PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRANSFERÊNCIA TRIDIMENSIONAL ACOPLADA DE CALOR E DE UMIDADE EM SOLOS SOB EDIFICAÇÕES

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Gerson Henrique dos Santos

Curitiba, 21 de Fevereiro de 2003

Dedico este trabalho aos meus pais,
parentes, amigos e esposa.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos

A Nathan Mendes, pela orientação.

Aos estagiários Roberto Zanetti Freire e Fabrício Celinski.

A minha esposa Alessandra, pela compreensão apresentada na maior parte do trabalho.

A CAPES pelo suporte financeiro.

Lista de Símbolos

A- área de uma superfície *(m^2)*

c_m - calor específico médio (*J/kgK*)

c_{ar} - calor específico do ar a pressão constante (*J/kg K*)

D_T - coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de temperatura *($m^2/s°K$)*

D_θ - coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de conteúdo de umidade *(m^2/s)*

D_{Tl} - coeficiente de transporte na fase líquida associado ao gradiente de temperatura *($m^2/s°K$)*

D_{Tv} - coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de temperatura *($m^2/s°K$)*

$D_{\theta v}$ - coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de conteúdo de umidade *(m^2/s)*

$D_{\theta l}$ - coeficiente de transporte na fase líquida associado ao gradiente de conteúdo de umidade *(m^2/s)*

$\dot{E}_t$ - taxa de transferência de calor que atravessa a superfície de controle do ambiente em estudo *(W)*

$\dot{E}_g$ - taxa de energia gerada no interior do ambiente (pessoas e equipamentos) *(W)*

$\dot{E}_{gs}$ - energia sensível (infiltração + geração) *(W)*

$\dot{E}_{gl}$ - energia latente (infiltração + geração) *(W)*

f_f - fator de forma,

h- coeficiente de troca de calor por convecção *(W/m² K)*

h_m coeficiente de convecção de massa *(m/s)*

j_v - fluxo de vapor *(kg/s m²)*

j - fluxo total *(kg/s m²)*

K_g - condutividade hidráulica *(m/s)*

L - calor latente de vaporização *(J/kg)*

$\dot{m}_{\inf}$ - vazão mássica de ar por infiltração através de portas e janelas (*kg/s*)

$\dot{m}_{resp}$ - vazão mássica de água através da respiração dos ocupantes (*kg/s*)

$\dot{m}_{ger_equip}$ - fluxo de vapor gerado internamente (*kg/s*)

M- massa molecular

P_s - pressão de saturação (kPa)

q_r - radiação solar (W/m^2)

$\dot{Q}(t)$ - fluxo de calor que atravessa a superfície de controle do ambiente (*W*)

$\Re$ - constante universal dos gases *(kJ/kmol K)*

R_{OL}- fluxo de calor por radiação de onda longa *(W/m²)*

T_{int} - temperatura interna do ambiente *(^oC)*

$T_n(t)$ - temperatura da superfície interna do envoltório do ambiente *(°C)*

$T_{x=L}$ - temperatura do n-ésimo nó da parede *(°C)*

${}^{n+1}T$ - temperatura no instante *n+1* *(°C)*

${}^{n+1}t$ - tempo no instante *n+1* *(s)*

T_{ant} - temperatura na iteração anterior *(°C)*

V_{ar} - volume do ambiente *(m^3)*

W_{ext} - umidade absoluta externa (*kg de água/kg de ar seco*)

W_{int} - umidade absoluta interna (*kg de água/kg de ar seco)*

${}^{n+1}W$ - umidade absoluta no instante *n+1* (*kg de água/kg de ar seco*)

W_{ant} - umidade absoluta na iteração anterior (*kg de água/kg de ar seco*)

Letras Gregas

α - absortividade

Δt - passo de tempo *(s)*

ε - emissividade

φ - umidade relativa

λ - condutividade térmica *(W/m K)*

θ - conteúdo de umidade em base de volume *(m^3/m^3)*

ρ_{ar} - massa específica do ar *(kg/m^3)*

σ - constante de Stefan-Boltzmann *(W/m^2K^4)*

Índices

0_ant – iteração anterior do instante anterior.

ant – iteração anterior .

ext – externo.

ger-equip – geração de energia por equipamentos.

inf – infiltração.

int – interno.

l – líquido.

ol – onda longa

resp – respiração.

v – vapor.

v_s- vapor saturado.

0 – instante anterior.

Sumário

1- INTRODUÇÃO 1

2- FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 7

2.1 FORMULAÇÃO PARA O DOMÍNIO DO AR 7
2.2 ANÁLISE DO MÉTODO NUMÉRICO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO PARA O DOMÍNIO DO AR 11
2.3 EFEITOS DA TRANSFERÊNCIA PURA DE CALOR NO SOLO NA PERFORMANCE TÉRMICA DO AMBIENTE 15
2.4 ANÁLISE 3-D DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ACOPLADA COM UMIDADE SOB SOLOS DE EDIFICAÇÕES 17
2.4.1 Condições de Contorno 19
2.4.2 Discretização das Equações Governantes 20
2.4.3 Interface entre Meios Porosos de Diferentes Higroscopicidades 25
2.4.4 Algoritmo Genérico para Resolver as Equações Governantes Altamente Acopladas 27
2.4.4 Considerações Matemáticas para a Troca de Vapor entre as Superfícies do Solo e Piso com o Ar 29

3- PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO 30

4- RESULTADOS 37

4.1 ANÁLISE DO TRANSIENTE HIGROTÉRMICO DE UM AMBIENTE 37
4.2 INTEGRAÇÃO NO TEMPO 41
4.3 EFEITOS DA TRANSFERÊNCIA PURA DE CALOR NA PERFORMANCE TÉRMICA DO AMBIENTE 44
4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO PURAMENTE CONDUTIVO 49
4.5 VALIDAÇÃO DA FORMULAÇÃO GLOBAL PARA O BALANÇO DE ENERGIA 51
4.6 ANÁLISE DO PERÍODO DE PRÉ-SIMULAÇÃO, DO PASSO DE TEMPO E DO TAMANHO DA MALHA PARA O DOMÍNIO DO SOLO COM UMIDADE 53
4.7 EFEITO DO LENÇOL FREÁTICO NA TEMPERATURA E NO CONTEÚDO DE UMIDADE DO SOLO 59
4.8 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ACOPLADA COM UMIDADE DO SOLO SOB A EDIFICAÇÕES 61

5- CONCLUSÕES 67

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70

ANEXO 74

Lista de Figuras

Fig.	Legenda	Pág.
2.1	Domínio físico do solo.....	16
2.2	Volume de controle elementar do domínio.....	21
2.3	Vizinhança do controle elementar do domínio.....	22
2.4	Domínio dos volumes de controle antes e após a interface.....	25
3.1	Dimensões do ambiente utilizado para a simulação (m).....	29
3.2	Variação temporal da temperatura externa e da umidade relativa para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro.....	30
3.3	Variação temporal da radiação total para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro.....	31
3.4	Variação temporal da temperatura externa e da umidade relativa no período de 3 dias.....	32
3.5	Variação temporal da radiação total no período de 3 dias.....	32
3.6	Dimensões do domínio do solo e do piso utilizados na simulação numérica (condução pura).....	33
3.7	Dimensões do domínio do solo e do piso.....	34
4.1	Variação temporal da temperatura interna do ambiente em Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s.....	37
4.2	Variação temporal da umidade relativa interna do ambiente em Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s.....	38
4.3	Variação temporal da temperatura interna do ambiente para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s, com uma geração interna de energia de 1000 W.....	38

4.4 Efeito do fator de carga de refrigeração (FCR) na variação temporal da temperatura interna do ambiente para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para um passo de tempo de 1800 segundos..... 39
4.5 Perfil de temperatura na parede frontal do ambiente..... 40
4.6 Temperatura interna do ambiente variando o método numérico e o passo de tempo..... 41
4.7 Temperatura interna do ambiente variando o método numérico e o passo de tempo..... 42
4.8 Umidade relativa interna do ambiente variando o método numérico e o passo de tempo..... 43
4.9 Evolução da temperatura do ambiente (sem radiação solar)..... 44
4.10 Distribuição da temperatura no solo e piso ao meio-dia, utilizando um arquivo climático senoidal para o modelo 2-D..... 44
4.11 Evolução da temperatura do ambiente (com radiação solar)..... 45
4.12 Distribuição da temperatura na superfície do solo e do piso ao meio-dia (modelo 3-D)..... 46
4.13 Distribuição da temperatura na superfície do solo e do piso às 18 horas (modelo 3-D)..... 46
4.14 Evolução da perda de calor (ou ganho) no ambiente..... 47
4.15 Dimensões do domínio..... 48
4.16 Perfis de temperatura ao longo da profundidade do solo utilizando um passo de tempo de 1 hora..... 49
4.17 Perfis de temperatura ao longo da profundidade variando o passo de tempo..... 50
4.18 Comparação entre os valores da temperatura interna para a edificação utilizando a formulação global e o CFX..... 51
4.19 Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso ao longo de 50 anos às 24 horas do dia 31 de dezembro..... 52
4.20 Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso ao longo de 50 anos às 24 horas do dia 31 de dezembro..... 53
4.21 Perfis de temperatura em um domínio com 5 m de profundidade..... 54

4.22 Perfis de conteúdo de umidade em um domínio com 5 m de profundidade..... 54
4.23 Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso variando o passo de tempo..... 55
4.24 Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso variando o passo de tempo..... 56
4.25 Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso variando o número de nós..... 57
4.26 Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso considerando lençol freático como condição de contorno..... 57
4.27 Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso considerando lençol freático como condição de contorno..... 59
4.28 Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso considerando lençol freático como condição de contorno..... 59
4.29 Variação da temperatura interna após 2 anos de pré-simulação..... 60
4.30 Variação da umidade absoluta interna após 2 anos de pré-simulação..... 61
4.31 Fluxo do calor pelo piso da edificação no período de um mês de simulação..... 62
4.32 Variação da temperatura interna após 2 anos de pré-simulação com uma vazão de 10 l/s..... 63
4.33 Variação da temperatura interna considerando areia como o solo e o piso da edificação..... 63
4.34 Variação da umidade absoluta interna considerando areia como o solo e o piso da edificação..... 64
4.35 Fluxo do calor pelo piso de areia da edificação no período de um mês de simulação..... 64

Lista de Tabelas

Tab.	Legenda	Pág.
4.1	Tempo de simulação para os diferentes métodos numéricos.	42
4.2	Propriedades básicas do solo.	48

Resumo

Após a crise mundial de energia na década de 70 e o crescente interesse em reduzir o consumo de energia de forma racional, vários programas computacionais foram desenvolvidos para simular o comportamento termoenergético de edificações. No entanto, estes códigos apresentam várias simplificações no que diz respeito a transferência de calor através do piso e do solo nas edificações.

Assim, neste trabalho descreveu-se primeiramente um modelo matemático aplicável a estudos de comportamento térmico de ambientes. Utilizou-se uma abordagem global para a modelagem do ambiente e multicamadas em diferenças finitas para o envoltório, teto e piso da edificação. O modelo foi capacitivo de forma a permitir uma análise mais precisa em regime transiente para temperatura e umidade do ar quando o ambiente foi submetido a diferentes parâmetros climáticos. Para avaliação de parâmetros termofísicos do modelo, elaborou-se um programa em C, o qual inclui infiltração de ar, cargas de condução, ganhos internos de pessoa, iluminação e equipamentos, além de radiação solar. Apresentou-se, na seção de resultados, a influência do passo de tempo na temperatura e umidade interna e em perfis de temperatura no envoltório da edificação.

Em seguida, diferentes métodos numéricos para integração das equações governantes no domínio do ar foram comparados em termos de temperatura e de umidade interna de um ambiente, já que simulações de edificações são realizadas de forma transiente durante períodos que podem ter a duração superior a um ano.

Na seqüência deste trabalho, aperfeiçoaram-se modelos para o transporte puro de calor por condução através do solo, analisando a sua influência no ambiente em estudo. Nestes modelos, a difusão de calor foi calculada pela lei de Fourier através do método das diferenças finitas, considerando três abordagens. Em uma primeira análise, adotou-se um modelo unidimensional, comparando-o, na seqüência, com modelos bidimensional e tridimensional. A validação do modelo puramente condutivo e a utilização de uma formulação global para o balanço de massa e de energia para ar interno ao ambiente foram realizadas via software comercial CFX-5.

No final, analisou-se a influência da umidade na transferência de calor e massa através do piso e solo sob o mesmo ambiente. Para esta análise, primeiramente verificou-se o período de pré-simulação necessário para reduzir os efeitos das condições iniciais e a influência do passo de tempo e do tamanho da malha para o domínio do solo com umidade. A metodologia apresentada foi baseada na teoria de Philip e De Vries, utilizando-se propriedades termofísicas para diferentes tipos de solos com coeficientes de transporte altamente dependentes do conteúdo de umidade. As equações governantes foram discretizadas em volumes finitos e um modelo 3-D foi utilizado para o solo e piso.

Abstract

COUPLED TRIDIMENSIONAL HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN SOILS UNDER BUILDINGS

After the wide world crisis of energy in the 70's and the interest in energy consumption reduction, some computational programs had been developed to simulate the building energy performance. However, these codes present some simplifications on their calculation routines of heat transfer through the ground.

In this way, we have described a mathematical model applied to building hygrothermal behavior analysis. We have used a lumped approach to model the room air temperature and humidity and a multi-layer model in finite differences for the building envelope. The capacitance model allows studying the dynamic performance of both humidity and temperature of a building zone when it is submitted to the different climatic factors. In order to evaluate the building performance, a C program has been written, which includes solar radiation (direct and diffuse), air infiltration, conduction loads, internal gains of people, lights and equipment. In the results section, we show the influences of simulation time step on temperature profiles within the building envelope and room air temperature and humidity ratio.

Then, different numerical methods to integrate in time, the energy and mass conservation equations of the room air domain, were compared in order to speed up simulations without loosing accuracy.

In the sequence, models for the pure conduction heat transfer through the ground and its influence on room air temperature were described. In these models, the heat diffusion was calculated by the Fourier´s law, by using the finite difference method, considering three approaches (1-D, 2-D and 3-D formulation). A validation of these models were carried out by comparing with results obtained from the commercial CFX-5 package.

To conclude, the moisture effects on the heat and mass transfer through the floor and ground were discussed. Firstly, sensitivity analyses of time step, grid size and warm-up period (to reduce initial condition) were carried out for the soil physical domain, considering the

presence of moisture. The methodology presented was based on the Philip and De Vries theory, using the thermophysical properties for dissimilar soils with transport coefficients highly dependent on moisture content. The governing equations were discretized in finite volumes and a 3-D model was used for ground and floor.

Capítulo 1

Introdução

Através de dados da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, estima-se que o consumo de energia elétrica nas edificações brasileiras represente mais de um terço do total nacional. O emprego de padrões arquitetônicos adequados, a especificação de produtos e materiais energeticamente eficientes e a adequação de critérios e projetos racionais podem reduzir em até 60% o consumo energético das edificações (www.energia.sp.gov.br).

Como este problema atinge praticamente o mundo todo, foram desenvolvidos vários programas computacionais – destacando-se os códigos BLAST (1977), DOE-1 (1978), NBSLD (1974), ESP (1974), TRNSYS (1975) e mais recentemente ENERGY PLUS (1999) e DOMUS (2001) – para simular o comportamento termoenergético de edificações. No entanto, estes códigos apresentam várias simplificações no que diz respeito a transferência de calor através do piso e do solo nas edificações.

Entre os problemas no cálculo do fluxo de calor através do solo, pode-se destacar: o seu fenômeno multidimensional; o seu regime transiente, no que diz respeito ao transporte de calor e massa; e o grande número de parâmetros envolvidos, principalmente quando se considera o transporte de calor acoplado com a umidade.

Apesar da complexibidade presente, os primeiros estudos, envolvendo a transferência de calor através do piso e porão, iniciaram-se na década de 40 e concluíram que o calor perdido através do piso das edificações era proporcional ao seu perímetro.

Porém, com o avanço dos computadores a partir dos anos 80, simulações computacionais começaram a ser utilizadas no estudo do solo. Bahnfleth (1989), utilizando

um modelo tridimensional em diferenças finitas para o solo, observou que a área e o seu formato também devem ser levados em conta.

Manuais da ASHRAE (1997) ainda recomendam uma formulação onde a quantidade de calor transferido pelo piso é proporcional ao perímetro da edificação, à diferença entre a temperatura externa e interna e a um fator que depende do clima da região e o tipo de material da construção.

Davies *et al.* (1995) usando o método dos volumes finitos, compararam modelos multi-dimensionais e observaram que a simulação através de um modelo tridimensional fornece melhores resultados do que um modelo bidimensional, quando valores de temperatura do ambiente e fluxo de calor foram comparados experimentalmente. Em outros trabalhos citados por Davies *et al.* (1995), apud Spelttz (1980) e Walton (1987), usando o modelo de diferenças finitas, encontraram-se discrepâncias superiores a 50% na carga térmica de um ambiente, comparando os modelos 2-D e 3-D para o solo.

O efeito da variação espacial da condutividade térmica na transferência de calor em piso de edificação foi discutido em Krarti (1996), que utilizou a *técnica de estimação de perfil de temperatura entre zonas (ITPE).* Em particular, verificou-se que em solos com condutividade térmica baixa em volta do perímetro da fundação, resulta geralmente em uma redução na amplitude anual do total do calor perdido pelo piso.

Através de um modelo tridimensional, utilizando volumes finitos, Adjali (1999) realizou uma análise de sensibilidade da condutividade do solo, e a relacionou nas distorções observadas entre os resultados experimentais e os simulados. Analisou-se também neste trabalho a influência da neve e da chuva nas distorções destas temperaturas. Verificou-se, principalmente, que um modelo puramente condutivo pode ser capaz de oferecer resultados bastante próximos quando comparados com os dados experimentais.

Atualmente, novas técnicas de simulação podem ser encontradas. Zoras (2001) utilizou uma combinação de fatores de resposta estrutural para a solução numérica tri-dimensional da equação da condução de calor.

Nos trabalhos citados acima, a condutividade e a capacidade térmica são consideradas geralmente constantes e os efeitos da umidade são ignorados.

A presença de umidade no solo fornece um mecanismo adicional de transporte: nos poros de um solo insaturado, água líquida evapora no lado mais aquecido, absorvendo calor

latente de vaporização, enquanto, devido ao gradiente de pressão do vapor, vapor condensa no lado mais frio do poro, liberando calor latente de vaporização (Deru e Kirkpatrick, 2002).

Este calor latente adicionado ou removido do ambiente pode ocasionar grandes discrepâncias em relação a valores de temperatura e umidade no interior de edificações, quando são comparados com aqueles obtidos através do cálculo com condução pura de calor através do envoltório da edificação (Mendes, 1997).

No entanto, o problema envolvendo a perda ou ganho de calor via solo acoplado com umidade é intrinsecamente mais complexo do que quando considera-se apenas condução pura de calor: (1) a condutividade e a capacidade térmica do solo são altamente dependentes do conteúdo de umidade, (2) evapo-transpiração forma uma parte integral no balanço de energia da superfície do solo, (3) a transferência de calor, armazenamento e a troca de fase da umidade entre líquido e vapor causa uma transferência e armazenamento simultâneo de calor sensível e latente (Janssen et al., 2002).

Brink e Hoogendoorn (1983) verificaram a perda de calor por condução através do solo e por convecção natural de armazenadores de energia. Utilizaram a equação de condução de calor em regime transiente para calcular as perdas em solos com baixa permeabilidade.

Freitas e Prata (1996) elaboraram uma metodologia numérica para análise térmica de cabos de potência enterrados em solos na presença de migração de calor e umidade em suas vizinhanças. Neste trabalho as equações governantes foram resolvidas via volumes finitos em duas dimensões.

Buonanno e Carotenuto (2000) também analisaram o comportamento do solo seco ou saturado ao redor de cabos de potência. As equações governantes foram resolvidas utilizando elementos finitos levando em conta as propriedades termofísicas para diferentes tipos de solos.

Onmura *et al.* (2001) investigaram o efeito evaporativo de telhados cobertos com grama em ambientes e observaram uma redução de até 50 % no fluxo de calor através do teto.

Lucas *et al.* (2001) expuseram uma série de experimentos executados analisando os efeitos da condensação em paredes e solo e propuseram algumas soluções para prevenir a deterioração destas superfícies.

Galbraith (2001) discutiu a influência da discretização espacial na exatidão da simulação numérica no transporte de calor e massa em meios porosos. Observou-se que em

uma discretização 1-D, o modelo *two-way*, baseado na técnica de volume de controle, pode ser utilizado para evitar malhas extremamente finas em diferentes modelos de estruturas em edificações.

A temperatura da superfície do solo de Atenas foi estimada e comparada com dados experimentais por Mihalakakou (2002). Neste trabalho utilizou-se um modelo determinístico baseado na equação diferencial da condução de calor, usando a equação do balanço de energia na superfície do solo como condição de contorno. Em comparação utilizou-se um modelo de rede neural, baseado em um algoritmo para estimar os valores da temperatura do solo para cada hora do dia.

Devido a instabilidade numérica ocasionada pelo efeito do calor latente, quando se utiliza grandes passos de tempo, Wang e Hagentoft (2001) propuseram um método numérico baseado em um algoritmo que combina um modelo explícito com um esquema de relaxação. Neste modelo, o cálculo do passo de tempo é calculado através de um critério de estabilidade para o transporte de calor e umidade, e de um critério para controlar o calor latente liberado ou absorvido.

Em frente ao mesmo problema, Mendes *et al.* (2002) propuseram o MTDMA para resolver as equações do balanço de massa e energia discretizadas em volumes finitos. Este modelo apresentou-se robusto para a solução implícita simultânea do balanço de massa e energia em meios porosos.

Deru e Kirkpatrick (2002a) desenvolveram um modelo em elementos finitos para a análise do transporte de calor e umidade acoplados. Neste modelo são considerados detalhes da condição de contorno atmosférica, incluindo precipitação. Efeitos da precipitação, tipo de solo, profundidade do lençol freático e do congelamento na transferência de calor, a partir da fundação de edificações, foram apresentadados por Deru e Kirkpatrick (2002b). Ilustraram também a dependência da condutividade térmica com o conteúdo de umidade.

Janssen *et al.* (2002) elaboraram uma análise do calor perdido através de um porão e apresentaram como falso um postulado geralmente aceito em simulações de ambientes: o acoplamento de calor e umidade em solos podem ser desprezados para o cálculo do fluxo de calor através da fundação de uma edificação.

Dada a divergência entre alguns autores sobre a influência da umidade e do aspecto multidimensional do piso e solo nos trabalhos acima, decidiu-se analisar o efeito

tridimensional e transiente da transferência acoplada de calor e umidade em solos sob edificações.

Deste modo, primeiramente, descreve-se um modelo matemático aplicável a estudos de comportamento térmico de ambientes. Utiliza-se uma abordagem global para a modelagem do ambiente e multicamadas em diferenças finitas para o envoltório, teto e piso da edificação. O modelo é capacitivo de forma a permitir uma análise mais precisa em regime transiente para temperatura e umidade do ar quando o ambiente está submetido a fatores climáticos. Para avaliação de parâmetros termofísicos do modelo, escreveu-se um programa em C, o qual inclui infiltração de ar, cargas de condução, ganhos internos de pessoa, iluminação e equipamentos, além de radiação solar. Mostram-se, na seção de resultados, a influência do passo de tempo na temperatura e umidade interna e em perfis de temperatura no envoltório da edificação.

Em seguida, procurou-se analisar e comparar em termos de temperatura e de umidade interna de um ambiente, diferentes métodos numéricos para integração das equações governantes no domínio do ar, uma vez que simulações de ambientes são realizadas de forma transiente durante períodos que podem ter a duração superior a um ano. Utilizou-se o mesmo ambiente descrito anteriormente, adotando-se uma formulação do tipo global tanto para temperatura como para massa de vapor d´água.

Na seqüência deste trabalho, aperfeiçoou-se um modelo para o transporte puro de calor por condução através do solo, analisando a sua influência no ambiente em estudo. A difusão de calor através dos envoltórios e do solo, no presente modelo, é calculada pela lei de Fourier através do método das diferenças finitas. Para o solo, consideram-se três abordagens. Em uma primeira análise, adota-se um modelo unidimensional, comparando-o, na seqüência, com modelos bidimensional e tridimensional. A validação do modelo puramente condutivo e a utilização de uma formulação global para o balanço de massa e de energia para ar interno ao ambiente foram realizadas via o software comercial CFX-5.

No final, analisou-se a influência da umidade na transferência de calor e massa através do piso e solo sob o mesmo ambiente. Para esta análise, primeiramente verificou-se o período de pré-simulação necessário para reduzir os efeitos das condições iniciais e a influência do passo de tempo e do tamanho da malha para o domínio do solo com umidade. A metodologia apresentada é baseada na teoria de Philip e De Vries (1957), utilizando-se as propriedades

termofísicas para dois tipos de solos descritas por Freitas (1995) e para o piso (reboco) descritas por Perrin (1985) . As equações governantes são discretizadas em volumes finitos e um modelo 3-D foi utilizado para o solo e piso.

Capítulo 2

Formulação Matemática

Neste capítulo descrevem-se os modelos matemáticos utilizados neste trabalho. Desenvolve-se, primeiramente, um modelo dinâmico para análise do comportamento higrotérmico de um ambiente. Em seguida, descrevem-se diferentes métodos numéricos para integração da equação de balanço de massa e de energia. Aperfeiçoa-se, na seqüência, um modelo para o transporte puro de calor através do solo e piso sob a edificação, incrementando-o, por fim, com um modelo que leva em conta a transferência acoplada de calor e de umidade.

2.1 Formulação para o Domínio do Ar

O presente trabalho utiliza um modelo dinâmico para análise do comportamento higrotérmico de uma sala sem sistema de climatização. Para isto, adota-se uma formulação global tanto para temperatura como para a massa de vapor de água. A Eq. (2.1) descreve o balanço de energia, onde o ambiente é submetido a cargas de condução, convecção, insolação e infiltração,

$$\dot{E}_t + \dot{E}_g = \rho_{ar} c_{ar} V_{ar} \frac{dT_{\text{int}}}{dt}, \tag{2.1}$$

onde:

$\dot{E}_t$ - taxa de transferência de calor que atravessa a superfície de controle do ambiente em estudo *(W);*

$\dot{E}_g$ - taxa de energia gerada no interior do ambiente (pessoas e equipamentos) *(W);*

ρ_{ar} - massa específica do ar (kg/m^3),

c_{ar} - calor específico do ar a pressão constante (*J/kg K*),

V_{ar} - volume do ambiente (m^3),

T_{int} - temperatura interna do ambiente (^oC).

Na parcela $\dot{E}_t$ da equação da conservação de energia, consideram-se as componentes devido à transferência de calor através das paredes (condução), através de vidros (condução e radiação) e através de frestas pelos mecanismos de infiltração. O fluxo por convecção de calor $\dot{Q}(t)$ que atravessa a superfície de controle da sala a ser simulada é calculado pela lei de Newton de resfriamento, como

$$\dot{Q}(t) = h_{\text{int}} A\left[T_n(t) - T_{\text{int}}(t)\right], \tag{2.2}$$

onde h_{int} representa o coeficiente de troca de calor por convecção, *A*, a área de troca, e $T_n(t)$ a temperatura da superfície interna do envoltório da sala. Essa temperatura é obtida através de um balanço de energia, em um volume elementar dentro do material do envoltório, usando a lei de Fourier, como é apresentada pela equação abaixo:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \tag{2.3}$$

Assim, a temperatura *T* mostrada na Eq. (2.3), é a temperatura para um dado volume de controle de uma determinada superfície sólida do envoltório, calculada em função das constantes termofísicas do material: massa específica (ρ), calor específico (*c*) e condutividade térmica (λ).

Do lado externo da sala, as paredes, laje, portas e janelas ficam expostas à radiação solar e à troca de calor por convecção. Desta forma, a condição de contorno da Eq. (2.3) para o lado externo (*x=0*), pode ser expressa matematicamente como

$$-\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{ext}\left(T_{ext} - T_{x=0}\right) + \alpha q_r, \tag{2.4}$$

onde:

$h_{ext}\left(T_{ext} - T_{x=0}\right)$ - troca de calor por convecção (W/m^2),

$\alpha\, q_r$ - radiação solar absorvida (W/m^2),

λ – condutividade térmica ($W/m\,K$).

Do lado interno não há radiação solar e desconsidera-se a radiação entre superfícies internas, pelo fato das temperaturas das superfícies serem muito próximas e de suas emissividades serem baixas. Logo, a condição de contorno para o lado interno (*x=L*) é escrita como

$$\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = h_{\text{int}}\left(T_{\text{int}} - T_{x=L}\right). \tag{2.5}$$

A temperatura $T_{x=L}$ da Eq. (2.5) equivale à temperatura do n-ésimo nó da parede, ou seja, à temperatura $T_n(t)$ necessária para o cálculo de $\dot{Q}(t)$ da Eq. (2.2).

Em uma primeira abordagem, para a análise dos métodos, adotou-se para o piso do ambiente, uma condição de contorno de 1ª espécie, impondo uma temperatura fixa no solo a uma profundidade de 5m. Por outro lado, para o teto, considerou-se uma perda por radiação de onda longa (R_{OL}), de forma que a Eq. (2.4) assumisse a seguinte forma:

$$-\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{ext}\left(T_{ext} - T_{x=0}\right) + \alpha q_r - \left(\varepsilon A\right)_{Teto} R_{OL}, \tag{2.6}$$

onde o termo $(\varepsilon A)_{Teto}$ representa o produto entre a emissividade do teto e a sua área.

Em ASHRAE (1993), encontra-se a formulação para o cálculo do fluxo de calor sensível e latente por infiltração. A formulação para o cálculo do fluxo de calor por insolação (radiação direta e refletida) é adotada conforme modelos de Szokolay (1993), ASHRAE (1993) e Stoecker e Jones (1985).

Para o balanço de massa de vapor de água, considera-se a troca por infiltração e os ganhos como respiração de ocupantes e de geração interna de vapor, resultando na formulação global:

$$\dot{m}_{\inf}\left(W_{ext} - W_{\inf}\right) + \dot{m}_{resp} + \dot{m}_{ger_equip} = \rho_{ar} V_a \frac{dW_{\inf}}{dt}, \qquad (2.7)$$

onde:

$\dot{m}_{\inf}$ - vazão mássica de ar por infiltração através de portas e janelas (*kg/s*),

W_{ext} - umidade absoluta externa (*kg de água/kg de ar seco*),

$W_{\inf}$ - umidade absoluta interna (*kg de água/kg de ar seco*),

$\dot{m}_{resp}$ - vazão mássica de água através da respiração dos ocupantes (*kg/s*),

$\dot{m}_{ger_equip}$ - vazão mássica de vapor gerado internamente (*kg/s*),

ρ_{ar} - massa específica do ar (*kg de ar seco/m³*),

V_a - volume do ambiente (m^3).

O fluxo de massa de água proveniente da respiração de indivíduos é calculado através de formulação apresentada em ASHRAE (1993), onde leva-se em conta a temperatura do ar interno, a umidade absoluta interna, a área do corpo do indivíduo e a sua atividade física desenvolvida no ambiente em estudo.

