade acopladas, para investigar o comportamento dos coeficientes convectivos interfaciais de transporte de calor e de massa, durante a secagem de materiais porosos. Os coeficientes de troca interfaciais diferem dos valores padrão correspondentes a escoamentos na camada limite em placa plana para temperatura e concentração constantes na parede. O efeito da ocorrência de heterogeneidades, ou seja, variações nos resultados no conteúdo de umidade da interface, também é estudado.

Kallel et al. (1993) resolveram um modelo unidimensional para transferência de calor e transferência de umidade em materiais porosos consolidados utilizando argamassa e tijolo. Os resultados numéricos são comparados com valores medidos experimentalmente. O modelo é utilizado para estudar o efeito do conteúdo inicial de umidade e dos coeficientes de troca convectivos sobre a temperatura durante a secagem do meio.

Em Damasceno Ferreira (1993) são descritas as técnicas experimentais utilizadas na obtenção de três propriedades: potencial de sucção, permeabilidade relativa e condutividade térmica efetiva. Este trabalho foi desenvolvido para a análise da transferência de calor com migração de umidade nas vizinhanças de cabos elétricos de potência aterrados, com o intuito de formular e prever os processos de secagem que ocorrem nos solos que envolvem estes cabos.

Mendes (1997) desenvolveu um código numérico considerando a presença do transporte de massa no processo de transferência de calor, para prever o comportamento térmico de ambientes. Este código, de simples aplicação, permite a obtenção de dados referentes à temperatura, umidade e fluxos de calor trocado, entre outras informações disponíveis. São apresentadas e discutidas as propriedades térmicas e difusivas de quatro materiais porosos: concreto, madeira e dois tipos de argamassa. Além disso, é mostrado um estudo detalhado a respeito de permeabilidade.

Todas as propriedades difusivas e termofísicas necessárias para a aplicação dos modelos descritos devem ser obtidas experimentalmente. Há grandes obstáculos na obtenção destas propriedades, inerentes principalmente à dificuldade em reproduzir satisfatoriamente em laboratório condições semelhantes àsquelas as quais os materiais estarão submetidos na realidade. Além disso, é difícil estabelecer uma dependência entre as propriedades estudadas, a temperatura e o conteúdo de umidade. As propriedades variáveis utilizadas neste trabalho foram obtidas da literatura através dos resultados experimentais de Perrin e Javelas (1987), Mendes (1997) e Damasceno Ferreira (1993).

No presente trabalho, o modelo contínuo, discutido por Whitaker (1977) e Borjes (1991), associado principalmente a Philip e De Vries (1957) para a análise do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos insaturados é utilizado. Neste modelo, as equações da conservação da massa e da energia são obtidas utilizando-se as leis fenomenológicas da difusão de massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) e calor (Lei de Fourier). As equações assim obtidas trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e massa, através de difusividades associadas a estes gradientes.

A análise térmica em paredes de edificações é realizada para duas situações distintas, a primeira considera apenas o transporte de energia e a segunda considera também o efeito do transporte de umidade. Duas configurações de parede são utilizadas, sendo que a escolha de uma delas teve como objetivo a comparação com trabalhos publicados. A realização desta análise permitiu uma ampliação no conhecimento sobre a inclusão da transferência de umidade no processo de transferência de calor, visto que os referidos autores avaliam o comportamento energético da parede apenas sob o ponto de vista térmico.

A segunda configuração foi escolhida devido à disponibilidade de propriedades difusivas variáveis para os materiais empregados, além do fato de que, neste caso, a disposição dos mesmos apresenta-se estruturada de maneira mais semelhante ao tipo de parede brasileira.

Para as duas estruturas investigadas, ambos os lados da parede trocam calor por convecção e no lado externo a temperatura e a radiação solar são funções do tempo. As equações diferenciais governantes são resolvidas numericamente e de forma iterativa utilizando o Método dos Volumes Finitos. Os resultados apresentam valores para os fluxos de calor nas fronteiras externa e interna, além de perfis de temperatura e umidade para determinados dias de simulação.

EQUAÇÕES GOVERNANTES PARA A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA EM MEIOS POROSOS NÃO SATURADOS

2.1 Introdução

A parede de uma edificação é um meio poroso não saturado que contém nos seus espaços vazios ar, água na forma líquida e água na forma vapor. Os processos de transporte de energia e massa que ocorrem no interior dos poros são processos que interagem e influenciam-se mutuamente, uma vez que tanto calor como umidade (na forma líquida ou na forma vapor) são transportados simultaneamente e em decorrência da influência combinada de gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. A análise desses fenômenos de transporte é extremamente difícil devido a diversos fatores: a própria estrutura do meio e a complexa distribuição dos vazios; a coexistência de diversas fases em mudança de estado físico; a grande dependência das propriedades difusivas e termofísicas do meio com a temperatura e com as diversas concentrações relativas, entre outras.

A fim de facilitar a compreensão da obtenção das equações diferenciais governantes, inicialmente serão descritos os mecanismos físicos de transporte de calor e umidade em um meio poroso não saturado. Logo a seguir, será apresentado o modelo fenomenológico clássico utilizado para descrever este processo. Este modelo é devido especialmente a Luikov (1954) e a Philip e De Vries (1957). Finalmente será mostrada a obtenção das equações de conservação da energia e da massa desenvolvidas segundo o modelo mencionado.

No desenvolvimento das equações que descrevem a situação investigada as seguintes hipóteses simplificativas são adotadas:

- a massa de vapor d'água presente nos poros é negligenciável comparada à massa de líquido;

- o vapor d'água e o ar contidos nos poros comportam-se como gases ideais;
- não há influência do efeito de histerese;
- o efeito da presença de solutos na água é desprezado;
- o meio poroso é isotrópico;
- a matriz sólida é uma matriz rígida e fixa.

2.2 Mecanismos Físicos de Transporte de Calor e Massa

Conforme mencionado anteriormente, em um meio poroso não saturado os processos de transporte de calor e umidade ocorrem simultaneamente e devido a gradientes de conteúdo de umidade e temperatura.

Calor migra essencialmente por condução através das partes sólidas (grãos) e também através dos poros preenchidos com líquido. Nos poros preenchidos com ar, a migração de calor é predominantemente devido ao transporte de calor latente pelo vapor, o transporte de vapor d'água ocorre por difusão molecular no ar existente nos poros e o líquido migra pelo efeito de capilaridade (movimento do líquido devido a diferenças de pressão). Considera-se que nos poros há somente ar e vapor d'água. Doravante, o vapor d'água será designado apenas de vapor.

Os mecanismos responsáveis pelo transporte de líquido e vapor dependem essencialmente da quantidade de água presente no meio. Desta forma, a seguir, será apresentada uma análise qualitativa dos mecanismos em diversos níveis de umidade.

Para um meio relativamente seco, onde não existe continuidade na fase líquida, a água presente encontra-se somente adsorvida na superfície dos grãos (considerados impermeáveis), conforme mostrado na figura 2.1. A transferência de umidade ocorre através da migração de vapor por difusão no ar, de regiões onde sua pressão parcial é mais alta para regiões onde sua pressão parcial é mais baixa.

À medida que o conteúdo de umidade aumenta, a água contida no meio passa a formar pequenas pontes ou ilhas de líquido entre grãos, conforme mostrado na figura 2.2. Este é o chamado estado pendular de um meio poroso.

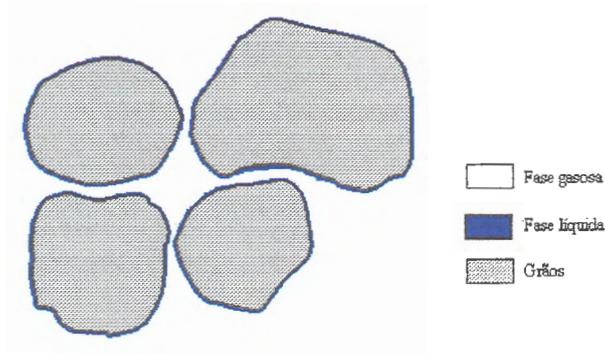


Figura 2.1 - Meio poroso praticamente seco

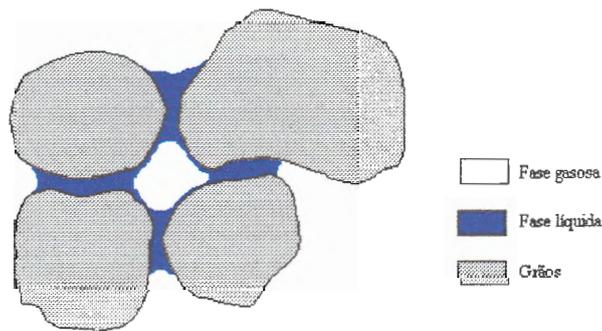


Figura 2.2 - Estado pendular de um meio poroso

Neste estado, o vapor se difunde no ar contido nos poros e também através das pontes de líquido. O mecanismo de difusão de vapor através destas pontes foi pioneiramente proposto por Philip e De Vries (1957) e será explicado a seguir.

A figura 2.3 representa dois meniscos da ponte de líquido formada entre dois grãos, na condição de equilíbrio termodinâmico. Inicialmente, suas curvaturas são iguais e estão representadas pelas linhas cheias. Vapor flui na direção indicada pela seta, devido a um gradiente de pressão parcial decorrente de uma diferença de temperatura. Ao atingir o menisco A, o vapor condensa-se resultando em uma diminuição de sua curvatura. Simultaneamente, no menisco B uma evaporação provoca um deslocamento do menisco, representada pelas linhas tracejadas. Esta diferença de posição do menisco irá produzir um fluxo capilar de líquido igual à taxa de evaporação e condensação nas interfaces.

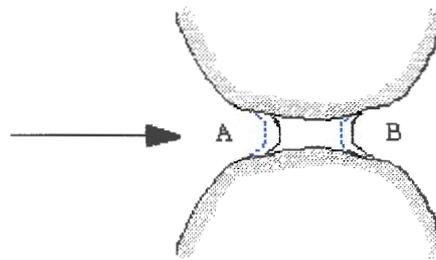


Figura 2.3 - Meniscos da ponte de líquido formada entre dois grãos

Desta maneira, ocorre um fluxo de umidade contínuo nas regiões de líquido e vapor. O fluxo de vapor é determinado por um gradiente na pressão de vapor através dos poros preenchidos com ar e o movimento das pontes de líquido ajusta-se com a finalidade de equilibrar este fluxo de vapor.

Quando se aumenta a quantidade de água, o fluxo de vapor induzido através das pontes de líquido diminui devido à redução no número de pontes e aumento do tamanho das pontes remanescentes a um nível em que o movimento do líquido não mais consegue equilibrar o fluxo do vapor.

Para um subsequente aumento no conteúdo de umidade, as pontes de líquido tornam-se maiores, unem-se umas às outras e passa a existir continuidade na fase líquida, ainda que exista presença de ar úmido (mistura de ar seco e vapor). Havendo continuidade na fase líquida, o líquido é transportado devido ao gradiente do potencial capilar, ou seja, por capilaridade. Este é o chamado estado funicular de um meio poroso e está esquematizado na figura 2.4.

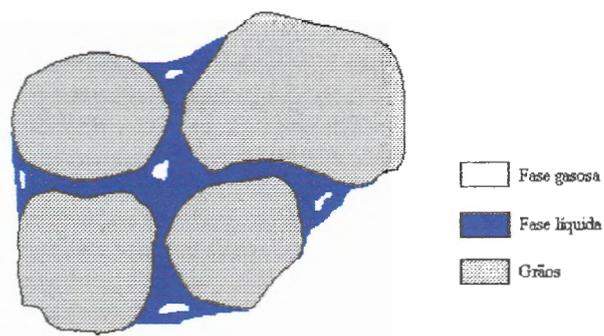


Figura 2.4 - Estado funicular de um meio poroso

Um aumento adicional do conteúdo de umidade faz com que todos os poros sejam preenchidos com água, levando à condição de meio poroso saturado. Não existe mais vapor e o líquido somente pode ser transportado devido à diferença de pressão hidrostática ou por efeitos de convecção natural.

2.3 Modelo Fenomenológico para a Transferência Simultânea de Calor e Massa em Meios Porosos Não Saturados

O modelo fenomenológico proposto por Luikov (1954) e Philip e De Vries (1957) trata o fenômeno da migração de umidade em meios porosos não saturados sob um ponto de vista macroscópico, utilizando as leis fenomenológicas da difusão de massa na fase líquida (Lei de Darcy), difusão de massa na fase vapor (Lei de Fick) e difusão de calor (Lei de Fourier) nas equações de balanço de massa e energia. O modelo teórico obtido desta forma apresenta explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade nos processos de migração de massa e calor.

As equações obtidas através destes dois modelos (Philip e De Vries, e de Luikov), são essencialmente as mesmas diferindo somente no tipo de variável empregada para representar o conteúdo de umidade do meio. Enquanto Philip e De Vries empregam o conteúdo volumétrico, denotado por θ , que representa a razão entre o volume de líquido contido no volume total (grãos e poros), Luikov emprega a massa ponderada, denotada por w , que representa a razão entre a massa de líquido em relação à massa total.

A seguir, será apresentada separadamente a obtenção das equações de transporte de massa e de transporte de calor, assumindo o meio poroso como um meio contínuo. Todos os balanços de calor e massa são feitos sobre um elemento infinitesimal, pequeno quando comparado à dimensão do corpo em estudo, mas grande o suficiente para ser uma amostra representativa do meio que contém as três fases.

2.3.1 Equações de Transporte

Na obtenção das equações para o transporte de umidade e de calor é necessário que se conheça previamente as expressões que representam os fluxos de vapor e de líquido transportados.

O fluxo de vapor, j_v , é obtido a partir da Lei de Fick para difusão de vapor d'água no ar, modificada por Philip e De Vries (1957) para incluir os efeitos da dependência da taxa de difusão com a porosidade. São incluídas, assim, variáveis relacionadas à tortuosidade do meio poroso e à redução da seção de passagem do vapor devido à presença do líquido, obtendo-se:

$$j_v = -D_{atm} \nu \alpha \nabla \rho_v \quad (2.1)$$

em que D_{atm} é a difusividade molecular do vapor d'água no ar, α é o fator de tortuosidade, a é o conteúdo volumétrico de ar, associado à porosidade e ao conteúdo de umidade de líquido, ν é o fator do fluxo de massa e ρ_v é a massa específica do vapor d'água.

O fator de fluxo de massa ν é introduzido para levar em consideração o movimento do ar na difusão binária, que ocorre nos poros do meio poroso. Com efeito, o movimento do vapor é influenciado pelo movimento do ar, e tal influência pode ser determinada com base na análise da difusão estacionária em um sistema fechado onde ocorre evaporação e condensação. De acordo com Philip e De Vries (1957), Stefan propôs a seguinte expressão para ν :

$$\nu = \frac{P}{(P - P_v)} \quad (2.2)$$

na qual P é a pressão total da fase gasosa e p_v é a pressão parcial do vapor d'água. Para temperaturas moderadas, próximas à temperatura ambiente, ν tem um valor muito próximo da unidade, para este caso em particular.

O próximo passo é a divisão do fluxo de vapor em duas componentes: uma isotérmica, devido aos gradientes de umidade, e outra devido aos gradientes de temperatura. Para isso,

introduz-se a expressão para a umidade relativa (ϕ) em uma mistura gasosa ar-vapor d'água em espaços porosos, conforme Edlefsen e Anderson (1943):

$$\rho_v = \rho_{SAT} \phi = \rho_{SAT} e^{(\psi g / R_v T)} \quad (2.3)$$

em que ρ_{sat} é a massa específica do vapor saturado, ϕ é a umidade relativa, g é a aceleração da gravidade, R_v é a constante do vapor d'água e Ψ é o potencial de sucção do meio, expresso em metros. O potencial de sucção está relacionado à energia potencial da água presente nos interstícios da matriz sólida, sendo que o seu gradiente é o responsável pela tendência da água escoar no interior de um material poroso, ou seja, relaciona-se à capacidade de um meio poroso reter líquido. O potencial de sucção está associado a duas forças atrativas: adesão, entre a água e a superfície do sólido, e coesão, entre as moléculas de água. A importância relativa de cada uma destas parcelas depende do conteúdo de umidade do meio. Uma vez que ambas as variáveis ϕ e ψ são uma função da temperatura e do conteúdo de umidade do meio poroso, podemos escrever:

$$\nabla \rho_v = \phi \nabla \rho_{SAT} + \rho_{SAT} \nabla \phi \quad (2.4)$$

O conteúdo volumétrico de umidade, representado por θ , é definido como a razão entre o volume de líquido e o volume total, que inclui o volume de vazios e o volume de grãos do meio poroso.

A influência da temperatura sobre o valor de ϕ , para um dado valor constante de θ , será negligenciada. De acordo com o discutido por Philip e De Vries (1957), o valor de ϕ influencia no tipo de mecanismo de transporte de umidade, por isso são feitas restrições em relação ao seu conteúdo no desenvolvimento de modelos. Em relação ao modelo de Philip e De Vries, utilizado neste trabalho, estas restrições encontram-se detalhadamente discutidas na referência citada, na qual os autores demonstraram que é possível negligenciar a influência da temperatura sobre esta variável para toda a faixa de valores de ϕ no modelo proposto. Assim, considerando que ρ_{sat} não depende de θ , a equação (2.4) torna-se:

$$\nabla \rho_v = \frac{\phi d\rho_{SAT}}{dT} \nabla T + \rho_{SAT} \frac{d\phi}{d\theta} \nabla \theta \quad (2.5)$$

e usando (2.3) para avaliar $d\phi/d\theta$, obtém-se:

$$\nabla \rho_v = \frac{\phi d\rho_{SAT}}{dT} \nabla T + \frac{\rho g}{R_v T} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \nabla \theta \quad (2.6)$$

Substituindo a equação anterior na equação (2.1) tem-se:

$$j_v = -D_{atm} v \alpha \left(\phi \frac{d\rho_{SAT}}{dT} \nabla T + \frac{\rho g}{R_v T} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \nabla \theta \right) \quad (2.7)$$

ou ainda, reescrevendo a equação em termos das difusividades

$$\frac{j_v}{\rho_i} = -(D_{Tv} \nabla T + D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (2.8)$$

na qual D_{Tv} e $D_{\theta v}$ são as difusividades do vapor associadas aos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade, respectivamente. Vale notar que o fluxo de vapor j_v está escrito como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente térmico e outra devido ao gradiente de umidade.

É importante ressaltar que na presente análise não foram consideradas as parcelas referentes aos gradientes de pressão. Conforme discutido por Hartley (1977) e Hartley e Couvillion (1986) a combinação destes gradientes somente necessita ser considerada se elevados gradientes térmicos são impostos ao meio poroso.

O fluxo de líquido, j_l , pode ser obtido utilizando-se a Lei de Darcy modificada para que pudesse ser aplicada a fluxos viscosos em sistemas porosos não saturados, conforme discutido por Childs e Collins-George (1950). A expressão obtida é :

$$\frac{j_l}{\rho_l} = -K_H \nabla \Phi \quad (2.9)$$

O fator de proporcionalidade desta equação, K_H , é denominado condutividade hidráulica.

O potencial total de umidade, Φ , é a soma de duas componentes, que incluem os efeitos de pressão e ação gravitacional:

$$\Phi = (\psi - z) \quad (2.10)$$

em que ψ é o potencial de sucção e z é a componente vertical do potencial de umidade (positiva para baixo).