2.2 Análise do Método Numérico de Integração no Tempo para o Domínio do Ar

Com base em alguns trabalhos relacionados ao desenvolvimento de software de simulação, observou-se que a utilização de um método numérico para a integração no tempo das equações de conservação de energia e de massa para o domínio do ar, pode gerar dúvidas em relação ao método mais apropriado, seja pela sua robustez, precisão ou tempo de simulação.

Da mesma forma, muitos problemas físicos em engenharia são descritos em forma de variação através das equações diferenciais. Uma questão importante na solução de um sistema de equações diferencias é a forma em que a variável independente, neste caso o tempo, é tratada. Nos balanços de energia e de massa o tratamento explícito muitas vezes é evitado devido ao pequeno passo de tempo que deve ser adotado para a solução de um problema.

Sabendo-se que as soluções analíticas e as soluções numéricas são equivalentes apenas no limite quando o passo de tempo tende a zero, a escolha de Δt é um compromisso importante entre o tempo de simulação e a precisão do resultado obtido. Entretanto, a utilização de passos de tempo muito pequenos podem ocasionar erros de arredondamentos indesejáveis.

Na análise higrotérmica de um ambiente, Mendes e Santos (2000) propuseram uma abordagem global para o cálculo da temperatura e umidade e resolveram as equações do balanço de energia e massa de forma analítica e iterativa (ou semi-analítica) entre elas. Apesar da robustez apresentada por este procedimento, ele pode exigir um grande número de iterações dependendo do passo de tempo escolhido e da precisão requerida.

Gerald e Wheatley (1999) destacaram entre os vários métodos para a solução de equações diferenciais ordinárias, o método de Euler e Euler modificado. Nestes dois métodos a integração no tempo é feita de maneira explícita.

Cláudio e Marins (1994) apresentaram o modelo para a solução de um sistema de equações diferenciais através do método explícito de Euler, obtendo deste modo variáveis como a temperatura e umidade simultaneamente.

Valores de temperatura e umidade podem também ser obtidos simultaneamente, de forma analítica, através da resolução das equações governantes por pacotes matemáticos

como o software comercial Matlab, conforme ilustrado em Hanselman e Littlefield (1999); entretanto, obtém-se expressões de grande tamanho, tornando-se longa a execução do cálculo.

Desta forma, métodos de integração das equações diferenciais governantes – correspondentes as equações de balanço de massa e de energia – são analisados e discutidos nesta seção.

2.2.1 Integração no Tempo

As equações diferenciais (2.1) e (2.7) correspondentes ao domínio do ar, podem ser respectivamente escritas como:

$$\frac{dT_{\text{int}}}{dt} = aT_{\text{int}} + bW_{\text{int}} + c\,, \tag{2.8}$$

e

$$\frac{dW_{\text{int}}}{dt} = eT_{\text{int}} + fW_{\text{int}} + g\,, \tag{2.9}$$

onde *a*, *b*, *c*, *e*, *f* e *g* são constantes relacionadas ao balanço de energia e de massa.

Para resolver as duas equações acima através de métodos numéricos, utilizou-se primeiramente o método simples de Euler explícito, obtido através da utilização dos dois primeiros termos da série de Taylor.

Neste método, calculam-se inicialmente a temperatura e a umidade no instante ${}^{n+1}t$ como

$${}^{n+1}T = {}^{n}T + \Delta t \left(\frac{dT}{dt}\right)^{n} \tag{2.10}$$

e

$${}^{n+1}W = {}^{n}W + \Delta t \left(\frac{dW}{dt}\right)^{n}. \tag{2.11}$$

onde cada valor de ${}^{n}T$ e ${}^{n}W$ é obtido através de seus valores calculados anteriormente e no caso de um sistema de equações diferenciais formado pelas variáveis T e W considera-se :

$$\left(\frac{dT}{dt}\right) = f(t,T,W) \tag{2.12}$$

e

$$\left(\frac{dW}{dt}\right) = g(t,T,W) \tag{2.13}$$

obtendo-se a temperatura e a umidade absoluta a partir de

$${}^{n+1}T = {}^{n}T + \Delta t\ f({}^{n}t, {}^{n}T, {}^{n}W), \tag{2.14}$$

$${}^{n+1}W = {}^{n}W + \Delta t\ f({}^{n}t, {}^{n}T, {}^{n}W), \tag{2.15}$$

sendo as Eqs. (2.14) e (2.15) resolvidas simultaneamente.

Neste caso, como o erro global é diretamente proporcional ao passo de tempo Δt, é necessário reduzí-lo a valores muito pequenos para dar estabilidade ao método.

Estabelece-se através do método simples de Euler, a inclinação $\left(\frac{dT}{dt}\right)$ e $\left(\frac{dW}{dt}\right)$ no começo do intervalo para determinar a inclinação da função, o que realmente ocorre somente se a função for linear.

Esta técnica pode ser corrigida através do chamado método de Euler modificado. Neste método corrige-se a inclinação no intervalo considerado através de uma média aritmética entre o começo e o fim da inclinação.

Primeiramente, estima-se o valor de ${}^{n+1}T$ e ${}^{n+1}W$ através do método simples de Euler. Deste modo, utilizam-se estes valores para calcular os valores de ${}^{n+1}\left(\frac{dT}{dt}\right)$ e ${}^{n+1}\left(\frac{dW}{dt}\right)$ fornecendo uma melhor estimativa ou "corrigindo" o valor de ${}^{n+1}T$ e ${}^{n+1}W$, como

$$^{n+1}T = {}^{n}T + \Delta t \left(\frac{\left(\frac{dT}{dt}\right) + {}^{n+1}\left(\frac{dT}{dt}\right)}{2} \right), \tag{2.16}$$

$$^{n+1}W = {}^{n}W + \Delta t \left(\frac{\left(\frac{dW}{dt}\right) + {}^{n+1}\left(\frac{dW}{dt}\right)}{2} \right). \tag{2.17}$$

O sistema de equações para a integração no tempo também pode ser feita de forma analítica e iterativa (ou semi-analítica) como utilizado em Mendes e Santos (2000) e no código DOMUS (Mendes *et al.*, 2001). Neste modelo as equações diferenciais (2.1) e (2.7) são resolvidas individualmente e de forma iterativa entre si, apresentando-se na forma:

$$T_{\text{int}} = \frac{-e^{\frac{-B}{\rho c V}\Delta t}\left(A - BT_{ant}\right) + A}{B} \tag{2.18}$$

e

$$W_{\text{int}} = \frac{e^{\frac{D}{\rho V}\Delta t}\left(C + DW_{ant}\right) - C}{D}, \tag{2.19}$$

onde T_{ant} e W_{ant} são a temperatura e a umidade absoluta na iteração anterior, respectivamente. Para resolver as Eqs. (2.18) e (2.19) simplificam-se as equações da conservação de energia e de massa:

$$A - BT_{\text{int}} = \rho c V \frac{dT_{\text{int}}}{dt}, \tag{2.20}$$

$$C + DW_{\text{int}} = \rho V \frac{dW_{\text{int}}}{dt} \quad , \tag{2.21}$$

onde

$$A = \sum_{i=1}^{n} hA_i T_i + \dot{E}_{gs} + \dot{E}_{gl}(W_{ant}) \quad ,$$

$$B = \sum_{i=1}^{n} hA_i \quad ,$$

$$C = \dot{m}_{\text{inf}} W_{ext} + \dot{m}_{resp}(T_{ant}) + \dot{m}_{ger} \, ,$$

$$D = -\dot{m}_{\text{inf}} \, ,$$

sendo

$\dot{E}_{gs}$ - energia sensível (infiltração + geração) (W),

$\dot{E}_{gl}$ - energia latente (infiltração + geração) (W),

h - o coeficiente de convecção interna ($W / m^2 K$),

A_i - a área de cada superfície do envoltório (m^2) ,

T_i - a temperatura de cada superfície do envoltório (^oC),

n - nº de superfícies.

Ainda, foram obtidas as soluções de equações diferenciais formadas pelas Eqs. (2.8) e (2.9) através do programa Matlab, para as condições iniciais $T_{\text{int}}(0)$ = T0 e $W_{\text{int}}(0)$ = W0. A solução deste sistema permite obter os valores de temperatura e de umidade simultaneamente.

2.3 Efeitos da Transferência Puramente Condutiva de Calor no Solo na Performance Térmica do Ambiente

O problema físico é dividido em três domínios: solo, envoltório da edificação e ar interno. No caso das paredes e do ar interno discutido da seção 2.1, a equação diferencial governante da transferência de calor para um elemento de volume de controle do solo pode ser expressa como

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = -\vec{\nabla}.\vec{q}\ . \tag{2.22}$$

Considerando a lei de Fourier

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T \tag{2.23}$$

e assumindo as propriedades termofísicas constantes (ρ, c, λ), obtém-se para o caso 3-D, a seguinte equação da conservação de energia:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \lambda \nabla^2 T\,, \tag{2.24}$$

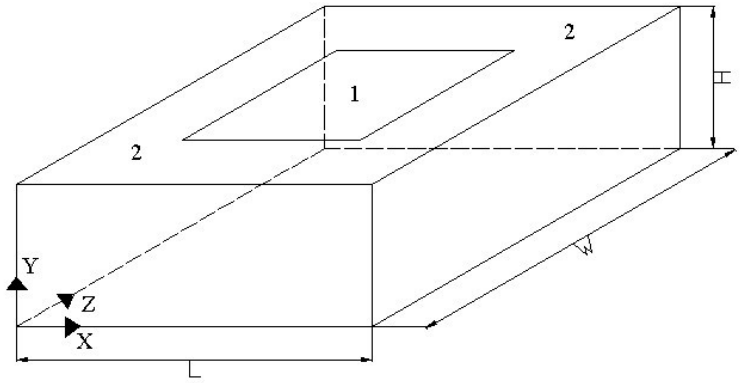

Fig. 2.1: Domínio físico do solo.

A Fig. 2.1 mostra o domínio físico que representa o problema onde a Eq. (2.24) é aplicada. De acordo com a Fig. 2.1, as condições de contorno, para o caso 3-D, podem ser expressas matematicamente como:

Superfície 1: $$\left(\lambda_{piso} \frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=H} = h_{\text{int}}\left(T_{\text{int}} - T_{y=H}\right) + \sum_{i=1}^{n} f_f \varepsilon \sigma (T^4{}_{viz} - T^4{}_{y=H})\,, \tag{2.25}$$

Superfície 2: $$\left(\lambda_{solo} \frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=H} = h_{ext}\left(T_{ext} - T_{y=H}\right) + \alpha\, q_r - \varepsilon\, R_{ol}\ , \tag{2.26}$$

onde

q_r - radiação solar (W/m^2),

α - absortividade do solo,

ε - emissividade do solo,

f_f - fator de forma,

λ_{solo} - condutividade térmica do solo (W/m K),

λ_{piso} - condutividade térmica do piso (W/m K),

σ - constante de Stefan-Boltzmann (W/m^{2}K^4),

R_{ol} - radiação de onda longa (W/m^2).

Entretanto, as outras superfícies mostradas na Fig. 2.1 são consideradas adiabáticas, ou seja:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=W} = \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = 0\,. \tag{2.27}$$

As direções dos eixos X e Y foram mantidas para a análise 2-D e somente o eixo Y para o caso 1-D.

Para o envoltório da construção, incluindo paredes e teto, um modelo 1-D foi considerado para a transferência de calor, assumindo convecção e radiação de onda longa para as superfícies internas, convecção e radiação de onda curta para as superfícies externas.

2.4 Análise 3-D da Transferência de Calor Acoplada com Umidade sob Solos de Edificações

As equações diferenciais parciais governantes para modelar a transferência de calor e umidade em meios porosos são dadas pelas Eqs. (2.28) e (2.29), (Philip e de Vries, 1957). Elas foram derivadas da conservação da massa e da energia em um elemento de volume de um material poroso. A equação da conservação da energia é descrita como:

$$\rho_0 c_m(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(\lambda\ (T,\theta)\nabla T) - L(T)(\nabla.\mathbf{j}_v)\,, \tag{2.28}$$

enquanto que a equação da conservação da massa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla.\mathbf{j} \ , \tag{2.29}$$

onde ρ é a densidade da matriz sólida, c_m, calor específico médio, T, temperatura, t, tempo, λ, condutividade térmica, L, calor latente de vaporização $(= h_{LV})$, θ, conteúdo de umidade em base de volume, $\mathbf{j}$, fluxo total de massa e ρ_l a densidade da água.

Nota-se que a Eq. (2.28) difere da equação da condução para o fluxo de calor transiente devido ao termo fonte responsável pela mudança de fase dentro do meio poroso. De acordo com Philip e De Vries (1957) e assumindo a hipótese de que o solo é um meio isotrópico, o fluxo de vapor é dado por

$$\frac{\mathbf{j}_v}{\rho_l} = -\left(D_{Tv}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta v}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \mathbf{i} - \left(D_{Tv}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial y} + D_{\theta v}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \mathbf{j} - \left(D_{Tv}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial z} + D_{\theta v}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \mathbf{k} \ , \tag{2.30}$$

e o fluxo de líquido por

$$\frac{\mathbf{j}_l}{\rho_l} = -\left(D_{Tl}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta l}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \mathbf{i} - \left(D_{Tl}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial y} + D_{\theta l}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \mathbf{j} - \left(D_{Tl}(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial z} + D_{\theta l}(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial K_g}{\partial z} \right) \mathbf{k} \ . \tag{2.31}$$

Deste modo, define-se o fluxo de massa total $\mathbf{j}$ como $\mathbf{j}_v + \mathbf{j}_l$, resultando

$$\frac{\mathbf{j}}{\rho_l} = -\left(D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \mathbf{i} - \left(D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial y} + D_\theta(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \mathbf{j} - \left(D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial z} + D_\theta(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial K_g}{\partial z} \right) \mathbf{k} \quad , \tag{2.32}$$

onde

$D_T = D_{Tl} + D_{Tv}$ e $D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v}$, onde D_{Tl} é o coeficiente de transporte na fase líquida associado ao gradiente de temperatura, D_{Tv}, é o coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de temperatura, $D_{\theta v}$, é o coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de conteúdo de umidade, D_T, coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de temperatura $\left(m^2/s\,\mathrm{K}\right)$, D_θ, coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de conteúdo de umidade $\left(m^2/s\right)$ e K_g, a condutividade hidráulica *(m/s).*

2.4.1 Condições de Contorno

Para a superfície externa ao ambiente, na equação associada a conservação de energia, considera-se que o solo é exposto a radiação de onda curta, convecção de calor e de massa e mudança de fase. Então, o balanço de energia torna-se:

$$-\left(\lambda(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=H} - \left(L(T) j_v \right)_{y=H} = h\left(T_\infty - T_{y=H}\right) + \alpha q_r + L(T) h_m \left(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=H}\right) - \varepsilon R_{ol} \,, \tag{2.33}$$

onde $h\left(T_\infty - T_{y=H}\right)$ representa o calor trocado com o ar exterior por convecção, αq_r é a radiação absorvida por onda curta, R_{ol} representa a perda por radiação de onda longa e $h_m L(T)\left(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=H}\right)$, é a energia proveniente da mudança de fase. A absortividade solar é definida como α e o coeficiente de convecção de massa como h_m que é relacionado com o *h* através da relação de Lewis.

Para a superfície interna, considera-se o piso exposto a convecção de calor e de massa e mudança de fase:

$$-\left(\lambda(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=H} - \left(L(T)j_v\right)_{y=H} = h\left(T_{\text{int}} - T_{y=H}\right) + L(T)h_m\left(\rho_{v,\text{int}} - \rho_{v,y=H}\right) \quad (2.34)$$

onde $h\left(T_{\text{int}} - T_{y=H}\right)$ representa o calor trocado com o ar interno ao ambiente por convecção, e $h_m L(T)\left(\rho_{v,\text{int}} - \rho_{v,y=H}\right)$ é a energia proveniente da mudança de fase.

O balanço de massa para o solo (externo) é descrito como

$$-\frac{\partial}{\partial y}\left(D_\theta(T,\theta)\frac{\partial \theta}{\partial y} + D_T(T,\theta)\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=H} = \frac{h_m}{\rho_l}\left(\rho_{v,\infty} - \rho_{y=H}\right) \quad (2.35)$$

A mesma equação anterior se aplica para o piso no interior do ambiente, trocando apenas a densidade do vapor no ar externo pela do ar interno. As outras superfícies do domínio, em uma primeira análise, foram consideradas adiabáticas e impermeáveis.

Para simular as condições de chuva e de lençol freático, saturaram-se os nós presentes nas superfícies inferior e superior do solo. Para a chuva desconsiderou-se a camada de filme de água na superfície superior, e no caso do lençol freático, desconsiderou-se qualquer resistência ao fluxo de massa entre os volumes de controle da superfície inferior e a superfície livre da água.

2.4.2 Discretização das Equações Governantes

Representa-se o balanço de energia e de massa para cada nó do domínio em estudo, através da discretização das equações governantes, transformando-as em um sistema de equações algébricas. Este sistema de equações é resolvido utilizando o algoritmo MTDMA, apresentado na seção 2.4.4.

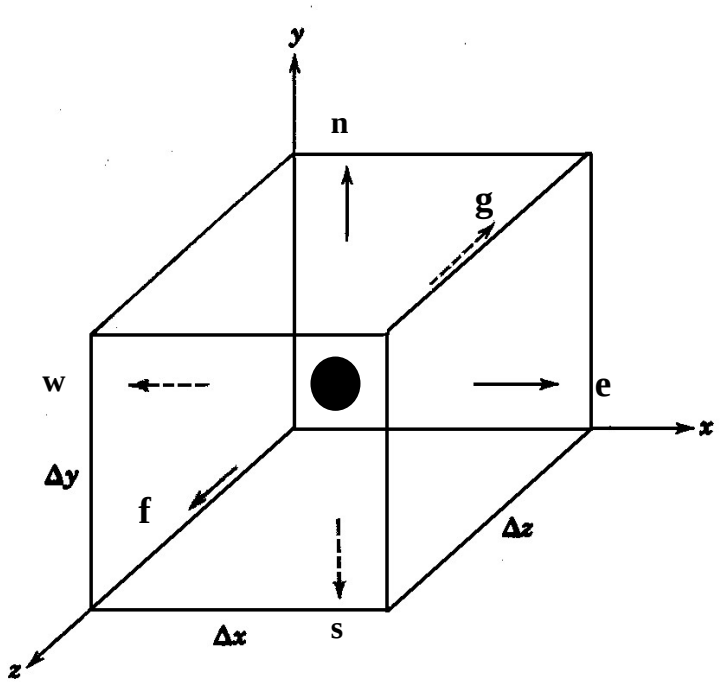

Figure 2.2: Volume de controle elementar do domínio.

A Fig. 2.2 ilustra o volume de controle de um nó no interior do domínio do solo e as letras minúsculas representam as suas fronteiras. Na Fig. 2.3, as letras maiúsculas representam os nós vizinhos, localizados no centro dos seus volumes de controle. Deste modo, os coeficientes de transporte e as propriedades termofísicas são calculados a partir de uma média harmônica na interface dos volumes de controle.

As equações governantes (2.28) e (2.30) foram discretizadas através da técnica dos volumes finitos, proposto por Patankar (1980), utilizando coordenadas cartesianas e um esquema totalmente implícito para a derivada temporal.

A discretização das equações no domínio do tempo e do espaço são realizadas em um intervalo de tempo Δt e ao longo de um elemento de volume, respectivamente.

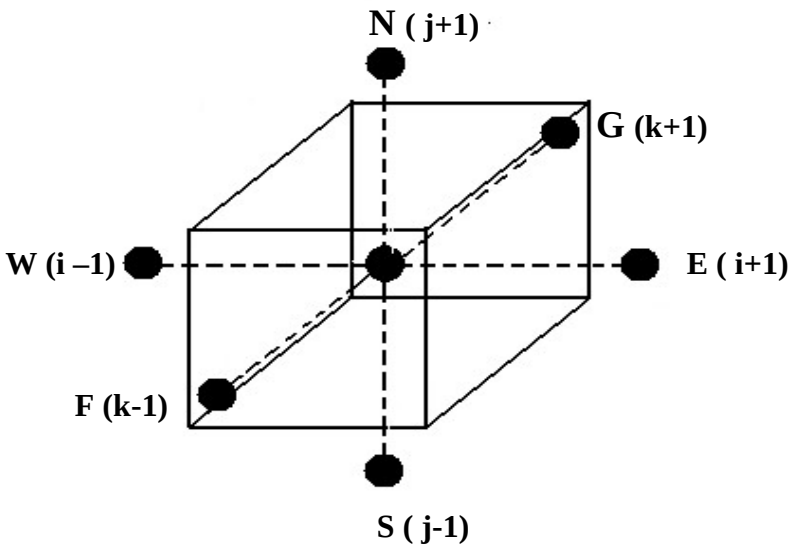

Figure 2.3: Vizinhança do controle elementar do domínio.

Discretizando a equação de conservação de massa para os nós internos, escrita em função dos coeficientes de transporte no modelo tridimensional, visando o uso do MTDMA, tem-se:

$$\left(\frac{1}{\Delta t}+\frac{D_{\theta e}}{\Delta x^2}+\frac{D_{\theta w}}{\Delta x^2}+\frac{D_{\theta n}}{\Delta y^2}+\frac{D_{\theta s}}{\Delta y^2}+\frac{D_{\theta f}}{\Delta z^2}+\frac{D_{\theta g}}{\Delta z^2}\right)\theta_P +$$
$$\left(\frac{D_{Te}}{\Delta x^2}+\frac{D_{Tw}}{\Delta x^2}+\frac{D_{Tn}}{\Delta y^2}+\frac{D_{Ts}}{\Delta y^2}+\frac{D_{Tf}}{\Delta z^2}+\frac{D_{Tg}}{\Delta z^2}\right)T_P=\frac{D_{\theta e}}{\Delta x^2}\theta_E+\frac{D_{Te}}{\Delta x^2}T_E+\frac{D_{\theta w}}{\Delta x^2}\theta_W+\frac{D_{Tw}}{\Delta x^2}T_W+ ,$$
$$\left(\frac{D_{\theta n}}{\Delta y^2}\theta_N^{ant}+\frac{D_{Tn}}{\Delta y^2}T_N^{ant}+\frac{D_{\theta s}}{\Delta y^2}\theta_S^{ant}+\frac{D_{Ts}}{\Delta y^2}T_S^{ant}+\frac{D_{\theta f}}{\Delta z^2}\theta_F^{ant}+\frac{D_{Tf}}{\Delta z^2}T_F^{ant}+\frac{D_{\theta g}}{\Delta z^2}\theta_G^{ant}+\right.$$
$$\left.\frac{D_{Tg}}{\Delta z^2}T_G^{ant}+\frac{\theta_P{}^0}{\Delta t}+\frac{K}{\Delta y}\right)$$

(2.36)

similarmente para a conservação de energia, obtém-se:

$$\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Ve}\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vw}\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vn}\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vf}\Delta x\Delta y}{\Delta z_f}+\right.$$
$$\left.\frac{L\rho_l D_{\theta Vg}\Delta x\Delta y}{\Delta z_g}\right)\theta_P +$$
$$\left(\frac{\rho_0 c_m\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t}+\frac{\lambda_e\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}+\frac{L\rho_l D_{TVe}\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}+\frac{\lambda_w\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}+\frac{L\rho_l D_{TVw}\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}+\right.$$
$$\left.\frac{\lambda_n\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}+\frac{L\rho_l D_{TVn}\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}+\frac{\lambda_s\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}+\frac{L\rho_l D_{TVs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}+\frac{\lambda_f\Delta x\Delta y}{\Delta z_f}+\frac{L\rho_l D_{TVg}\Delta x\Delta y}{\Delta z_g}\right)T_P =$$
$$\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Ve}\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}\right)\theta_E+\left(\frac{\lambda_e\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}+\frac{L\rho_l D_{TVe}\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}\right)T_E+\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vw}\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}\right)\theta_W +$$
$$\left(\frac{\lambda_w\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}+\frac{L\rho_l D_{TVw}\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}\right)T_W +$$
$$\left[\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vn}\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}\right)\theta_N^{ant}+\left(\frac{\lambda_n\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}+\frac{L\rho_l D_{TVn}\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}\right)T_N^{ant}+\right.$$
$$\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}\right)\theta_S^{ant}+\left(\frac{\lambda_s\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}+\frac{L\rho_l D_{TVs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}\right)T_S^{ant}+\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vf}\Delta x\Delta y}{\Delta z_f}\right)\theta_F^{ant}+$$
$$\left(\frac{\lambda_f\Delta x\Delta y}{\Delta z_f}+\frac{L\rho_l D_{TVf}\Delta x\Delta y}{\Delta z_f}\right)T_F^{ant}+\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vg}\Delta x\Delta y}{\Delta z_g}\right)\theta_G^{ant}+\left(\frac{\lambda_g\Delta x\Delta y}{\Delta z_g}+\frac{L\rho_l D_{TVg}\Delta x\Delta y}{\Delta z_g}\right)T_G^{ant}$$
$$\left.+\frac{\rho_0 c_m\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t}T_P{}^0\right]$$

.

(2.37)

Para evitar problemas de estabilidade com o incremento do passo de tempo na discretização dos nós da superfície, linearizou-se a diferença de concentração de vapor entre os nós da superfície e o meio externo (seção 2.4.4), deixando-a em função da diferença de temperatura e de conteúdo de umidade, reforçando, deste modo, a diagonal principal (Mendes *et al.*, 2002).

Deste modo, a equação da conservação da massa para os nós localizados na superfície do domínio, utilizando meio volume de controle, mostra-se:

$$\left(\frac{1}{2\Delta t}+\frac{D_{\theta e}}{2\Delta x^2}+\frac{D_{\theta w}}{2\Delta x^2}+\frac{h_m M_2}{\rho_l \Delta y}+\frac{D_{\theta s}}{\Delta y^2}+\frac{D_{\theta f}}{2\Delta z^2}+\frac{D_{\theta g}}{2\Delta z^2}\right)\theta_P +$$
$$\left(\frac{D_{Te}}{2\Delta x^2}+\frac{D_{Tw}}{2\Delta x^2}+\frac{h_m M_1}{\rho_l \Delta y}+\frac{D_{Ts}}{\Delta y^2}+\frac{D_{Tf}}{2\Delta z^2}+\frac{D_{Tg}}{2\Delta z^2}\right)T_P = \frac{D_{\theta e}}{2\Delta x^2}\theta_E+\frac{D_{Te}}{2\Delta x^2}T_E +$$
$$\frac{D_{\theta w}}{2\Delta x^2}\theta_W+\frac{D_{Tw}}{2\Delta x^2}T_W +$$
$$\left(\begin{array}{l}\frac{D_{\theta s}}{\Delta y^2}\theta_S^{ant}+\frac{D_{Ts}}{\Delta y^2}T_S^{ant}+\frac{D_{\theta f}}{2\Delta z^2}\theta_F^{ant}+\frac{D_{Tf}}{2\Delta z^2}T_F^{ant}+\frac{D_{\theta g}}{2\Delta z^2}\theta_G^{ant}+\frac{D_{Tg}}{2\Delta z^2}T_G^{ant}+\\ \frac{h_m M_1 T\infty}{\rho_l \Delta y}+\frac{h_m M_2 \theta\infty}{\rho_l \Delta y}+\frac{h_m M_3}{\rho_l \Delta y}+\frac{K}{\Delta y}+\frac{\theta_P{}^0}{2\Delta t}\end{array}\right)$$

(2.38)

e para a conservação de energia:

$$\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Ve}\Delta y\Delta z}{\Delta x_e}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vw}\Delta y\Delta z}{\Delta x_w}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vn}\Delta x\Delta z}{\Delta y_n}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vf}\Delta x\Delta y}{\Delta z_f}+\frac{L\rho_l D_{\theta Vg}\Delta x\Delta y}{\Delta z_g}\right)\theta_P +$$

$$\left(\frac{\rho_0 c_m\Delta x\Delta y\Delta z}{2\Delta t}+\frac{\lambda_e\Delta y\Delta z}{2\Delta x_e}+\frac{L\rho_l D_{TVe}\Delta y\Delta z}{2\Delta x_e}+\frac{\lambda_w\Delta y\Delta z}{2\Delta x_w}+\frac{L\rho_l D_{TVw}\Delta y\Delta z}{2\Delta x_w}+Lh_m M_1\Delta x\Delta z+h_c\Delta x\Delta z+\frac{\lambda_s\Delta x\Delta z}{2\Delta y_s}+\frac{L\rho_l D_{TVs}\Delta x\Delta z}{2\Delta y_s}+\frac{\lambda_f\Delta x\Delta y}{2\Delta z_f}+\frac{L\rho_l D_{TVg}\Delta x\Delta y}{2\Delta z_g}\right)T_P =$$

$$\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Ve}\Delta y\Delta z}{2\Delta x_e}\right)\theta_E+\left(\frac{\lambda_e\Delta y\Delta z}{2\Delta x_e}+\frac{L\rho_l D_{TVe}\Delta y\Delta z}{2\Delta x_e}\right)T_E+\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vw}\Delta y\Delta z}{2\Delta x_w}\right)\theta_W +$$

$$\left(\frac{\lambda_w\Delta y\Delta z}{2\Delta x_w}+\frac{L\rho_l D_{TVw}\Delta y\Delta z}{2\Delta x_w}\right)T_W +$$

$$\left[\begin{array}{l}\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}\right)\theta_S^{ant}+\left(\frac{\lambda_s\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}+\frac{L\rho_l D_{TVs}\Delta x\Delta z}{\Delta y_s}\right)T_S^{ant}+\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vf}\Delta x\Delta y}{2\Delta z_f}\right)\theta_F^{ant}+\\ \left(\frac{\lambda_f\Delta x\Delta y}{2\Delta z_f}+\frac{L\rho_l D_{TVf}\Delta x\Delta y}{2\Delta z_f}\right)T_F^{ant}+\left(\frac{L\rho_l D_{\theta Vg}\Delta x\Delta y}{2\Delta z_g}\right)\theta_G^{ant}+\\ \left(\frac{\lambda_g\Delta x\Delta y}{2\Delta z_g}+\frac{L\rho_l D_{TVg}\Delta x\Delta y}{2\Delta z_g}\right)T_G^{ant}+\frac{\rho_0 c_m\Delta x\Delta y\Delta z}{2\Delta t}T_P{}^0+h_c T_\infty\Delta x\Delta z+\\ Lh_m(M_1T_\infty+M_2\theta_\infty+M_3)\Delta x\Delta z+\alpha q_r\Delta x\Delta z-\varepsilon\, Rol\Delta x\Delta z\end{array}\right] \quad (2.39)$$

onde ρ_0 é a densidade da matriz sólida, c_m, calor específico do meio, T, temperatura, t, tempo, λ, condutividade térmica, L, calor latente de vaporização $(=h_{LV})$, θ, conteúdo de umidade em base de volume, ρ_l, densidade da água, ε, emissividade para radiação de onda longa, Rol, radiação de onda longa, o sobrescrito "*ant*" indica que a variável assume o valor da iteração anterior e o sobrescrito "o" indica que a variável assume o valor do passo de tempo anterior.