Como visto anteriormente, o potencial de sucção depende da temperatura e do conteúdo de umidade. Desta forma, das equações (2.9) e (2.10) pode-se escrever:

$$\frac{j_l}{\rho_l} = -K_H \left(\frac{\partial \psi}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \nabla \theta - \nabla z \right) \quad (2.11)$$

O último termo do lado direito da equação (2.11) corresponde à contribuição da ação da gravidade sobre o fluxo de líquido. Esta contribuição não será considerada neste estudo, pois o mesmo é avaliado unidirecionalmente na direção x , horizontal, na qual a componente da aceleração da gravidade é nula. A equação (2.11) é reescrita de forma a conter duas parcelas, uma devido ao gradiente de temperatura e outra devido ao gradiente de umidade:

$$\frac{j_l}{\rho_l} = -(D_{Tl} \nabla T + D_{\theta} \nabla \theta) \quad (2.12)$$

na qual D_{Tl} e D_{θ} são as difusividades do líquido associadas aos gradientes de temperatura e umidade, respectivamente.

Neste caso, também o fluxo de líquido é escrito como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente de temperatura e outra decorrente do gradiente de umidade; a incorporação explícita destes efeitos individuais nos fluxos de líquido e vapor constitui a grande contribuição do modelo fenomenológico de Philip e De Vries.

2.3.1.1 Conservação da Massa

A equação para o transporte de umidade é obtida partindo-se da expressão da conservação da massa que estabelece que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{j_v + j_l}{\rho_l} \right) \quad (2.13)$$

em que j_v é o fluxo de vapor, j_l é o fluxo de líquido, ρ_l é a massa específica do líquido e θ é o conteúdo volumétrico de umidade, definido anteriormente. A massa de vapor foi ignorada em presença da massa de líquido.

O lado esquerdo da equação (2.13) representa o acúmulo de umidade em um volume infinitesimal do meio poroso, enquanto que o lado direito fornece a umidade transportada devido aos fluxos de vapor e de líquido que, conforme visto anteriormente, são escritos como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente de temperatura e outra decorrente do gradiente de umidade.

2.3.1.2 Conservação da Energia

A equação da conservação da energia em um meio poroso não saturado, incluindo o transporte de calor por difusão térmica e o calor transportado pelo líquido e vapor, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial (CT)}{\partial t} = \nabla \cdot [k_* \nabla T + (h_l + h_v) j_v + h_l j_l] \quad (2.14)$$

na qual T é a temperatura, C é a capacidade calorífica, k_* é a condutividade térmica para o caso hipotético de não existir fluxo de líquido ou de vapor, h_l é a entalpia do líquido e h_v é a entalpia de vaporização.

O lado esquerdo da equação (2.14) representa o acúmulo de energia em um volume infinitesimal do meio poroso. O primeiro termo do lado direito representa o calor transportado por condução térmica. O segundo termo indica a energia transportada pelo vapor na forma de calor sensível e latente, enquanto que a energia transportada pelo líquido na forma de calor sensível está representada pelo terceiro termo.

Para fins de simplificação, os dois últimos termos da equação anterior podem ser escritos da seguinte maneira:

$$(h_l + h_v) j_v + h_l j_l = h_v j_v + h_l (j_v + j_l) \quad (2.15)$$

Assumindo que a entalpia de vaporização h_v é muito maior que a entalpia do líquido e que os fluxos de líquido e vapor têm sentidos opostos, ou seja, $j_v > (j_v + j_l)$, conclui-se que:

$$h_v j_v \gg h_l (j_v + j_l) \quad (2.16)$$

O resultado obtido é a soma dos efeitos de transporte de calor difusivo e transporte de calor latente pelo vapor, e, por isso, a equação (2.14) torna-se:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_* \nabla T + h_{lv} j_v) \quad (2.17)$$

As equações para a conservação da massa e da energia para o problema são produzidas substituindo-se as equações (2.8) e (2.12) que correspondem aos fluxos de vapor e líquido, nas equações (2.13) e (2.17), obtendo-se, desta maneira, as seguintes expressões:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{TV} \nabla T + D_{\theta v} \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_{Tl} \nabla T + D_{\theta l} \nabla \theta) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \nabla \cdot [(k_* + \rho_l h_{lv} D_{TV}) \nabla T + \rho_l h_{lv} D_{\theta v} \nabla \theta] \quad (2.19)$$

em que $k_* + \rho_l h_{lv} D_{TV}$ é a condutividade térmica do meio poroso, que inclui as contribuições da difusão térmica e do transporte de energia devido à migração de vapor. O termo k_* é a condutividade térmica efetiva, que é função do conteúdo de umidade e já considera a presença de poros no meio.

A equação (2.18) pode ser rearranjada, introduzindo as variáveis difusividade mássica total e térmica total, respectivamente definidas por:

$$D_{\theta} = D_{\theta l} + D_{\theta v} \quad \text{e} \quad D_T = D_{Tl} + D_{TV} \quad (2.20)$$

Desta forma, a expressão (2.18) torna-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) \quad (2.21)$$

As equações (2.18) e (2.19) são as equações governantes do fenômeno de transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos não saturados, baseado no modelo fenomenológico clássico de Philip e De Vries.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as equações diferenciais governantes que descrevem o fenômeno da transferência de calor e massa em paredes de edificações, sendo especificadas as condições de contorno às quais o domínio está sujeito. Também são apresentadas as expressões para as propriedades termofísicas e difusivas utilizadas na simulação numérica.

3.2 Equações Diferenciais Governantes

No presente trabalho serão investigados dois tipos de parede: parede tipicamente brasileira e tipicamente americana. Somente para fins de apresentação das equações diferenciais governantes e condições de contorno será mostrada a parede composta de argamassa e tijolo nas proporções especificadas, Fig. 3.1, onde assume-se contato térmico perfeito entre os materiais que constituem a parede, cujas espessuras estão demonstradas na figura em mm. A mesma encontra-se isolada termicamente e impermeável à passagem de massa nas faces superior e inferior, sendo o transporte analisado unidimensionalmente na direção horizontal. Além disso, encontra-se igualmente impermeável nas faces esquerda e direita. Posteriormente, os dois tipos de parede investigados serão apresentados oportunamente.

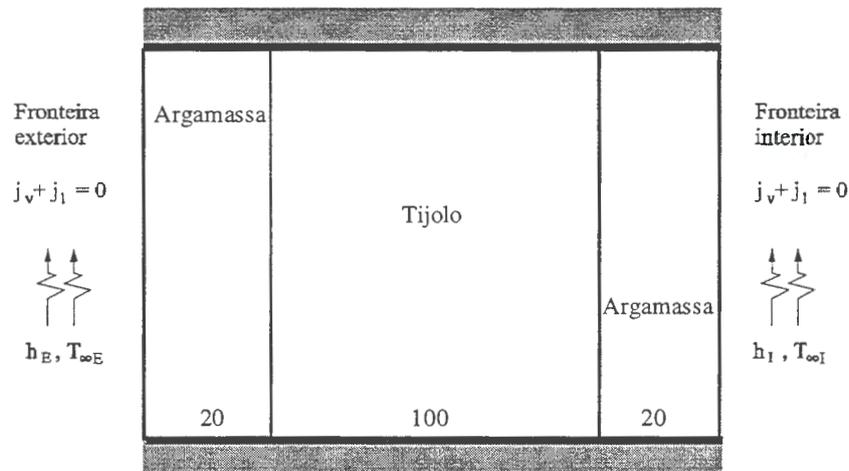


Figura 3.1 - Representação esquemática de uma parede genérica

O problema estudado é governado pelas Leis de Conservação da Massa e da Energia, cuja obtenção das equações está demonstrada no Capítulo 2: equação (2.18) para a conservação da massa e equação (2.19) para conservação da energia. À luz dos objetivos do trabalho, primeiramente considera-se somente o transporte de energia para o cálculo do balanço térmico através do domínio, o que tem sido amplamente utilizado (ASHRAE, 1993). Em seguida, a fim de verificar-se os efeitos da inclusão do processo de transferência de massa no balanço térmico, são resolvidas simultaneamente as equações diferenciais governantes para os transportes de energia e de massa.

Considerando a situação unidimensional ao longo do eixo x , as equações podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(k_* + \rho_l h_{lv} D_{TV} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\rho_l h_{lv} D_{\theta T} \right) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.2)$$

sendo, respectivamente, a equação da conservação da energia e a equação da conservação da massa.

Em relação às trocas térmicas do sistema com o ambiente, foram considerados dois tipos de condições de contorno. Primeiramente ambas as faces da parede foram sujeitas a trocas convectivas de calor com o ambiente, que permanecia a uma temperatura constante, mais elevada no ambiente externo do que no interno, provocando um fluxo de calor neste sentido. A seguir, foi considerada a radiação solar existente no ambiente externo, através de uma temperatura fictícia denominada Temperatura Sol-Ar (ASHRAE, 1993), que simula as variações diárias de temperatura em função da radiação incidente do sol, adicionando o efeito das trocas radiativas às trocas convectivas. Esta temperatura, cujos valores estão apresentados na Tabela 3.1, evolui em função do tempo ao longo de um dia para 40° latitude norte, 21 de julho. Os mesmos variam aproximadamente de 24 a 52°C, demonstrando um comportamento periódico que reflete em um sentido variável no fluxo de calor convectivo trocado através da fronteira externa da parede. Assume-se que estes valores repetem-se consecutivamente.

Tabela 3.1 - Temperatura Sol-Ar (°C)

Hora	T Sol-Ar	Hora	T Sol-Ar	Hora	T Sol-Ar
1	25,430	9	29,764	17	50,618
2	24,880	10	31,700	18	43,948
3	24,440	11	33,752	19	31,416
4	24,110	12	35,850	20	29,830
5	24,000	13	40,446	21	28,620
6	25,104	14	46,682	22	27,520
7	26,382	15	50,860	23	26,640
8	27,918	16	52,350	24	25,980

Para as trocas de umidade considerou-se que ambas as faces da parede são impermeáveis ao fluxo de massa. Esta condição representa a situação real de uma parede de edificação com cobertura perfeitamente impermeável. A consideração da superfície permeável ao fluxo de massa é uma das sugestões de trabalhos futuros apresentadas no Capítulo 6 – Conclusões.

As condições de contorno para as posições $x = 0$ e $x = L$ podem ser representadas por:

$$h(T - T_{\infty}) = -(k_s + \rho_l h_v D_{TV}) \frac{\partial T}{\partial x} - (\rho_l h_v D_{\theta v}) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.3)$$

para as trocas térmicas por convecção, na qual T_{∞} pode ser constante ou variável, e

$$-D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

para a equação da massa. A equação (3.4) advém da condição de impermeabilidade das fronteiras, na qual admite-se que a soma dos fluxos de vapor e líquido é zero, ou seja:

$$j_v + j_l = 0 \quad (3.5)$$

As condições de contorno são aplicadas de acordo com as seguintes combinações:

- i. fluxo de calor convectivo em ambas as fronteiras, com a T_{∞} externa constante e parede impermeável;
- ii. fluxo de calor convectivo em ambas as fronteiras, com a T_{∞} externa variável ($T_{\text{SOL-AR}}$) e parede impermeável;

A seguir, são comentadas as propriedades e parâmetros utilizados. Os valores das mesmas são apresentados no apêndice A.

3.3 Propriedades Termofísicas e Difusivas

A simulação do fenômeno da transferência simultânea de calor e massa em meios porosos exige o conhecimento prévio dos coeficientes de transporte envolvidos.

O coeficiente de troca térmica utilizado é a condutividade térmica efetiva. A condutividade térmica efetiva está associada à tendência de um meio de conduzir o calor em maior ou menor escala, e leva em consideração no processo de condução do calor a existência de diferentes fases. Para um material poroso não saturado, a condutividade térmica efetiva dependerá das características térmicas tanto das partículas que constituem o meio, como dos constituintes presentes nos interstícios do meio, sendo também influenciada pelas proporções de cada constituinte e pela interação entre eles. Adicionalmente, a condutividade térmica efetiva também é função do conteúdo de umidade presente no meio, da estrutura da matriz sólida, que determina a continuidade das fases, e da resistência térmica de contato entre as partículas, que depende da estrutura do meio. Neste estudo, foram adotadas as expressões utilizadas por Mendes (1997), para a condutividade térmica efetiva nos diferentes materiais utilizados, cujo comportamento pode ser observado no apêndice A.

No que se refere à transferência de umidade, é necessário o conhecimento das difusividades mássicas dos materiais empregados. Estas variáveis são escritas em função das propriedades do meio poroso e relacionam o transporte de massa (e de energia, devido ao acoplamento das equações) com os gradientes térmicos e isotérmicos que regem este transporte. As difusividades mássicas, variáveis com a temperatura e o conteúdo de umidade, são pouco disponíveis na literatura devido à complexidade nas suas medições e ao seu alto custo de obtenção experimental. Uma vez que o objetivo deste estudo é a investigação da influência do transporte de massa nos processos de transporte de energia, utilizou-se as mesmas expressões para as difusividades mássicas utilizadas por Mendes (1997). As curvas que descrevem o comportamento destes coeficientes em função do conteúdo de umidade do meio são mostradas no apêndice A, para os diferentes materiais empregados.

Para uma melhor visualização da magnitude dos coeficientes de transporte e, conseqüentemente da importância relativa entre eles, os mesmos foram agrupados conforme utilizados nas equações governantes do problema, equações (3.1) e (3.2).

A Tabela 3.2 apresenta os símbolos que representam cada grupo de variáveis, e suas dimensões.

Tabela 3.2 - Símbolos e dimensões para os grupos de variáveis utilizados

Símbolo	Grupo	Unidades
L_S	$(k_* + \rho h_v D_{Tv})$	W/m.K
D_P	$(\rho h_v D_{Tv})$	W/m.K
D_T	$(D_{Tv} + D_{Tn})$	m ² /s.K
D_θ	$(D_{\theta v} + D_{\theta a})$	m ² /s

A seguir são mostradas as curvas que revelam o comportamento dos coeficientes em função do grau de saturação do meio (S), descrito pela equação:

$$S = \frac{\theta}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

em que ε é a porosidade, definida como a razão entre o volume de poros e o volume total. As curvas correspondem a temperatura de 20°C.

As propriedades termofísicas e difusivas dos materiais utilizados são consideradas variáveis com a temperatura e o conteúdo de umidade. Suas expressões estão apresentadas no apêndice A, juntamente com as expressões que descrevem as características do ambiente e dos fluidos cujo conhecimento é necessário para o desenvolvimento deste estudo.

Para maiores informações sobre a obtenção experimental das propriedades utilizadas sugere-se verificar as referências apresentadas por Mendes (1997).

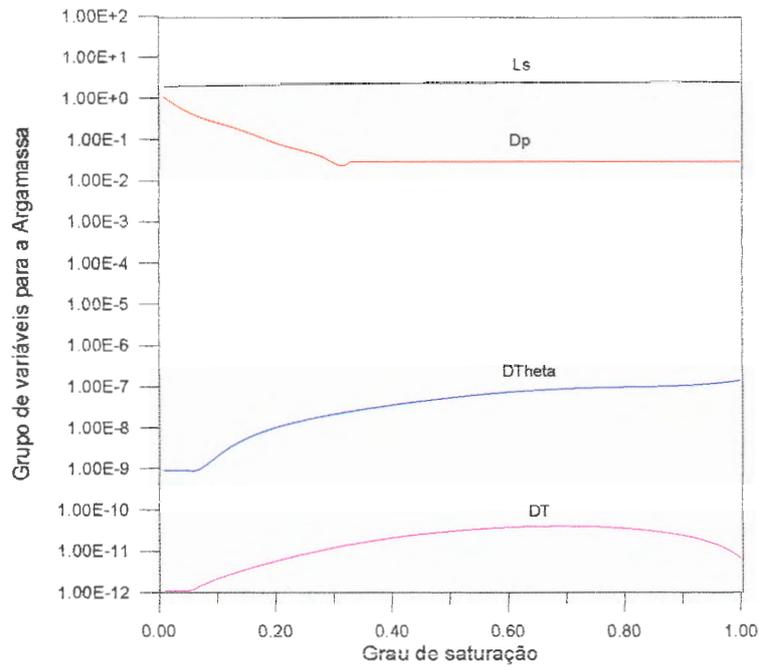


Figura 3.2 – Grupo de variáveis para a Argamassa

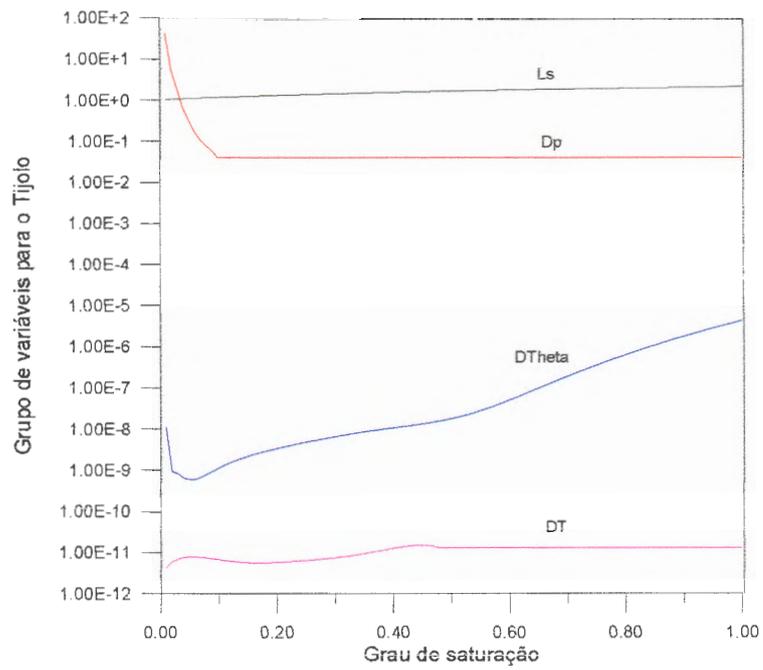


Figura 3.3 – Grupo de variáveis para o Tijolo

Finalmente, é importante ressaltar que a modificação do material que compõe a parede não acarreta dificuldade computacional alguma, bastando apenas trocar as expressões para as difusividades. A dificuldade encontra-se exatamente na obtenção experimental destas expressões.

METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a metodologia numérica utilizada na resolução das equações diferenciais que governam a transferência acoplada de calor e de umidade no problema investigado. É apresentada, também, a verificação da validade do esquema numérico, através da comparação dos resultados obtidos com a literatura.

4.2 Metodologia de Solução Numérica do Problema

A resolução numérica foi feita utilizando o Método dos Volumes Finitos (Patankar, 1980). Este método consiste em dividir o domínio de solução em pequenos volumes de controle e colocar pontos nodais nos centros de cada um destes volumes e também nas fronteiras do domínio. As equações diferenciais governantes do problema são discretizadas através do método das diferenças finitas originando um sistema de equações algébricas que é resolvido através do algoritmo TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm). As variáveis temperatura e conteúdo de umidade de um ponto nodal são calculadas, para um dado instante de tempo, em função dos respectivos valores de seus pontos vizinhos.

Devido ao acoplamento das equações diferenciais governantes, equação da conservação da energia e da massa, o seguinte procedimento numérico foi adotado. Primeiramente parte-se de um campo de temperatura e umidade inicial com o qual são calculados os valores das propriedades difusivas. A resolução numérica fornece um perfil de temperatura e logo a seguir um perfil de umidade (calculado a partir do novo campo de temperatura). As propriedades difusivas são recalculadas para estes dois novos campos e o tempo é incrementado. Este processo

é feito sucessivamente. Para a discretização temporal é utilizado um esquema totalmente implícito. Isto significa que os valores das variáveis temperatura e conteúdo de umidade são calculados simultaneamente a cada iteração no tempo.

A escolha tanto do número de volumes de controle quanto do intervalo de tempo deve levar em conta o compromisso entre a precisão da solução numérica e o tempo computacional.