2.4.3 Interface entre Meios Porosos de Diferentes Higroscopicidades

Primeiramente, levou-se em consideração a interface entre dois materiais de diferentes higroscopicidades utilizando o modelo apresentado por Mendes e Philippi (2002), onde foi utilizado o gradiente de conteúdo de umidade como potencial motriz. Porém, ao utilizar uma

média harmônica para os coeficientes de transporte e para as propriedades termofísicas no sentido do fluxo de energia e de massa para o volume de controle, as equações governantes discretizadas, do modelo tridimensional para o solo, mostraram-se de difícil manipulação algébrica, considerando a tridimensionalidade do problema.

Assim, no intuito de facilitar a discretização das equações governantes e incluir o fenômeno de descontinuidade na interface, considerou-se o domínio apresentado na Fig. 2.4.

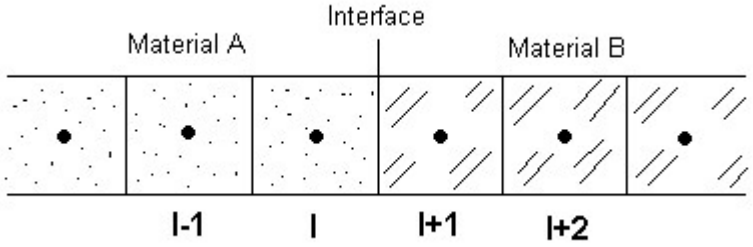

Figura 2.4: Domínio dos volumes de controle antes e após a interface.

A descontinuidade entre os materiais foi considerada no nó à direita, impondo o seu conteúdo de umidade no instante anterior a partir de:

$$\theta_{I+1}^{0} = C_1^{0_ant}\theta_I^0 + C_2^{0_ant} \tag{2.40}$$

onde o sobrescrito *0*, indica no tempo anterior, e o sobrescrito *0_ant*, indica a iteração anterior do passo de tempo anterior.

Os coeficientes $C_1^{0_ant}$ e $C_2^{0_ant}$ apresentados por Mendes e Philippi (2002), são obtidos como

$$C_1^{0_ant} = \frac{\left(\partial\varphi/\partial\theta\right)_I^{0_ant}}{\left(\partial\varphi/\partial\theta\right)_{I+1}^{0_ant}} \tag{2.41}$$

e

$$C_2^{0_ant} = \theta_{I+1}^{0_ant} - C_1^{0_ant}\theta_I^{0_ant} \quad , \tag{2.42}$$

onde φ é a umidade relativa.

2.4.4 Algoritmo Genérico para Resolver as Equações Governantes Altamente Acopladas

Mendes *et al.* (2002) apresentaram um algoritmo genérico, para resolver as equações de transporte de calor e de massa acopladas, mostrando-se altamente robusto, o qual permite calcular as variáveis dependentes simultaneamente, evitando divergências causadas pelo uso de termos calculados em iterações anteriores.

A discretização das equações governantes no domínio físico fornecem as seguintes equações algébricas

$$\mathbf{A}_i.\mathbf{x}_i = \mathbf{B}_i.\mathbf{x}_{i+1} + \mathbf{C}_i.\mathbf{x}_{i-1} + \mathbf{D}_i \tag{2.43}$$

onde ***x*** é um vetor que contém as variáveis dependentes, neste caso

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} \theta_i \\ T_i \end{bmatrix}. \tag{2.44}$$

Diferentemente do tradicional TDMA, os coeficientes *A, B* e *C* são tensores de segunda ordem. O vetor x_i pode ser expresso como função de x_{i+1}

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{P}_i.\mathbf{x}_{i+1} + \mathbf{q}_i \tag{2.45}$$

onde P_i é um tensor de segunda ordem.

Transformando a Eq. (2.45) em x_{i-1} e substituindo na Eq. (2.43), a seguinte equação é obtida

$$\left(\mathbf{A}_i - \mathbf{C}_i.\mathbf{P}_{i-1}\right)\mathbf{x}_i = \mathbf{B}_i.\mathbf{x}_{i+1} + \mathbf{C}_i.\mathbf{q}_{i-1} + \mathbf{D}_i\,. \tag{2.46}$$

Explicitando x_i na Eq. (2.46) obtém-se

$$\mathbf{x}_i = \left[\left(\mathbf{A}_i - \mathbf{C}_i.\mathbf{P}_{i-1}\right)^{-1}.\mathbf{B}_i\right]\mathbf{x}_{i+1} + \left(\mathbf{A}_i - \mathbf{C}_i.\mathbf{P}_{i-1}\right)^{-1}\left(\mathbf{C}_i.\mathbf{q}_{i-1} + \mathbf{D}_i\right) . \tag{2.47}$$

Então comparando as Eqs. (2.47) e (2.45) obtém-se as seguintes expressões recursivas:

$$\mathbf{P}_i = \left[\left(\mathbf{A}_i - \mathbf{C}_i.\mathbf{P}_{i-1}\right)^{-1}.\mathbf{B}_i\right] \tag{2.48}$$

e

$$\mathbf{q}_i = \left(\mathbf{A}_i - \mathbf{C}_i.\mathbf{P}_{i-1}\right)^{-1}\left(\mathbf{C}_i.\mathbf{q}_{i-1} + \mathbf{D}_i\right). \tag{2.49}$$

Deste modo, obtém-se as variáveis dependes varrendo cada linha começando do último nó até o primeiro.

2.4.4 Considerações Matemáticas para a Troca de Vapor entre as Superfícies do Solo e Piso com o Ar

O fluxo de vapor entre a superfície porosa e o ar é normalmente escrito em função da diferença de concentração de vapor - $\Delta\rho_v$ -, no qual o fluxo de vapor é determinado com valores de iterações anteriores de temperatura e conteúdo de umidade, resultando em um termo de instabilidade adicional.

Mendes *et al.* (2002) apresentaram um novo procedimento para calcular o fluxo de vapor, independentemente dos valores da temperatura e de conteúdo de umidade, das iterações anteriores. Para isto, linearizou-se o termo $\Delta\rho_v$ como uma combinação linear da temperatura e do conteúdo de umidade, da seguinte forma:

$$\left(\rho_{v,\infty} - \rho_v(s)\right) = M_1(T_\infty - T(s)) + M_2(\theta_\infty - \theta(s)) + M_3, \tag{2.50}$$

onde

$$M_1 = A\frac{M}{\Re}\phi,$$

$$M_2 = \frac{M}{\Re}\left(\frac{P_s(s)}{T(s)}\right)^{prev}\left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta(s)}\right)^{prev},$$

$$M_3 = \frac{M}{\Re}\left[\left(\frac{P_s(s)}{T(s)}\right)^{prev} R(\theta^{prev}(s)) + \phi_\infty(R(T_\infty) - R(T^{prev}(s)))\right].$$

Capítulo 3

Procedimento de Simulação

Para a análise do transiente higrotérmico de um ambiente desenvolveu-se um código computacional próprio, em linguagem *C*, utilizando as equações do modelo apresentado na seção 2.1. Essas equações foram discretizadas pelo método de diferenças finitas, adotando-se uma distribuição espacial não-uniforme e um esquema totalmente implícito.

Para a simulação numérica, considerou-se um ambiente (Fig.3.1) localizado na cidade de Curitiba-PR, Brasil, com 25 m^2 de área e de 2,5 m de altura, possuindo 1 janela de dimensões (1,5 x 1) m e uma porta de dimensões (0,8 x 2,10) m na fachada frontal do ambiente voltada para o noroeste. Inseriu-se uma segunda janela de (1,5 x 1) m na fachada voltada para o sudoeste. O teto considerou-se plano, formado por laje de concreto.

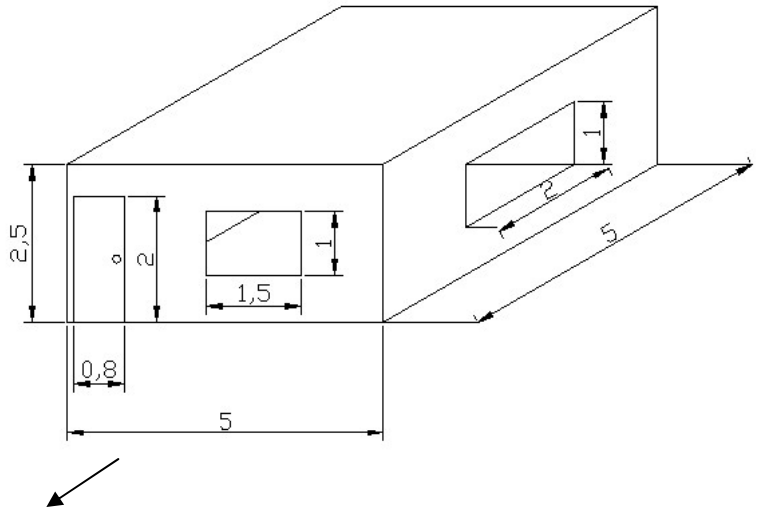

Figura 3.1: Dimensões do ambiente utilizado para a simulação (m).

Para o cálculo de cargas de condução utilizando diferenças finitas, consideraram-se todas as paredes com 0.19 m de espessura e formadas por 3 camadas: argamassa, tijolo e argamassa. As janelas foram consideradas como uma camada simples de vidro e a porta como sendo de madeira maciça, enquanto o piso, formado por uma camada de madeira, concreto e solo.

Distribuiu-se a espessura da parede e do solo e piso ao longo de 21 nós, sendo que na janela e porta utilizaram-se 6 nós. Utilizou-se uma malha não-uniforme, considerando as faces do volume de controle situadas no meio da distância entre os pontos nodais. Adotou-se para a condição de contorno para as superfícies externas das paredes, laje, porta e janelas a troca de calor por convecção e a exposição à radiação solar. No caso das superfícies internas considerou-se além da troca de calor por convecção, a troca por radiação de onda longa entre elas.

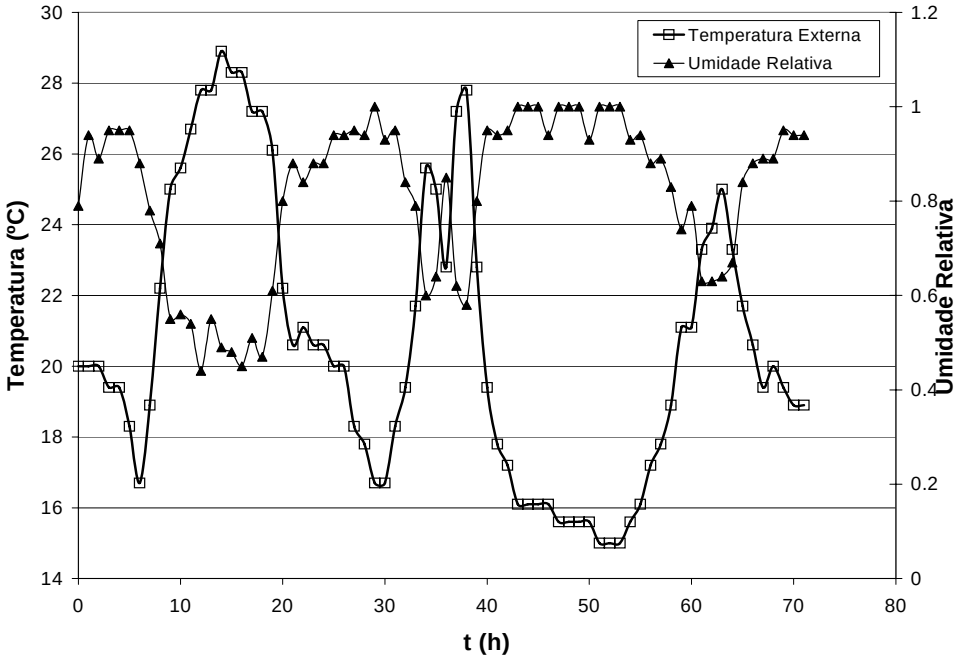

Figura 3.2: Variação temporal da temperatura externa e da umidade relativa para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro

Para a simulação dos ganhos de insolação, utilizaram-se os algoritmos fornecido por Szokolay (1993) para o cálculo dos ângulos de altitude e azimute solar em função da hora do dia. Para as condições externas, utilizou-se o arquivo climático de Curitiba, obtido do

programa UMIDUS (Mendes *et al*., 1999) fornecendo temperatura, umidade relativa, radiação direta e difusa hora a hora.

Na Fig. 3.2, observa-se a variação da temperatura e umidade relativa externa na cidade de Curitiba-PR, durante os três primeiros dias do mês de janeiro. Analisa-se o comportamento oposto da umidade relativa em relação a temperatura, com valores máximos durante a noite, o que é normalmente esperado. A Figura 3.3 ilustra valores de radiação total (difusa mais direta), para esse mesmo período. Neste caso, observam-se valores altos, em torno de 900 W/m^2, ao meio-dia.

Com o objetivo de reduzir as influências das condições iniciais, para a análise do transiente higrotérmico do ambiente, o programa foi submetido a três "pré-simulações" para esses mesmos 3 primeiros dias de janeiro.

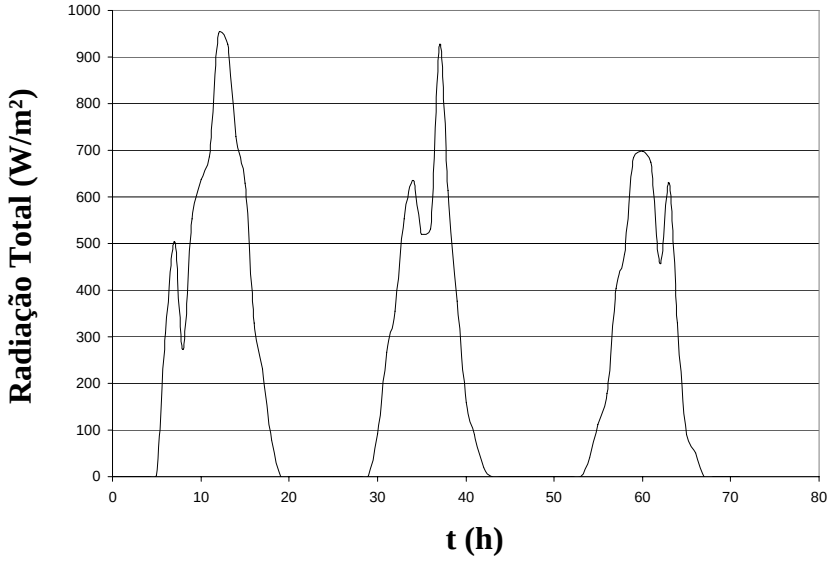

Figura 3.3: Variação temporal da radiação total para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro.

Na análise do método numérico de integração no tempo simulou-se a mesma edificação apresentada na Fig. 3.1, localizada na cidade de Curitiba-PR, Brasil, com a fachada frontal do ambiente voltada para o norte. Utilizou-se para o clima externo, funções seno para temperatura, umidade relativa e radiação solar, como ilustram as Figs. 3.4 e 3.5. Considerou-se a variação senoidal da temperatura durante o dia entre 15º C e 25º C e da umidade externa

entre 50% e 70%. Admitiu-se a variação da radiação total (direta mais difusa) com valores entre 6 e 18 horas, com pico ao meio-dia.

Manteve-se para o ambiente a mesma discretização e condições de contorno. Para a eliminação dos efeitos das condições iniciais, submeteu-se primeiramente o código computacional a uma pré-simulação de 7 dias.

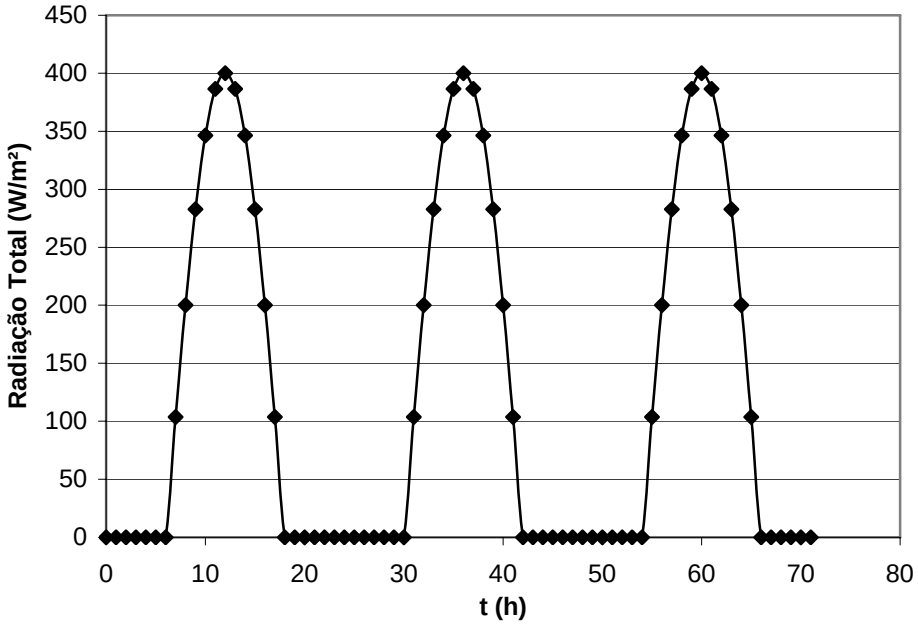

Figura 3.4. Variação temporal da temperatura externa e da umidade relativa no período de 3 dias.

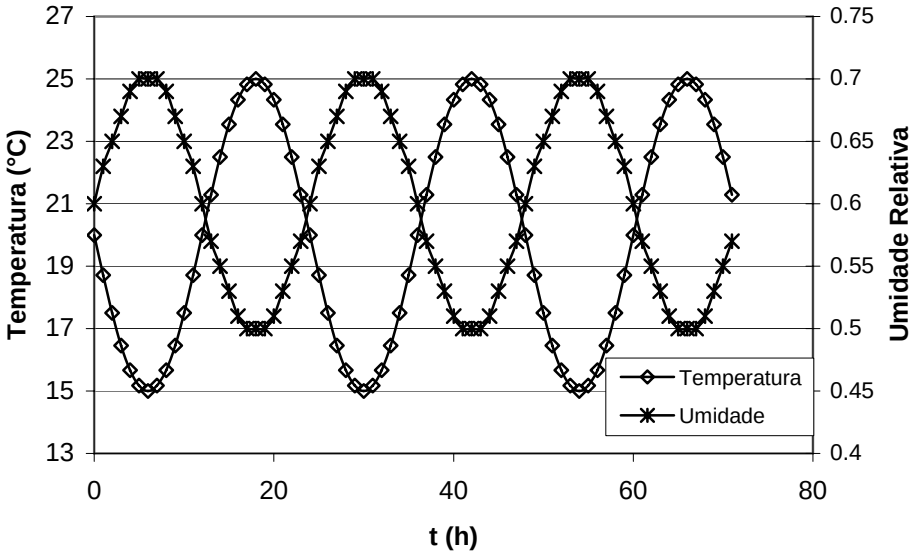

Figura 3.5: Variação temporal da radiação total no período de 3 dias.

Para a análise dos efeitos da transferência pura de calor do solo e piso na performance térmica do ambiente ilustrado na Fig. 3.1, repetiu-se a mesma discretização e condições de contorno para o envoltório da edificação.

No estudo dos aspectos multidimensionais do solo e do piso (Fig. 3.6), utilizou-se nos modelos 1-D, 2-D e 3-D (seção 2.3), uma malha não uniforme subdividida em 0,35 m de concreto e 3,65 m de solo. Consideraram-se constantes as propriedades termofísicas obtidas em Incropera (1992).

No modelo tridimensional (Fig. 3.6), o efeito do sombreamento no solo não foi considerado. Adotou-se, para os modelos 2-D e 3-D, a radiação solar incidindo no lado leste até o meio-dia, e no lado oeste, do meio-dia até as 18 horas. Considerou-se para o lado norte, a radiação solar incidindo durante todo o dia, e para o sul, em nenhum momento.

Utilizou-se, no modelo 1-D, 21 nós, sendo que nos modelos 2-D e 3-D, 441 e 9.261 nós, respectivamente.

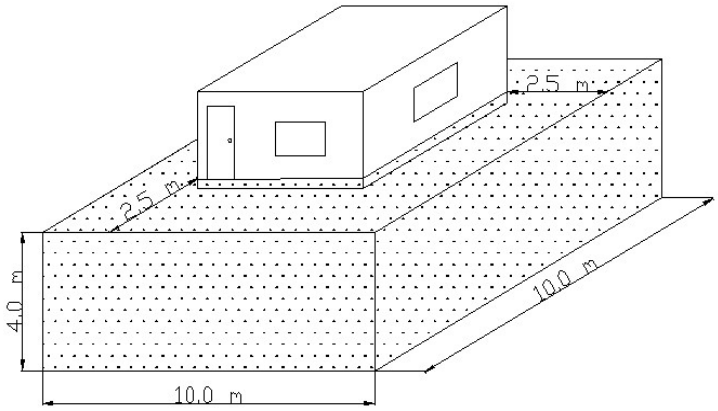

Figura 3.6: Dimensões do domínio do solo e do piso utilizados na simulação numérica (condução pura).

Na análise 3-D da transferência acoplada de calor e de massa no solo, primeiramente verificou-se o período de pré-simulação necessário para reduzir os efeitos das condições iniciais e a influência do passo de tempo e do tamanho da malha para o domínio do solo com

umidade (seção 4.6). Nesta seção considerou-se o solo do tipo aluvião-arenoso, submetendo-o ao arquivo climático da cidade de Curitiba.

Para verificar os efeitos do solo e do piso na edificação (Fig. 3.7), levando-se em conta a transferência acoplada de calor e massa, utilizou-se para as condições externas uma temperatura média anual de 20°C, com uma variação diária de 5°C. Para os valores de pico considerou-se uma variação anual de 5°C (Eq. 3.1).

$$T_{ext} = 20 + 5\,\mathrm{sen}\left(\pi + \frac{\pi\ t}{31536000}\right) + 5\,\mathrm{sen}\left(\pi + \frac{\pi\ t}{43200}\right) . \tag{3.1}$$

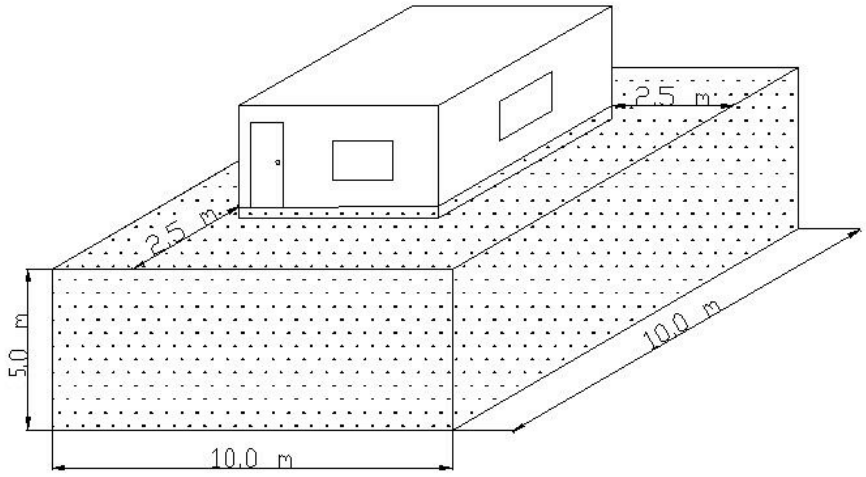

Figura 3.7: Dimensões do domínio do solo e do piso.

Considerou-se para a umidade relativa externa (Eq. 3.2) um valor médio diário de 60 % com uma variação diária de 10%. Esta variação considerou-se constante ao longo do ano.

$$UR_{ext} = 0.60 - 0.10\,\mathrm{sen}\left(\pi + \frac{\pi\ t}{43200}\right) . \tag{3.2}$$

Para a radiação direta e difusa considerou-se uma variação diária de 300 (W/m²) com uma variação de pico anual de 100 (W/m²), conforme a Eq. (3.3).

$$q_{rad} = 300 + 100\,\mathrm{sen}\left(\pi + \frac{\pi\ t}{31536000}\right)\mathrm{sen}\left(\frac{3\ \pi}{2} + \frac{\pi\ t}{43200}\right). \tag{3.3}$$

Admitindo a utilização de períodos de pré-simulação e simulação superiores a um ano, o uso de uma malha muito refinada para o domínio solo ocasionaria um tempo de processamento muito alto. Deste modo, utilizou-se uma malha não uniformemente distribuída com 9261 nós para o domínio do solo.

Para um período de pré-simulação de dois anos, utilizou-se um passo de tempo de 1 hora, sendo que para o período de simulação de 1 mês adotou-se um passo de tempo de 100 s.

Capítulo 4

Resultados

Apresentam-se neste capítulo, os resultados obtidos através da análise do transiente higrotérmico de um ambiente, utilizando passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s. Para esta análise, adotou-se uma formulação global para o balanço de energia e de massa no ambiente.

Na análise numérica de integração no tempo das equações governantes, são apresentadas comparações entre os quatro métodos: Euler, Euler modificado, semi-analítico apresentado por Mendes e Santos (2000) e o fornecido pelo software Matlab.

Apresenta-se na seção 4.3, a importância do aspecto multidimensional do solo e do piso na temperatura interna da edificação, e por fim, analisa-se a influência da transferência acoplada de calor e de umidade através do solo e do piso na performance térmica da edificação.

4.1 Análise do Transiente Higrotérmico de um Ambiente

A linearização da derivada temporal da temperatura, para a solução da Eq. (2.3) (condução de calor em regime transiente) pelo método de diferenças finitas, acarreta erros quando se simula o comportamento térmico de edificações, pois normalmente, o intervalo de tempo desejado é de 1 ano. Assim, a maioria dos programas de simulação que utiliza tanto o método do fator de resposta como o método de diferenças finitas ou volumes finitos, adota passos de tempo de 1h.

Desta forma, analisa-se, preponderantemente nesta seção, a sensibilidade do transiente higrotérmico de ambientes ao passo de tempo de simulação, adotando-se para o solo e o piso, um modelo unidimensional (seção 2.1).

Nas Figs. 4.1 e 4.2, observam-se as variações de temperatura interna e de umidade relativa do ambiente com os respectivos passos de tempo (*dt*) para a simulação. No caso da temperatura, verifica-se uma variação de até 4 ºC para os picos de temperatura e de 2 ºC para os valores de mínimo (vales). Para a umidade relativa, nota-se, pela Fig. 4.2, uma variação de até 10% .

As altas temperaturas mostradas na Fig. 4.1, devem-se ao fato da troca de ar com o ambiente externo, ser feita apenas por infiltração pelas frestas de porta e janelas consideradas. Temperaturas ainda maiores são atingidas quando é inserida uma geração de energia no ambiente. Tais temperaturas são verificadas na Fig. 4.3, onde adotou-se uma geração interna, típica de escritórios, de 40 W/m^2 para o ambiente.

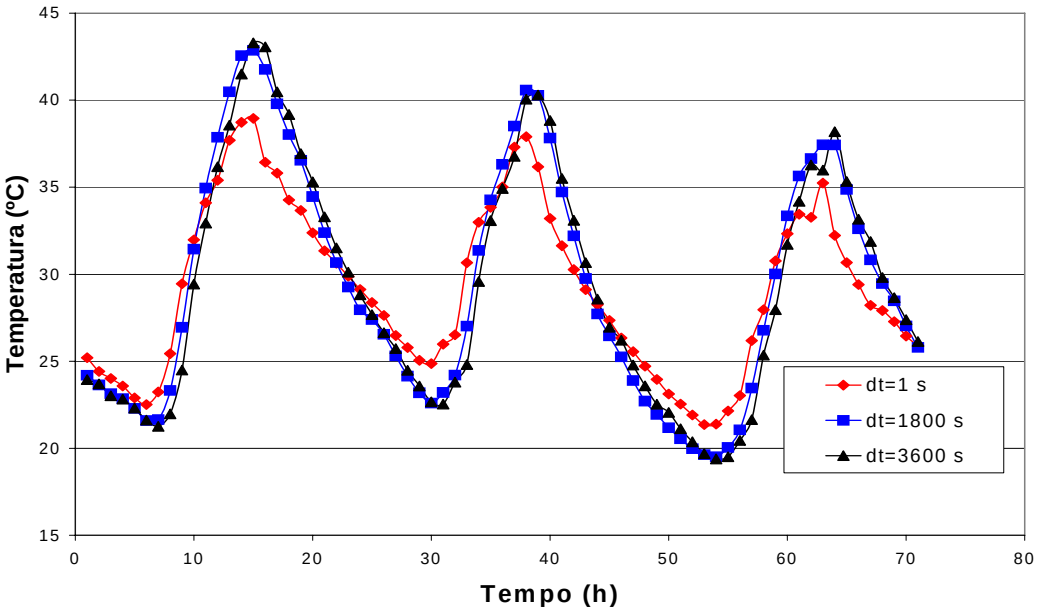

Figura 4.1: Variação temporal da temperatura interna do ambiente em Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s.

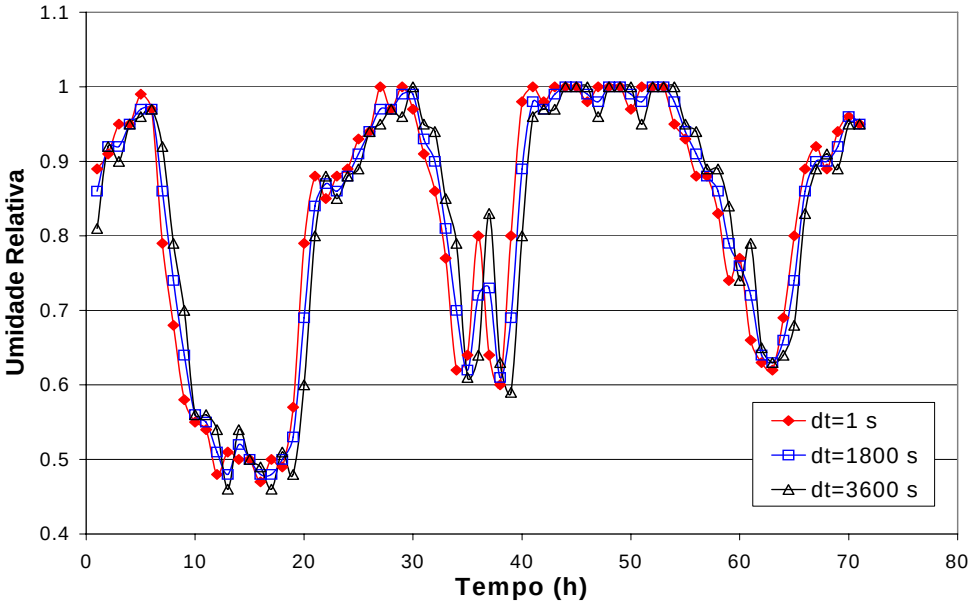

Figura 4.2: Variação temporal da umidade relativa interna do ambiente em Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s.

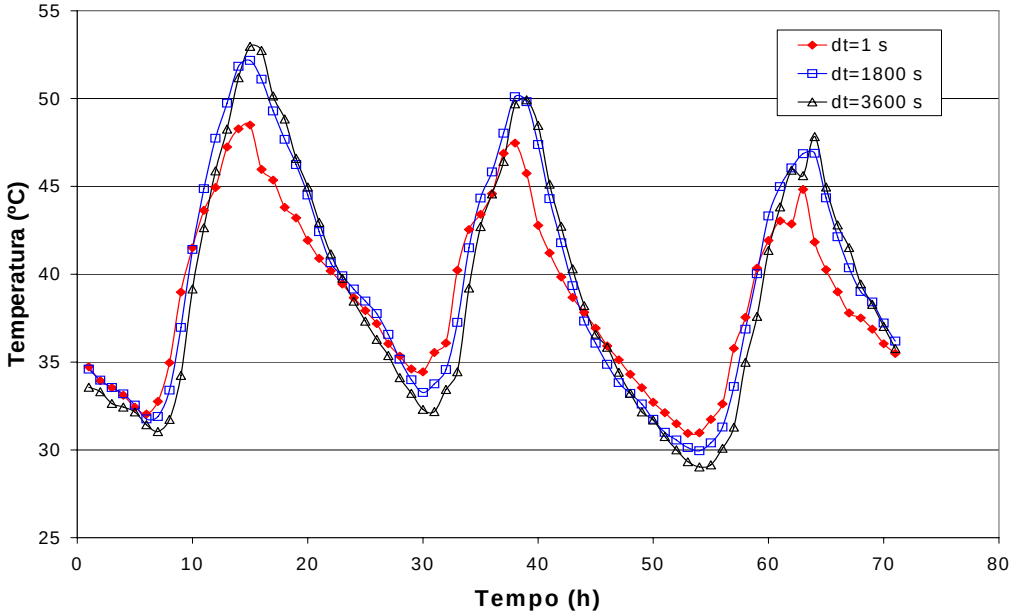

Figura 4.3: Variação temporal da temperatura interna do ambiente para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s, com uma geração interna de energia de 1000 W.

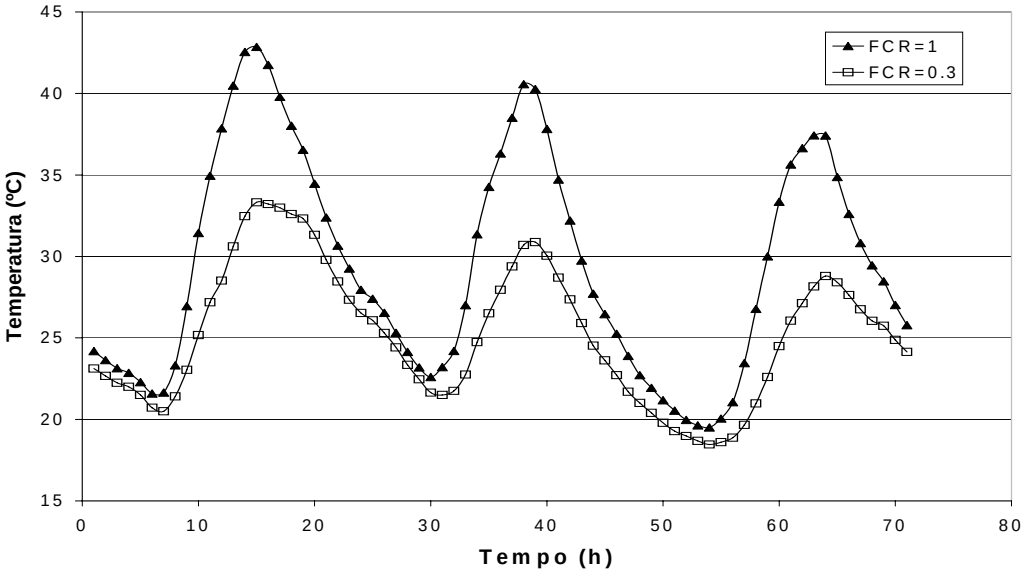

Figura 4.4: Efeito do fator de carga de refrigeração (FCR) na variação temporal da temperatura interna do ambiente para Curitiba no período de 1° a 3 de janeiro para um passo de tempo de 1800 segundos.

Outro fator importante para as altas temperaturas apresentadas na Fig.4.3, deve-se ao fluxo de energia por radiação que atravessa as janelas, pois está sendo considerado como ganho de energia instantâneo para o ambiente. Tal efeito pode ser observado na Fig. 4.4, de onde um fator de ponderação (FCR) de 30% foi adotado no ambiente. Neste caso, observa-se uma variação de temperatura de aproximadamente 10ºC para os picos de temperatura.

A Fig. 4.5 apresenta o perfil de temperatura na parede frontal, às 15 horas no dia 3 de janeiro. Nota-se, pela Fig. 4.5, uma discrepância considerável entre os perfis de temperatura para passos de tempo de 1, 1800 e 3600 s, numa parede bem ensolarada (direção noroeste às 15h). Esta discrepância é responsável, em grande parte, pela diferença de temperatura encontrada nas figuras acima e na umidade relativa, pois esta é uma função da temperatura. Notou-se com este estudo que quanto maior for a incidência de energia sobre o envoltório da edificação, maior será o erro devido à adoção de passos de tempo da ordem de 1h.

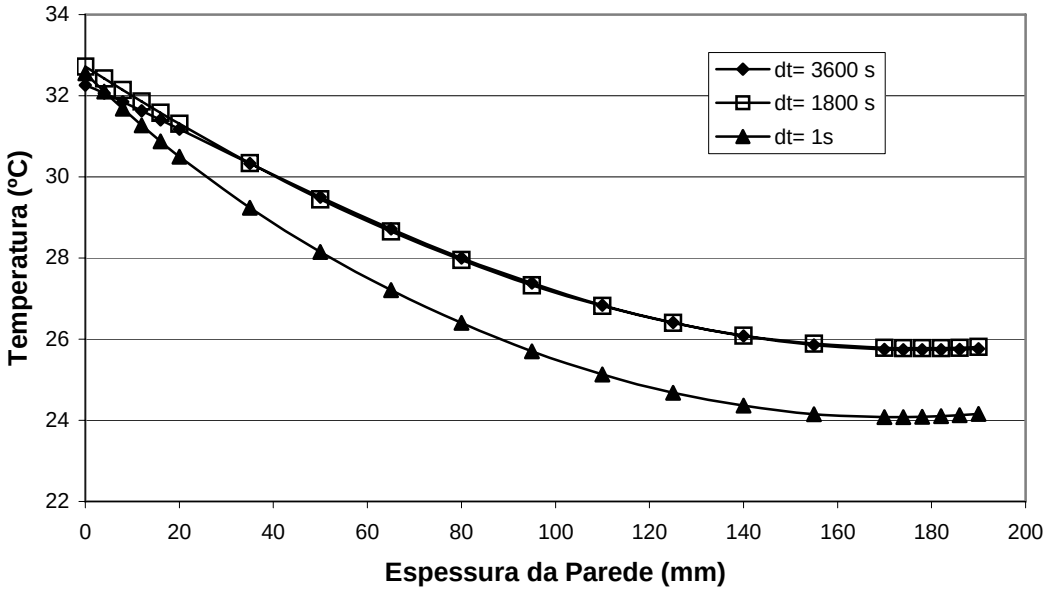

Figura 4.5: Perfil de temperatura na parede frontal do ambiente.

É importante ressaltar que a adoção de passos de tempo diferentes de 1h, implica em interpolações lineares dos valores lidos no arquivo climático em questão, adicionando erros à estimativa de perfis de temperatura. No entanto, isso é inevitável, pois não há arquivo de dados, até então, que forneçam dados climáticos em intervalos inferiores a 1h.

4.2 Integração no Tempo

Considerando os modelos apresentados na seção 2.2, comparou-se na Fig. 4.6 a temperatura interna do ambiente, utilizando o método semi-analítico com um passo de tempo de 100 s e 3600 s, o método simples de Euler com um passo de tempo de 0,25 s como referência e o simulado através das equações fornecidas pelo Matlab para o cálculo da temperatura e umidade absoluta com um passo de tempo de 100 s e 3600 s.

A diferença de temperatura superior a 4º C entre os passos de tempo utilizados no método semi-analítico deve-se a linearização da derivada temporal através do método das diferenças finitas utilizadas no cálculo da temperatura do envoltório da edificação.

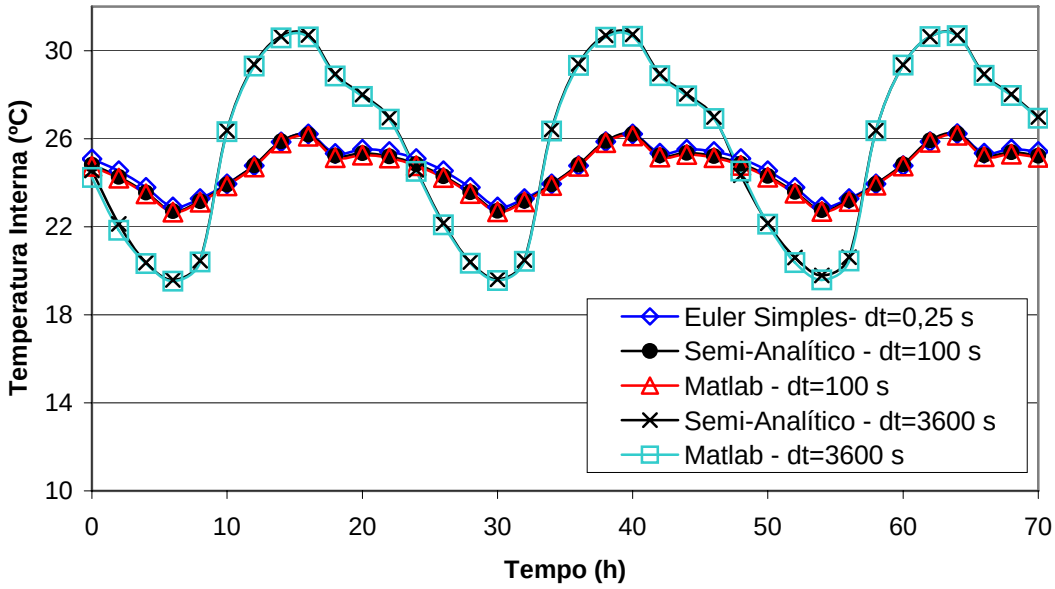

Figura 4.6: Temperatura interna do ambiente variando o método numérico e o passo de tempo.

Para estabilidade do método simples de Euler (Figs. 4.6 e 4.7) e o método de Euler modificado (Fig. 4.7), utilizou-se um passo de tempo máximo de 0,25 s. A proximidade entre os valores obtidos pelo método semi-analítico e os outros 3 métodos (Euler simples, Euler modificado e Matlab) observados na Fig. 4.7, induz a utilização de um passo de tempo de 0,25 s para a redução de erros, porém inviável em grandes períodos de simulação, como por exemplo, de 1 ano.

Atribui-se as descontinuidades observadas no formato da senóide das Figs. 4.6 e 4.7 aos efeitos da radiação total incidente no ambiente, considerado como ganho instantâneo no balanço de energia.

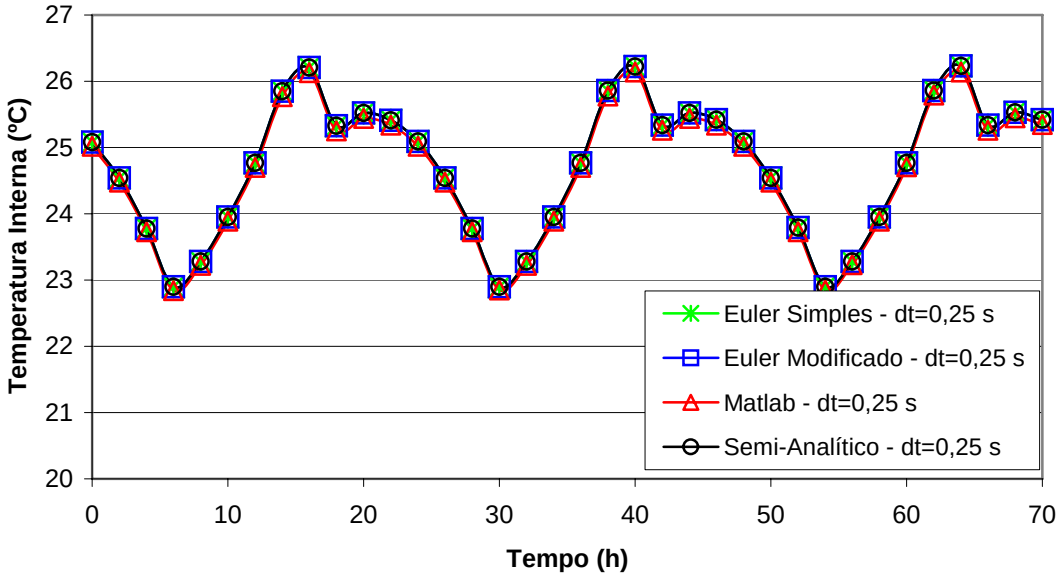

Figura 4.7: Temperatura interna do ambiente variando o método numérico e o passo de tempo.

A Tab. 4.1 indica o tempo de simulação para um período de 10 dias utilizando um passo de tempo de 0,25 s. Devido ao tamanho das equações obtidas para o cálculo da temperatura e umidade, observou-se que entre os métodos, o Matlab utilizou o maior tempo de simulação.

Tabela 4.1. Tempo de simulação para os diferentes métodos numéricos.

Método	Tempo de Simulação
Semi-Analítico	12’ 35”
Euler Simples	12’ 25”
Euler Modificado	12’ 25”
Matlab	18’ 00”

Comparando-se o método semi-analítico e o fornecido pelo Matlab, observou-se um período de simulação de 8,4 s e 9,6 s, respectivamente, para um período de 1 ano de simulação e um passo de tempo de 3600 s.

Mostra-se na Fig. 4.8 a umidade relativa interna calculada através dos diversos métodos numéricos. Semelhantemente a temperatura, observou-se proximidade entre os resultados quando submetidos a um passo de tempo de 0,25 s. A influência da temperatura no cálculo da umidade é ilustrado através da variação do passo de tempo. Observa-se uma variação de até 10 % entre os valores de pico.

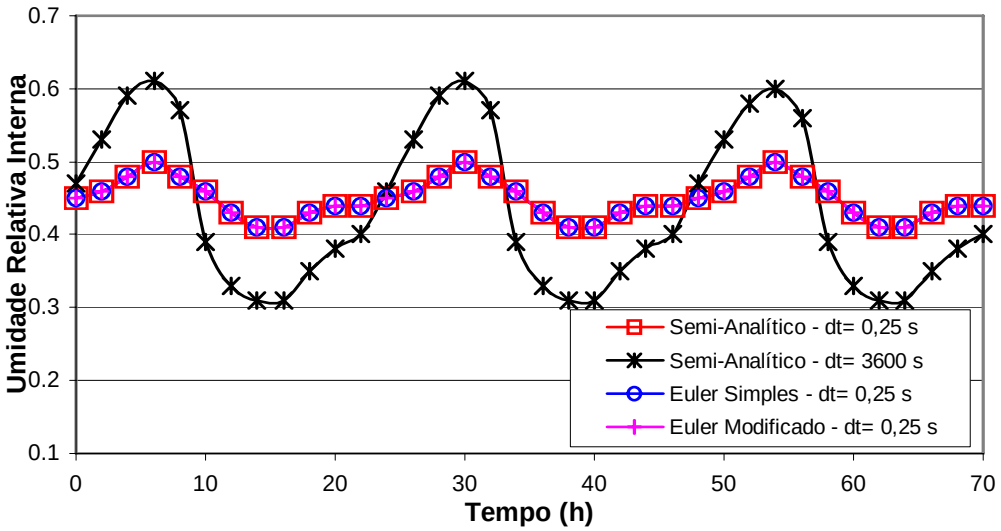

Figura 4.8: Umidade relativa interna do ambiente variando o método numérico e o passo de tempo.

4.3 Efeitos da Transferência Pura de Calor para o Solo na Performance Térmica do Ambiente

Observa-se na Fig. 4.9, a evolução da temperatura do ar do ambiente durante um período de 72 horas. Para a elaboração da Fig. 4.9, submeteu-se o código a uma pré-simulação de 30 dias para evitar os efeitos das condições iniciais impostas ao programa.

Verificou-se na Fig. 4.9 uma diferença máxima de aproximadamente 5 °C na temperatura interna, durante o dia. A similaridade dos resultados a partir dos modelos 2-D e 3-D é principalmente atribuída ao fato da radiação solar ter sido desprezada, neste caso.

Apresenta-se na Fig. 4.10, a distribuição da temperatura ao longo do domínio do solo ao meio-dia. As altas temperaturas observadas na superfície do solo, no lado esquerdo, foram atribuídas a radiação solar, incidente até o meio-dia no lado leste da edificação. Verificou-se na Fig. 4.10 que a distribuição da temperatura concentrou-se ao longo do perímetro da

edificação, como previamente observado por Bahnfleth (1989), e não ao longo de uma direção vertical como tratado no modelo de transferência de calor 1-D.

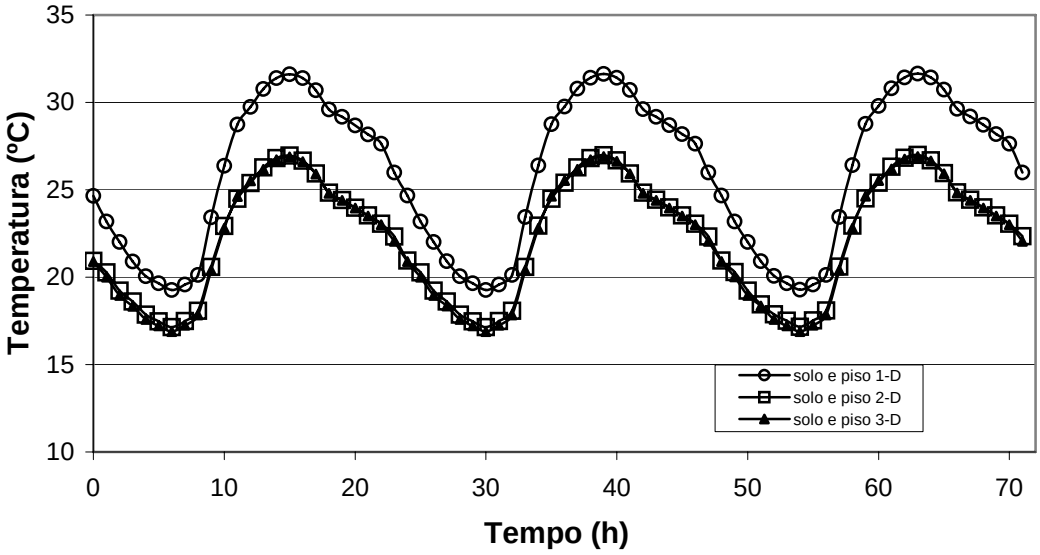

Figura 4.9: Evolução da temperatura do ambiente (sem radiação solar).

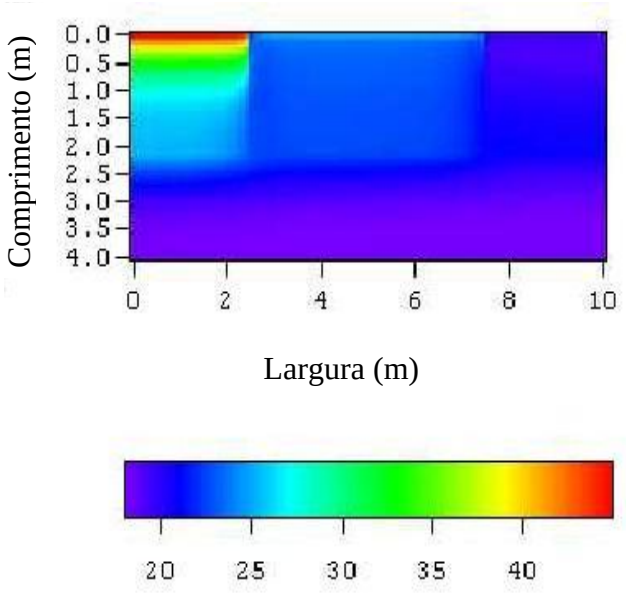

Figura 4.10: Distribuição da temperatura no solo e piso ao meio-dia, utilizando um arquivo climático senoidal para o modelo 2-D.

Verificou-se o efeito da radiação solar na Fig. 4.11, principalmente para o modelo 2-D. Observou-se uma variação máxima de 2 °C em comparação com os resultados da Fig. 4.10. Atribuiu-se o incremento da temperatura ao fluxo de calor proveniente da superfície externa, exposta a radiação solar, como observado na Fig. 4.10.

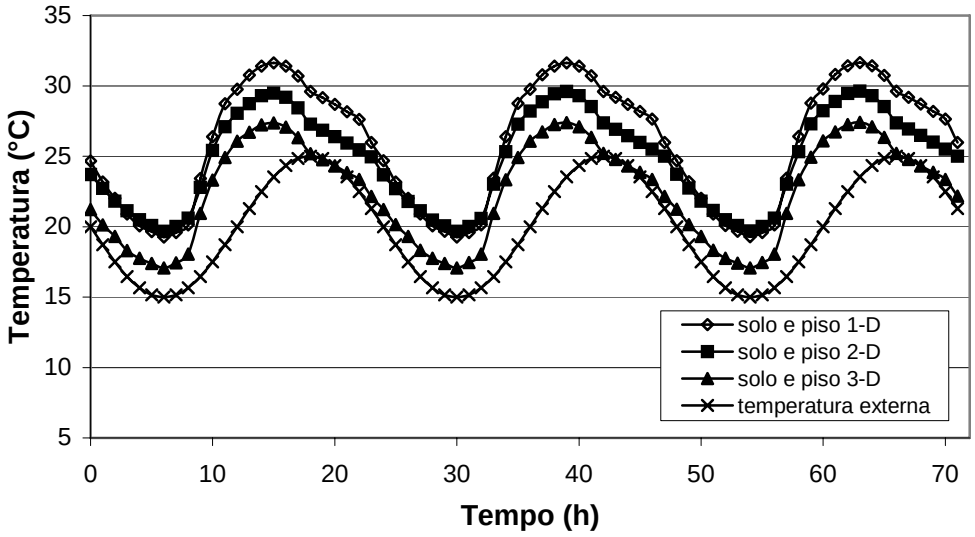

Figura 4.11: Evolução da temperatura do ambiente (com radiação solar).

Nas Figs. 4.12 e 4.13 verificaram-se as temperaturas da superfície do solo e do piso da edificação, ao meio-dia e às 18 horas. Considerou-se a radiação solar incidindo no lado leste da edificação até o meio-dia, e no lado oeste, do meio-dia até as 18 horas. No lado norte, considerou-se a radiação solar durante todo o dia, ao contrário do lado sul, na qual a superfície não foi exposta a radiação solar. Estas condições foram consideradas próximas das condições reais que ocorrem na cidade de Curitiba (latitude = -25.4°), Brasil, durante quase todo o ano.

Ignoraram-se os efeitos de sombreamento sobre o solo nestas simulações e a absortividade do solo para onda curta foi considerada igual a 1.

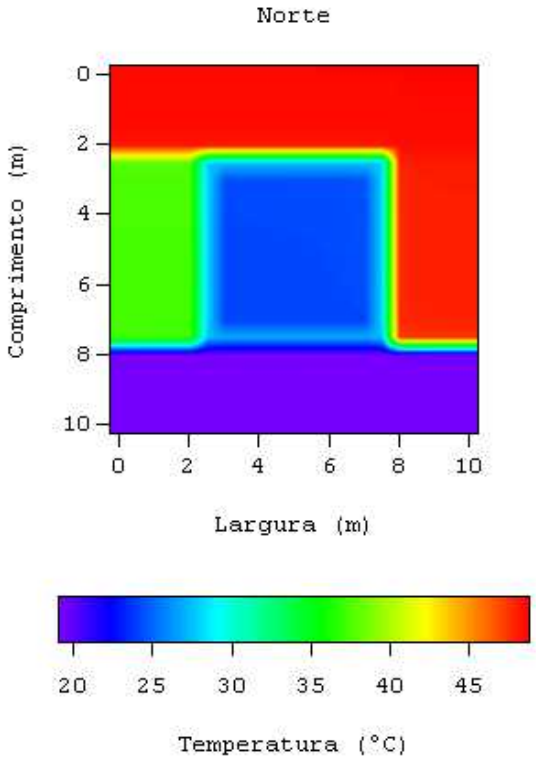

Figura 4.12: Distribuição da temperatura na superfície do solo e do piso ao meio-dia (modelo 3-D).

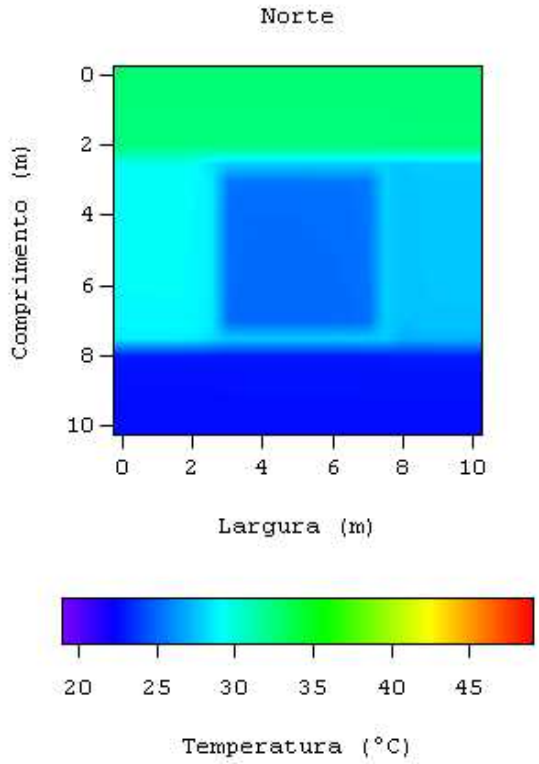

Figura 4.13: Distribuição da temperatura na superfície do solo e do piso às 18 horas (modelo 3-D).

Ilustra-se na Fig. 4.14 a evolução do calor perdido (ou ganho) através do solo, calculado através dos modelos 1-D e 3-D. Para simular uma condição de inverno (situação mais crítica), considerou-se uma função seno variando entre –5 °C e 5 °C, diariamente, para representar a temperatura externa. Para a segunda comparação apresentada na Fig. 4.14, considerou-se uma temperatura constante interna para o ambiente de 22 °C.

Na Fig 4.14, observou-se um alto fluxo de calor quando considerou-se para a simulação do programa, o modelo 1-D para um ambiente não climatizado, resultando em uma maior temperatura para o ambiente como apresentado na Fig. 4.11.

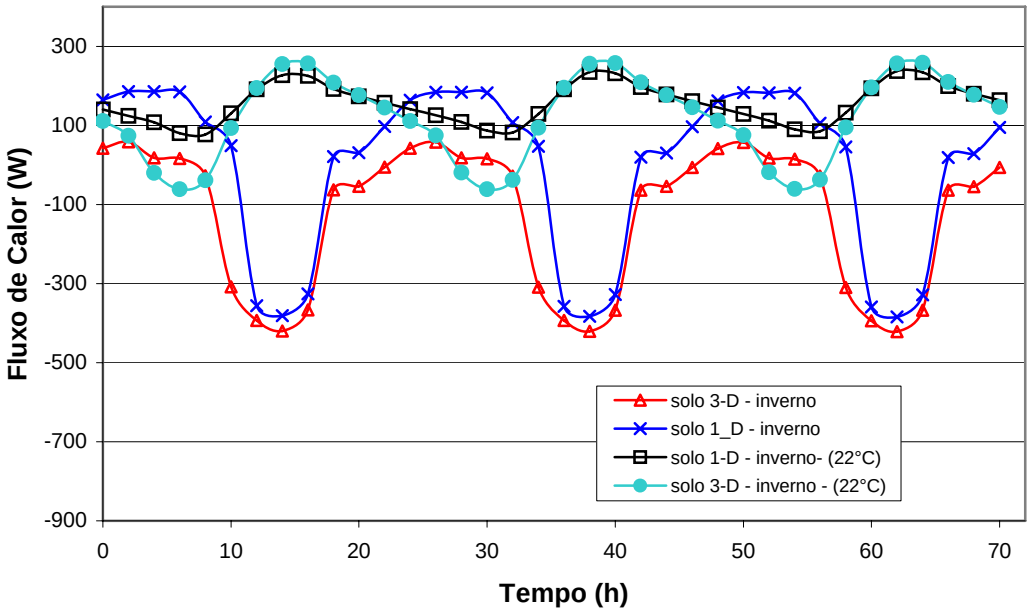

Figura 4.14: Evolução da perda de calor (ou ganho) no ambiente.

No caso em que a temperatura interna do ambiente foi mantida constante a 22 °C, o modelo 1-D apresentou as maiores temperaturas para a superfície do piso, reduzindo o fluxo de calor.

Estes efeitos foram comentados e justificados no trabalho de Davies *et al.* (1995). No modelo 1-D, para permitir o fluxo de calor somente em uma direção, os outros dois planos devem ser considerados adiabáticos, reduzindo desta forma, o fluxo de calor. As descontinuidades observadas na derivada do fluxo de calor podem ser atribuídas a inércia térmica do ambiente.

4.4 Validação do Modelo Puramente Condutivo

Utilizou-se o software comercial CFX-5 – *Computational Fluid Dynamics Software*- para a validação do modelo puramente condutivo para o solo, com as propriedades apresentadas na Tab. 4.2 obtidas em Incropera (1992).

Tabela 4.2: Propriedades básicas do solo.

Propriedade do solo	Valor
Condutividade Térmica	0,52 W/m K
Densidade	2050 kg/m³
Calor específico a pressão constante	1840 J/kg K

Fonte: Incropera (1992).

As dimensões do domínio são apresentadas na Fig. 4.15.

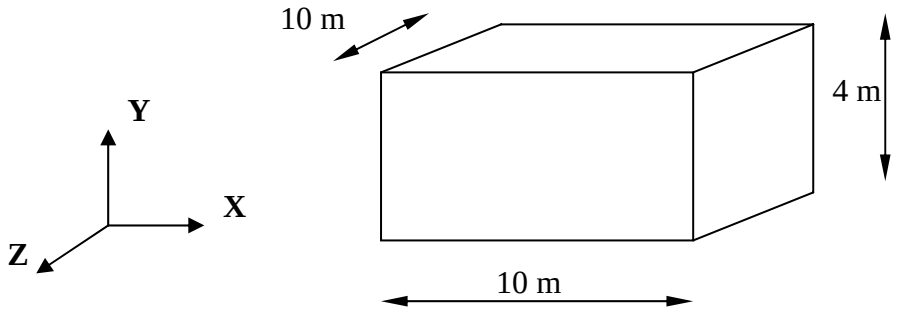

Figura 4.15: Dimensões do domínio.

Para as condições de contorno, consideraram-se as faces laterais e inferior do solo como adiabáticas. Na superfície em contato com o ar externo (face superior do solo), considerou-se um coeficiente de convecção igual a 10 W/m²K e uma temperatura de 32ºC, ambos constantes para o ar externo. Como condição inicial, considerou-se uma temperatura inicial de 20°C para todo o domínio.

Na Fig. 4.16, compararam-se os perfis de temperatura ao longo da profundidade do solo, utilizando um passo de tempo de 1 hora. Atribui-se a pequena diferença entre os valores apresentados ao tamanho da malha, 20 x 8 x 20 nós, utilizado pelo código computacional em estudo ao longo do domínio.

Para o período de um ano de simulação, o CFX utilizou 11h e 32min de tempo processamento, sendo que para o código computacional em estudo, este período foi de 1 minuto e 20 segundos.