Na discretização do domínio de solução, para o caso estudado onde o objetivo foi a validação do modelo, utilizou-se uma malha regular com 340 volumes de controle. Para o problema que é o objetivo central deste estudo, descrito no Capítulo 3, utilizou-se uma malha regular com 100 volumes de controle. Este número foi determinado através de uma análise de malhas na qual verificou-se que a partir da malha 100, os resultados apresentaram-se idênticos até a 4ª casa decimal, justificando a utilização de uma malha com 100 volumes de controle. O passo de tempo utilizado para as duas configurações de parede estudadas foi de 90 segundos.

4.3 Validação dos Resultados

Em situações onde apenas o efeito do transporte de energia é considerado, o cálculo do campo térmico sob condições transientes é usualmente obtido através do Método da Função de Transferência (ASHRAE Handbook, 1993). Beyer et al. (1993) e Beyer e Vilhena (1994), propuseram uma outra formulação semi-analítica para o estudo deste processo transiente. Os resultados desta formulação foram comparados com os obtidos através do Método dos Volumes Finitos levando-se em conta tanto a qualidade da solução quanto a facilidade de uso do método (Beyer et al., 1995).

Objetivando-se a validação do modelo proposto, utilizou-se como referência para comparação com a literatura, o trabalho desenvolvido por Beyer et al. (1995), cujos resultados que serão considerados neste trabalho são os valores obtidos pelos autores para o Método dos Volumes Finitos. Nesta seção, o problema será avaliado somente do ponto de vista térmico. No Capítulo 5, Seção 5.2, o mesmo problema será abordado, porém através do modelo em que as equações para o transporte de energia e para o transporte de massa encontram-se acopladas, a fim de verificar-se o efeito da inclusão do processo de transferência de umidade nos perfis de temperatura e nos fluxos de calor nas faces.

A seguir, são apresentadas a geometria do problema e condições de contorno, bem como a discussão dos resultados obtidos.

A Fig. 4.1 mostra a parede multicomposta de uma edificação onde assume-se contato térmico perfeito entre os meios que constituem a parede. Trata-se de uma parede tipicamente norte americana cuja utilização, conforme mencionado, teve como objetivo não perder a base de comparação com trabalhos semelhantes já editados (Beyer et al., 1995). A situação estudada é unidimensional, considerando as faces superior e inferior isoladas termicamente.

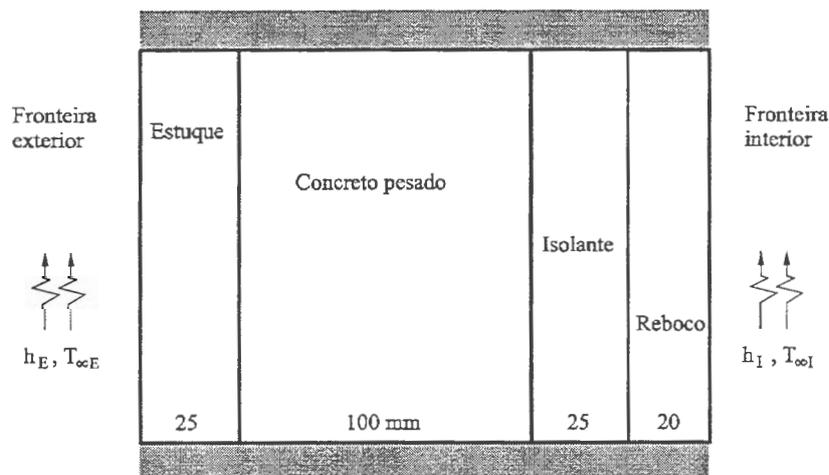


Figura 4.1 - Representação esquemática da parede americana

No início do processo, todo o meio está a uma temperatura constante T_i . Ambos os lados da parede trocam calor convectivamente; no lado externo tem-se uma temperatura T_∞ , variável com o tempo, simulando a variação de temperatura durante o decurso de um dia completo. Esta temperatura fictícia é denominada Temperatura Sol-Ar (ASHRAE, 1993) e leva em conta o fluxo de calor radiativo incidente do sol, variável ao longo do dia. A expressão analítica para a condição de contorno térmica é:

$$h(T - T_\infty) = -k_* \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.1)$$

Os coeficientes convectivos de troca térmica externo e interno são 16,95 e 8,26 W/m².K, respectivamente, e a temperatura interna da sala é mantida constante em 24 °C. A temperatura inicial da parede é constante e igual a 28,5 °C.

Nesta etapa do trabalho, as propriedades térmicas dos materiais que compõem a parede foram assumidas constantes e estão mostradas na Tabela 4.1, sendo as mesmas utilizadas por Beyer et al. (1995).

Tabela 4.1 - Propriedades térmicas da parede

Propriedade	Estuque	Concreto	Isolante	Reboco
k^* (W/m.°C)	0,692	1,731	0,043	0,727
α (m ² /s)	$4,434 \times 10^{-7}$	$9,187 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-7}$

Os resultados para o processo térmico são comparados na forma de fluxo de calor na fronteira interna com os resultados do caso estudado por Beyer et al. (1995), como pode ser observado na Tabela 4.2. Nesta tabela a coluna MFT refere-se ao Método da Função de Transferência, método semi-analítico cujos valores foram obtidos por Beyer et al. (1995), enquanto que MVF refere-se ao Método dos Volumes finitos.

A análise desta tabela revela a excelente concordância entre os resultados obtidos através deste método semi-analítico e do método numérico, conforme discutido por Beyer et al. (1995). Neste trabalho, utilizando-se o mesmo método (MVF) porém através de um algoritmo diferente obteve-se valores idênticos entre as duas últimas colunas, o que valida o algoritmo desenvolvido.

Tabela 4.2 - Fluxo de calor (W/m^2) na fronteira interna ao longo do 4º dia

– comparação com a literatura –

Horas	MFT	MVF	
		Beyer et al.	Presente trabalho
1	11,310	11,440	11,440
2	9,872	9,969	9,969
3	8,556	8,625	8,625
4	7,355	7,401	7,401
5	6,268	6,295	6,295
6	5,304	5,317	5,317
7	4,533	4,533	4,533
8	4,038	4,027	4,027
9	3,843	3,831	3,831
10	3,957	3,947	3,947
11	4,373	4,366	4,366
12	5,069	5,068	5,068
13	6,027	6,031	6,031
14	7,354	7,345	7,345
15	9,272	9,280	9,280
16	11,778	11,831	11,831
17	14,540	14,638	14,638
18	17,071	17,225	17,225
19	18,772	18,983	18,983
20	18,968	19,231	19,231
21	17,839	18,121	18,121
22	16,225	16,486	16,486
23	14,524	14,741	14,741
24	12,868	13,039	13,039

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos para as duas configurações de parede estudadas: a parede tipicamente americana utilizada por Beyer et al. (1995), e a parede com características mais próximas à parede brasileira estudada neste trabalho. Para fins de apresentação no texto, estas duas paredes serão doravante denominadas parede americana e parede brasileira, respectivamente.

Para a parede americana, o transporte de umidade foi acoplado ao processo térmico do problema utilizado como referência para validação do método (veja Capítulo 4, Seção 4.3), mantendo-se as mesmas condições de contorno usadas para a solução do problema térmico e considerando a parede impermeável à passagem de massa.

No que se refere à parede brasileira, foram adotadas duas situações como condições de contorno para o transporte de calor; em um primeiro momento, assumiu-se que ambas as faces da parede trocam calor convectivamente com o ambiente e, posteriormente, além das trocas convectivas para ambas as faces considerou-se que na face externa a convecção está também associada a efeitos radiativos, através de uma temperatura variável ao longo do dia. Para estas duas situações, a avaliação dos resultados foi feita considerando ambas as faces da parede impermeáveis ao fluxo de umidade.

A fim de investigar o processo simultâneo de transferência de calor e massa, objetivo principal deste trabalho, é apresentada a seguir uma comparação entre o processo que considera somente a transferência de calor e o processo acoplado, no qual são considerados ambos os transportes. Estas duas situações, a partir de agora, serão referenciadas como processo térmico e processo acoplado, respectivamente.

As equações diferenciais governantes do processo acoplado estão mostradas no Capítulo 3, Seção 3.2. Para o processo térmico, somente a equação da energia (equação 3.1) é resolvida, excluindo-se dela o último termo do lado direito e a segunda parcela do primeiro termo do lado direito.

5.2 Parede Americana

Os valores para as condições iniciais e condições de contorno que se referem às trocas térmicas desta parede encontram-se no Capítulo 4, Seção 4.3, na qual este tipo de configuração de parede foi descrito. Quando se inclui o transporte de massa, a expressão para o fluxo de calor nas fronteiras deve incluir a parcela referente ao gradiente de conteúdo de umidade.

Inicialmente, o meio apresenta um conteúdo inicial de umidade θ_i diferente para cada material que constitui a parede. Estes valores podem ser observados na Tabela 5.1. Para o processo acoplado ambas as fronteiras são assumidas impermeáveis ao fluxo de massa; isto significa que a umidade (na forma de vapor ou líquido) migra no interior da parede de um lado a outro, sem, no entanto, entrar ou sair do sistema. As expressões analíticas para as duas condições de contorno térmica e mássica são, respectivamente:

$$h(T - T_\infty) = -\left(k_* + \rho_l h_{lv} D_{Tv}\right) \frac{\partial T}{\partial x} - \left(\rho_l h_{lv} D_{\theta v}\right) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (5.1)$$

e,

$$-D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_\tau \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (5.2)$$

para ambas as faces da parede, posições $x = 0$ e $x = L$, diferindo somente pelo fato de que T_∞ é variável na fronteira externa e constante na fronteira interna.

Para o processo térmico a condição de contorno convectiva nas posições $x = 0$ e $x = L$ reduz-se a:

$$h(T - T_{\infty}) = -k_* \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.3)$$

Nesta etapa, são válidos os valores das propriedades térmicas apresentadas na Tabela 4.1. As difusividades mássicas foram consideradas constantes e seus valores correspondem aos valores de difusividades e conteúdos iniciais de umidade apresentadas por Mendes et al. (1996). Estes valores estão mostrados na Tabela 5.1, onde tem-se que:

$$D_T = D_{TV} + D_{TL} \quad e \quad D_{\theta} = D_{\theta V} + D_{\theta L} \quad (2.20)$$

Tabela 5.1 - Difusividades constantes e conteúdos iniciais de umidade

	Estuque	Concreto	Isolante	Reboco
D_{θ} (m ² /s)	$1,75 \times 10^{-9}$	$2,21 \times 10^{-9}$	$3,69 \times 10^{-10}$	$1,75 \times 10^{-9}$
D_T (m ² /s.K)	$1,16 \times 10^{-11}$	$1,46 \times 10^{-11}$	$1,91 \times 10^{-12}$	$1,16 \times 10^{-11}$
$D_{\theta V}$ (m ² /s)	$1,75 \times 10^{-9}$	$1,18 \times 10^{-10}$	$3,69 \times 10^{-10}$	$1,75 \times 10^{-9}$
D_{TV} (m ² /s.K)	$1,07 \times 10^{-11}$	$1,40 \times 10^{-11}$	$1,78 \times 10^{-12}$	$1,07 \times 10^{-11}$
$\theta_{inicial}$ (%)	1,16	10,8	9,1	1,16

A Fig. 5.1 apresenta os valores do fluxo de calor na fronteira interna em função do tempo. A linha vermelha corresponde à situação do processo térmico, enquanto que a linha preta corresponde à situação do processo acoplado.

O formato das curvas desta figura mostra a característica periódica do processo, uma vez que a temperatura T_{∞} do lado externo é uma função periódica do tempo ao longo de um dia. Observa-se que o processo evolui para estado estacionário periódico. Com relação à comparação

dos dois processos investigados, verifica-se que ocorre um aumento no fluxo de calor quando a transferência de massa é considerada. Isto acontece porque tem-se a contribuição do transporte de calor latente pelo vapor, e a contribuição do transporte de massa que nesta fronteira entra como termo fonte positivo na equação da energia.

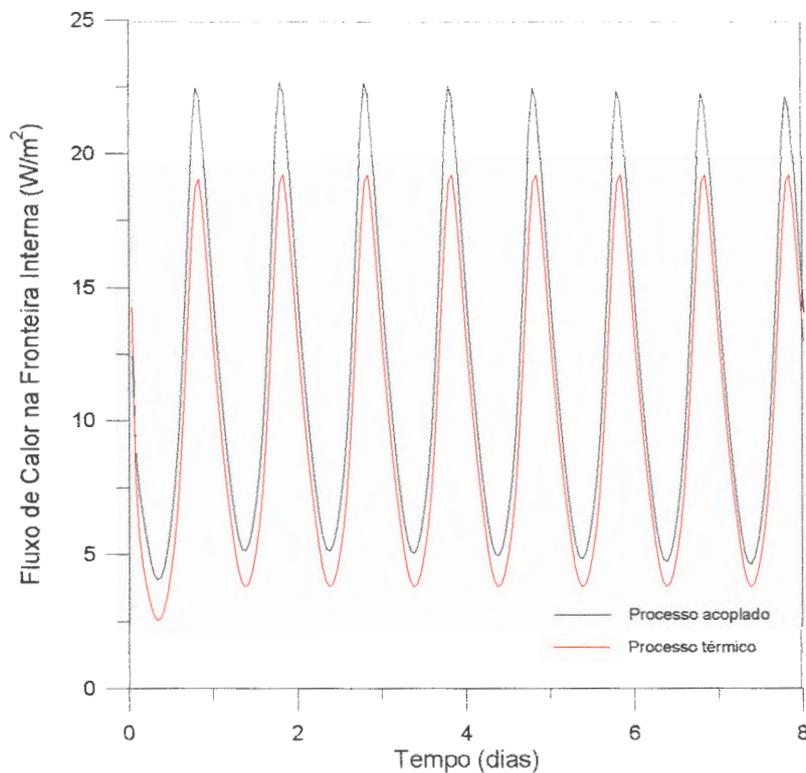


Figura 5.1 - Fluxo de calor na fronteira interna para a parede americana

A Tabela 5.2 apresenta uma comparação entre os valores do fluxo de calor na parede interna ao longo do 4º dia de simulação, considerando-se os resultados obtidos a partir dos dois modelos: processo térmico e processo acoplado. Novamente pode ser observado que quando se inclui transporte de massa o fluxo de calor aumenta e nos picos apresenta diferenças da ordem de 20%.

Tabela 5.2 - Fluxo de calor (W/m^2) na fronteira interna ao longo do 4º dia
 – comparação entre processo térmico e processo acoplado –

Horas	Parede Americana – Térmico	Parede Americana – Acoplado
1	11,440	12,814
2	9,969	11,238
3	8,625	9,806
4	7,401	8,508
5	6,295	7,342
6	5,317	6,328
7	4,533	5,566
8	4,027	5,141
9	3,831	5,070
10	3,947	5,346
11	4,366	5,950
12	5,068	6,857
13	6,031	8,042
14	7,345	9,683
15	9,280	12,110
16	11,831	15,169
17	14,638	18,341
18	17,225	21,046
19	18,983	22,545
20	19,231	22,101
21	18,121	20,348
22	16,486	18,321
23	14,741	16,328
24	13,039	14,450

A Fig. 5.2 apresenta os valores do fluxo de calor na fronteira externa em função do tempo. Neste caso, o fluxo de calor tem valores negativos porque, em determinadas horas do dia, a temperatura da parede junto à fronteira externa é maior do que a temperatura T_∞ externa (observe os valores da temperatura Sol-Ar, Tabela 3.1, Capítulo 3, Seção 3.2). Tal fato não ocorre na fronteira interna da parede em função da inércia térmica a ela associada (note os valores sempre positivos da Fig. 5.1). Ao longo do período de 8 dias considerado na análise, o fluxo líquido de calor na fronteira externa é próximo ao fluxo de calor na fronteira interna; matematicamente, as integrais sob a curva possuem valores bastante próximos. A diferença entre estes valores pode ser utilizada para indicar a proximidade do estado estacionário periódico. Para os 8 dias considerados, a diferença entre os fluxos é da ordem de 8 % e para uma simulação de 20 dias esta diferença cai para 1,5 %.

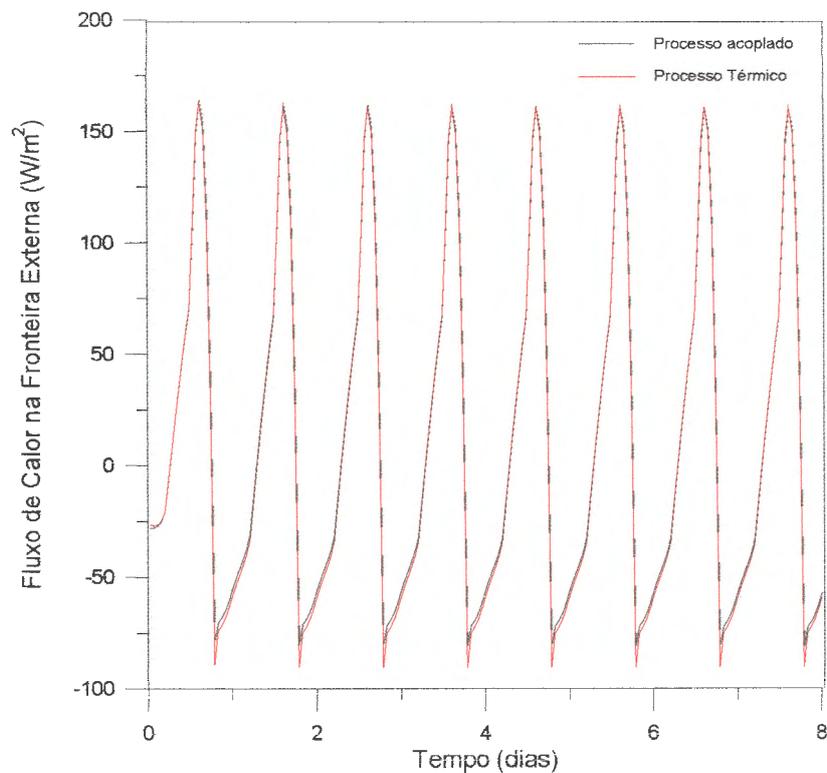


Figura 5.2 - Fluxo de calor na fronteira externa para a parede americana

Com relação à comparação entre as curvas da Fig. 5.2, observa-se que elas são quase coincidentes, indicando que a inclusão do transporte de massa tem pouca influência no cálculo deste fluxo de calor. Isto ocorre porque os efeitos do transporte de calor latente pelo vapor e do transporte de umidade praticamente se anulam, uma vez que nesta fronteira os gradientes de temperatura e umidade têm valores positivos ou negativos, dependendo da hora do dia. Na fronteira interna, os gradientes de temperatura e umidade têm sempre o mesmo sinal. Estas características poderão ser observadas nas próximas duas figuras.

A Fig. 5.3 apresenta a distribuição de temperatura ao longo da parede para o 5º dia de simulação, tendo como parâmetro de curva quatro diferentes horas do dia: hora 0, 6, 12 e 18, sendo que a hora 0 equivale à hora 24 do dia anterior. A linha vermelha representa a situação do problema térmico e a linha preta representa o processo acoplado.