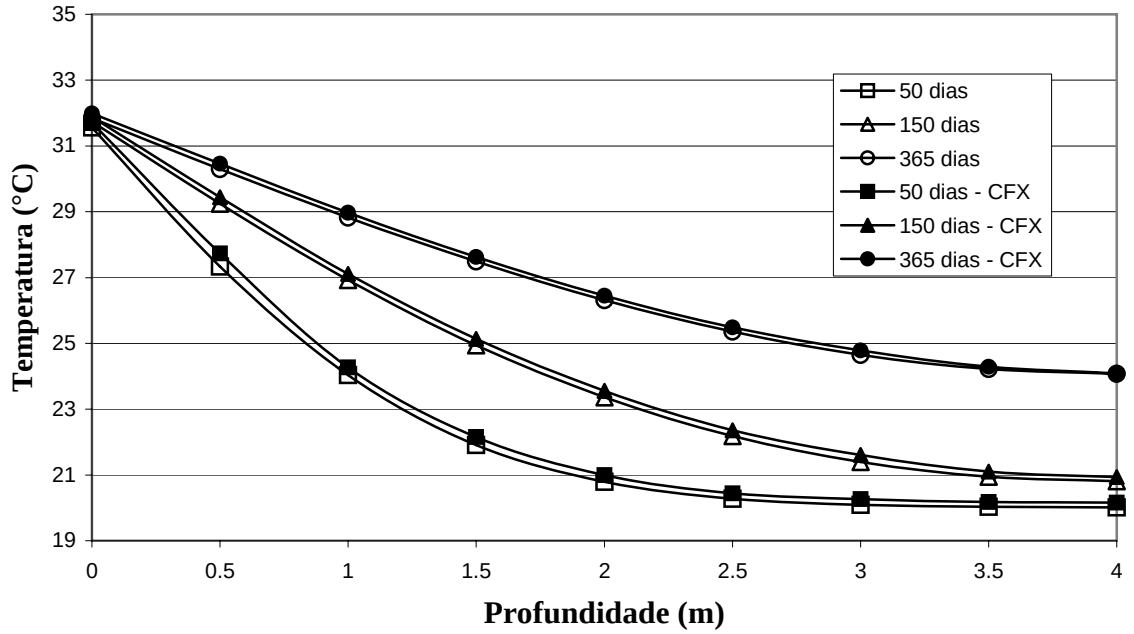

Figura 4.16: Perfis de temperatura ao longo da profundidade do solo utilizando um passo de tempo de 1 hora.

Na Fig. 4.17, analisou-se a sensibilidade dos software em relação ao passo de tempo, utilizado para um período de 50 dias de simulação. Atribuíram-se a não-sensibilidade ao passo de tempo a alta capacidade térmica do solo e as condições de contorno constantes.

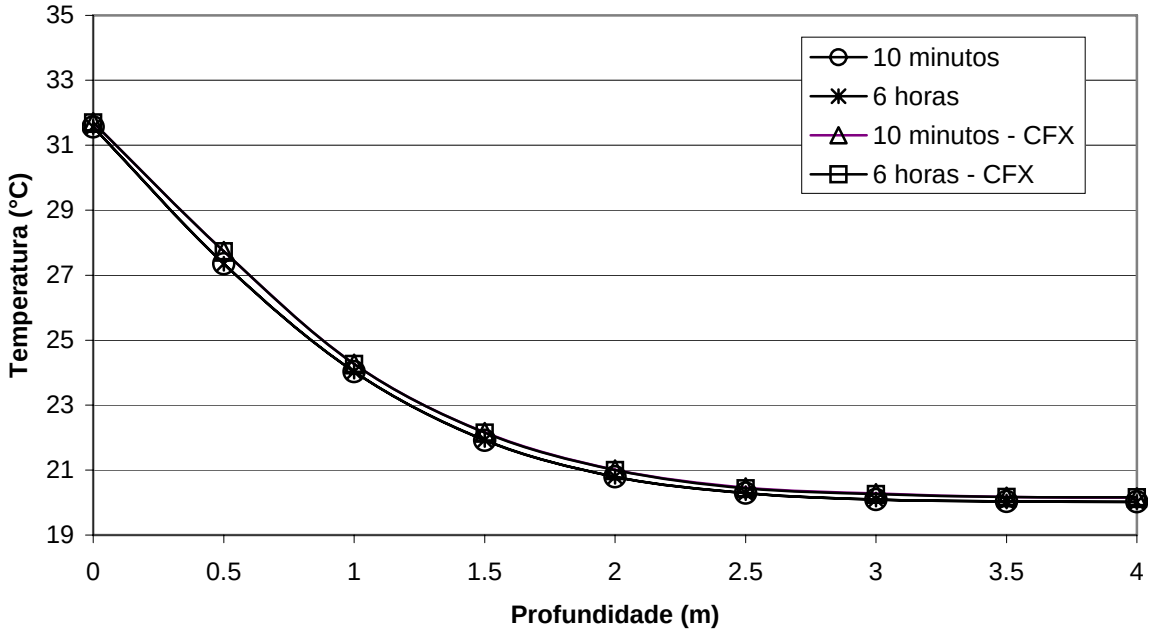

Figura 4.17: Perfis de temperatura ao longo da profundidade variando o passo de tempo.

4.5 Validação da Formulação Global para o Balanço de Energia

Compararam-se, na Fig. 4.18, os resultados fornecidos pela formulação global para o domínio do ar apresentado na seção 2.1, com a temperatura média apresentada pelo CFX para o interior da edificação (Fig. 3.7). Para ambos os modelos utilizaram-se um coeficiente de convecção externo de 12W/m²K e uma temperatura externa de 25 ºC. Considerou-se uma temperatura inicial de 20 °C para todo o domínio, incluindo o solo e a edificação. O fluxo de massa para o interior da edificação foi desconsiderado, juntamente com a geração de energia e de vapor de água.

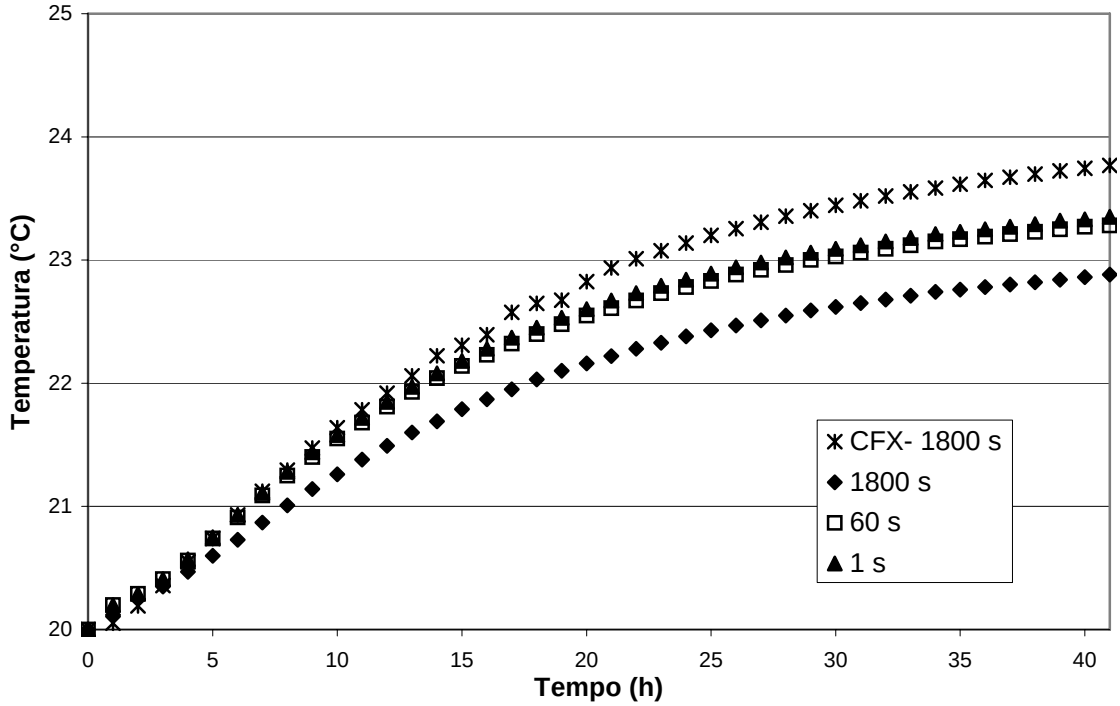

Figura 4.18: Comparação entre os valores da temperatura interna para a edificação utilizando a formulação global e o CFX.

Observou-se, na Fig. 4.18, uma diferença de aproximadamente 0,5 °C entre os resultados, com o decréscimo do passo de tempo do código computacional. Neste caso, utilizou-se para o CFX um passo de tempo de 1800 s. Essa diferença de temperatura é atribuída a tridimensionalidade do envoltório das paredes da edificação pelo CFX, e pela utilização de um coeficiente de convecção interno médio de 0,4 W/m² K para a formulação global, fornecido pelo CFX.

Para um período de 42 horas de simulação, o CFX utilizou um tempo de 96 horas de processamento, enquanto que o código computacional em estudo utilizou um tempo de processamento de 10 minutos para o passo de tempo de 1 s. Utilizou-se para este estudo, um computador Athon AP 1,8 Gz com 512 MB de memória RAM.

4.6 Análise do Período de Pré-Simulação, do Passo de Tempo e do Tamanho da Malha para o Domínio do Solo com Umidade

Para a análise do período de pré-simulação, considerou-se um domínio de dimensões (5 m x 20 m x 5 m) para o solo tipo aluvião-arenoso, distribuído uniformemente em uma malha formada por 4961 nós. Utilizou-se um arquivo climático da cidade de Curitiba para a superfície superior do solo com um coeficiente de convecção constante igual a 10 W/m²K, uma absortividade igual a 0,5 e uma perda constante por radiação de onda longa igual a 30 W/m², enquanto que as outras superfícies foram consideradas adiabáticas. Para a elaboração das Figs. 4.19 e 4.20, repetiu-se o arquivo climático anual por um período de 50 anos, utilizando um passo de tempo de 2 horas. Como condições iniciais para o domínio adotou-se uma temperatura de 15 °C e um conteúdo de umidade de 4%.

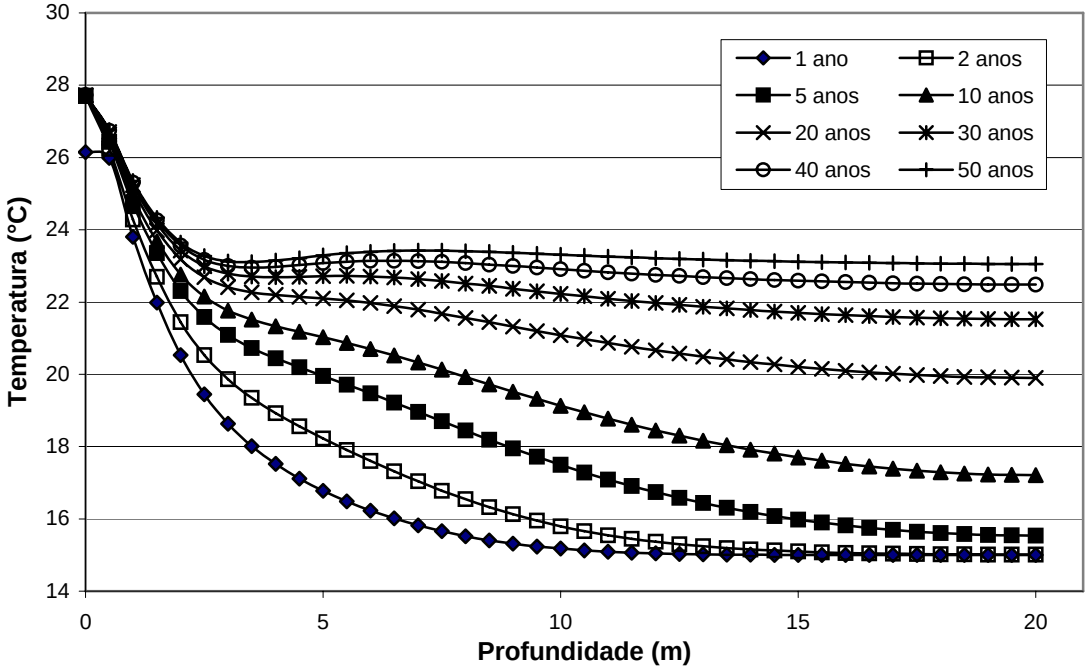

Figura 4.19: Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso ao longo de 50 anos às 24 horas do dia 31 de dezembro.

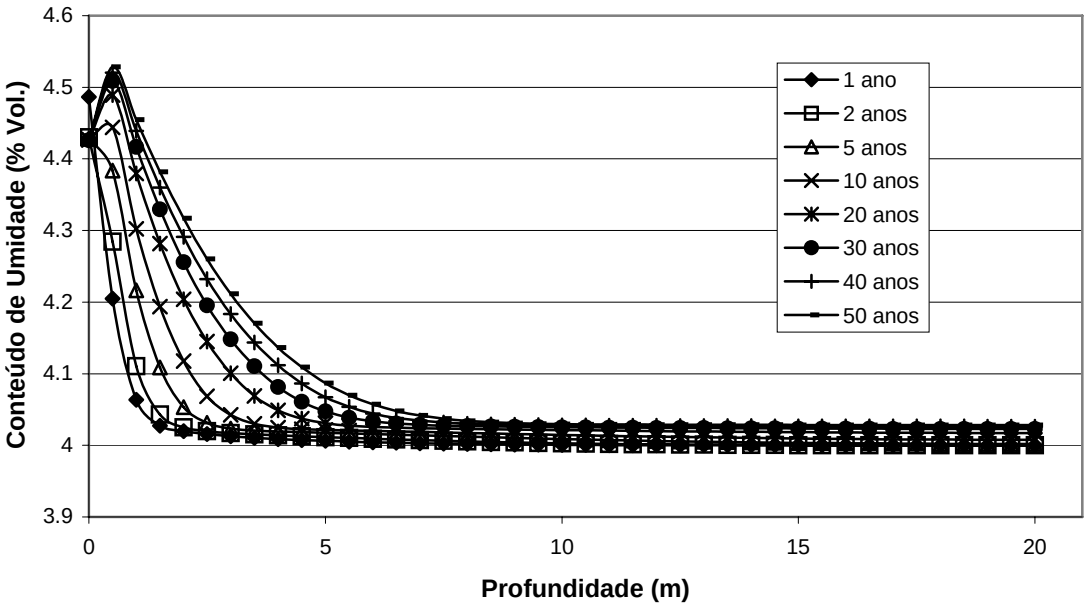

Figura 4.20: Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso ao longo de 50 anos às 24 horas do dia 31 de dezembro.

As Figs. 4.19 e 4.20 correspondem aos valores de temperatura e conteúdo de umidade para o horário das 24 horas do dia 31 de dezembro após 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 anos. Observaram-se nestas figuras que a partir do segundo ano de simulação, a temperatura e o conteúdo de umidade permaneceram praticamente inalterados na superfície do solo, podendo, deste modo, ser considerado um bom período de pré-simulação. As diferenças nos valores de temperatura e do conteúdo de umidade, observadas ao longo do domínio, com o decorrer dos anos, são atribuídos a tendência do domínio de atingir a temperatura e o conteúdo de umidade resultantes das condições climáticas médias do arquivo climático de Curitiba.

Verificou-se também na Fig. 4.20, que a partir de 5 m de profundidade, as linhas de conteúdo de umidade tendem a tornar-se constantes. Desta maneira, adotou-se esta profundidade para o domínio do solo e uma condição inicial de 4% para o conteúdo de umidade do solo aluvião-arenoso.

Nas Figs. 4.21 e 4.22 foram repetidas as simulações demonstradas nas Figs. 4.19 e 4.20, porém em um domínio com 5 m de profundidade. Neste caso, como a temperatura e o conteúdo de umidade na superfície praticamente não variaram, adotou-se esta dimensão como

limite do domínio. Na Fig. 4.21, notou-se a superposição dos perfis de temperatura após um período de 30 anos.

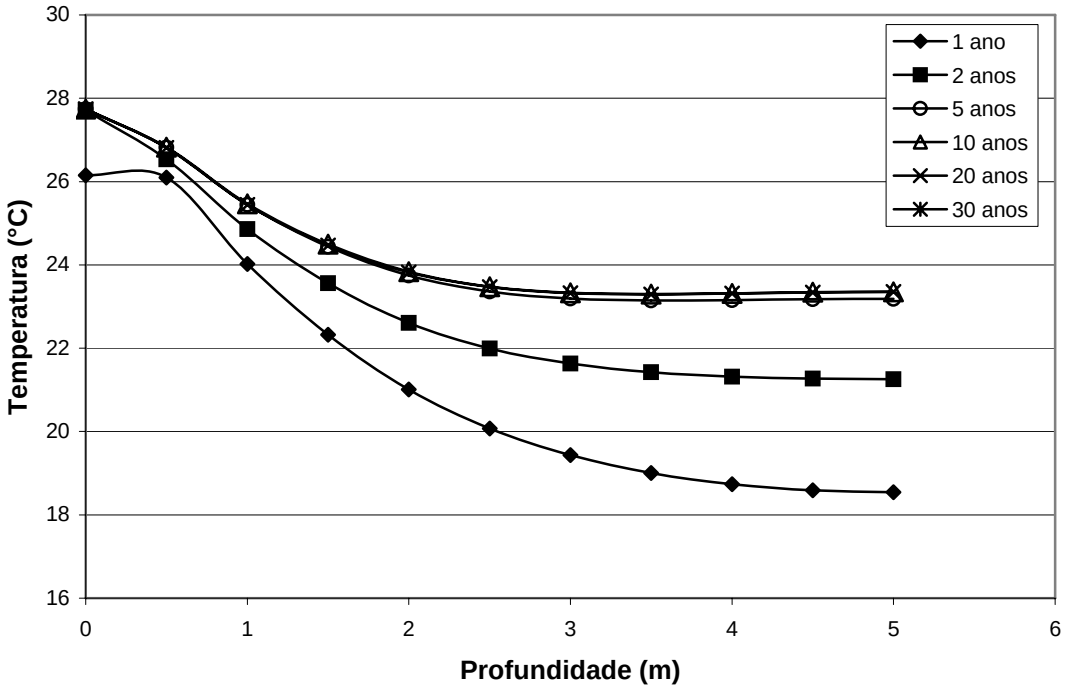

Figura 4.21: Perfis de temperatura em um domínio com 5 m de profundidade.

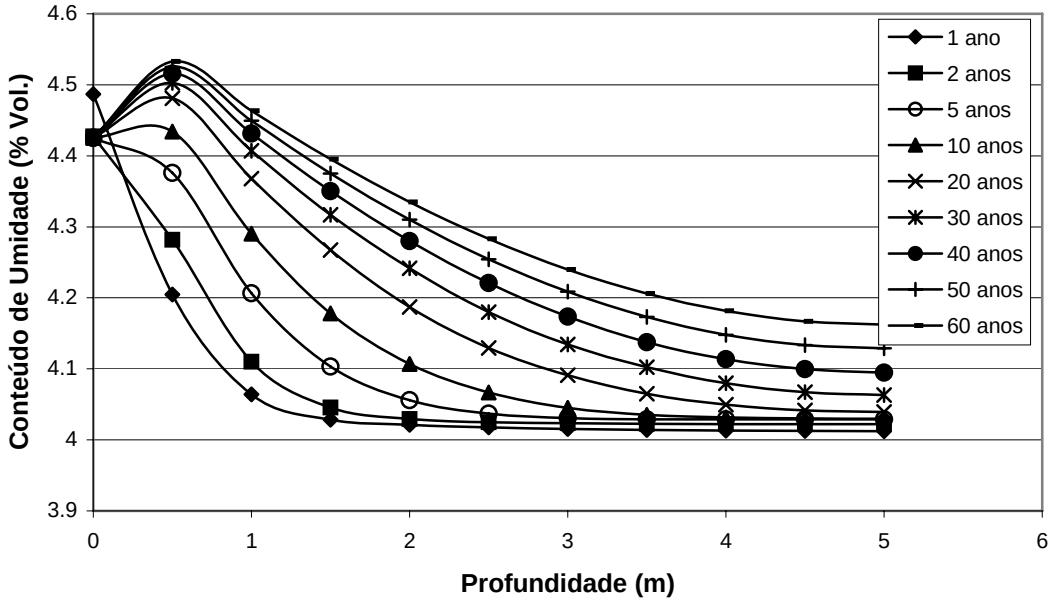

Figura 4.22: Perfis de conteúdo de umidade em um domínio com 5 m de profundidade.

Para a análise da sensibilidade ao passo de tempo, considerou-se o mesmo domínio de dimensões (5 m x 20 m x 5 m), distribuído não-uniformemente em uma malha com 2541 nós. Utilizou-se do mesmo modo, do arquivo climático da cidade de Curitiba para a superfície superior do solo com um coeficiente de convecção constante igual a 10 W/m²K, uma absortividade igual a 0,5 e uma perda constante por radiação de onda longa igual a 30 W/m², enquanto que as outras superfícies foram consideradas adiabáticas. Os perfis de temperatura e conteúdo de umidade apresentados nas Figs. 4.23 e 4.24, correspondem às 24 horas do 31 de dezembro do quinto ano de simulação.

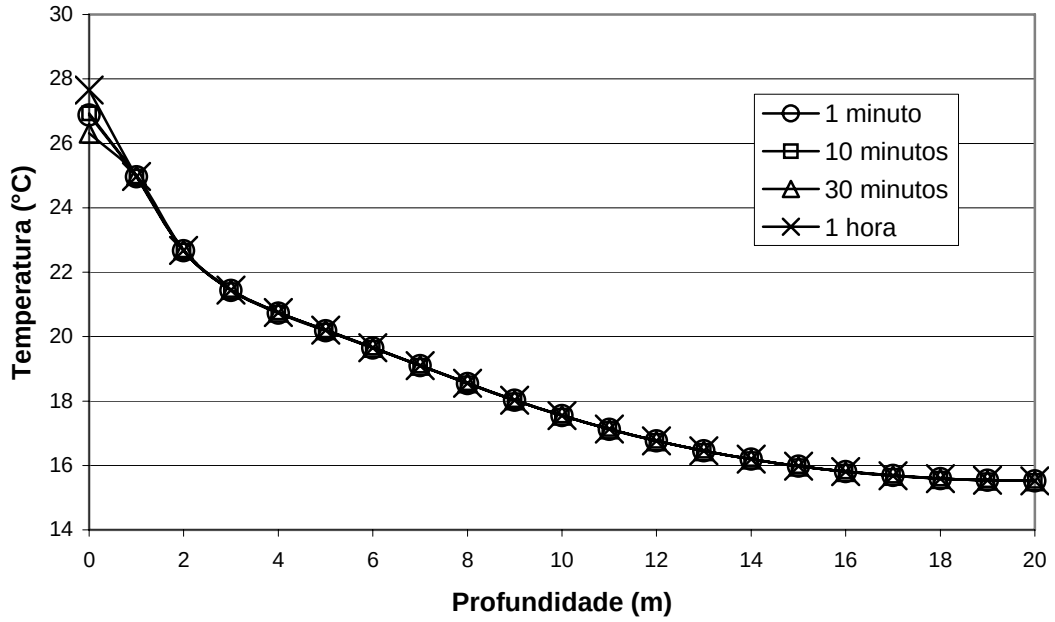

Figura 4.23: Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso variando o passo de tempo.

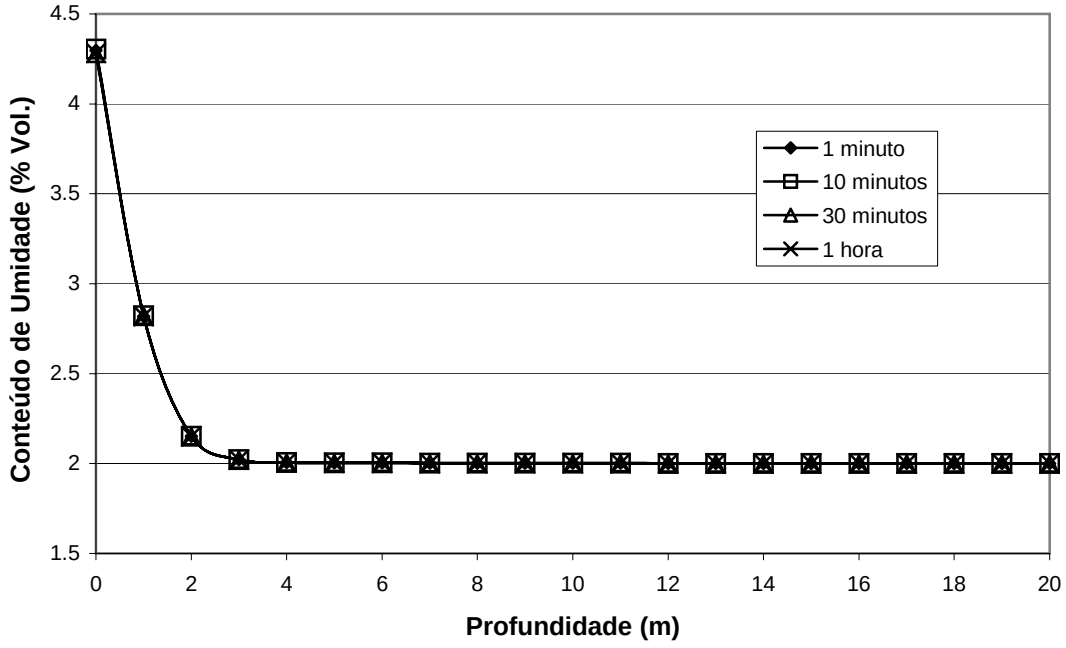

Figura 4.24: Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso variando o passo de tempo.

Verificou-se na Fig. 4.23 uma variação máxima de aproximadamente 1°C apenas na superfície do solo, com a variação do passo de tempo. No entanto, o do conteúdo de umidade, observado na Fig. 4.24, não se mostrou sensível ao passo de tempo.

Na análise da sensibilidade ao tamanho da malha, considerou-se o mesmo domínio de dimensões (5 m x 20 m x 5 m). Variou-se o número de nós na direção *y*, utilizando na comparação 20, 40 e 80 nós, respectivamente, visto que sem o efeito de sombreamento, esta é a direção que predominam os gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Utilizaram-se as mesmas condições iniciais e de contorno, citadas anteriormente. Do mesmo modo, os valores de temperatura e de conteúdo de umidade correspondem às 24 horas do 31 de dezembro do quinto ano de simulação.

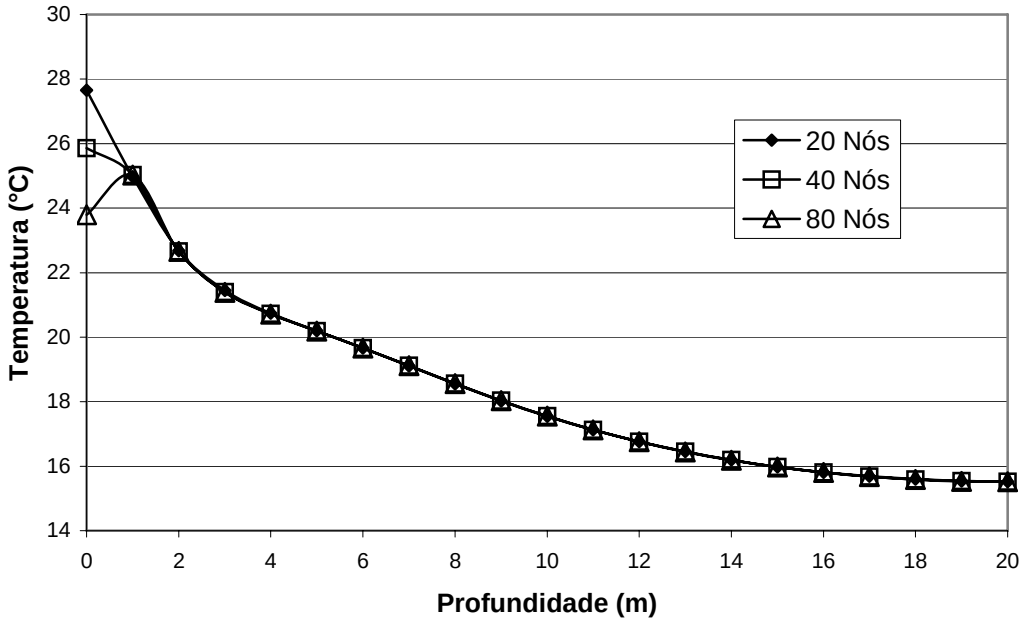

Figura 4.25: Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso variando o número de nós.

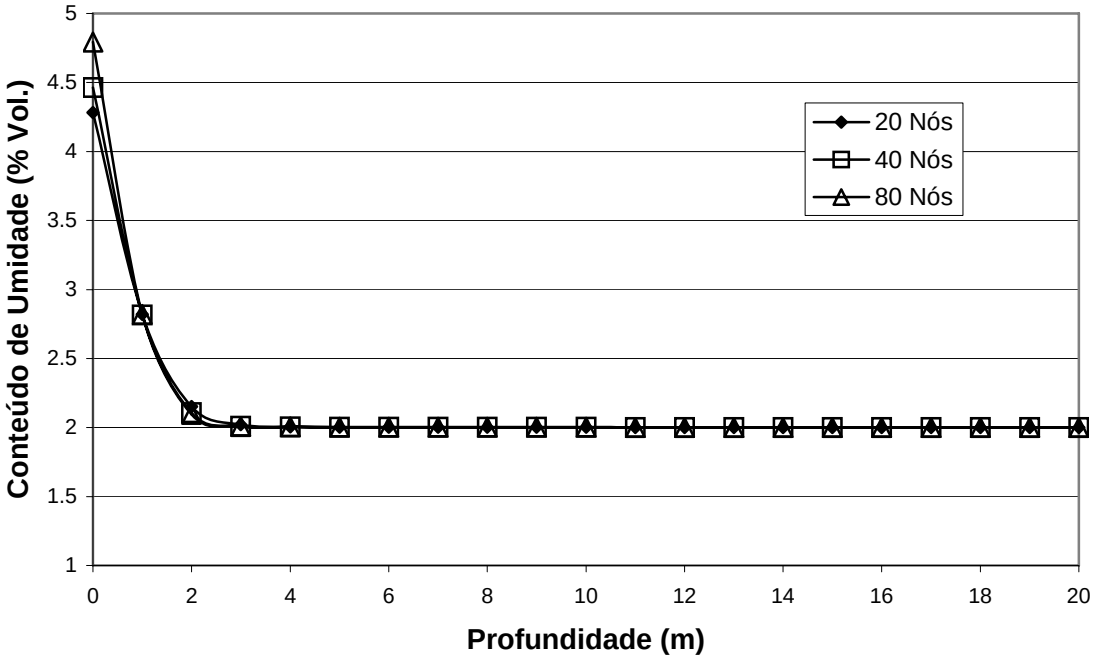

Figura 4.26: Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso variando o número de nós.

Com a variação do número de nós utilizados na malha, verificou-se na Fig. 4.25 uma variação máxima aproximada para a temperatura de 4 °C, enquanto que para o conteúdo de umidade, observou-se na Fig. 4.26 uma variação de máxima de 0,5 %, ambos na superfície. Admitindo-se que quanto mais refinada a malha, mais preciso serão os resultados, as Figs 4.25 e 4.26 indicam a necessidade de um refinamento maior na região da superfície. Porém, quanto mais volumes de controle, maior serão o número de equações algébricas para serem resolvidas, e conseqüentemente, mais longo será o tempo de processamento.

4.7 Efeito do Lençol Freático na Temperatura e no Conteúdo de Umidade do Solo

Para impor o lençol freático como condição de contorno para o domínio apresentado na Fig. 3.7, consideraram-se os volumes de controle localizados na superfície inferior do domínio completamente saturados, não atribuindo resistência ao fluxo de massa provocado pela presença de ar entre a água e o solo. Dessa forma, isso representaria uma condição extrema para a análise do lençol freático. Para a superfície superior considerou-se o arquivo climático de Curitiba como condição de contorno, com um coeficiente de convecção constante igual a 10 W/m² K. No caso das superfícies laterais, estas foram consideradas adiabáticas.

Observou-se, através das Figs. 4.27 e 4.28, a grande influência do gradiente de conteúdo de umidade na imposição dos perfis de temperatura.

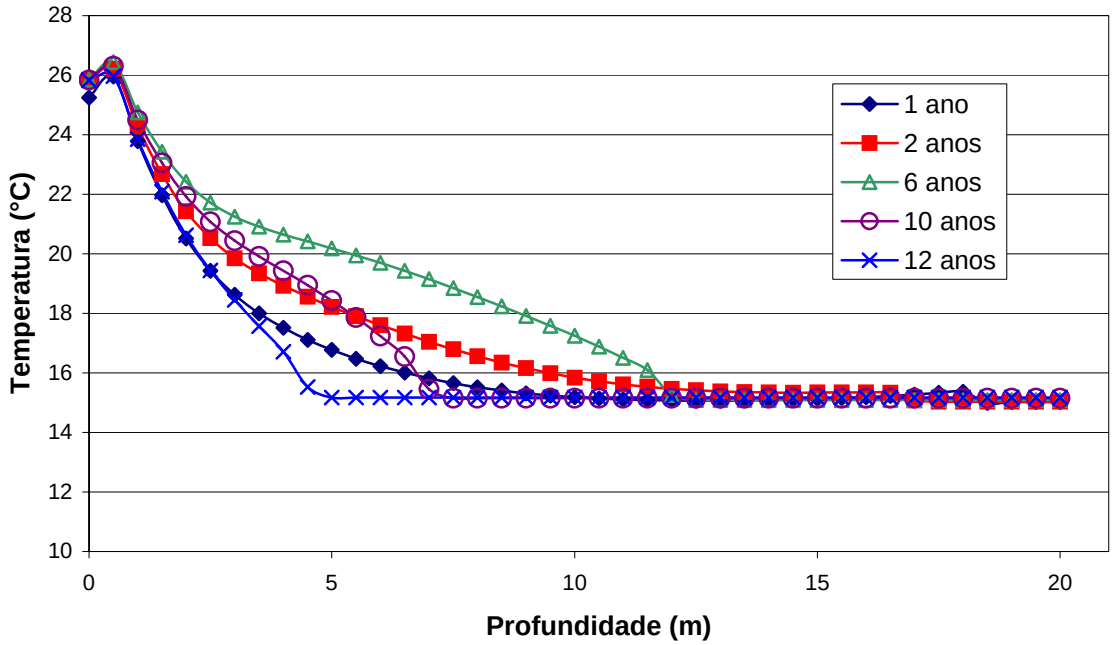

Figura 4.27: Perfis de temperatura do solo do tipo aluvião-arenoso considerando lençol freático como condição de contorno.

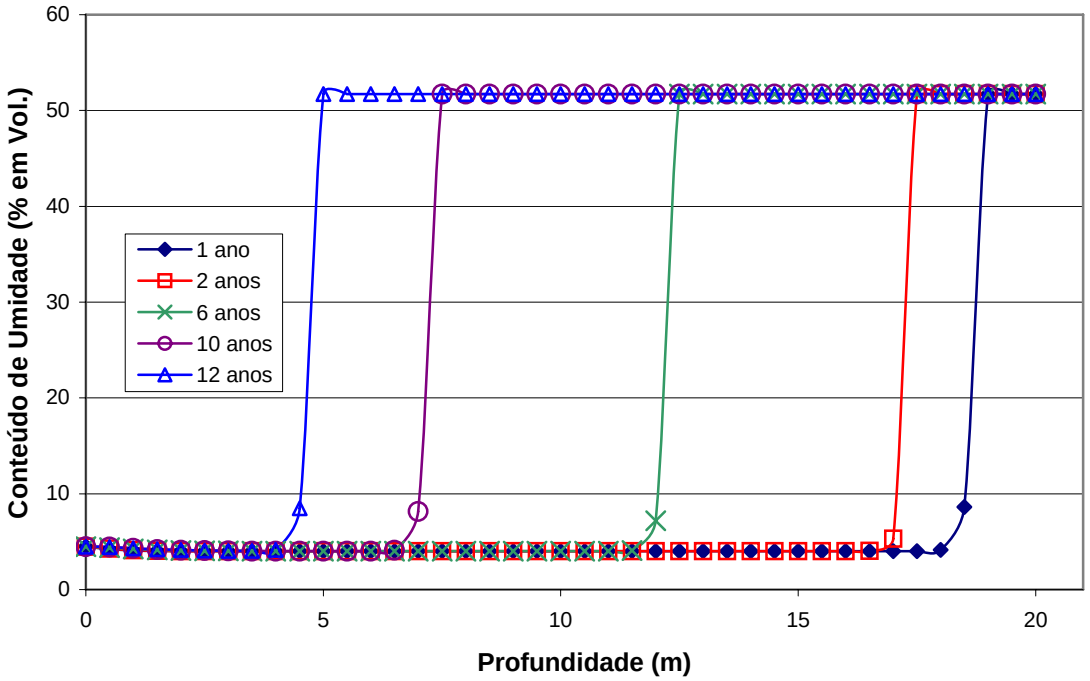

Figura 4.28: Perfis de conteúdo de umidade do solo do tipo aluvião-arenoso considerando lençol freático como condição de contorno.

4.8 Análise da Transferência de Calor Acoplada com Umidade do Solo sob Edificações

O solo sob a edificação (Fig. 3.7) foi considerado do tipo aluvião-arenoso, sendo suas propriedades ilustradas em anexo. Para o piso, consideraram-se as propriedades do reboco.

Adotou-se um domínio de 2,5 m estendendo-se a partir da parede da edificação. Para o solo, utilizou-se uma profundidade de 5 m e para o piso uma espessura de 0.375 m.

Para as condições iniciais, considerou-se uma temperatura de 20°C para as paredes da edificação. Para o solo e o piso, considerou-se uma temperatura inicial de 20 °C e um conteúdo de umidade volumétrico de 0,04, ou seja, um grau de saturação de 8%.

Considerou-se, como condição de contorno para a superfície externa do solo, a radiação solar, chuva sem o efeito da radiação durante o período de simulação, chuva com radiação após o terceiro dia de simulação. Para o modelo puramente condutivo considerou-se apenas a radiação solar como condição de contorno. A convecção foi considerada em todos os casos.

No modelo assumindo a chuva como condição de contorno, os nós da superfície foram saturados, não considerando a película de líquido sobre o solo. Em toda as Figs. (4.29-4.31) utilizou-se uma infiltração de 1 *L/s.*

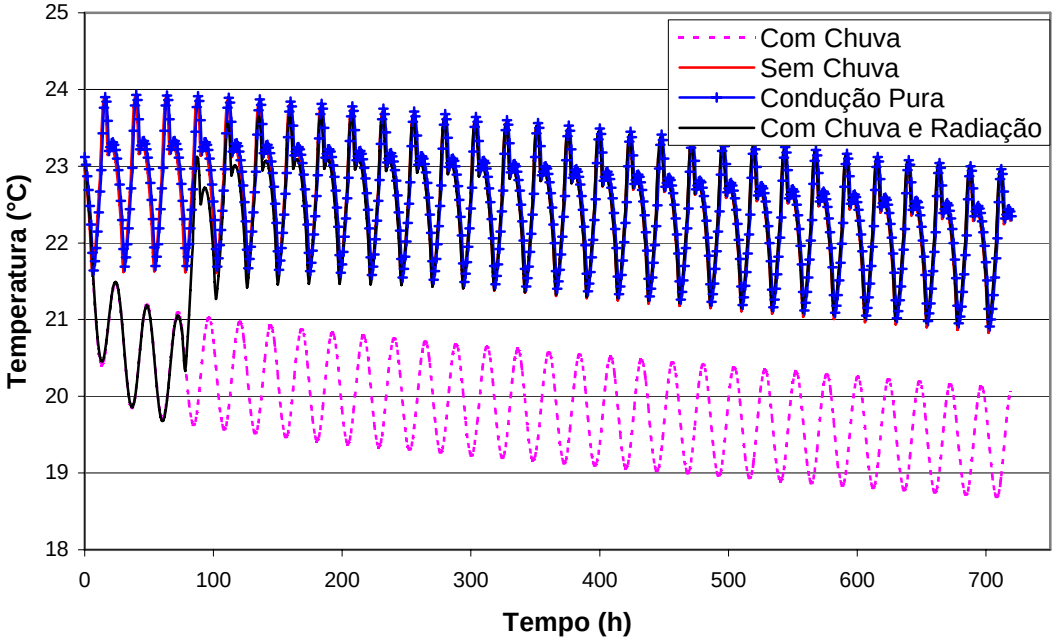

Figura 4.29: Variação da temperatura interna após 2 anos de pré-simulação.

Na Fig. 4.29 observou-se a variação da temperatura interna do ambiente. Durante o período de simulação verificou-se uma variação não significativa entre o modelo puramente condutivo e o modelo considerando umidade. O decréscimo no valor da temperatura interna com a chuva deve-se principalmente a ausência da radiação solar durante o período de 1 mês no primeiro caso e de 3 dias, no segundo caso. Deste modo, observou-se que a principal fonte de carga térmica responsável pela temperatura interna do ambiente foi a radiação solar.

Na Fig. 4.30, observou-se a variação da umidade absoluta no interior da edificação. Verificou-se uma variação superior a 15%, quando considera-se o modelo puramente condutivo para o solo e o piso da edificação. Verificou-se também a pequena variação diária no valor da amplitude da umidade absoluta interna, provocada à preponderância do fluxo de vapor na superfície do piso em relação ao fluxo de vapor por infiltração.

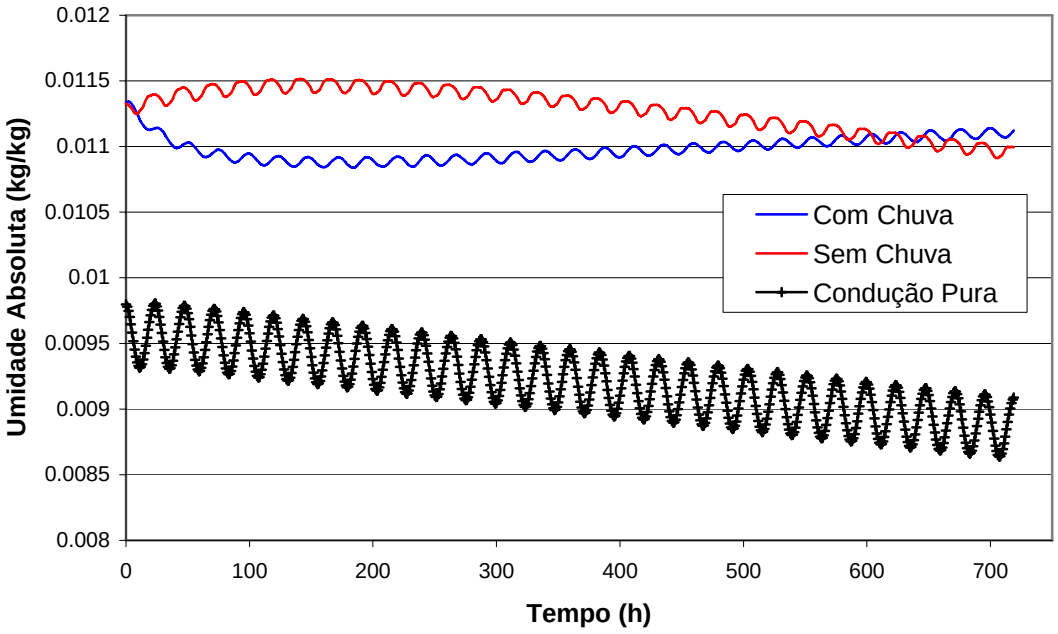

Figura 4.30: Variação da umidade absoluta interna após 2 anos de pré-simulação.

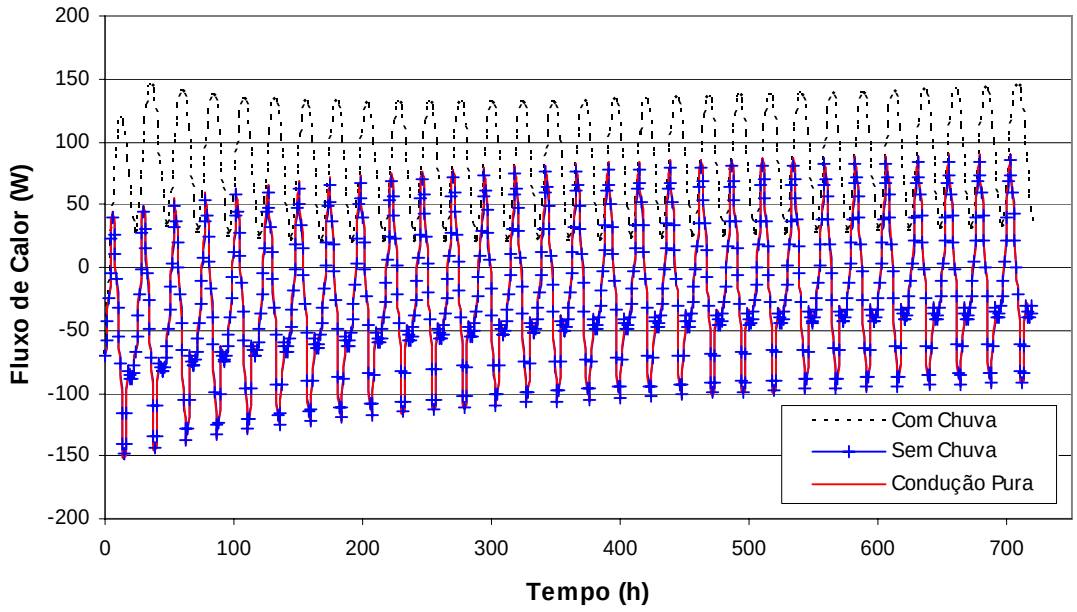

Figura 4.31: Fluxo do calor pelo piso da edificação no período de um mês de simulação.

Observou-se na Fig. 4.31 a variação do fluxo de calor pelo piso da edificação. A ausência de radiação solar durante o período de chuva, ocasiona uma diminuição na temperatura interna do ambiente, aumentando o fluxo de calor pelo piso. Neste caso, observou-se na Fig. 4.31 uma diferença superior a 100 % para o fluxo de calor entre os modelos.

Na Fig. 4.32, utilizou-se uma vazão de 10 *l/s* para a infiltração. Neste caso, verificou-se uma diferença máxima de 0,5°C entre os valores de pico, atribuída ao aumento da diferença de concentração de vapor entre o ar interno e os nós da superfície do piso, ocasionado pelo aumento da vazão de infiltração.

Nas Figs. (4.33-4.35), considerou-se a areia como o solo e piso da edificação. Nesta simulação, não foram considerados os efeitos da radiação solar e adotou-se uma vazão de infiltração de 20 *L/s*.

Na Fig. 4.32, observou-se uma pequena diferença entre os picos de temperaturas para os dois modelos.

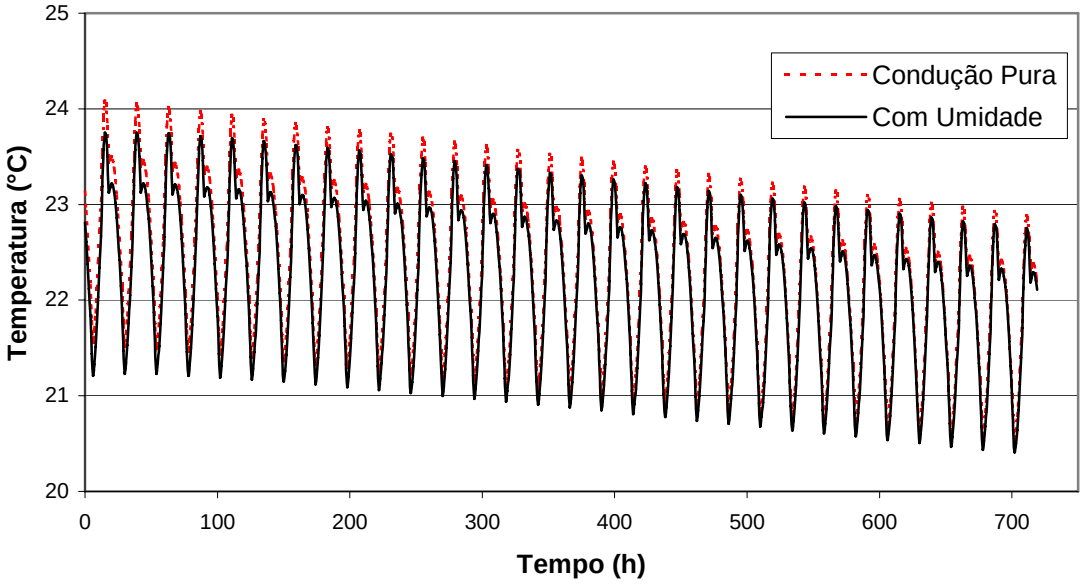

Figura 4.32: Variação da temperatura interna após 2 anos de pré-simulação com uma vazão de 10 L/s.

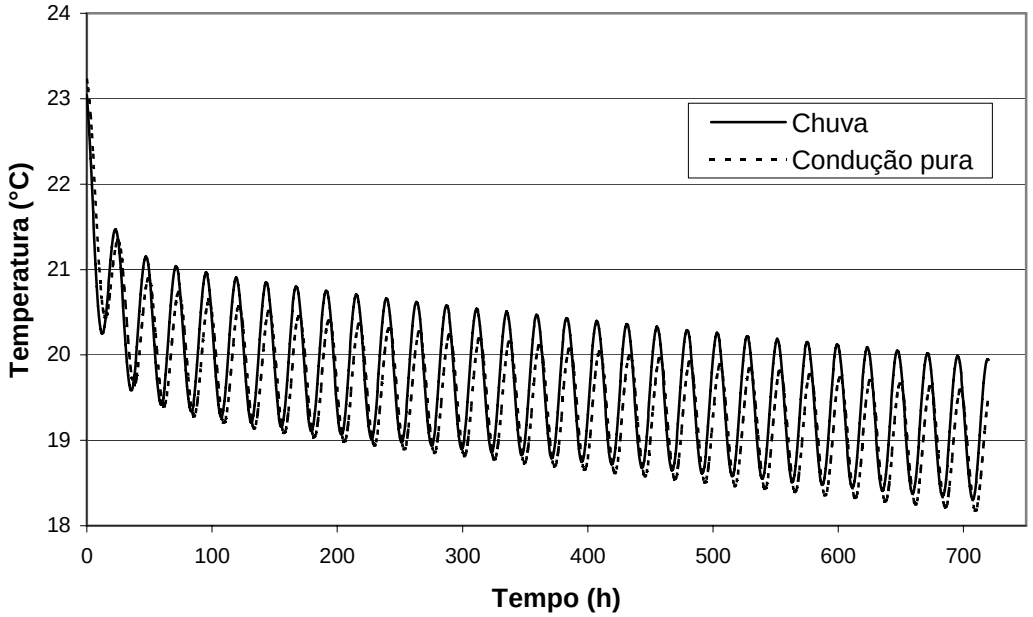

Figura 4.33: Variação da temperatura interna considerando areia como solo e piso da edificação.

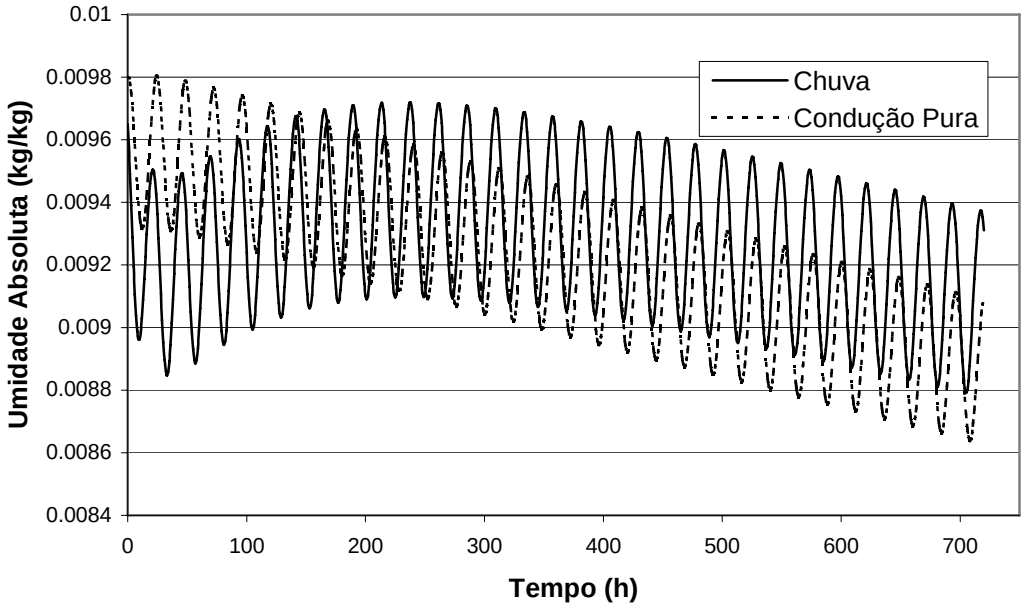

Figura 4.34: Variação da umidade absoluta interna considerando areia como o solo e o piso da edificação.

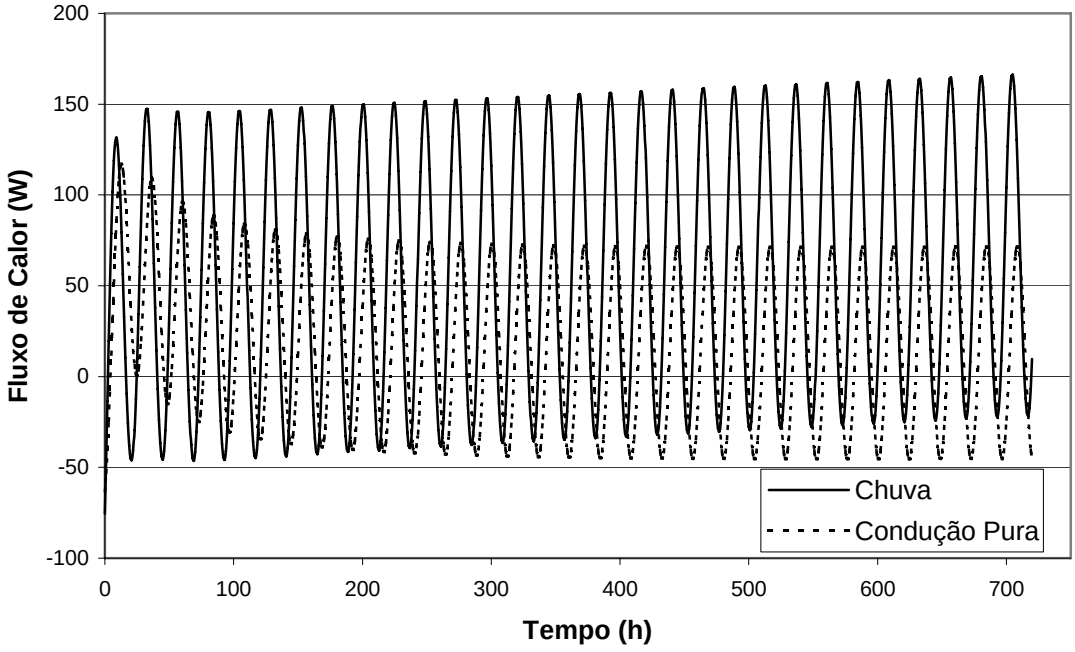

Figura 4.35: Fluxo do calor pelo piso de areia da edificação no período de um mês de simulação.

Na Fig. 4.34, verificou-se uma diferença superior a 10 % no valor da umidade absoluta no interior da edificação nos primeiros dias de simulação.

Embora os valores do fluxo de calor pelo piso não apresentarem variação significativa na temperatura da sala, observa-se na Fig. 4.35 uma diferença superior a 110 % entre os resultados, podendo ser importantes no cálculo do fator de calor sensível para a edificação, dependendo do sentido do fluxo do calor latente e sensível no piso.

Capítulo 5

Conclusões

Os códigos computacionais desenvolvidos até hoje para a simulação energética de edificações, apresentam várias simplificações no que diz respeito a transferência de calor através do piso e do solo nas edificações. Mesmo os trabalhos mais completos apresentados na literatura, apresentam divergências no que diz respeito aos efeitos da umidade no piso e não levam em conta a tridimensionalidade do problema.

Neste trabalho, descreveu-se primeiramente um modelo matemático aplicável a estudos de comportamento térmico de ambientes. Mostrou-se a influência do passo de tempo nos resultados de simulação, tais como temperatura interna, perfis de temperatura e umidade relativa. Observaram-se diferenças significativas entre os valores obtidos através de diferentes passos de tempo para a simulação, evidenciando a importância desse estudo. Na análise do método numérico de integração no tempo para o domínio do ar, observou-se a partir dos resultados, a inviabilidade de se usar métodos explícitos como o de Euler simples e modificado para períodos grandes de simulação, como por exemplo, de 1 ano. A formulação fornecida pelo Matlab mostrou-se robusta, porém, devido ao seu tamanho, apresentou-se mais lenta que o método semi-analítico.

A utilização de grandes passos de tempo, apesar de acelerar a simulação, revelou grandes diferenças em comparação com o uso de pequenos passos de tempo. Esta diferença deve ser atribuída, em grande parte, a linearização da derivada temporal da temperatura em um esquema de 1° ordem, utilizando-se o método das diferenças finitas, no cálculo da temperatura do envoltório da edificação. Neste caso, levando-se em conta a precisão, o tempo

de simulação e a robustez, o método semi-analítico apresentou-se como o mais eficaz e robusto na simulação de ambientes tratados no presente caso.

Na análise do efeito multidimensional do solo na performance térmica da edificação, relevantes diferenças na temperatura da sala foram encontradas quando utilizaram-se os modelos 1-D, 2-D e 3-D. As grandes diferenças observadas nos valores de temperatura entre os modelos 1-D e 2-D são atribuídas, principalmente, à assimetria no perfil de temperatura do solo originada pela radiação solar direta.

Na transferência acoplada de calor e umidade no solo, verificou-se uma variação não significativa nos valores de temperatura interna entre o modelo puramente condutivo e o modelo com umidade. Atribuiu-se, principalmente, o decréscimo no valor da temperatura interna com a chuva à ausência da radiação solar durante o período de simulação. Deste modo observou-se que a principal fonte de carga térmica responsável pela temperatura interna do ambiente é a radiação solar. No caso da umidade absoluta interna, observou-se uma variação superior a 15%, entre os modelos puramente condutivo e com umidade.

Para o fluxo de calor pelo piso da edificação, verificou-se a pequena contribuição de carga térmica do piso de ambos os modelos para a edificação. No entanto, a ausência de radiação solar durante o período de chuva, ocasionou uma diminuição na temperatura interna do ambiente, provocando um aumentando no fluxo de calor pelo piso de aproximadamente 100 % .

Apesar de aumentar o poder evaporativo do piso ao considerar somente areia, não foi notado um efeito significativo na temperatura interna da edificação entre os modelos. Porém, estes resultados podem apresentar-se importante no cálculo do fator de calor sensível para a edificação, dependendo do sentido do fluxo do calor latente e sensível no piso.

Embora o efeito da umidade não tenha ocasionado uma diferença significativa na temperatura interna da edificação, acredita-se que em ambientes com uma maior área de contato com o solo ou em zonas subterrâneas onde os efeitos da radiação solar não sejam tão predominantes, a umidade através do piso venha a contribuir mais efetivamente para a carga térmica.

Para trabalhos futuros são sugeridos:

- Refino da malha para o domínio do solo, principalmente próximo a superfície;

- Incremento no programa da projeção do sombreamento da edificação sobre o solo;
- Determinação de correlações empíricas para o fluxo de calor através do piso e comparação com modelos apresentados pela ASHRAE;
- Inclusão do efeito do fenômeno de histerese;
- Análise de sensibilidade em zonas subterrâneas.

Embora o principal enfoque apresentado neste trabalho seja voltado ao efeito da transferência acoplada de calor e massa em solos sob edificações, o programa desenvolvido, após algumas modificações, poderá ser ainda aplicado na análise do desempenho térmico em cabos de potência subterrâneos, na utilização do solo como trocador de calor em sistemas de aquecimento e de refrigeração e na geração de energia como no caso das chaminés solares.

Referências Bibliográficas

ASHRAE – American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineering - Handbook-Fundamentals Atlanta: ASHRAE, , 1993 e 1997.

Adjali M.H., Davies M., Littler J. A Numerical Simulation of Measured Transient Temperatures in the Walls, Floor and Surrounding Soil of a Buried Structure. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, V. 9, N. 4, p. 405-422, 1999.

Bahnfleth W. P. Three-Dimensional Modelling of Slab- on- Grade Heat Transfer, Building Simulation Conference – IBPSA 89, p. 133-138, 1989.

Buonanno, G., Carotenuto, A. A Comparison of Thermal performances of Underground power Cables in Dry and Saturated Soils. Journal of Porous Media, V. 3, N. 1, p. 1-10, 2000.

Cláudio, D.M., Marins, J. M. Cálculo Numérico Computacional, 2º edição, Ed. Atlas, S. Paulo, Brazil, p. 464, 1994.

Davies M., Tindale A., Litter J. Importance of Multi-Dimensional Condutive Heat Flow In and Around Buildings. Building Serv Eng Res Technol, V. 16, N. 2, p.83-90, 1995.

Deru, M. P., Kirkpatrick, A.T. Ground-Coupled Heat and Moisture transfer from building – Part 1 – Analysis and Modeling. Journal of Solar Energy Engineering, V.124, p. 10-16, Feb. 2002.

Deru, M. P., Kirkpatrick, A.T. Ground-Coupled Heat and Moisture transfer from building – Part 2 – Aplication. Journal of Solar Energy Engineering, V.124, p. 17-21, Feb. 2002.

Gerald, C. F., Wheatley, P. O. Applied Numerical Analyis, 6º edition, Addison-Wesley, p. 700, 1999.

Freitas, D. S., Prata, A.T. Thermal Performance of Underground Power Cables with Constant and Cyclic Currents in Presence of Misture Migration in the Surrounding Soil. IEEE Transactions on Power Delivery, V. 11, N. 3, July 1996.