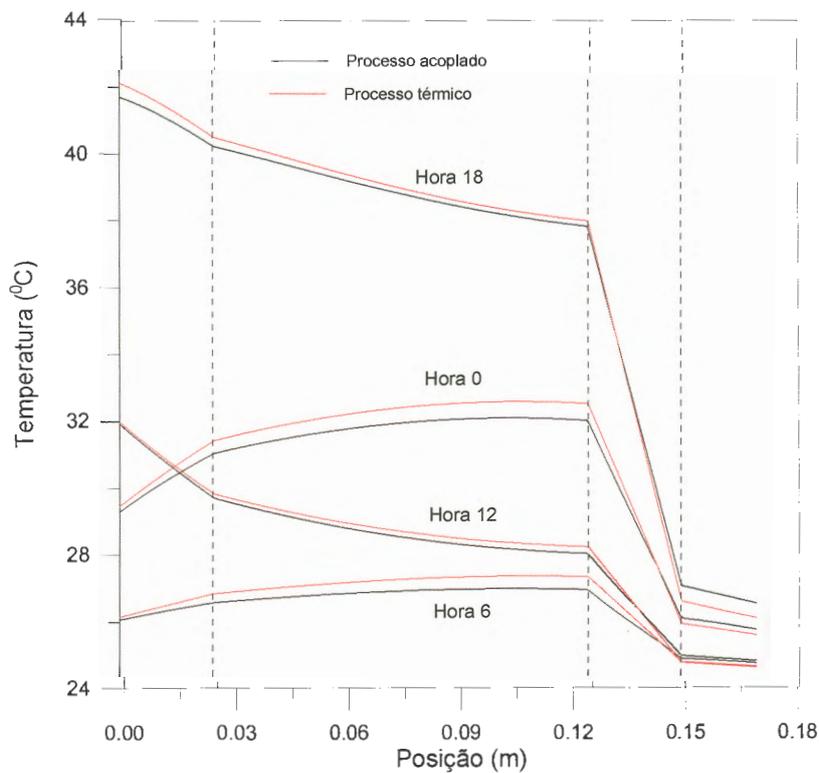


Figura 5.3 - Distribuição de temperatura para o 5º dia

Conforme pode ser observado no formato das curvas desta figura, ao longo do dia as temperaturas mínimas são atingidas na hora 6 e as máximas na hora 18, refletindo o comportamento da condição de temperatura externa variável. Nos horários onde a Temperatura Sol-Ar é menor, ou seja, à noite, tem-se menores valores de temperatura no perfil térmico da parede e onde a Temperatura Sol-Ar é mais elevada, durante o dia, tem-se um aumento nos valores do perfil de temperatura no interior da parede até a hora 18, onde atinge os valores máximos. Além disto, pode-se observar as diferenças nos valores das propriedades difusivas dos materiais que compõem a parede, indicadas pelas diferentes inclinações dos perfis. Estas diferenças ficam evidenciadas especialmente nas interfaces entre dois materiais, causando os pontos de inflexão verificados na figura. Vale notar as declividades positivas nas horas 0 e 6 que causam valores de fluxos térmicos negativos junto à face externa nestas horas. Outra característica que pode ser observada é que, na região junto à face externa, os perfis têm valores que se aproximam da temperatura T_{∞} - variável com o tempo; próximo à face interna os perfis tendem a um valor único, uma vez que a temperatura interna é assumida constante.

Com relação à comparação dos perfis de temperatura obtidos para os dois modelos, verifica-se que a inclusão do transporte de umidade na formulação não modificou o comportamento padrão das distribuições de temperatura. Observa-se que junto as camadas de estuque e concreto o processo térmico apresenta valores de temperatura levemente maiores que o processo acoplado, enquanto que na camada de reboco acontece o inverso. Esta diferença ocorre em função dos efeitos combinados da inclusão dos termos de transporte de calor latente pelo vapor e de transporte de umidade, que podem tornar o termo fonte da equação da energia positivo ou negativo.

A Fig. 5.4 apresenta a distribuição do conteúdo de umidade no interior da parede para o 5º dia de simulação para quatro diferentes horas do dia. Observa-se que há pouca variação entre as distribuições de conteúdo de umidade para as diferentes horas do dia, indicando que esta variável possui uma resposta mais lenta ao tempo quando comparada às distribuições de temperatura. Vale notar as magnitudes das derivadas do conteúdo de umidade junto às faces interna e externa, corroborando o que havia sido comentado em relação aos perfis de temperatura.

A fim de se verificar a sensibilidade dos resultados térmicos com a variação das propriedades difusivas do meio, realizaram-se algumas simulações nas quais os valores das difusividades foram alterados individualmente 15 e 30 %, para mais e para menos. O objetivo deste estudo foi avaliar quantitativamente como o fluxo de calor junto à superfície interna é afetado pela variação destas propriedades. Para a análise dos resultados, foram computados os erros associados ao ponto de pico da curva de fluxo térmico (observe a Fig. 5.1). Os valores obtidos demonstraram que as maiores diferenças (da ordem de 10 %) ocorreram no início do processo - quando os gradientes, térmico e mássico, são maiores - e para a simulação em que se alterou em 30 % o coeficiente D_{qv} . Esta análise de variação de propriedades teve como objetivo verificar, de uma maneira bastante aproximada, como o processo em estudo se comporta face às modificações das propriedades difusivas.

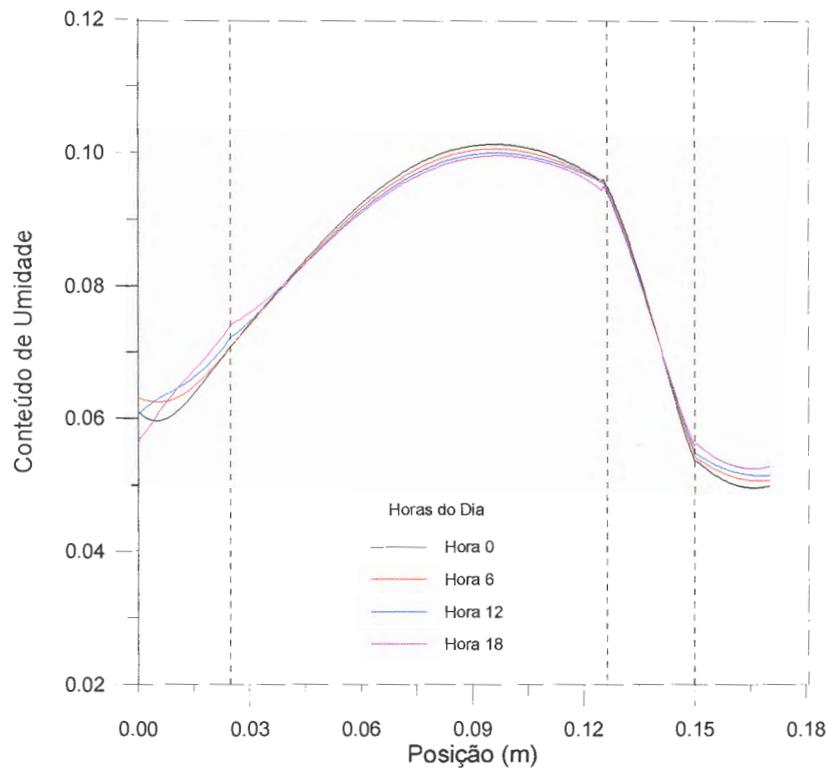


Figura 5.4 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 5^o dia

5.3 Parede Brasileira

A Fig. 5.5 mostra a parede multicomposta tipicamente brasileira utilizada no presente trabalho, na qual assumiu-se contato térmico perfeito entre os materiais que constituem a parede. Nesta etapa, analisou-se o problema não somente sob o ponto de vista térmico, mas também em relação ao transporte de umidade. Em ambos os casos considerou-se os fluxos de calor e de massa unidimensionalmente na direção x , sendo as faces superior e inferior isoladas termicamente e impermeáveis ao fluxo de massa e as faces esquerda e direita também impermeáveis ao fluxo de massa.

Esta parede é constituída por tijolo e por uma argamassa de cimento. A argamassa de cimento ARG2 de Perrin (1985, 1987) possui massa específica de 2050 kg/m^3 , 18% de porosidade e apresenta a seguinte composição em massa: 1 parte de ligante (cimento portland), 3 partes de areia e $\frac{1}{2}$ parte de água. Essa argamassa é constituída, predominantemente de mesoporos ($2 \text{ nm} < \text{raio} < 50 \text{ nm}$), refletindo um comportamento altamente higroscópico.

O tijolo terracota TIJ de Perrin (1985, 1987) tem um grande número de macroporos que lhe proporcionam um comportamento pouco higroscópico. Sua massa específica é 1900 kg/m^3 e sua porosidade total 29%.

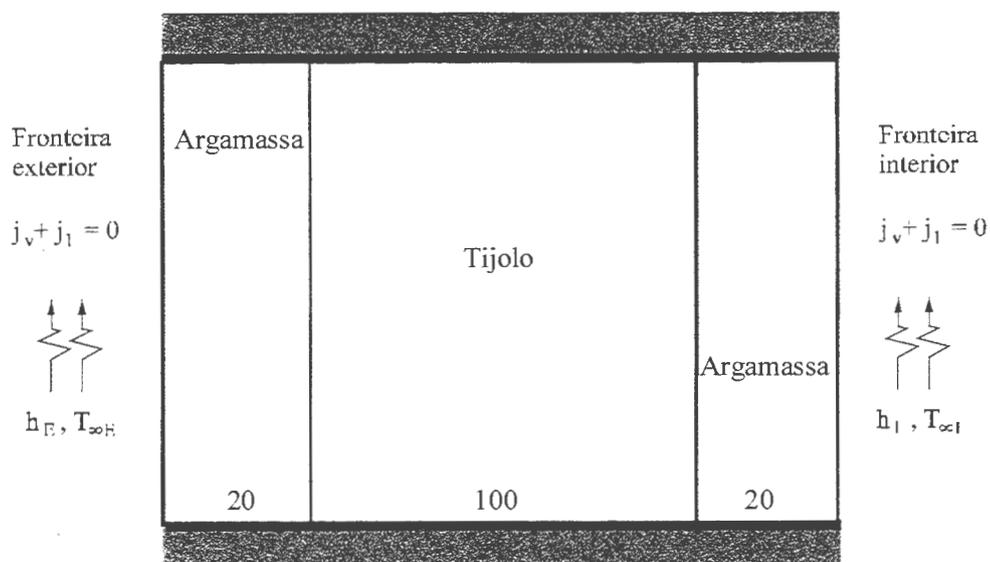


Figura 5.5 – Representação esquemática da parede brasileira

As equações diferenciais governantes, as condições de contorno e as propriedades utilizadas neste tipo de parede estão apresentados detalhadamente do Capítulo 3 deste trabalho. A análise é feita para as duas condições de contorno de temperatura consideradas: somente convectiva e convectiva-radiativa (temperatura Sol-Ar). Em relação às trocas de umidade, considerou-se a parede impermeável ao fluxo de massa.

Os resultados são explorados através de cinco tipos de gráfico. O primeiro apresenta valores do fluxo de calor em ambas as faces da parede em função do tempo. O segundo tipo mostra a temperatura em função do tempo, tendo como parâmetro de curva quatro diferentes posições dentro da parede. Estas posições correspondem à face da parede em contato com o ambiente externo da edificação, às duas interfaces internas entre os materiais e à face da parede em contato com o ambiente interno. As interfaces em contato com os ambientes externo e interno serão referenciadas como fronteira quente ou aquecida e fronteira fria, respectivamente. O terceiro tipo de gráfico traz os resultados para o conteúdo de umidade em função do tempo com o mesmo parâmetro de curva do caso anterior. Os dois próximos tipos de gráficos elaborados apresentam os perfis de temperatura e conteúdo de umidade em função da posição ao longo da parede, tendo como parâmetro de curva o tempo, através de quatro diferentes horas do dia: horas 0, 6, 12 e 18.

5.3.1 Condição de Contorno Convectiva

As Figs. 5.6 e 5.7 mostram o fluxo de calor em função do tempo nas fronteiras interna e externa, respectivamente. Novamente a linha vermelha corresponde ao processo térmico e a linha preta refere-se ao processo acoplado. Uma vez que a temperatura ambiente externa é considerada constante e igual a 30°C, o fluxo de calor apresenta-se constante no regime permanente para as duas figuras.

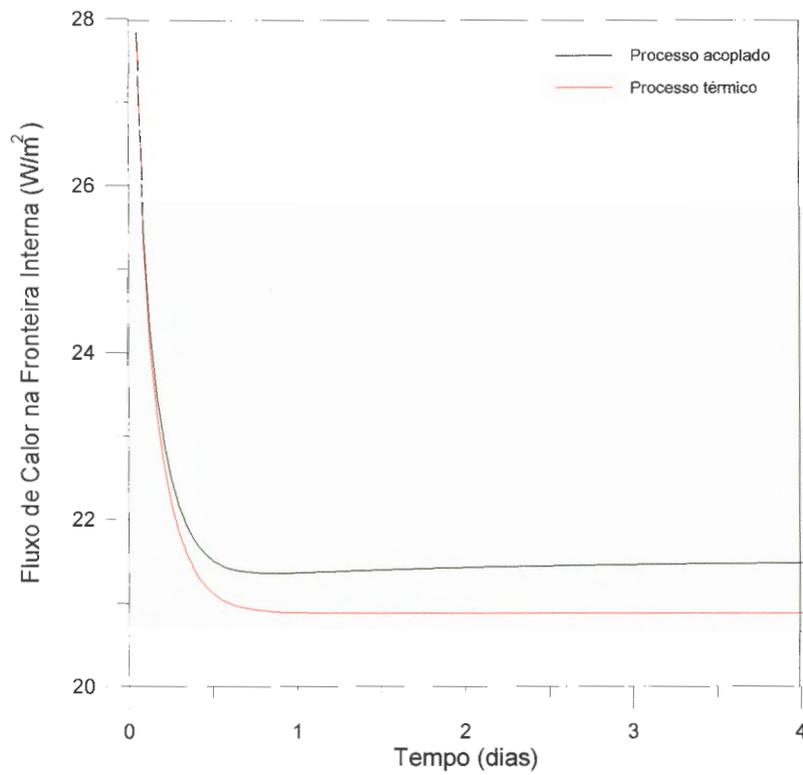


Figura 5.6 – Fluxo de calor na fronteira interna para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

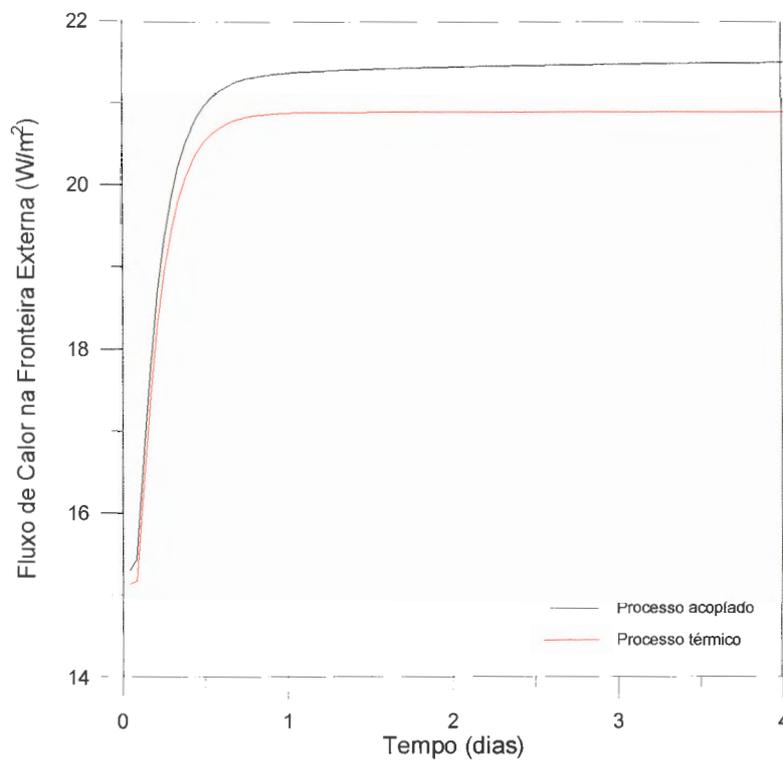


Figura 5.7 – Fluxo de calor na fronteira externa para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

Um parâmetro que pode ser utilizado para fornecer informações sobre a velocidade de formação e o desenvolvimento dos perfis de temperatura e de umidade deste sistema é o número de Luikov (Lu). Este número adimensional representa a relação entre a difusividade de umidade associada ao gradiente de umidade, D_θ , e a difusividade térmica, α , ou seja:

$$Lu = \frac{D_\theta}{\alpha} \quad (5.4)$$

Quanto menor o número de Luikov, mais rapidamente se desenvolverá o perfil de temperatura em relação ao perfil de umidade.

Para este trabalho, o número de Luikov foi calculado para um valor de conteúdo de umidade igual a 0,04, escolhido arbitrariamente para avaliar o comportamento dos perfis das propriedades no processo. Os resultados indicam um número de Luikov baixo para ambos os materiais, sendo aproximadamente 0,0162 para a argamassa e 0,0019 para o tijolo. Neste caso, conclui-se que por apresentar número de Luikov baixo (difusividade térmica muito maior do que a difusividade mássica), o processo desenvolve-se termicamente mais rápido do que em relação à massa, explicando porque o regime permanente do processo térmico é atingido tão rapidamente em relação à massa.

Com relação à comparação entre os dois processos investigados, verifica-se que o processo acoplado apresenta valores mais elevados para o fluxo de calor do que o processo térmico. Isto ocorre porque tem-se a contribuição do transporte de calor latente pelo vapor e a contribuição do transporte de massa que na fronteira externa entra como termo fonte positivo na equação da energia.

A Fig. 5.8 apresenta o comportamento da temperatura em função do tempo para diferentes posições dentro da parede: na fronteira quente (interface da parede com o ambiente externo), nas duas interfaces entre os materiais e na fronteira fria (interface da parede com o ambiente interno). As posições de cada interface são referenciadas na figura pelos valores de x mostrados, que são definidos considerando-se a espessura de cada camada, em metros. Nesta figura o eixo das abscissas teve seu intervalo diminuído para que as curvas de temperatura pudessem ser mais claramente analisadas (note que, conforme visto na figura anterior, o estado

estacionário é atingido rapidamente, não havendo necessidade de serem plotados os valores até o 16º dia). Verifica-se que para as posições mais próximas da face aquecida o processo térmico apresenta valores maiores de temperatura do que o processo acoplado para as mesmas posições. Em relação às posições mais próximas à face mais fria ocorre o inverso: o processo acoplado apresenta valores de temperatura superiores aos obtidos pelo processo térmico. Normalmente, há uma soma dos efeitos das parcelas referentes à inclusão do transporte de umidade; o termo fonte da equação da energia é positivo em algumas posições e negativo em outras, devido à mudança de sentido dos gradientes de temperatura e umidade.

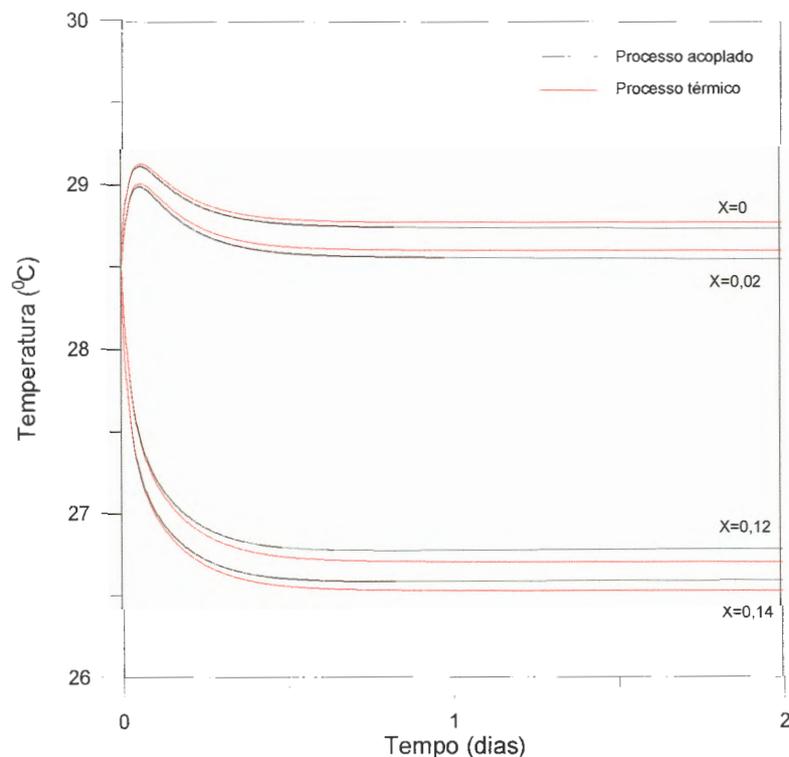


Figura 5.8 - Perfis de temperatura em função do tempo para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

A Fig. 5.9 fornece os resultados para o conteúdo de umidade em função do tempo para diferentes posições dentro da parede: na fronteira aquecida, nas duas interfaces entre os materiais e na fronteira fria. Observa-se valores menores de conteúdo de umidade para as posições mais próximas à superfície externa, pois a mesma está sendo aquecida, e valores maiores de conteúdo de umidade para as posições mais próximas à superfície interna. Observa-se ainda que, com o passar do tempo, o conteúdo de umidade tende a valores intermediários aos conteúdos iniciais de

umidade dos materiais (argamassa 10,8% e tijolo 1,6%). Isto acontece devido à condição de impermeabilidade da fronteira, pois, não existindo trocas com os ambientes externo e interno da edificação, toda a umidade presente no sistema irá distribuir-se ao longo do domínio.