Galbraith, G. H., Ji, C., Mclean, R., Baker, P. The influence of Space Discretization on the Accurancy of numerical Simulation of heat and moisture transport in porous Building Materials. Journal of Thermal Envelope and Building Science, V. 25, N. 2, p. 143-160, 2001.

Hanselman, D., Littlefield, B. Matlab 5, Makron Books, S. Paulo, p. 413, 1999.

Incropera F.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 3º ed., 1992.

Janssen, H., Carmeliet, J., Hens, H. The Influence of soil Moisture in the Unsatured Zone on the heat Loss from Building via the Ground. Journal of Thermal Envelope and Building Science, V. 25, N. 4, p. 275-298, 2002.

Krarti, M. Effect of Spacial Variation of Soil Thermal Properties on Slab-on-Ground Heat Transfer. Building and Environment, V. 31, N. 1, p. 51-57, 1996.

Kuehn T. H. Thermal Environmental Engineering, 3rd ed., Prentice Hall, 1998.

Lucas, F., Adelard, L., Garde, F., Boyer, H. Study of moisture in buildings for Hot Humid Climates. Energy and Building, V. 34, p. 345-355, 2002.

Mendes, N., Philippi, P. C., Lamberts, R. A new Mathematical Method to Solve Highly Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media. International Journal of Heat and Mass Transfer, V. 45, p. 509-518, 2002.

Mendes, N. e Santos, G.H. Análise de Transiente Higrotérmico de Ambientes Não-Climatizados, VIII Encontro Nacional de Ciências Térmicas - ENCIT 2000, Porto Alegre, 2000.

Mendes N., Oliveira R. C., Santos G. DOMUS 1.0: A Brazilian PC Program for Building Simulation, International Building Performance Simulation Association Conference – IBPSA´01, p. 83-89, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.

Mendes, N., Philippi P.C. Modelo de Transferência de Calor e de Umidade Através da Interface entre meios porosos de diferentes Higroscopicidades. IX Congresso Brasileiro de engenharia e Ciências Térmicas – ENCIT 2002, Caxambú – CIT02-0080, 2002.

Mihalakakou, G. On Estimating Soil Surface Temperature Profiles. Energy and Buildings, V. 34, p. 251-259, 2002.

Oliveira, A. A. J; Freitas, D. S. Influência do Meio nas Difusividades do Modelo de Phillip e Vries. Relatório de Pesquisa, UFSC, 1993.

Onmura, S., Matsumoto, M., Hokoi S. Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens. Energy and Building, V. 33, p. 653-666, 2001.

Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1980.

Philip, J. R., D. A. de Vries. Moisture Moviment in Porous media under Temperature Gradients. Trans Am geophysical Union, V. 38, p. 222-232, 1957.

Speltz, J. J. A numerical simulation of transiente heat flow in earth-sheltered buildings for seven select US cities MSc thesis, Trinity University, USA, 1980.

Stoecker W. F. e Jones J.W. Refrigeração e Ar Condicionado, McGraw Hill do Brasil, 1985.

Szokolay S. Solar Geometry, PLEA – Passive and Low Energy Architecture Conference - NOTES, Department of Architecture at University of Queensland, Brisbane, Australia, 1993.

Van Den Brink, G. J., Hoogendoorn, C. J. Ground Water Flow Heat Losses for seasonal Heat storage in the Soil. Solar Energy, V. 30, N. 4, p. 367-371, 1983.

Walton G N. Estimating 3-D heat loss from rectangular basements and slabs using 2-D calculation ASHRAE Trans. 93(1) (1987).

Wang, J., Hagentoft, C. E. A Numerical Method for Calculating Combined Heat, Air and Moisture Transport in Building Envelope Components. Nordic Journal of building Physics, Vol. 2, 2001.

Zoras S, Davies M., Wrobel L. C., Earth-Contact Heat Transfer: A Novel Simulation Technique. 7th REHVA World Congress – CLIMA 2001, Napoli, 2001.

ANEXO

Arquivos das Propriedades dos Solos Insaturados: Aluvião Arenoso, Backfill e Areia

1.0 DESCRIÇÃO DOS ARQUIVOS

Elaboraram-se os arquivos das propriedades e isotermas para três tipos de solo. Ajustou-se a partir do software Origin, uma base de dados contendo as propriedades térmicas e hidrológicas de três tipos de solos insaturados: aluvião arenoso, backfill e areia; obtidas em Oliveira e Freitas (1993).

1.1 Arquivo de Propriedades

Estruturaram-se os arquivos das propriedades do solo da seguinte forma:

S	K	D_T	D_θ	D_{TV}	$D_{\theta V}$
…	…	…	…	…	…

onde:

S = saturação (%);

K = condutividade térmica efetiva (W/m K);

D_T = coeficiente de transporte de umidade associado a um gradiente de temperatura ($D_{TV} + D_{TL}$), sendo:

D_{TV} = coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente de temperatura ($m^2/s\ K$);

D_{TL} = coeficiente de transporte de líquido associado a um gradiente de temperatura ($m^2/s/K$);

D_θ = coeficiente de transporte de umidade associado a um gradiente de conteúdo de umidade ($D_{\theta V} + D_{\theta L}$) , sendo:

$D_{\theta V}$ = coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente de conteúdo de umidade (m^2/s);

$D_{\theta L}$ = coeficiente de transporte de líquido associado a um gradiente de conteúdo de umidade (m^2/s);

D_{TV} = coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente de temperatura ($m^2/s\ K$);

$D_{\theta V}$ = coeficiente de transporte de vapor associado a um gradiente de conteúdo de umidade (m^2/s);

Esses arquivos tem 101 linhas onde a saturação varia entre 0% e 100%.

1.2 Arquivo de Isotermas

Estruturaram-se os arquivos de isotermas da seguinte forma:

ϕ	θ	$d\phi/d\theta$
...	...	...

onde:

ϕ = umidade relativa;

θ = conteúdo de umidade;

$d\phi/d\theta$ = derivada da umidade relativa em relação ao conteúdo de umidade;

Esses arquivos tem 501 linhas onde a umidade relativa varia de 0 a 1 (passo 0,002).

2.0 AJUSTE DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS INSATURADOS

2.1 Aluvião Arenoso (Arquivo das Propriedades)

Ajuste para Condutividade Térmica Efetiva:

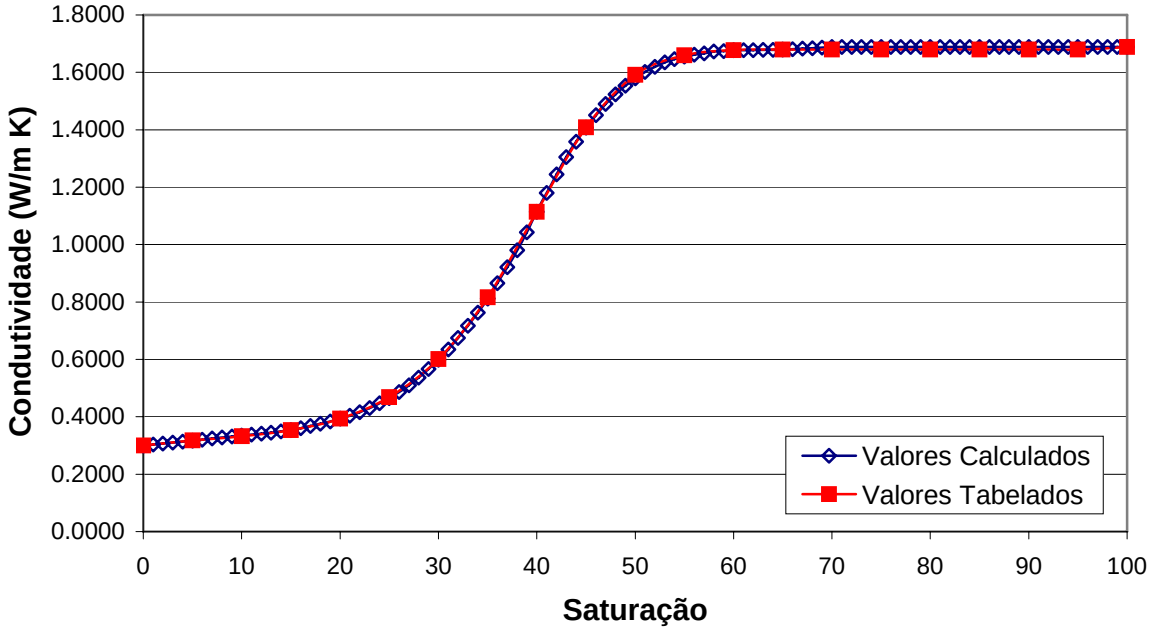

Figura A.1: Gráfico Condutividade – Aluvião Arenoso

Tabela A.1: Equações de Ajuste – Condutividade – Aluvião Arenoso

Saturação	Equação de Ajuste
0 - 15	0.00352*S +0.29937
16 - 40	-0.07291+0.06983*S-0.00433*S^2+0.000117337*S^3-0.000000856667*S^4
41 - 60	-9.4941+0.5208*S-0.00802*S^2+0.0000406667*S^3
61 - 65	1.653+0.0004*S
66 - 70	1.562+0.0018*S
70 - 100	1.688

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Temperatura ($D_{\theta L}$):

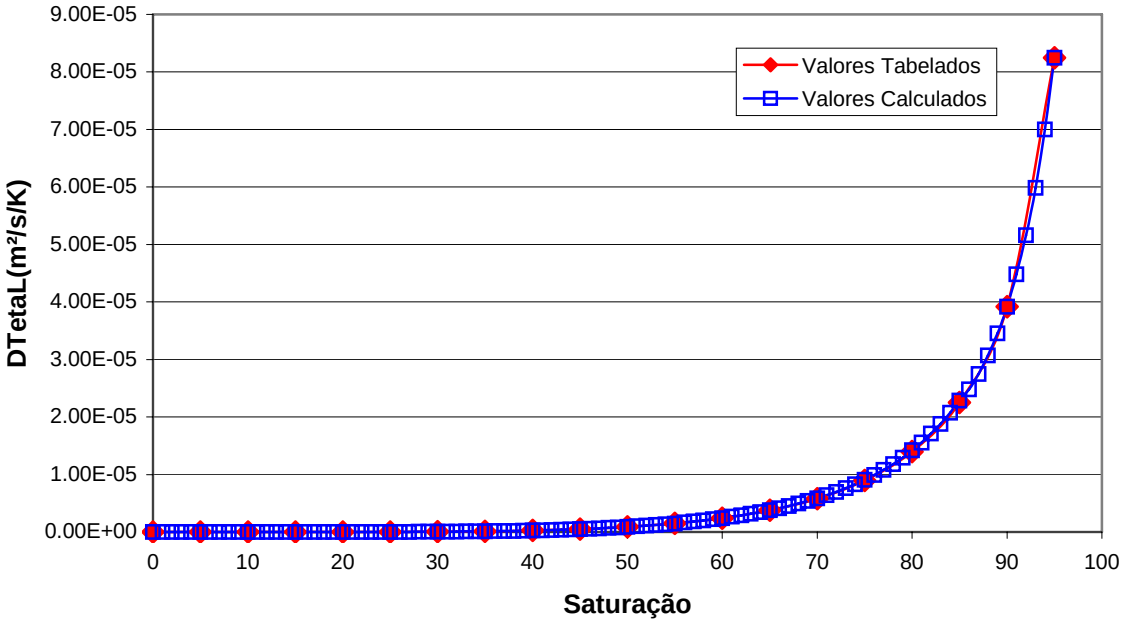

Figura A.2: Gráfico $D_{\theta L}$ – Aluvião Arenoso

Tabela A.2: Equações de Ajuste – $D_{\theta L}$ – Aluvião Arenoso

Saturação	Equação de Ajuste (log)
0 – 9	0
10	1.229E-31
11 – 15	-71.96725+4.10158*S
16 – 25	22.9169+1.17431*S-0.02285*S^2
26 – 55	-14.18991+0.45737*S-0.01128*S^2+0.000143733*S^3-0.00000072*S^4
56 – 85	-10.80722+0.16336*S-0.00179*S^2+0.00000848889*S^3
86 – 95	3.9686-0.24246*S+0.00166*S^2
96 – 100	-30.9572+0.28288*S

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Líquido Associado a Um Gradiente de Temperatura (D_{TL}):

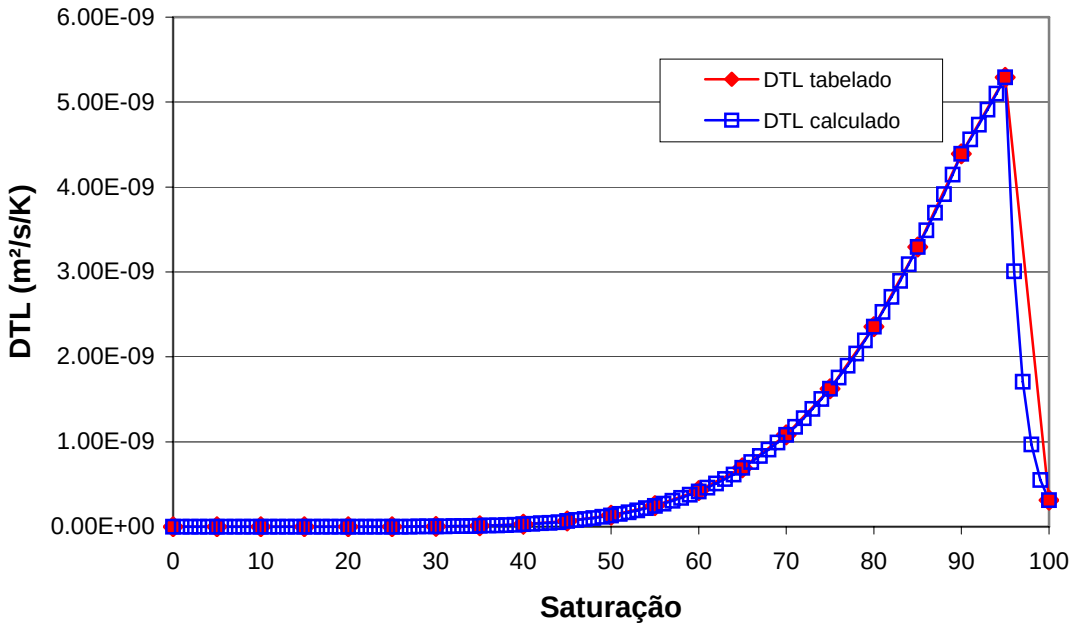

Figura A.3: Gráfico D_{TL} – Aluvião Arenoso

Tabela A.3: Equações de Ajuste – D_{TL} – Aluvião Arenoso

Saturação	Equação de Ajuste (log)
0 – 9	0
10 – 15	-76.31865+4.10164*S
16 – 45	-62.4926+8.69533*S-0.65513*S^2+0.0269*S^3-0.000621327*S^4+0.00000760587*S^5-0.0000000384533*S^6
46 – 65	-15.4611+0.1887*S-0.00196*S^2+0.0000084*S^3
66 – 85	-13.33189+0.09036*S-0.000437143*S^2+0.000000533333*S^3
86 – 90	-10.6073+0.025*S
91 – 95	-9.8135+0.01618*S
96 – 100	15.0518+-0.24556*S

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Conteúdo de Umidade ($D_{\theta V}$):

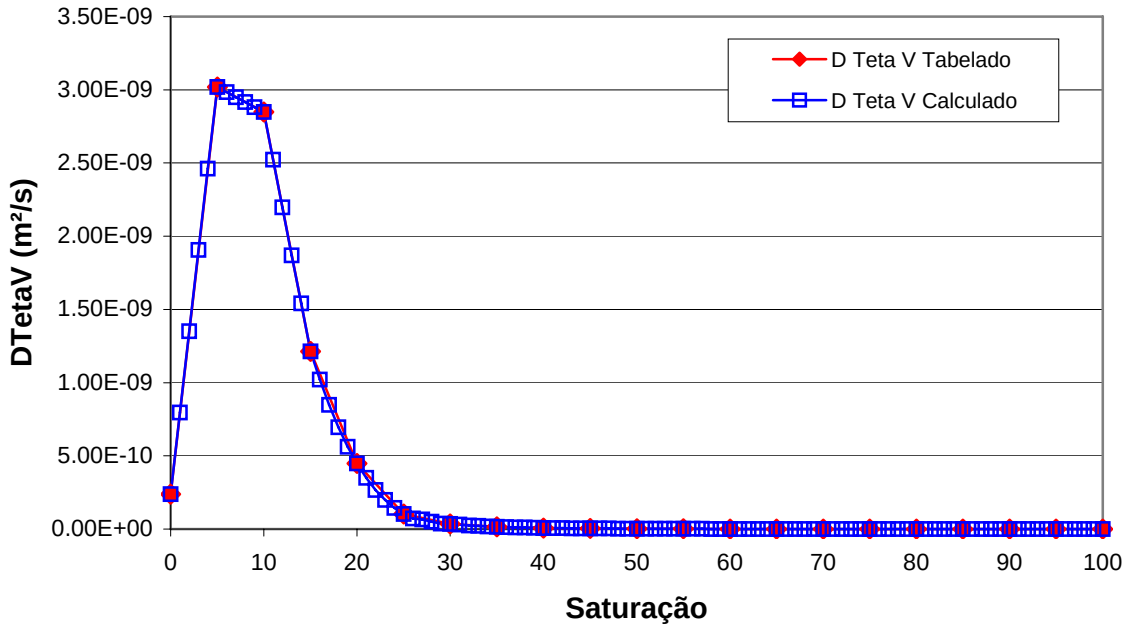

Figura A.4: Gráfico $D_{\theta V}$ – Aluvião Arenoso

Tabela A.4: Equações de Ajuste – $D_{\theta V}$ – Aluvião Arenoso

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 5	0.0000000002391+0.00000000055578*S
6 – 10	0.00000000318766-0.0000000000339321*S
11 – 15	0.00000000612582-0.000000000327455*S
16 – 30	0.0000000074889-0.00000000067501*S+0.0000000000200056*S-0.000000000000192893*S^3
31 – 60	0.00000000402487-0.000000000477446*S+0.0000000000239131*S^2-0.000000000000064361*S^3+9.78284E-15*S^4-7.94363E-17*S^5+2.68764E-19*S^6
61 – 100	0.000000000113447-0.0000000000069646*S+0.000000000000181227*S^2-2.53754E-15*S^3+2.00353E-17*S^4-8.41244E-20*S^5+1.45993E-22*S^6

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Temperatura (D_{TV}):

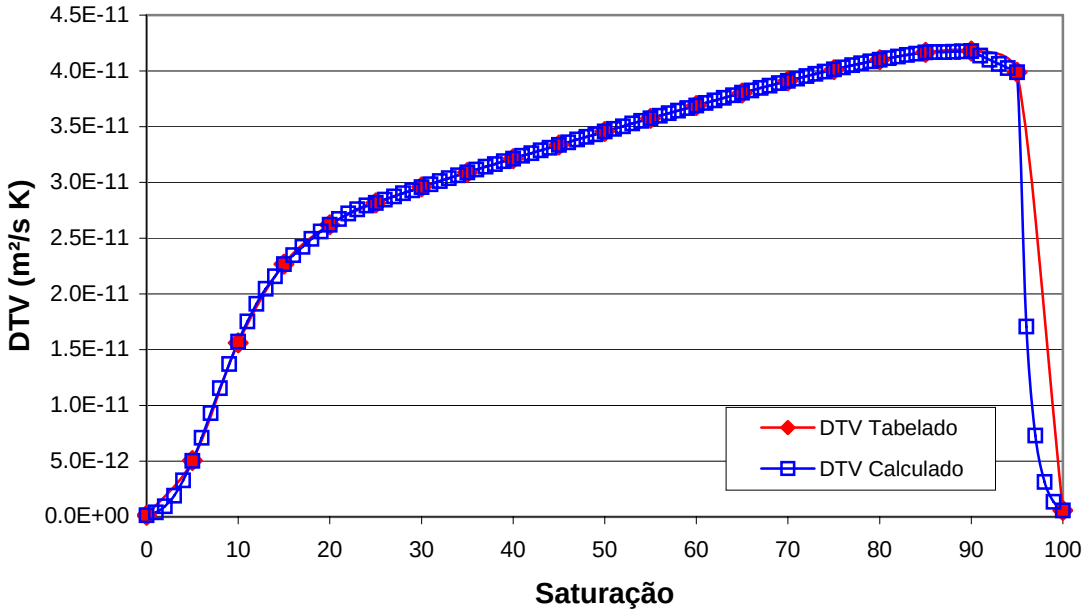

Figura A.5: Gráfico D_{TV} – Aluvião Arenoso

Tabela A.5: Equações de Ajuste – D_{TV} – Aluvião Arenoso

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 15	-10.57432+(-2.28556*EXP(-S/4.34835))
16 – 25	-11.0239+0.03479*S-0.000634*S^2
26 – 40	-10.68879+0.00661*S-0.000043*S^2
41 – 60	-10.6514+0.0046*S-0.000016*S^2
61 – 75	-10.65969+0.00486*S-0.000018*S^2
76 – 85	-10.8631+0.01027*S-0.000054*S^2
86 – 90	-10.4007+0.00024*S
91 – 95	-10.0191-0.004*S
96 - 100	24.6312-0.36874*S

2.2 Backfill (Arquivo de Propriedades)

Ajuste para Condutividade Térmica Efetiva:

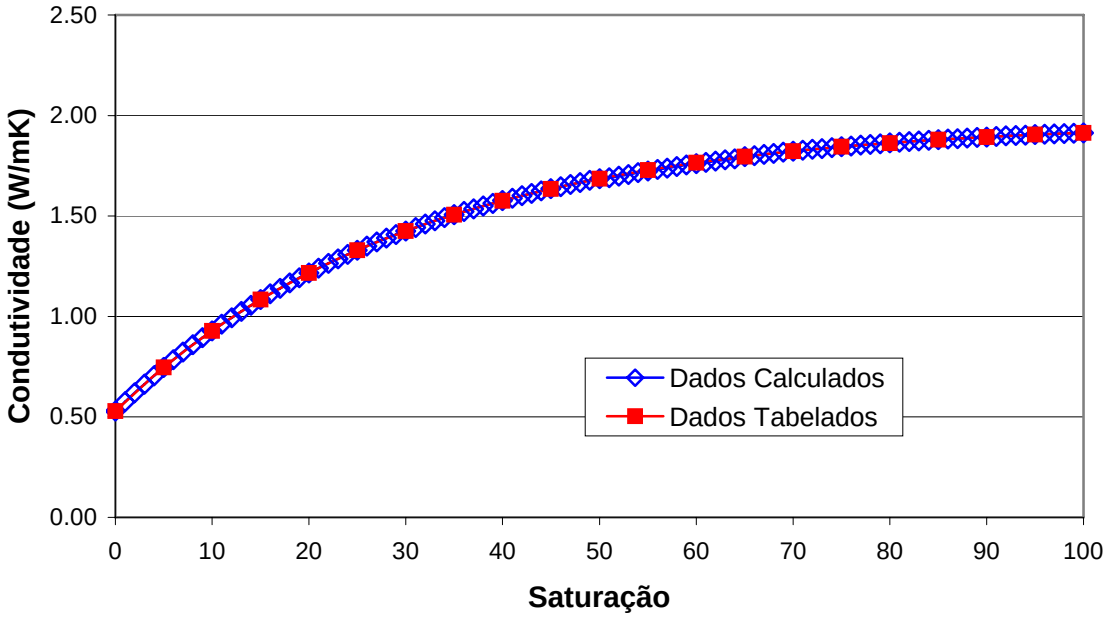

Figura A.6: Gráfico Condutividade – Backfill

Tabela A.6: Equações de Ajuste – Condutividade – Backfill

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 50	0.52998+0.04686*S-0.000806017*S^2+0.0000122922*S^3-0.000000208968*S^4+0.00000000258763*S^5-0.0000000000134902*S^6
51 – 65	1.431-0.00523*S+0.00034*S^2-0.00000266667*S^3
66 – 75	0.989+0.0189*S-0.0001*S^2
76 – 90	0.519+0.03867*S-0.00038*S^2+0.00000133333*S^3
91 – 100	1.164+0.0135*S-0.00006*S^2

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Temperatura ($D_{\theta L}$):

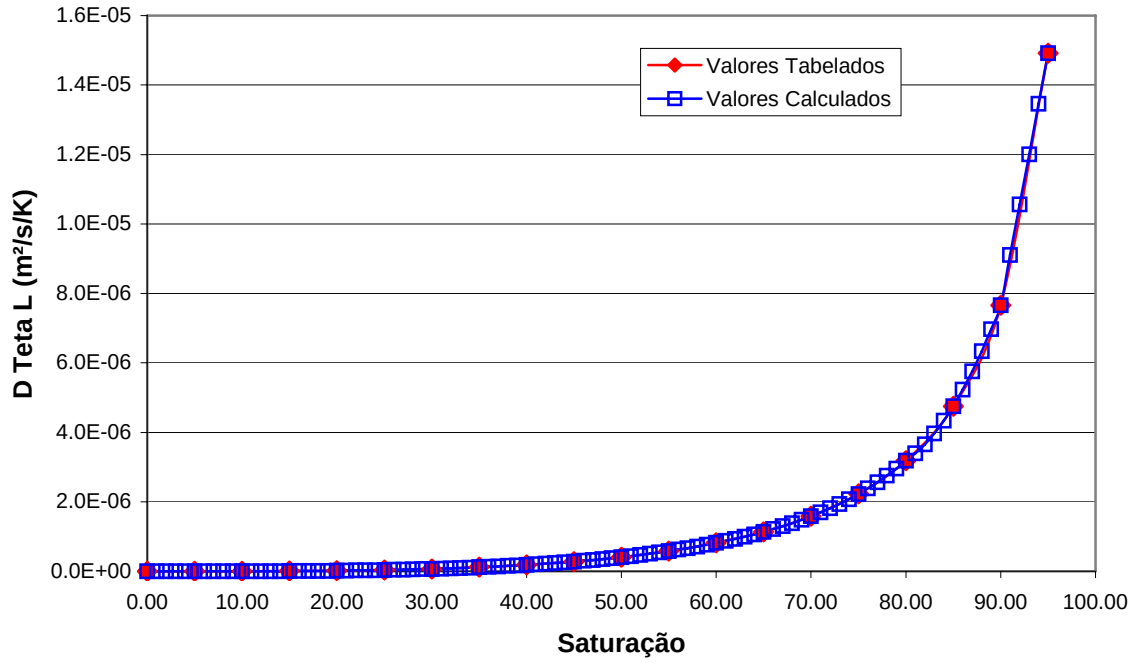

Figura A.7: Gráfico $D_{\theta L}$ – Backfill

Tabela A.7: Equações de Ajuste – $D_{\theta L}$ – Backfill

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 4	0
5	4.125E-12
6 – 50	0.000000000000214804+0.0000000000804479*S-0.0000000000334264*S^2+0.00000000000346156*S^3+7.69826E-15*S^4-3.94661E-16*S^5+8.26018E-18*S^6
51 – 80	0.00011317-0.0000111371*S+0.000000456031*S^2-0.00000000995172*S^3+0.00000000012231*S^4-0.000000000000803333*S^5+2.21333E-15*S^6
81 – 90	0.000160268-0.0000041059*S+0.00000002678*S^2
91 – 95	-0.000122935+0.000001451*S
96 – 100	-0.009+0.000094858*S

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Líquido Associado a Um Gradiente de Temperatura (D_{TL}):

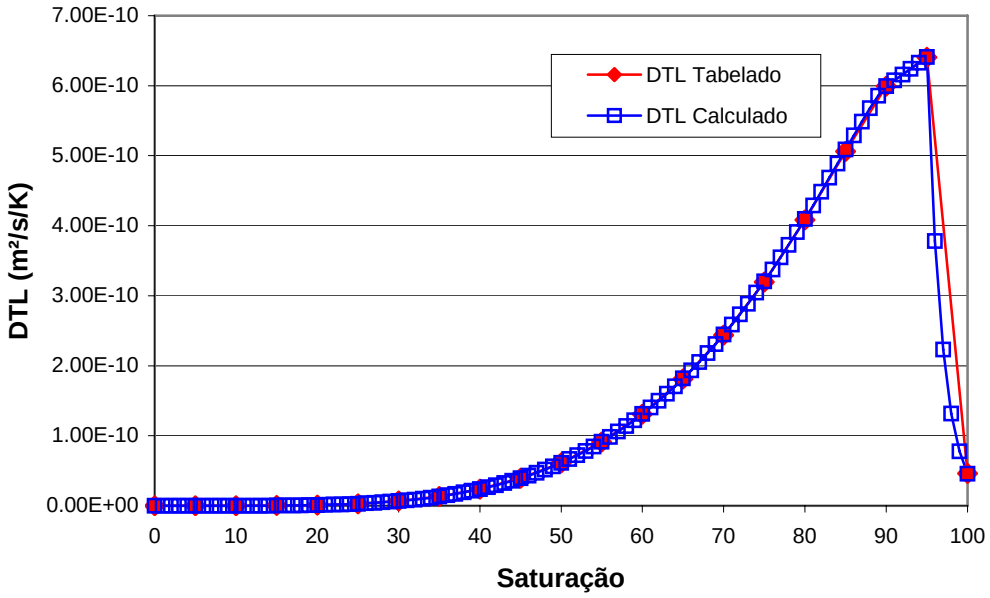

Figura A.8: Gráfico D_{TL} – Backfill

Tabela A.8: Equações de Ajuste – D_{TL} – Backfill

Saturação	Equação de Ajuste (log)
0 – 4	0
5 – 10	-19.7+0.606*S
11 – 35	-19.14+0.97357*S-0.06002*S^2+0.00213*S^3-0.0000393333*S^4+0.000000293333*S^5
36 – 90	-19.2113+0.67424*S-0.02432*S^2+0.000507884*S^3-0.00000605184*S^4+0.0000000384153*S^5-0.000000000101089*S^6
91 – 95	-9.744+0.0058*S
96 – 100	12.6-0.2294*S

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Conteúdo de Umidade ($D_{\theta V}$):