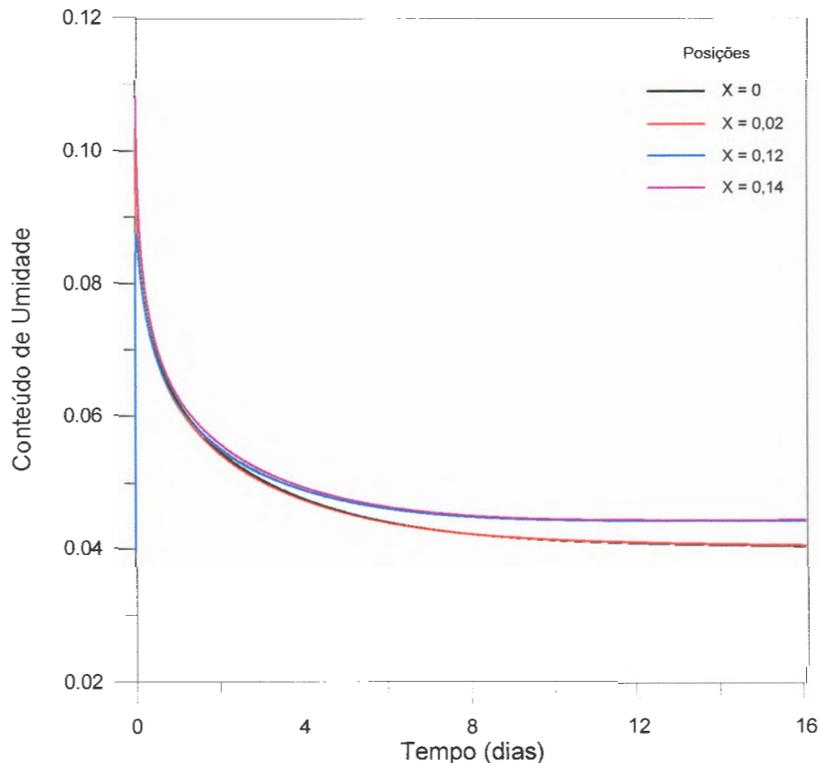


Figura 5.9 - Perfis de conteúdo de umidade em função do tempo para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

Na Fig. 5.10 é apresentada a distribuição de temperatura ao longo da posição na parede, cujos valores foram coincidentes para todos os horários do dia. O formato praticamente linear das curvas revela que as contribuições do termo fonte e da parcela referente ao transporte de calor latente no termo difusivo na equação da energia são muito pequenas. Esta constatação pode ser feita plotando-se estes valores: o termo fonte é da ordem de 5000 vezes menor que o termo difusivo e a parcela referente ao calor latente é da ordem de 1000 vezes menor que a condutividade térmica efetiva. Nota-se ainda que os valores de temperatura próximo à face externa para o processo térmico são maiores do que para o processo acoplado, e que os valores de temperatura próximo à face interna são menores para o processo térmico do que para o processo acoplado, conforme observado anteriormente. Os pontos de inflexão que aparecem

nestas curvas denotam as interfaces entre os materiais que compõem a parede e surgem em função das diferenças nos valores das propriedades difusivas destes materiais.

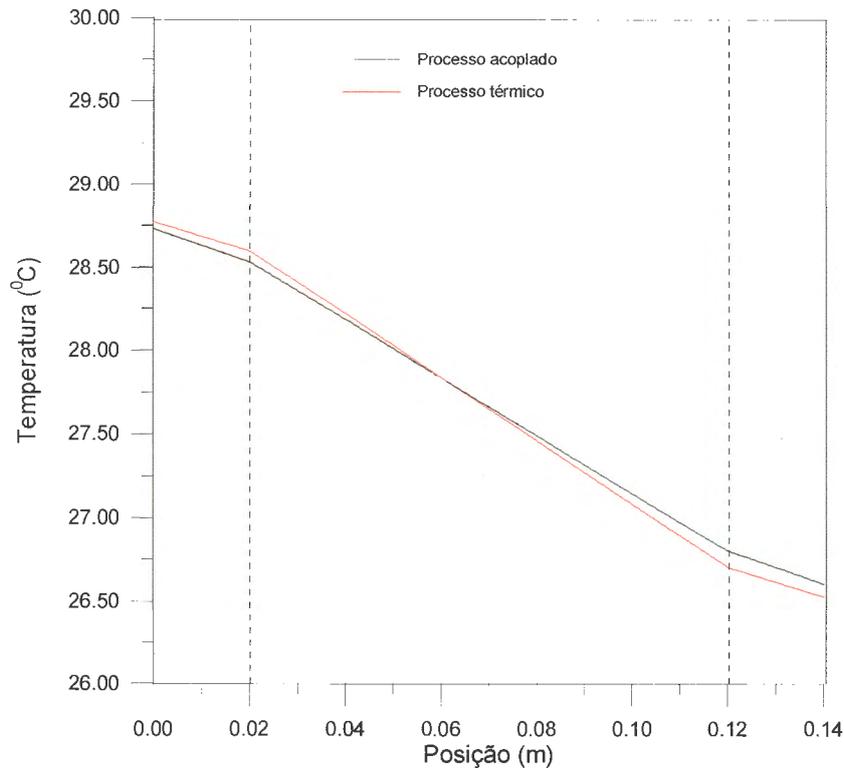


Figura 5.10 - Distribuição de temperatura para o 16º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

As Figs. 5.11 a 5.14 mostram as distribuições para o conteúdo de umidade em função da posição tendo como parâmetro de curva o tempo, através de quatro diferentes horários de um dia: horas 0, 6, 12 e 18. Verifica-se que, à medida que as horas passam dentro de um mesmo dia, as curvas vão se tornando menos acentuadas, pois a tendência do processo, novamente devido à condição de impermeabilidade do sistema, é de o conteúdo de umidade entrar em equilíbrio para todo o meio, aproximando-se de um conteúdo de umidade intermediário entre os conteúdos de umidade iniciais dos materiais. Também com o passar dos dias, as curvas vão tornando-se cada vez mais próximas entre si e cada vez menos acentuadas, como pode ser observado pela seqüência das Figs. 5.11 até 5.14, que mostra os resultados para o 2º, 4º, 8º e 16º dias de simulação, respectivamente. No regime permanente, todo o meio terá praticamente o mesmo conteúdo de umidade (Fig. 5.14), havendo apenas uma leve diferença, da ordem de 0,39 %, para o valor do conteúdo de umidade ao longo da posição, sendo maior o conteúdo de umidade quanto mais afastado da fronteira aquecida.

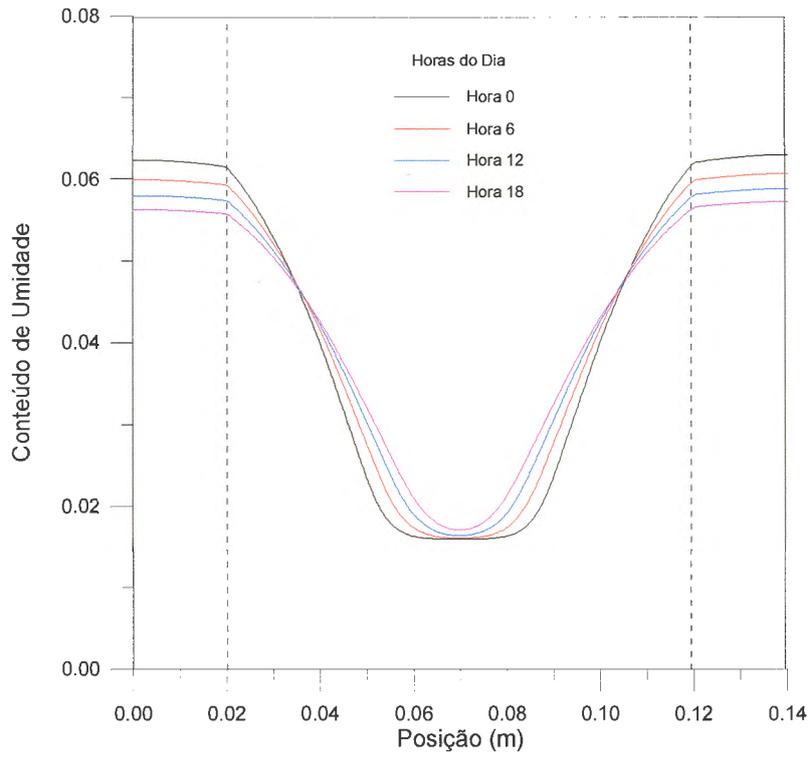


Figura 5.11 – Distribuição do conteúdo de umidade para o 2º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

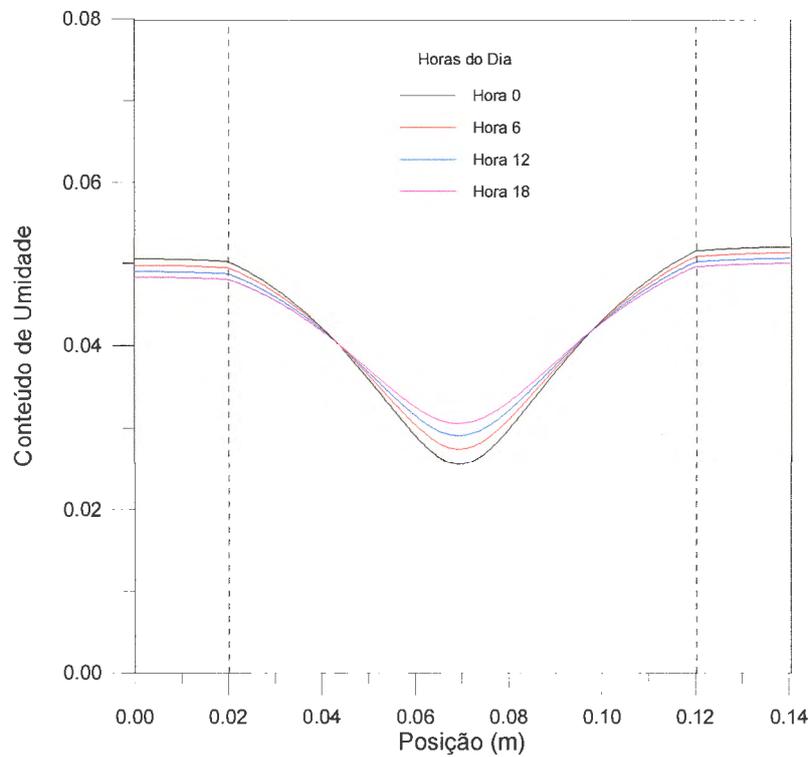


Figura 5.12 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 4º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

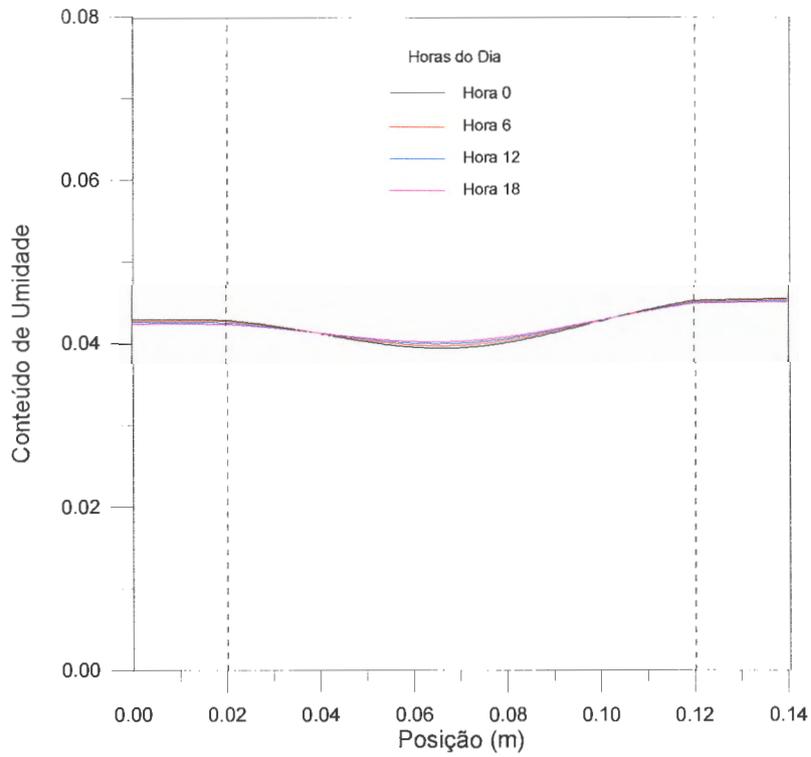


Figura 5.13 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 8º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

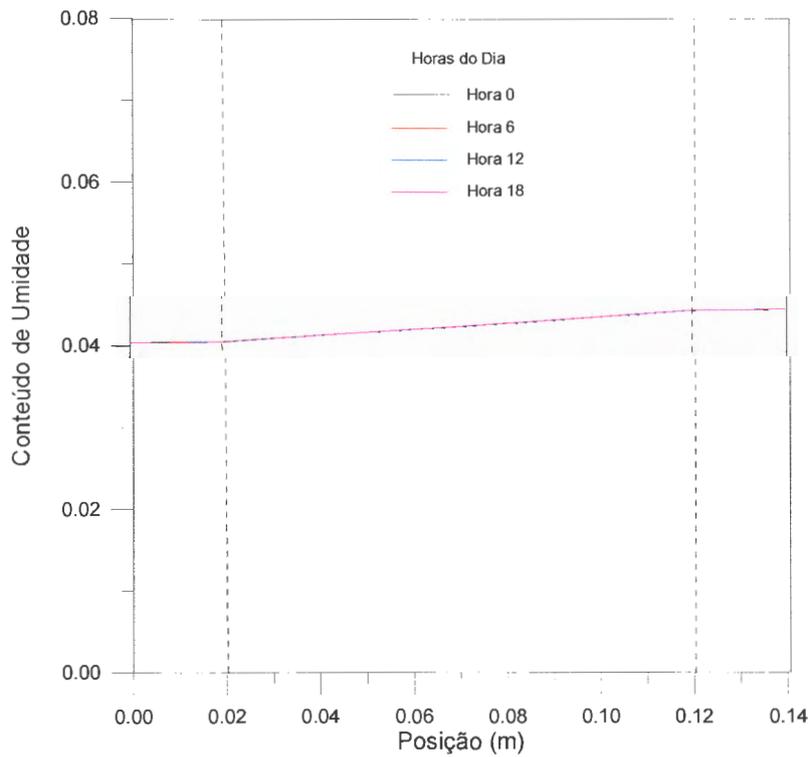


Figura 5.14 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 16º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita constante

5.3.2 Condição de Contorno Convectiva-radiativa

As Figs. 5.15 e 5.16 mostram os fluxos de calor na fronteira interna e na fronteira externa em função do tempo respectivamente, na qual a linha vermelha corresponde ao processo térmico e a linha preta corresponde ao processo acoplado. O formato das curvas destas figuras deve-se à característica periódica do processo, uma vez que a temperatura T_{∞} do lado externo é uma função periódica do tempo (que simula a variação da temperatura do ambiente externo) tendo como período um dia. Observa-se que o processo evolui para estado estacionário periódico.

Com relação à comparação entre os dois processos investigados, a Fig. 5.15, mostra que ocorre um pequeno aumento no fluxo de calor quando a transferência de massa é considerada no balanço térmico. Similarmente ao caso anterior, onde a temperatura externa era constante, isto acontece devido à contribuição dos termos de transporte de massa. Para os materiais utilizados nesta parede, a contribuição destes termos é pequena, não alterando significativamente os valores do fluxo e da temperatura (esta característica mais adiante será discutida). Na comparação entre estas figuras e as Figs. 5.6 e 5.7 note as escalas diferentes do eixo das ordenadas.

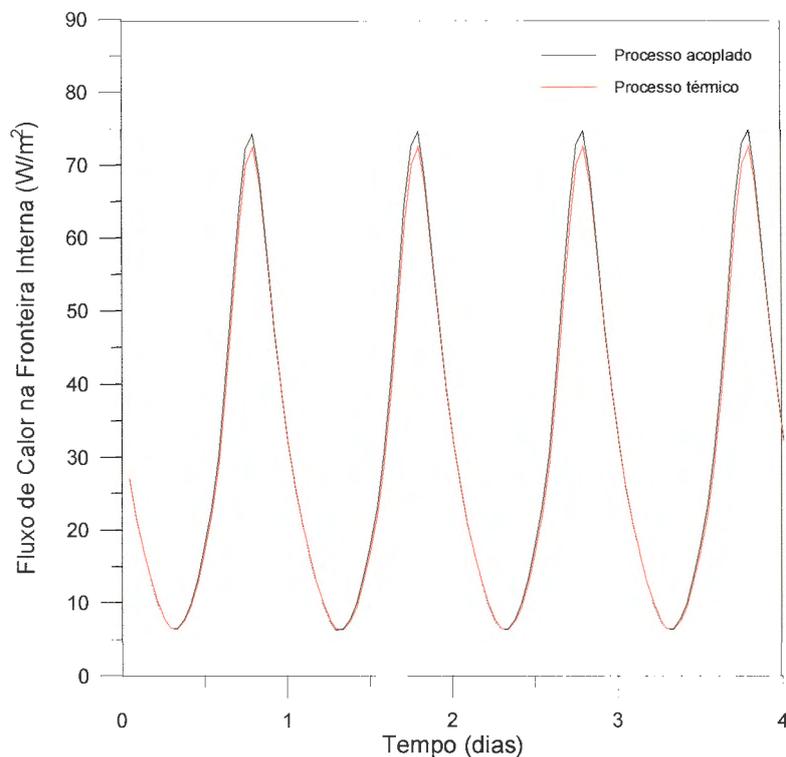


Figura 5.15 – Fluxo de calor na fronteira interna para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

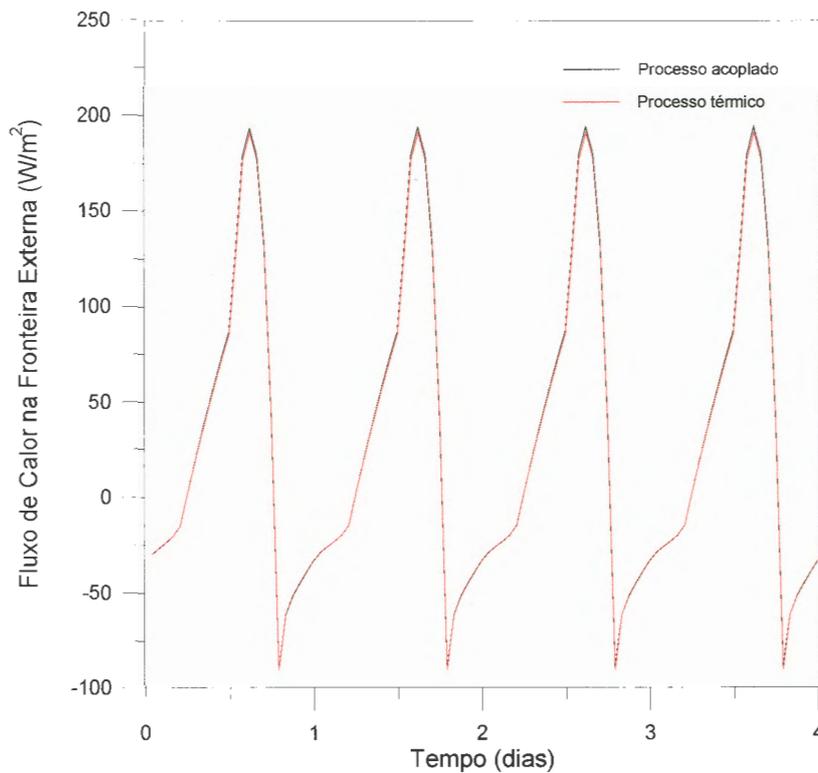


Figura 5.16 – Fluxo de calor na fronteira externa para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

Na Fig. 5.16, observa-se que, em alguns momentos, o fluxo de calor tem valores negativos, porque em determinadas horas do dia a temperatura da parede é maior do que a temperatura T_{∞} externa (observe a Tabela 3.1). Tal fato não ocorre em regiões internas da parede em função da inércia térmica a ela associada, o que pode ser verificado através dos valores sempre positivos da Fig. 5.15. Em relação à comparação entre as curvas da Fig. 5.16, observa-se que as mesmas são praticamente coincidentes, indicando que a inclusão do transporte de massa tem pouca influência no valor do fluxo de calor nesta fronteira, conforme visto anteriormente.

A Fig. 5.17 mostra o comportamento da temperatura em função do tempo para as diferentes posições dentro da parede: fronteira quente, interfaces entre os materiais e fronteira fria, referenciadas através da espessura de cada camada, em metros. O formato das curvas reflete a característica periódica do processo, devido a T_{∞} variável no ambiente externo. Através da figura, percebe-se que os valores maiores de temperatura ocorrem, na maior parte do tempo, nas posições mais próximas à superfície externa, pois a mesma está sendo aquecida, diminuindo à medida que se chega à superfície interna. Em alguns momentos o sentido do fluxo de calor é invertido, resultando em temperaturas mais altas próximo a superfície fria da parede. É possível

constatar ainda, que para as posições mais próximas da face aquecida, o processo térmico apresenta valores levemente maiores de temperatura do que o processo acoplado para as mesmas posições, chegando no mínimo a igualar seus valores aos do processo acoplado em determinados instantes. Em contrapartida, nas posições mais próximas à face mais fria ocorre o inverso: o processo acoplado apresenta valores de temperatura levemente superiores aos obtidos pelo processo térmico na maior parte do tempo, salvo momentos onde ambos os processos fornecem os mesmos resultados.

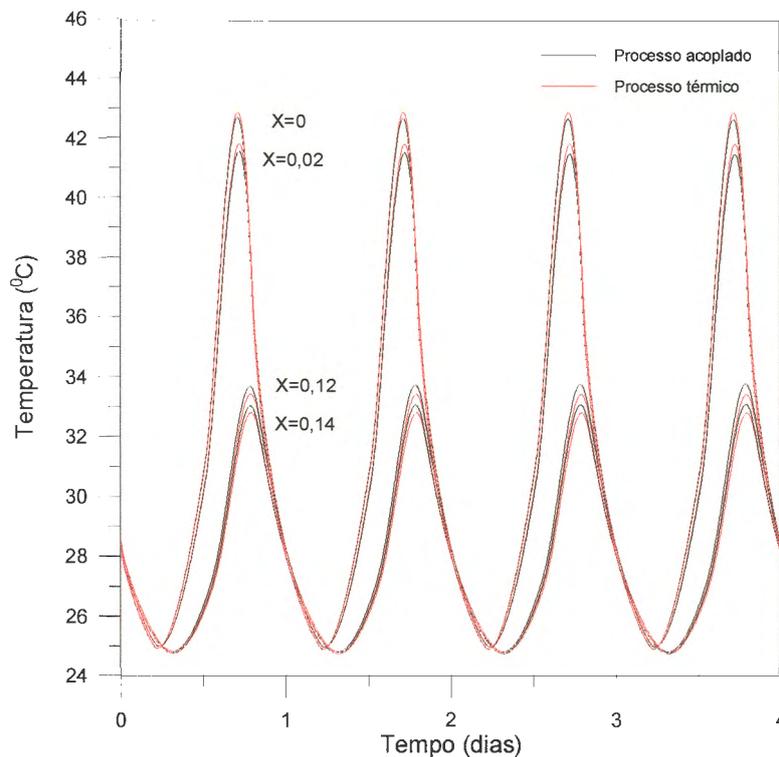


Figura 5.17 - Perfis de temperatura em função do tempo para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

A Fig. 5.18 apresenta os resultados obtidos para o conteúdo de umidade em função do tempo para diferentes posições dentro da parede: na fronteira quente, nas duas interfaces entre os materiais e na fronteira fria. As interfaces estão referenciadas na figura através das suas posições no interior da parede. Os resultados mostram valores menores de conteúdo de umidade para as posições mais próximas à superfície externa, pois nesta região as temperaturas são mais elevadas; e valores maiores de conteúdo de umidade para as posições mais próximas à superfície interna, onde as temperaturas são mais baixas. Analogamente à situação onde a temperatura

externa foi considerada constante, o conteúdo de umidade tende a valores intermediários entre os conteúdos iniciais de umidade dos materiais à medida que o tempo passa, devido à condição de impermeabilidade da fronteira. Como pode ser observado, considerar a temperatura externa variável não causou mudanças significativas na distribuição do conteúdo de umidade com o tempo.

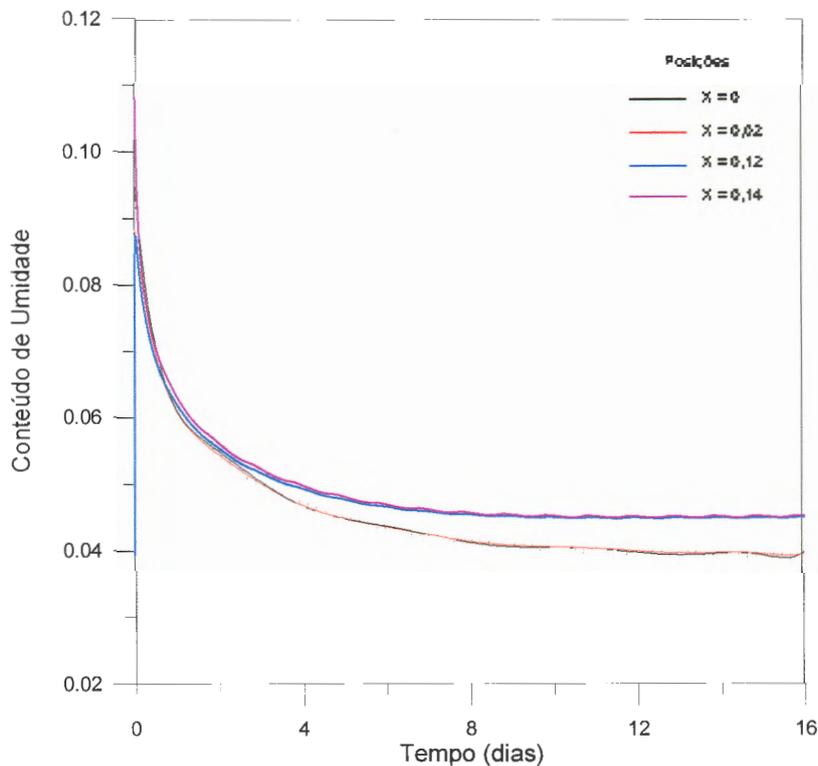


Figura 5.18 - Perfis de conteúdo de umidade em função do tempo para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

Na Fig. 5.19 é possível observar a distribuição da temperatura em função da posição para o 16º dia de simulação tendo como parâmetro de curva quatro diferentes momentos do dia: horas 0, 6, 12 e 18. Analisando-se o formato das curvas desta figura ao longo do dia, constata-se que as temperaturas mínimas são atingidas na hora 6 e as máximas na hora 18, refletindo o comportamento da condição de temperatura externa variável. Nos horários onde a Temperatura Sol-Ar é menor, ou seja, à noite, tem-se menores valores de temperatura no perfil térmico da parede e nos momentos onde a Temperatura Sol-Ar é mais elevada, durante o dia, tem-se um

aumento nos valores do perfil de temperatura no interior da parede até a hora 18, onde os valores máximos são atingidos. As diferenças entre os valores das propriedades difusivas dos materiais que compõem a parede, ficam evidenciadas na Fig. 5.19 através das diferentes inclinações dos perfis e dos pontos de inflexão que surgem nas interfaces entre dois materiais.

Com relação à comparação dos perfis de temperatura obtidos para os dois modelos, verifica-se que a inclusão do transporte de umidade na formulação não modificou o comportamento das distribuições de temperatura; ocorre apenas uma mudança branda nos seus valores em função do meio considerado. Nas horas 0 e 6, quando as temperaturas são menores, as distribuições são praticamente idênticas. Nas horas 12 e 18, nas posições próximas à face aquecida, as temperaturas são levemente mais elevadas quando se utiliza o processo térmico e, na região próxima à face fria, as temperaturas são mais elevadas quando se utiliza o processo acoplado. Este comportamento concorda com as conclusões da análise feita para a Fig. 5.17. Adicionalmente, as maiores variações entre as distribuições ocorrem na hora 18, uma vez que as temperaturas são maiores.

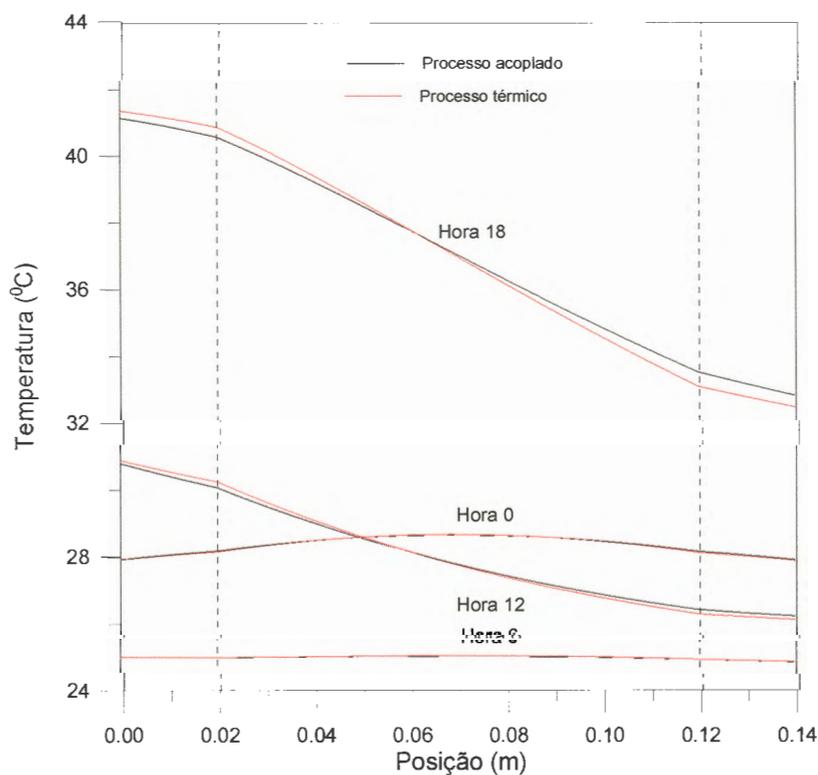


Figura 5.19 - Distribuição de temperatura para o 16º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

Nas Figs. 5.20 a 5.23 podem ser observadas as distribuições do conteúdo de umidade no interior da parede ao longo da posição para quatro diferentes horas do dia: horas 0, 6, 12 e 18, referenciadas nas figuras. Similarmente à situação em que a temperatura externa foi considerada constante, à medida que as horas passam dentro de um mesmo dia as curvas tornam-se menos acentuadas devido à tendência do processo, resultante da condição de impermeabilidade do sistema, de equilibrar o conteúdo de umidade no meio. O mesmo ocorre com o passar dos dias, conforme pode ser verificado através da observação da seqüência das Figs. 5.20 até 5.23; as curvas vão tornando-se cada vez mais próximas entre si e cada vez menos acentuadas. No regime permanente periódico, todo o meio terá praticamente o mesmo conteúdo de umidade (observe a Fig. 5.23), havendo apenas uma leve diferença, da ordem de 0,64 %, para o valor do conteúdo de umidade ao longo da posição, sendo maior o conteúdo de umidade quanto mais afastado da fronteira aquecida. Comparando-se as Figs. 5.20 a 5.23 para as duas situações, onde utiliza-se e onde não se utiliza temperatura externa variável, constata-se que não houve mudanças significativas na distribuição do conteúdo de umidade com a posição.

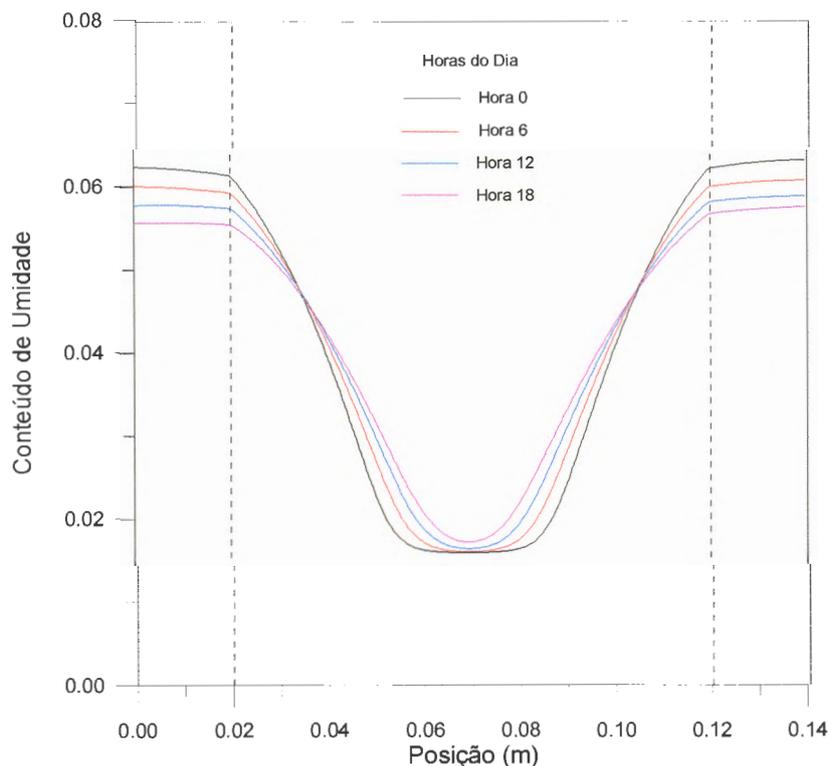


Figura 5.20 – Distribuição do conteúdo de umidade para o 2º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

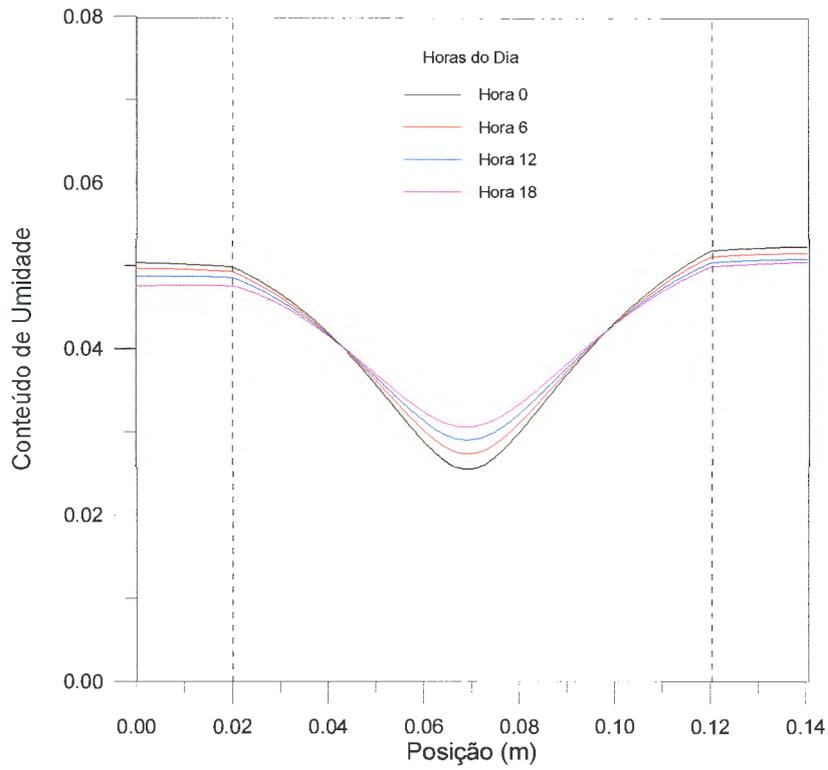


Figura 5.21 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 4º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

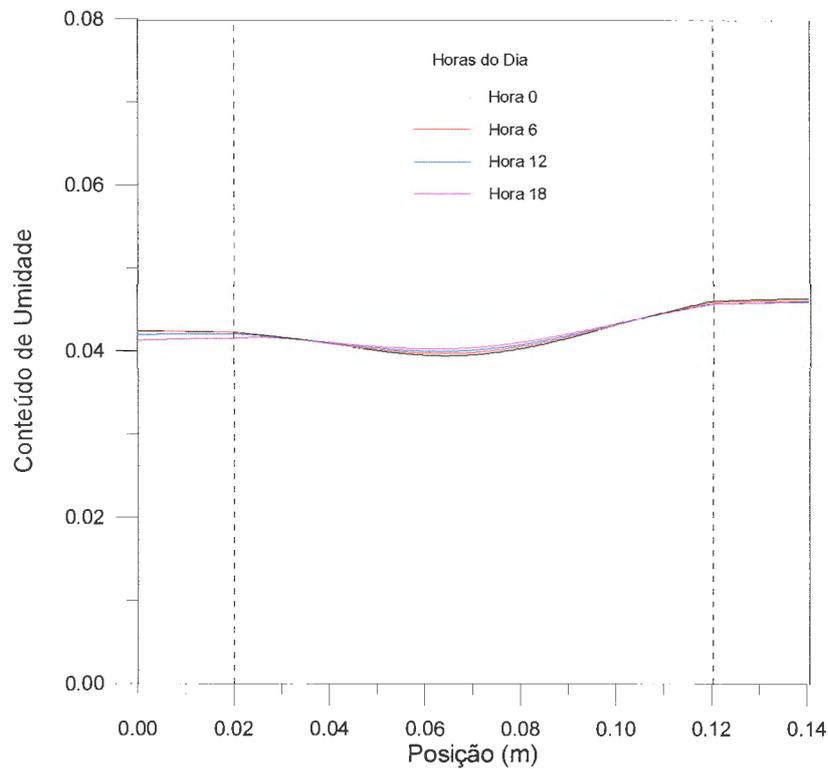


Figura 5.22 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 8º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

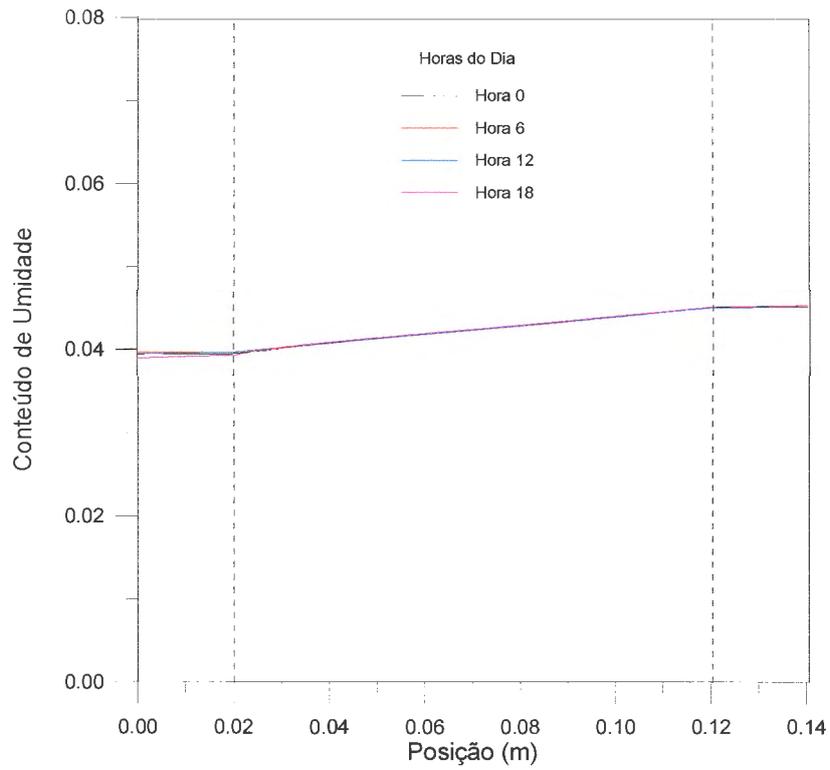


Figura 5.23 - Distribuição do conteúdo de umidade para o 16º dia para a parede brasileira com temperatura externa infinita variável

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o fenômeno da transferência simultânea de calor e massa em uma parede de edificação. O estudo do desempenho térmico de paredes de edificações tem um papel importante na predição do comportamento térmico dos ambientes internos das mesmas e também no dimensionamento dos sistemas de climatização.

A análise dos casos simulados revelou que o processo acoplado, ou seja, o processo no qual o transporte de umidade é considerado associado ao transporte de energia, forneceu valores para o fluxo de calor na fronteira interna ligeiramente superiores àqueles encontrados para o processo térmico. Isto acontece porque tem-se tanto a contribuição do transporte de calor latente pelo vapor, quanto a contribuição do transporte de massa que nesta fronteira entra como termo fonte positivo na equação da energia. Já na fronteira externa, observa-se que as curvas para os dois processos são quase coincidentes, indicando que a inclusão do transporte de massa tem pouca influência no cálculo deste fluxo de calor; neste caso, os efeitos do transporte de calor latente pelo vapor e do transporte de umidade praticamente se anulam.

Com relação à comparação dos perfis de temperatura obtidos para os dois processos, verifica-se que a inclusão do transporte de umidade na formulação não modificou o padrão das distribuições de temperatura. Observa-se que junto à face externa o processo térmico apresenta valores de temperatura maiores que o processo acoplado, enquanto que na face interna acontece o inverso. Esta diferença ocorre em função dos efeitos combinados da inclusão dos termos de transporte de calor latente pelo vapor e de transporte de umidade, que podem tornar o termo fonte da equação da energia positivo ou negativo.

Quanto à distribuição do conteúdo de umidade no interior da parede, observou-se que há pouca variação para as diferentes horas do dia, indicando que esta variável possui uma resposta mais lenta ao tempo quando comparada às distribuições de temperatura.

O comportamento descrito acima para as variáveis analisadas refere-se tanto à parede americana quanto à parede brasileira, principalmente na situação na qual a temperatura externa é considerada constante. Na simulação em que utilizou-se a temperatura externa variável, observa-se um comportamento similar, porém menos evidente em função até mesmo das diferentes escalas utilizadas para as curvas que representam os fluxos de calor nas fronteiras. Em relação às distribuições de conteúdo de umidade, conforme pôde ser observado, considerar a temperatura externa variável não causou mudanças significativas nos resultados.

Pela observação dos resultados apresentados, pode-se afirmar que a inclusão do transporte de umidade acoplado ao transporte de energia exerce influência nos resultados obtidos, principalmente em relação aos fluxos de calor trocado. Porém, comparando-se os resultados da parede americana com os resultados da parede brasileira, conclui-se que tanto o material do qual é feito o meio poroso quanto a configuração de parede escolhida interferem de forma significativa na magnitude das diferenças dos valores encontrados.

Em função dos resultados obtidos, a utilização de novos materiais e novas configurações de parede e a utilização de novas condições de contorno, especialmente a de permeabilidade ao fluxo de massa nas fronteiras da parede são sugestões para trabalhos futuros. Além disto, este trabalho poderia ser estendido na análise de diferentes configurações de parede, uma vez que estas mudanças não acarretam complicações mecânicas.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE, (1993), "Handbook of Fundamentals", ASHRAE, pp.26.17-26.28.
- BEYER, P.O., (1996), "Fluxo de Calor não Estacionário em Meios Multicompostos", VI Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Florianópolis, Santa Catarina, pp. 817-822.
- BEYER, P.O., VIELMO, H.A. E VILHENA, M.T.M.B., (1995), "Estudo Comparativo entre Soluções para a Transferência de Calor em Paredes Multicompostas", XIII Congresso Brasileiro e II Ibero Americano de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG, CD-ROM.
- BEYER, P.O., VILHENA, M.T.M.B. e Strcek, E.I., (1993), "Fluxo de Calor Transiente em Paredes pela Transformada de Laplace com Inversão Numérica", XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Brasília, pp 609-612.
- BEYER, P.O. e VILHENA, M.T.M.B., (1994), "Fluxo de Calor Transiente em Paredes Externas Multicompostas", V Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Florianópolis, São Paulo.
- BORIES, S., (1991), "Fundamentals of Drying of Capillary-Porous Bodies in Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media", S. Kakaç et al (eds) Kluvic academic publishers, pp. 391-434.
- BOUDDOUR, A., AURIAULT, J.-L., MHAMDI-ALAOUI, M. E BLOCH, J.-F., (1998), "Heat and Mass Transfer in Wet Porous Media in Presence of Evaporation-Condensation", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 15, pp. 2263-2277.
- BUCKINGHAM, E., (1907), "Studies in the movement of soil moisture", U.S Dept. Agr. Bur. Soils Bull., 38, Washington, pp. 29-61.
- BURCH, D.M. E THOMAS, W.C., (1992), "An Analysis of Moisture accumulation in a wood-frame Wall Subject to Winter Climate", Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings V, Proceedings of ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference, Flórida.
- BURROW, P. e WEIGAND, B., (1990), "One-Dimensional Heat Conduction in a Semi-Infinite Solid with the Surface Temperature a Harmonic Function of Time: a Simple Approximate Solution for the Transient Behavior", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 112.
- CARY, J.W.; TAYLOR, S.A. (1962a), "The Interaction of the Simultaneous Diffusion of Heat and Water Vapor", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 26, pp. 413-416.
- CARY, J.W.; TAYLOR, S.A. (1962b), "Thermally Driven Liquid and Vapor Phase Transfer of Water and Energy in Soil", Soil Sci. Soc. Amer. Proc., vol. 26, pp. 417-420.
- CARY, J.W. (1963), "Onsager's Relations and the Nonisothermal Diffusion of Water Vapor", J. Phys. Chem., vol. 67, pp. 126-129.

CARY, J.W. (1966), "Soil Moisture Transport due to Thermal Gradients: Predical Aspects", Soil Amer. Proc., vol. 30, pp. 428-433.

CHILDS, E.C.; COLLIS-GEORGE, N. (1950), "The Permeability of Porous Materials", Proc. Roy. Soc., vol. 201A, pp. 392-405.

COUVILLION, R.J. (1981), "Heat and Mass Transfer in a Semi-Infinite Moist Soil with a Drying Front Present", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering.

CRAUSSE, P. (1982), "Étude Fondamentale des Transferts Couplés de Chaleur et d'Humidité en Milieu Poreux non Saturé", These d'Etat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

CRAUSEE, P.;BACON, G.;BORIES, S. (1987), "Étude Fondamentale des Transferts Couplés Chaleur-Masse en Millieu Poreux", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 24, N 6, pp. 991-1004.

CUNNINGHAM, M.J., (1992), "Moisture Diffusion due to Periodic Moisture and Temperature Boundary Conditions – an Approximate Steady Analytical Solution with Non-Constant Diffusion Coefficiens", Building and Environment, Vol. 27, No. 3, pp. 367-377.

DAMASCENO FERREIRA, L.S. (1987), "Migração de Umidade Causada por Gradientes Térmicos entre Duas Fronteiras Impermeáveis Contendo um Meio Poroso Não Saturado", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.

DAMASCENO FERREIRA, L.S.; PRATA, A.T. (1989), "Evaluation of a Parametric Model for Heat and Mass Transfer in Unsaturated Porous Media", Multi-Phase Transport & Particulate Phenomena, vol. 1, Edited by T. Nejat Veziroglu, Hemisphere Publishing Corporation, New York.

DAMASCENO FERREIRA, L.S.; PRATA, A.T. (1990), "Moisture Migration near a Heated Cillinder Bounded by a Moist Soil", Anais do III Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Itapema, SC, pp. 613-618.

DAMASCENO FERREIRA, L. S, (1993), "Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos que Envolvem Cabos de Potência Aterrados", Tese de Doutorado, UFSC.

DARCY, H., (1856), "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon", Dalmont, Paris.

DE VRIES, D.A. (1958), "Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media", Transfer. Am. Geophys. Union, vol. 39, pp. 909-916.

DE VRIES, D.A. (1975), "Heat Transfer in Soils", Heat and Mass Transfer in Biosphere, pp. 5-28, Scripta, Washington.

ECKERT, E.R.G.; FAGHRI, M. (1980), "A General Analysis of Moisture Migration Caused by Temperature Difference in an Unsaturated Porous Medium", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 23, pp. 1613-1623.

ECKERT, E.R.G.; FAGHRI, M. (1986), "A Parametric Analysis of Moisture Migration in an Unsaturated Porous Slab Caused by Convective Heat and Mass Transfer", *Warme-Stoffbertrag*, vol. 20, pp. 77-87.

EDLEFSEN, N.E.; ANDERSON, A.B.C. (1943), "Thermodynamics of Soil Moisture", *Hilgardia*, vol. 15, pp. 31-298.

HARTLEY, J.G., COUVILLION, R.J. (1981), "Drying Front Movement Near Low-Intensity, Impermeable Underground Heat Sources", *Journal of Heat Transfer*, vol. 108, pp. 182-189.

HARTLEY, J.G. (1977), "An Analysis of Thermal Stability of the Soil Environment of Underground Electric Cables", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Mechanical Engineering.

HARTLEY, J.G. (1987), "Coupled Heat and Mass Moisture Transfer in Soils: A Review", Chapter 4 de *Advances in Drying*, editado por A.S. Mujumdar, Hemisphere, Washington.

JURY, W.A. (1973), "Simultaneous Transport of Heat and Moisture Through a Medium Sand", Ph.D. Thesis, University of Wisconsin.

KALLEL, F., GALANIS, N. PERRIN, B. e JAVELAS, R., (1993), "Effects of Moisture on Temperature During Drying of Consolidated Porous Materials", *ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 724-733.

LUIKOV, A.V. (1954), "Transport Phenomena in Capillary-porous Bodies", *ostekhzdat*, Moscou.

LUIKOV, A.V. (1975), "System of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 1-14.

MARCZAK, L. D. F. E SEBEN, S., (1998), "Heat Transfer and Moisture Migration in Soils Surrounding Buried Power Cables", *Latin American Applied Research*, 28, nº 4, pp. 235-241.

MASMOUDI, W. e PRAT, M., (1991), "Heat and Mass Transfer Between a Porous Medium and a Parallel External Flow. Application to Drying of Capillary Porous Materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 8, pp. 1975-1989.

MENDES, N., WINKELMANN, F. C., LAMBERTS, R., PHILIPPI, P. C., CUNHA NETO, J.A.B. E PEDRINI, A., (1996), "Cooling Loads from Heat and Moisture Transfer through Porous Walls: Sensitivity to Treatment of Transfer Coefficients in the Philip and De Vries Model", VI Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Florianópolis, Santa Catarina, pp. 155-160.

MENDES, N., (1997), "Desenvolvimento de Modelos para Código Genérico de Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações", Tese de Doutorado, UFSC.

MOTAKEF, S. e EL-MASRI, M.A., (1986), "Simultaneous Heat of Mass Transfer with Phase Change in a Porous Slab", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, No. 10, pp. 1503-1512.

NASRALLAH, S. B. e PERRE, P., (1988), "Detailed Study of a Model of Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, pp. 957-967.

PATANKAR, S.V. (1980), "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington.

PERRIN, B. e JAVELAS, R., (1987), "Transferts Couplés de Chaleur et de Masse dans des Matériaux Consolidés Utilisés en Génie Civil", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 2, pp. 297-309.

PHILIP, J.R.; DE VRIES, D.A. (1957), "Water movement in Porous Media under Temperature Gradients", *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 29, pp. 222-232.

SHAH, D.J.; RAMSEY, J.W.; WANG, M. (1984), "An Experimental Determination of Heat and Mass Transfer Coefficients in Moist, Unsaturated Soils", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 27, pp. 1075-1081.

SHAPIRO, A.P. e MOTAKEF, S., (1990), "Unsteady Heat and Mass Transfer with Phase Change in Porous Slabs: Analytical Solutions and Experimental Results", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 1.

UDELL, K.S. (1985), "Heat Transfer in Porous Media Considering Phase Change and Cappillary - The Heat Pipe Effect", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 28, N- 2, pp. 485-495.

VAFAI, K.; WHITAKER, S. (1986), "Simultaneous Heat and Mass Transfer Accompanied by Phase Change in Porous Insulation", *Journal of Heat Transfer*, vol. 108, pp. 132-140.

WANG, B.X.; FANG, Z.H. (1988), "Water Absorption and Measurements of the Mass Difusivity in Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 31, N- 2, pp. 251-257.

WANG, B.X.; YU, W.P. (1988), "A Method for Evaluation of Heat and Mass Transport Properties of Moist Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 31, n 5, pp. 1005-1009.

WHITAKER, S., (1977), "Simultaneous Heat Mass and Momentum Transfer in Porous Media", *Drying Technology*, 1, pp. 3-33.

EQUAÇÕES PARA AS PROPRIEDADES UTILIZADAS

A seguir serão apresentadas as expressões para as propriedades utilizadas neste trabalho, sendo as mesmas relativas tanto aos materiais empregados (tijolo e argamassa) quanto às características dos fluidos envolvidos. Da mesma forma serão mostradas as figuras que contém as curvas que descrevem o comportamento de algumas das propriedades, variáveis com a temperatura ou com o conteúdo de umidade .

No que diz respeito às condições utilizadas, inicialmente considera-se que todo o meio está sujeito a uma temperatura inicial T_M constante e igual a $28,5^\circ\text{C}$ e um conteúdo de inicial umidade, θ_i , constante e diferente para cada material que compõe o meio, sendo $10,8\%$ para a argamassa e $1,6\%$ para o tijolo. Os coeficientes convectivos de troca térmica externo e interno são, respectivamente, $16,95$ e $8,26 \text{ W/m}^2$ e a temperatura interna da sala é mantida em 24°C . Na consideração de temperatura ambiente externa constante, a mesma foi fixada em 30°C . Na consideração de temperatura ambiente externa variável, a temperatura SOL-AR evolui em função do tempo para 40° latitude norte, para o dia 21 de julho. A Tabela 3.1, que apresenta os valores para $T_{\text{SOL-AR}}$ em função do tempo, está mostrada no Capítulo 3, na Seção 3.3, que trata das condições de contorno.

A entalpia de vaporização (h_{iv}) e a massa específica do líquido (ρ_l) foram obtidas de Damasceno Ferreira (1993) e são consideradas variáveis com a temperatura, que é utilizada em $^\circ\text{C}$ nas duas equações.

$$h_{iv} = 4186 \cdot \left[755,785 - 0,532883 \cdot (T + 273,16) - 7,7141^{-4} \cdot (T + 273,16)^2 + \right. \\ \left. + 3,48007^{-6} \cdot (T + 273,16)^3 - 4,70563^{-9} \cdot (T + 273,16)^4 \right] \quad (\text{A.1})$$

$$\rho_l = \frac{(999,8360 + 18,22494 \cdot T - 7,92221 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 5,544846 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1,49756 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 - 3,932952 \cdot 10^{-10} \cdot T^5)}{(1 + 1,815973 \cdot 10^{-2} \cdot T)} \quad (\text{A.2})$$

Nas Tabelas A.1 e A.2, são apresentadas as expressões para as condutividades térmicas efetivas e propriedades difusivas térmicas e isotérmicas usadas no programa. As difusividades térmicas e isotérmicas estão expressas em função do conteúdo de umidade, enquanto que as condutividades térmicas efetivas estão expressas em função do grau de saturação do meio.

Tabela A.1 - Expressões para as propriedades utilizadas para Argamassa

PROPRIEDADE	EQUAÇÃO	R ²
K* - Fig. A.1	$y = 7,70497788 \times 10^{-07} S^3 - 1,75549335 \times 10^{-04} S^2 + 1,65549580 \times 10^{-02} S + 1,89576776$	0,999260976
DT - Fig. A.3	$y = 3,31241086 \times 10^{-16} \theta^5 - 1,50326107 \times 10^{-14} \theta^4 + 1,88986684 \times 10^{-13} \theta^3 - 5,45656190 \times 10^{-13} \theta^2 + 1,89754178 \times 10^{-12} \theta - 4,14396727 \times 10^{-13}$ $y = 1,111774 \times 10^{-12}$ para $x \leq 1$	0,998360615
DT _v - Fig. A.4	$y = 9,98997346 \times 10^{-17} \theta^5 - 4,44103810 \times 10^{-15} \theta^4 + 7,64826808 \times 10^{-14} \theta^3 - 6,17107603 \times 10^{-13} \theta^2 + 2,03824232 \times 10^{-12} \theta - 3,96873633 \times 10^{-13}$	0,997981272
D _θ - Fig. A.5	$y = 1,67197917 \times 10^{-13} \theta^6 - 7,88299169 \times 10^{-12} \theta^5 + 1,38091765 \times 10^{-10} \theta^4 - 1,16006388 \times 10^{-09} \theta^3 + 5,46640646 \times 10^{-09} \theta^2 - 8,35364094 \times 10^{-09} \theta + 4,81904814 \times 10^{-09}$ $y = 9,021258 \times 10^{-10}$ para $\theta \leq 1$	0,995598316
D _{θv} - Fig. A.6	$y = 3,06310396 \times 10^{-13} \theta^6 - 6,56397210 \times 10^{-12} \theta^5 + 5,61884567 \times 10^{-11} \theta^4 - 2,45658403 \times 10^{-10} \theta^3 + 5,86780207 \times 10^{-10} \theta^2 - 7,81066955 \times 10^{-10} \theta + 5,68374472 \times 10^{-10}$ para $\theta \leq 6$	0,997984119

Tabela A.2 - Expressões para as propriedades utilizadas para o Tijolo

PROPRIEDADE	EQUAÇÃO	R ²
K* - Fig. A.2	$y = -4,03935796 \times 10^{-05} S^2 + 1,49879939 \times 10^{-02} S + 1,01871809$	0,996857963
DT - Fig. A.7	$y = -2,38358237 \times 10^{-16} \theta^6 + 1,01410081 \times 10^{-14} \theta^5 -$ $1,68765588 \times 10^{-13} \theta^4 + 1,38895528 \times 10^{-12} \theta^3 -$ $5,69623314 \times 10^{-12} \theta^2 + 9,99968018 \times 10^{-12} \theta + 1,94391396 \times 10^{-12}$ <p>para $\theta \leq 14$</p>	0,979702308
DT _v - Fig. A.8	DTV=DT-DTL para $x \leq 12$	
D θ - Fig. A.9	$y = -6,78548693 \times 10^{-05} \theta^5 + 1,48217499 \times 10^{-04} \theta^4 -$ $1,28214733 \times 10^{-04} \theta^3 + 5,49633979 \times 10^{-05} \theta^2 -$ $1,17187451 \times 10^{-05} \theta + 1,00505108 \times 10^{-06}$ <p>para $\theta \leq 0,6$</p> $y = 4,65485017 \times 10^{-14} \theta^6 - 2,05728157 \times 10^{-12} \theta^5 +$ $3,57359686 \times 10^{-11} \theta^4 - 3,08214536 \times 10^{-10} \theta^3 +$ $1,43116736 \times 10^{-09} \theta^2 - 2,68123454 \times 10^{-09} \theta + 2,28413222 \times 10^{-09}$ <p>para $\theta > 0,6$</p>	0,949976612 0,999704929
D θ_v - Fig. A.10	$y = 7,72376911 \times 10^{-06} \theta^6 - 3,00305601 \times 10^{-05} \theta^5 +$ $4,75620259 \times 10^{-05} \theta^4 - 3,93049564 \times 10^{-05} \theta^3 +$ $1,79475797 \times 10^{-05} \theta^2 - 4,34163351 \times 10^{-06} \theta + 4,46385536 \times 10^{-07}$ <p>para $\theta \leq 1$</p> $y = -9,64208854 \times 10^{-12} \theta^5 + 1,59759364 \times 10^{-10} \theta^4 -$ $1,00810810 \times 10^{-09} \theta^3 + 3,07868633 \times 10^{-09} \theta^2 -$ $4,62073869 \times 10^{-09} \theta + 2,79015693 \times 10^{-09}$ <p>para $1 \leq \theta \leq 3$</p>	0,993559241 0,998452099

O comportamento das propriedades dos materiais empregados, cujas equações foram listadas nas Tabelas A.1 e A.2, pode ser observado nas Figs. A.1 a A.10, a seguir.

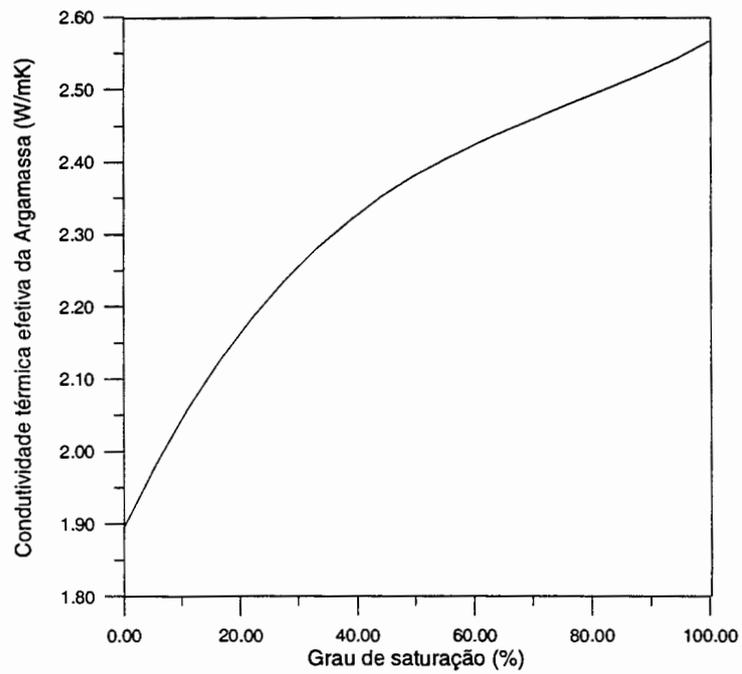


Figura A.1 - Condutividade térmica efetiva para a Argamassa

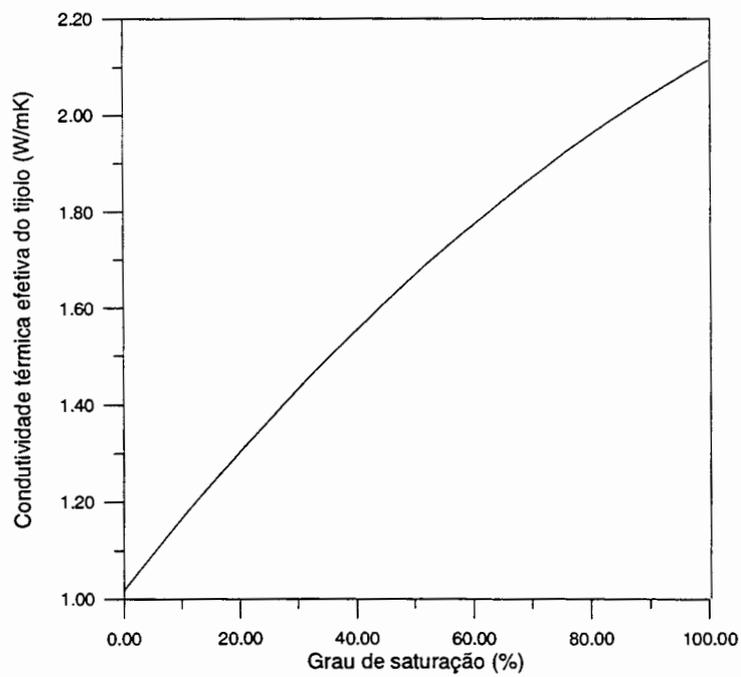


Figura A.2 - Condutividade térmica efetiva para o Tijolo

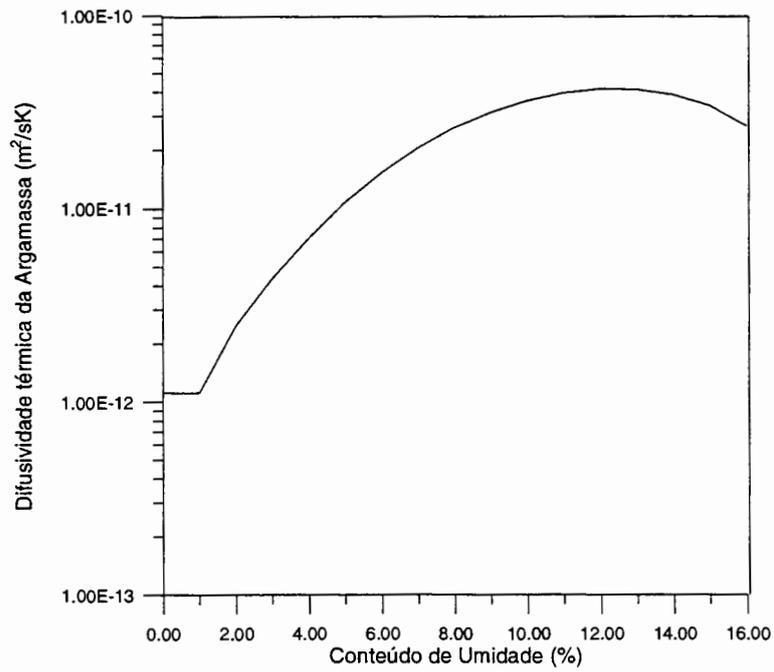


Figura A.3 - Difusividade Térmica para Argamassa

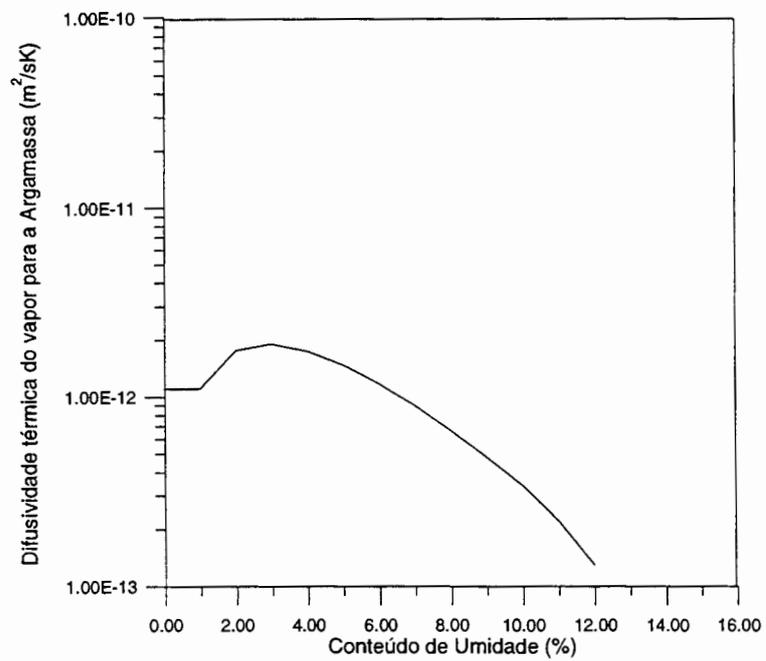


Figura A.4 - Difusividade Térmica do Vapor para Argamassa

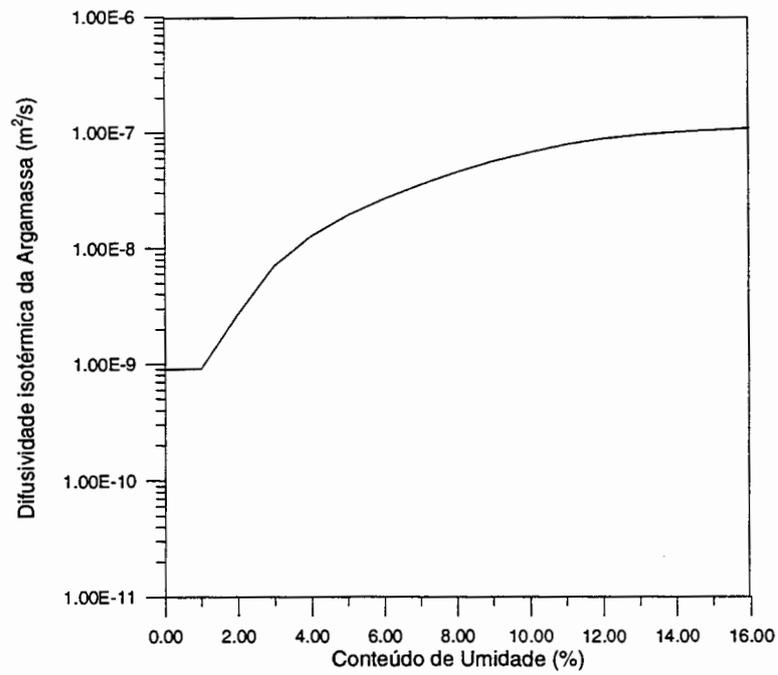


Figura A.5 - Difusividade Isotérmica para Argamassa

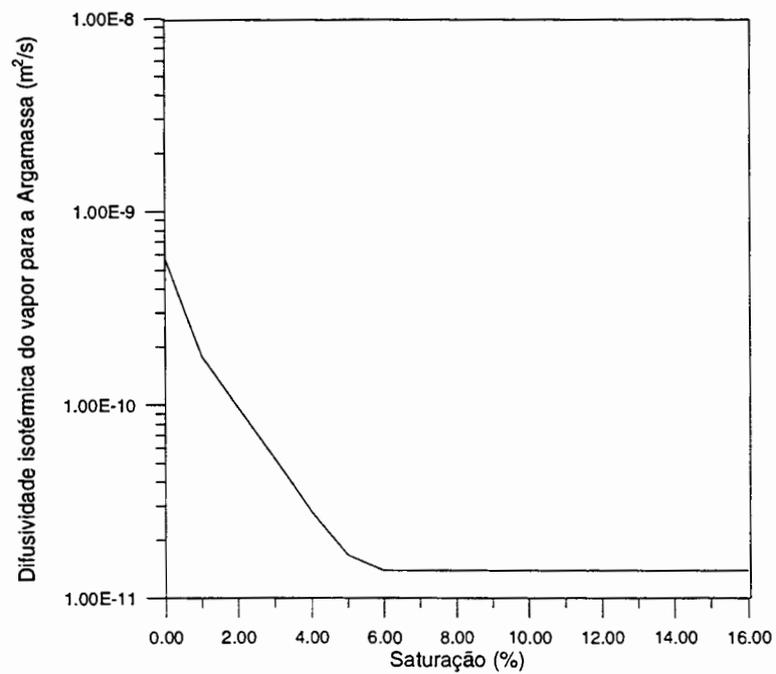


Figura A.6 - Difusividade Isotérmica do Vapor para Argamassa

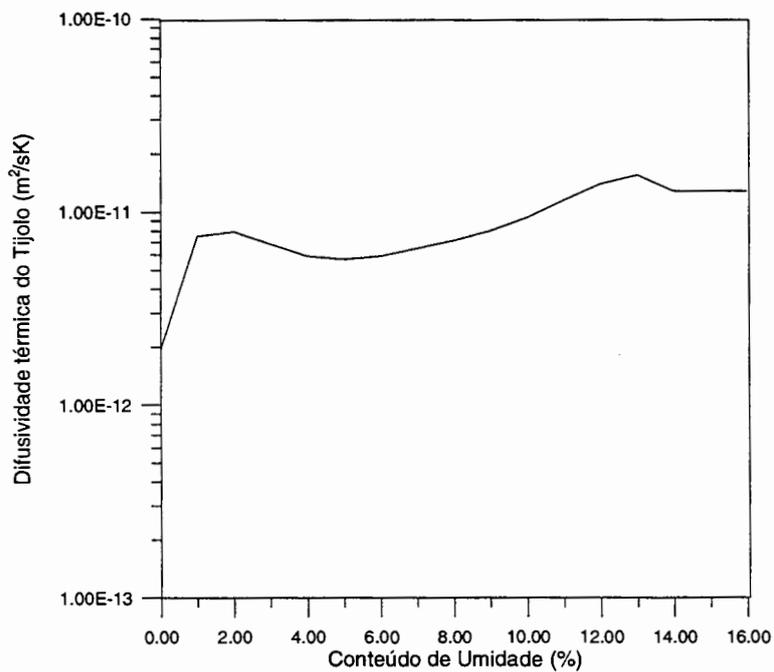


Figura A.7 - Difusividade Térmica para o Tijolo

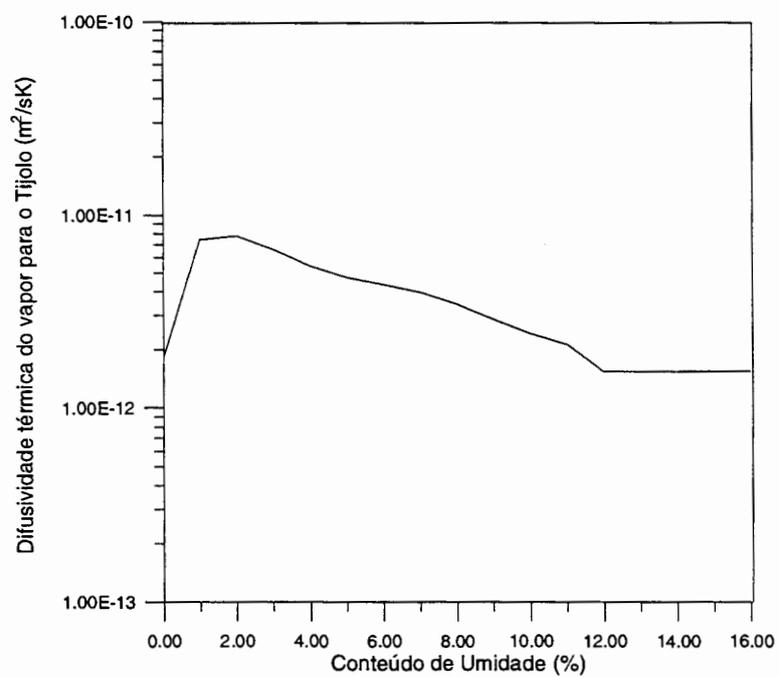


Figura A.8 - Difusividade Térmica do Vapor para o Tijolo

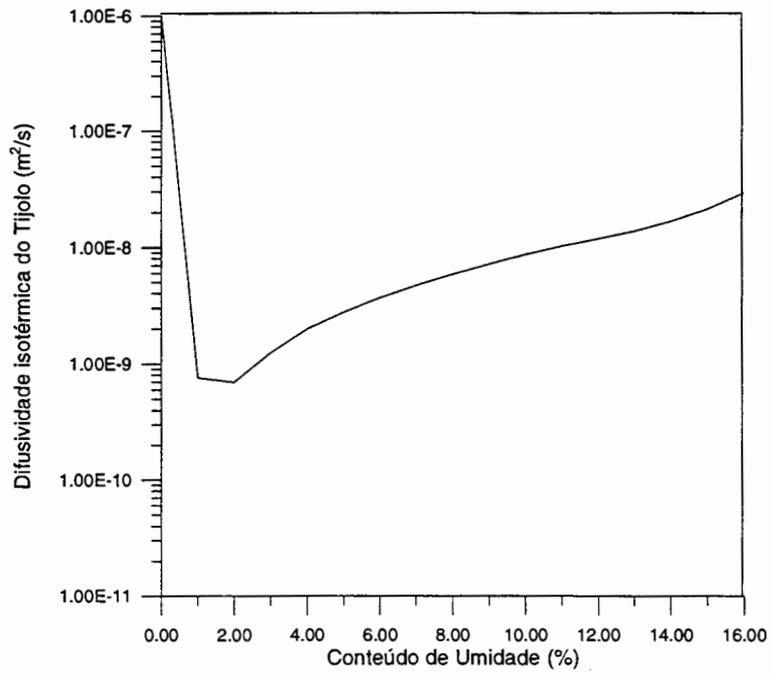


Figura A.9 - Difusividade Isotérmica para o Tijolo

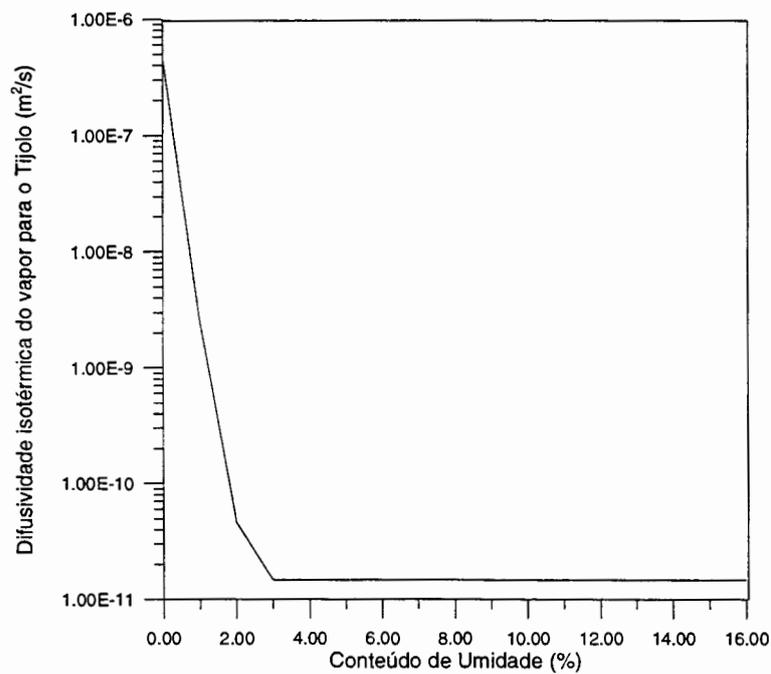


Figura A.10 - Difusividade Isotérmica do Vapor para o Tijolo