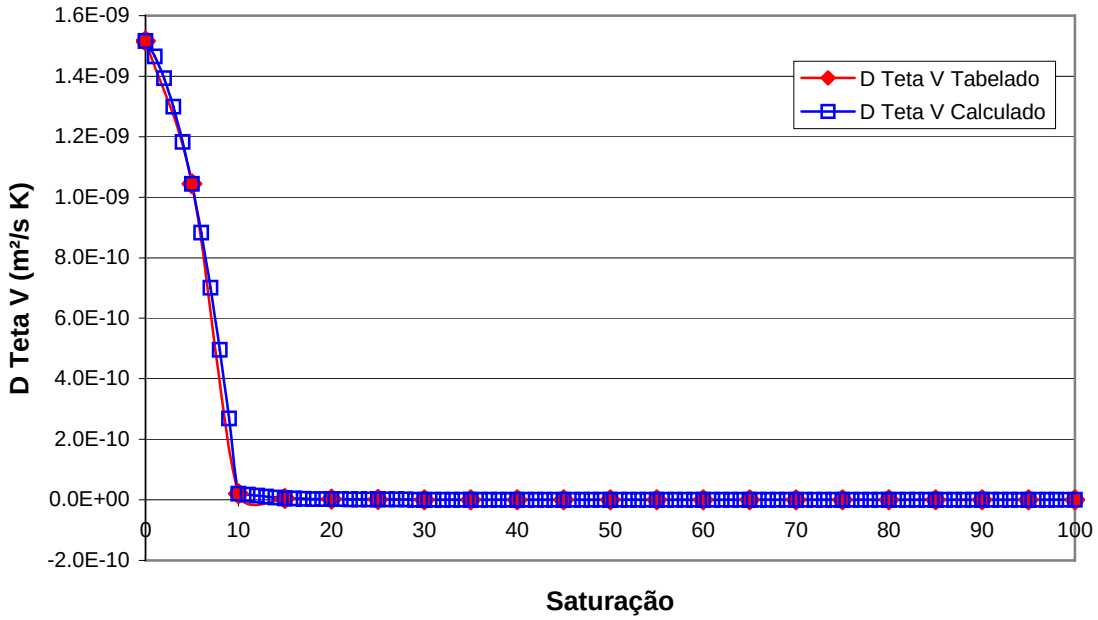

Figura A.9: Gráfico $D_{\theta V}$ – Backfill

Tabela A.9: Equações de Ajuste – $D_{\theta V}$ – Backfill

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 10	0.000000001516-0.000000000039259*S-0.0000000000110282*S^2
11 – 15	0.000000000052078-0.0000000000031488*S
16 – 40	0.00000000000019303+0.000000000338395*EXP(-S/2.78821)+0.0000000000252856*EXP(-S/7.13508)
41 – 90	-5.76164E-15+0.00000000000652103*EXP(-S/21.56122)+0.00000000000064348*EXP(-S/21.49784)+0.0000000000258265*EXP(-S/6.69427)
91 – 100	-0.00000000000277218+7.32932E-15*S-4.5552E-17*S^2

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Temperatura (D_{TV}):

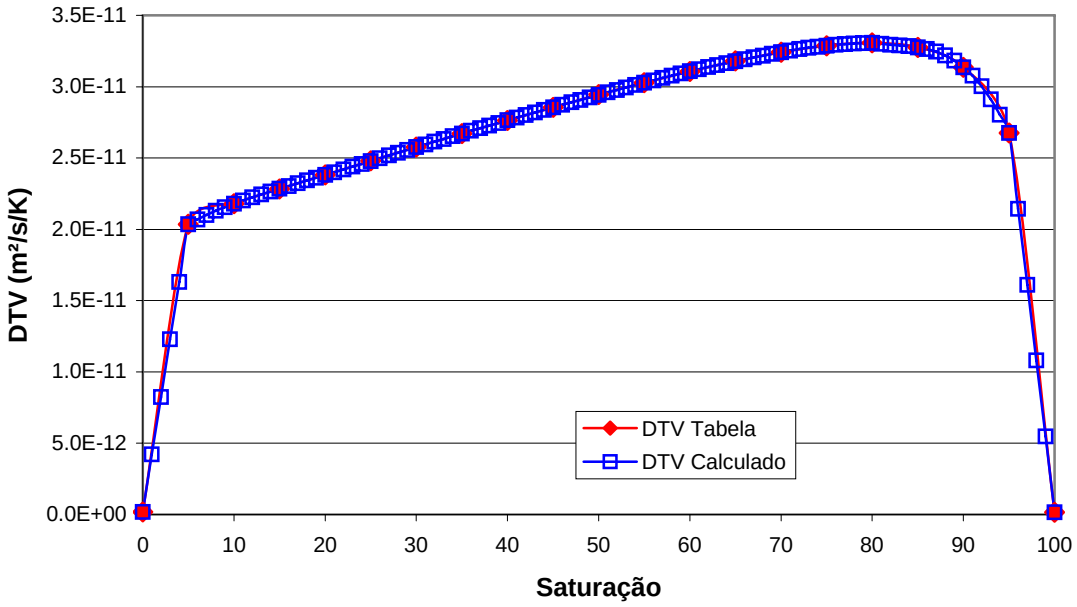

Figura A.10: Gráfico D_{TV} – Backfill

Tabela A.10: Equações de Ajuste – D_{TV} – Backfill

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 5	0.0000000000001879+0.00000000000403242*S
6 – 70	0.0000000000178174+0.000000000000694937*S-0.0000000000000480436*S^2+2.40489E-15*S^3-6.78282E-17*S^4+1.08266E-18*S^5-9.13205E-21*S^6+3.15467E-23*S^7
71 – 80	-0.00000000000013+0.000000000000815*S-0.000000000000005*S^2
81 – 95	0.00000000164555-0.0000000000585613*S+0.000000000000794*S^2-2.86667E-15*S^3
96 – 100	0.0000000000531937-0.00000000000531776*S

2.3 Areia (Arquivo de Propriedades)

Ajuste para Condutividade Térmica Efetiva:

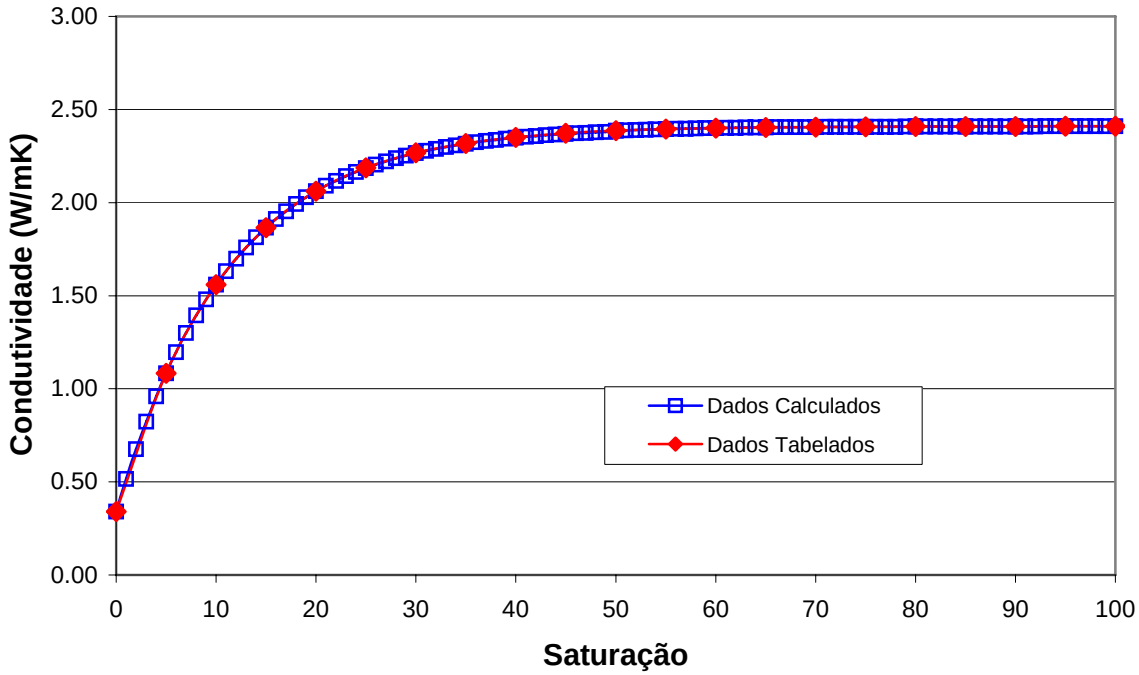

Figura A.11: Gráfico Condutividade – Areia

Tabela A.11: Equações de Ajuste – Condutividade – Areia

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 20	0.34+0.18302*S-0.00777*S^2+0.000187333*S^3-0.0000206667*S^4
21 – 50	0.70612+0.11928*S-0.00339*S^2+0.0000453131*S^3-0.000000236364*S^4
51 – 65	2.16465+0.00693*S-0.00005*S^2
66 – 75	2.287+0.0031*S-0.00002*S^2
76 – 85	2.392+0.0002*S-1.53525E-21*S^2
86 – 90	2.409
91 – 95	2.391+0.0002*S
96 – 100	2.41

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Temperatura ($D_{\theta L}$):

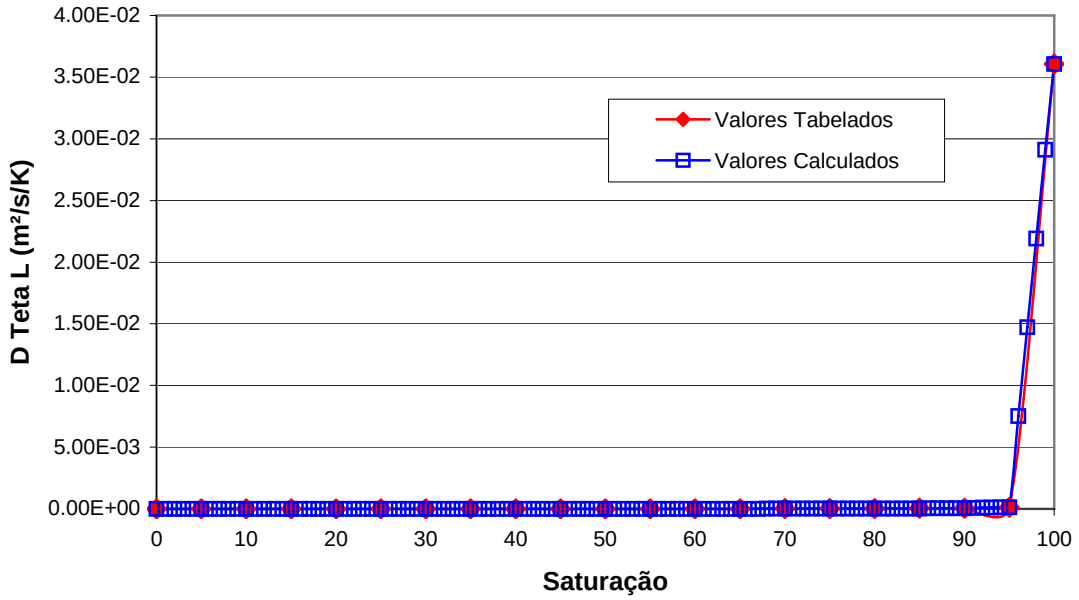

Figura A.12: Gráfico $D_{\theta L}$ – Areia

Tabela A.12: Equações de Ajuste – $D_{\theta L}$ – Areia

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 4	0
5	0.0000000449
6 – 50	-0.0000000000686137-0.0000000025995*S+0.00000000260074*S^2-0.0000000000631158*S^3+0.0000000000200674*S^4-0.000000000000280311*S^5+1.94771E-16*S^6
51 – 75	-0.000245946+0.0000212269*S-0.000000731853*S^2+0.0000000127097*S^3-0.000000000110667*S^4+0.000000000000392*S^5
76 – 90	-0.00412+0.000159688*S-0.0000020704*S^2+0.00000000902667*S^3
91 – 95	-0.00115+0.000013508*I93
96 – 100	-0.68271+0.00719*S

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Líquido Associado a Um Gradiente de Temperatura (D_{TL}):

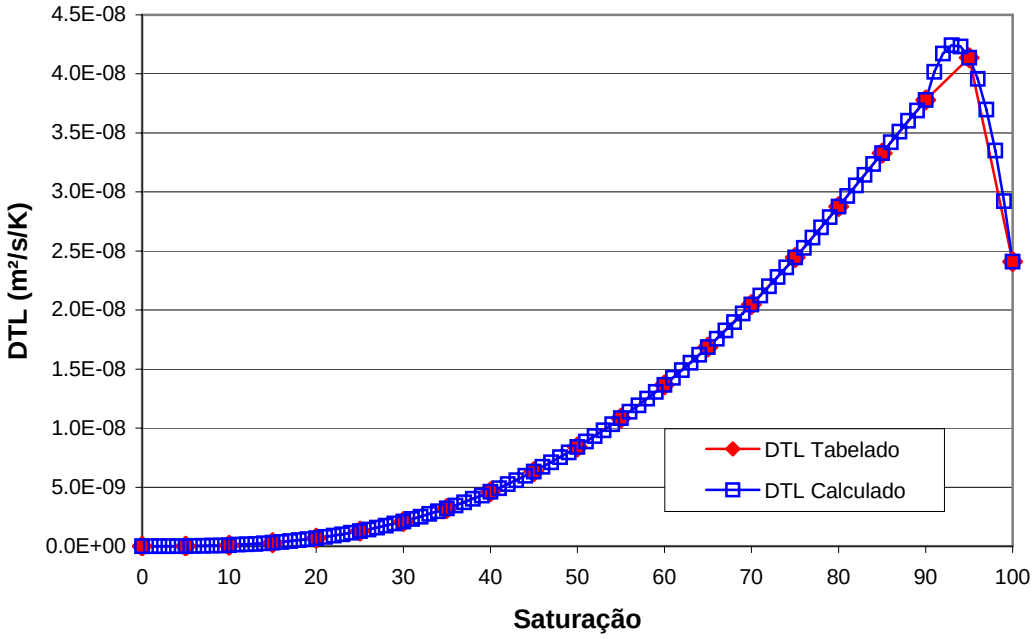

Figura A.13: Gráfico D_{TL} – Areia

Tabela A.13: Equações de Ajuste – D_{TL} – Areia

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 4	0
5 – 90	0.000000000000180388-0.00000000000332429*S+0.0000000000000892022*S^2+7.96583E-16*S^3+5.35462E-15*S^4-2.28613E-16*S^5+5.17168E-18*S^6-6.62116E-20*S^7+4.51224E-22*S^8-1.27779E-24*S^9
91 – 100	-0.0000035939+0.0000000779*S-0.0000000004172*S^2

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Conteúdo de Umidade ($D_{\theta V}$):

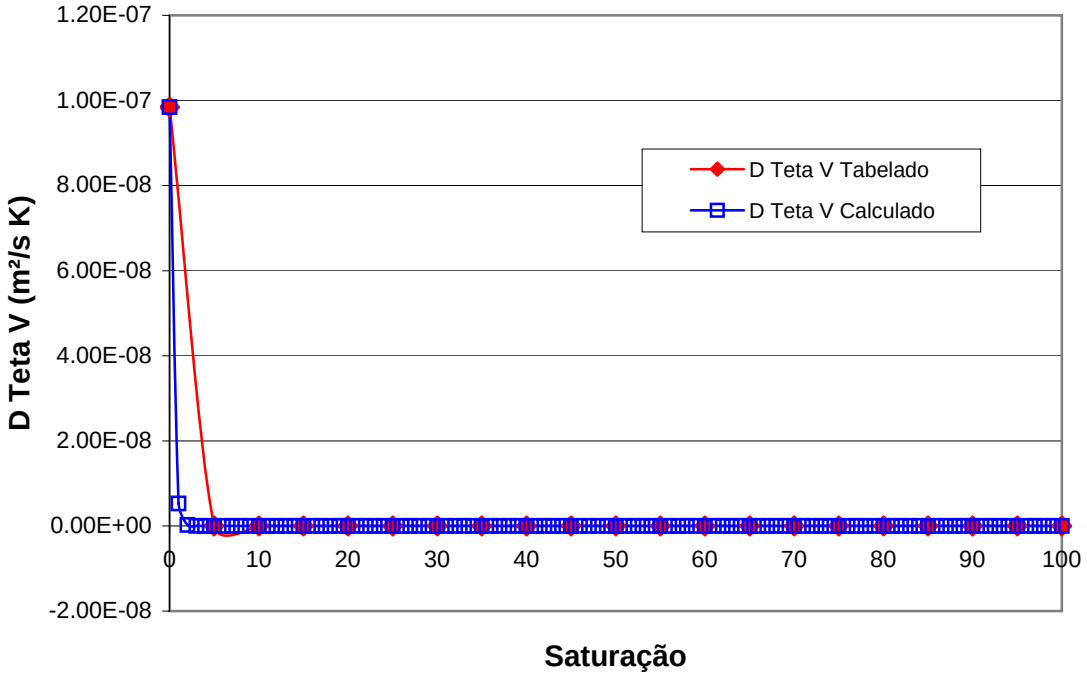

Figura A.14: Gráfico $D_{\theta V}$ – Areia

Tabela A.14: Equações de Ajuste – $D_{\theta V}$ – Areia

Saturação	Equação de Ajuste (log)
0 – 5	-7.00687-1.27047*S
6 – 45	-12.48418-0.25113*S+0.0191*S^2-0.00088445*S^3+0.0000235153*S^4-0.000000330128*S^5+0.00000000189285*S^6
46 – 95	-14.32919+0.01237*S-0.000654554*S^2+0.00000838901*S^3-0.0000000368061*S^4
96 – 100	-61.30467+1.01578*S-0.00555*S^2

Ajuste para o Coeficiente de Transporte de Vapor Associado a Um Gradiente de Temperatura (D_{TV}):

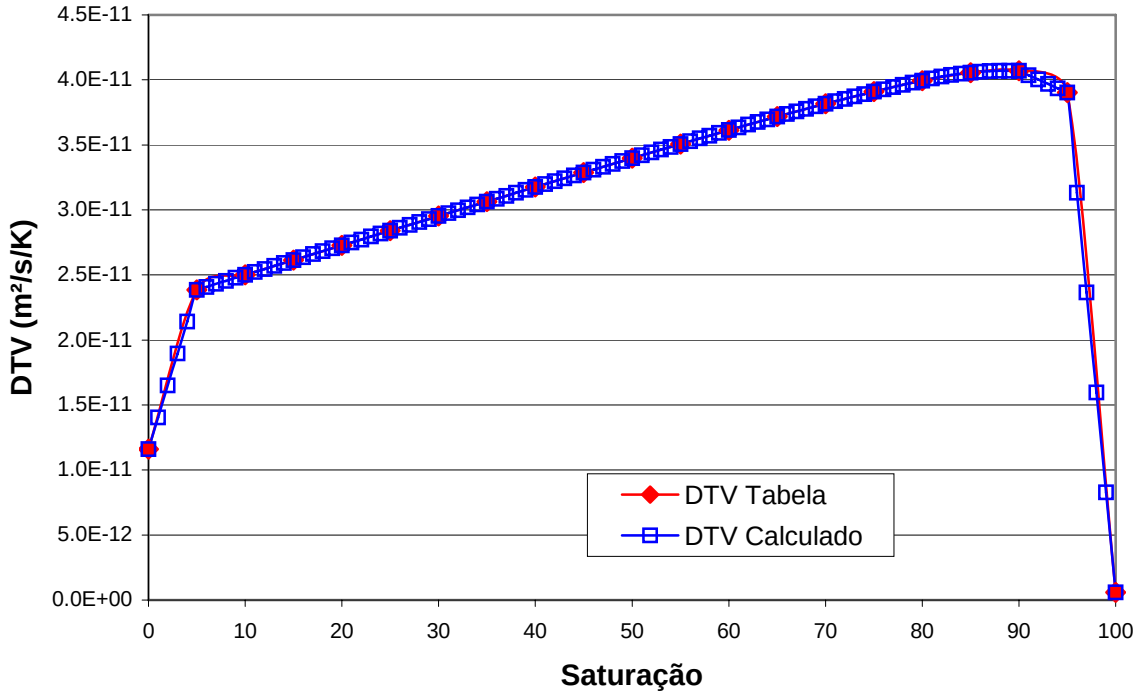

Figura A.15: Gráfico D_{TV} – Areia

Tabela A.15: Equações de Ajuste – D_{TV} – Areia

Saturação	Equação de Ajuste
0 – 5	0.0000000000116+0.000000000002452*S
6 – 80	0.00000000002268+0.000000000000237467*S-6.06592E-16*S^2+1.31771E-17*S^3-1.1211E-19*S^4
81 – 90	-0.00000000003662+0.000000000001741*S-0.0000000000000098*S^2
91 – 95	0.00000000007075-0.000000000000334*S
96 – 100	0.000000000768971-0.0000000000076837*S

3.0 ARQUIVOS DAS ISOTERMAS

Elaboraram-se arquivos de isotermas para três tipos de solos :

- Aluvião Arenoso (silto-arenoso);
- Backfill (areno-siltoso);
- Areia (arenoso).

Após o ajuste do conteúdo de umidade, calculou-se a sua derivada em relação ao conteúdo de umidade.

3.1 Aluvião Arenoso (Arquivo de Isotermas)

Ajuste para o Conteúdo de Umidade (θ):

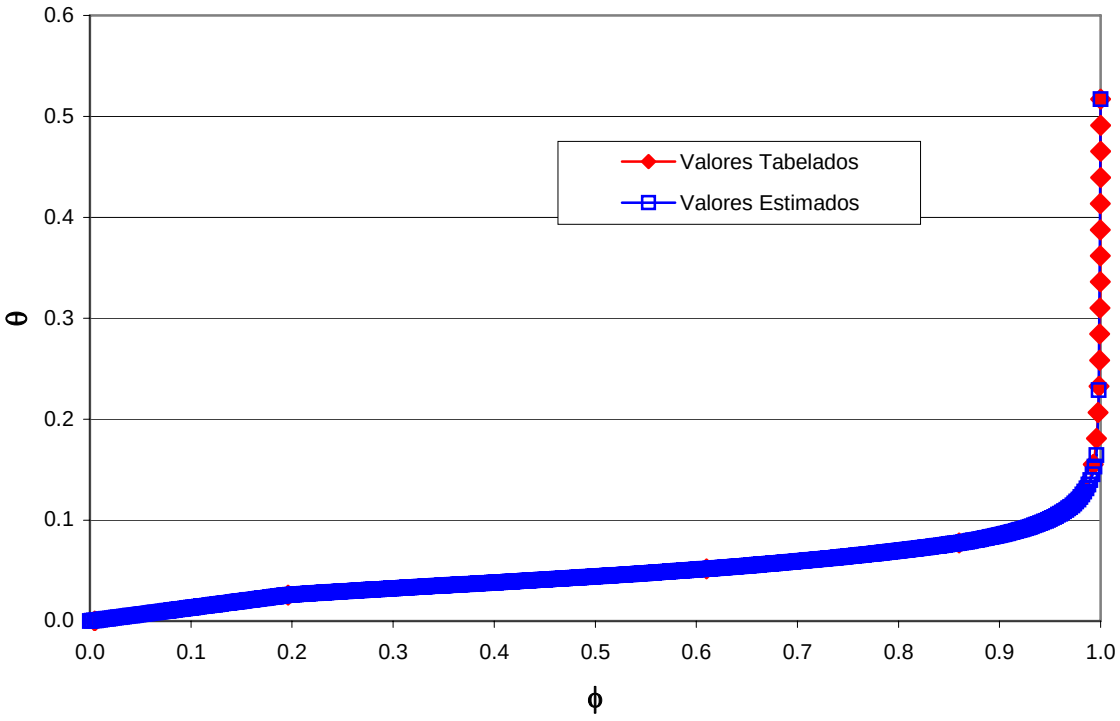

Figura A.16: Gráfico ϕ x θ - Aluvião Arenoso

Tabela A.16: Equações de Ajuste – θ – Aluvião Arenoso

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.000 – 0.196	1.73472E-18+0.13182*ϕ
0.198 – 0.860	ϕ/(3.26577+25.85072*ϕ-19.47771*ϕ^2)
0.862 – 0.996	(-0.02276)*LN((ϕ-0.99904)/(-4.1862))
0.998	(-0.10378)*LN((ϕ-1.00013)/(-0.01931))
1.000	0.517

Derivada (dϕ/dθ):

Para o calculo da derivada da umidade relativa em relação ao conteúdo de umidade, dividiu-se o gráfico ϕ x θ em 4 regiões como mostrado na Figura A.17.

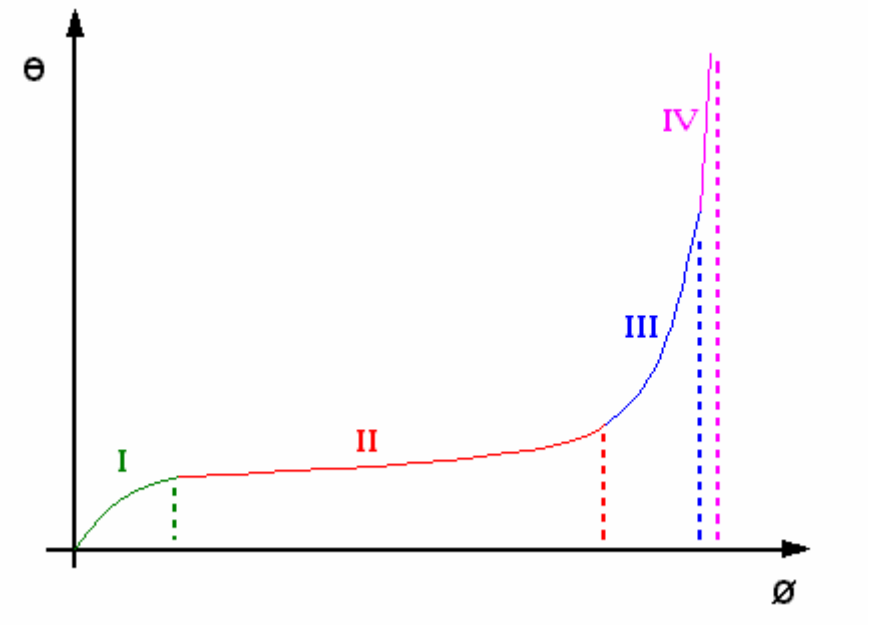

Figura A.17: Regiões do Gráfico ϕ x θ

Região I

Escolheu-se uma reta para esta região:

$$\theta = C_1.\phi + C_2 \tag{A.1}$$

Isolando a variável ϕ para o calculo da derivada, tem-se:

$$\phi = \frac{(\theta - C_2)}{C_1} \tag{A.2}$$

Deste modo, obteve-se a derivada desta reta, dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{1}{C_1} \tag{A.3}$$

Sendo a constante C_1 = 0.13182, considerada para os pontos ϕ = 0.000 até ϕ = 0.196, obteve-se a derivada dϕ/dθ para este intervalo, descrita na Tab. A.17.

Tabela A.17: Equações de Ajuste – dϕ/dθ – Aluvião Arenoso

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.000 – 0.196	1/0.13182

Região II

Para o calculo da derivada neste intervalo, utilizou-se o Modelo GAB representado na Eq. (A.5). Para esta região do gráfico, representa-se θ como:

$$\theta = \frac{\phi}{A\phi^2 + B\phi + C} \tag{A.4}$$

onde:

$$A\phi^2 + B\phi + C = R \tag{A.5}$$

Derivando ϕ em relação a θ, obtém-se:

$$\frac{\partial\phi}{\partial\theta} = \left[\left(-A + \frac{C}{\phi^2}\right)\theta^2\right] \tag{A.6}$$

onde a constante C é igual a 3.26577 para o intervalo de ϕ variando entre 0.198 e 0.860. A equação de ajuste desta derivada está representada na Tabela A.18..

Tabela A.18: Equações de Ajuste – dϕ/dθ – Aluvião Arenoso

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.198 – 0.860	((19.47771+(3.26577/ϕ^2))* θ^2)^-1

Região III

Para o intervalo de ϕ variando entre 0.862 e 0.996, utilizou-se a exponencial mostrada na Eq. (A.7) para a obtenção da derivada dϕ/dθ:

$$\phi = C_3.e^{B_3.\theta} + D_3 \tag{A.7}$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial\theta} = C_3.B_3.e^{B_3\theta} \tag{A.8}$$

Sendo C3, B3 e D3 constantes, descreveu-se a equação de ajuste para a derivada dϕ/dθ, conforme a Tab. A.19.

Tabela A.19: Equações de Ajuste – dϕ/dθ – Aluvião Arenoso

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.862 – 0.996	(4.1862/0.02276)*EXP(-θ/0.02276)

Região IV

Ajustou-se a região 4 do gráfico através da Eq. (A.9), para o intervalo de ϕ variando entre 0.998 e 1.000.

$$\phi = C_4.e^{B_4.\theta} + D_4 \tag{A.9}$$

Derivando em relação a θ, obtém-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = C_4.B_4.e^{B_4\theta} \tag{A.10}$$

Sendo C_4, B_4 e D_4 constantes, descreve-se a equação de ajuste para a derivada dϕ/dθ na Tabela A.20.

Tabela A.20: Equações de Ajuste – dϕ/dθ – Aluvião Arenoso

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.862 – 0.996	(0.01931/0.10378)*EXP(-θ/0.10378)

3.2 Backfill (Arquivo de Isotermas)

Ajuste para o Conteúdo de Umidade (θ):

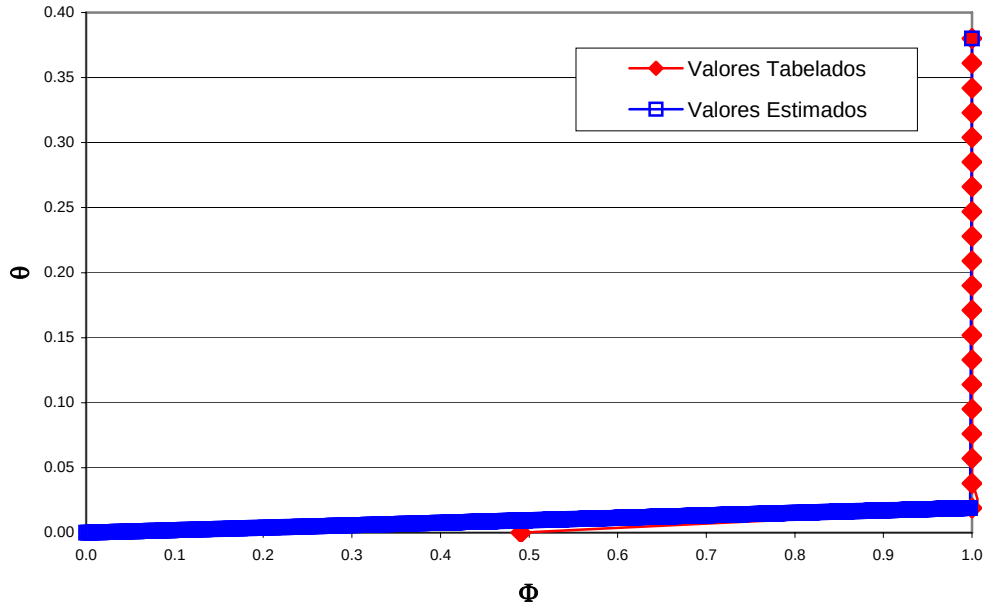

Figura A.18: Gráfico ϕ x θ - Backfill

Tabela A.21: Equações de Ajuste – θ – Backfill

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.000 – 0.006	0
0.008 – 0.974	-0.000101651+0.0137*ϕ
0.976 – 0.996	-0.54704+0.57489*ϕ
0.998 – 1.000	-103.41761+103.68261*ϕ

Derivada (dϕ/dθ):

Devido aos poucos valores de dados tabelados até a região próxima da saturação do solo, a qualidade dos dados ajustados tornaram-se baixos, tanto para os arquivos relacionados ao backfill quanto para os da areia.

Obteve-se a derivada dϕ/dθ através das Eq.(A.3) entre os segmentos citados na Tabela A.21.

As constantes C_1 para cada seguimento e a equação de ajuste para as derivadas dϕ/dθ são mostradas na Tabela A.22.

Tabela A.22: Equações de Ajuste – dϕ/dθ – Backfill

Umidade Relativa	Constante C_1	Equação de Ajuste
0.000 – 0.006	0	0
0.008 – 0.974	0.0137	1/0.0137
0.976 – 0.996	0.57489	1/0.57489
0.998 – 1.000	103.68261	1/103.68261

3.3 Areia (Arquivo de Isotermas)

Ajuste para o Conteúdo de Umidade (θ):

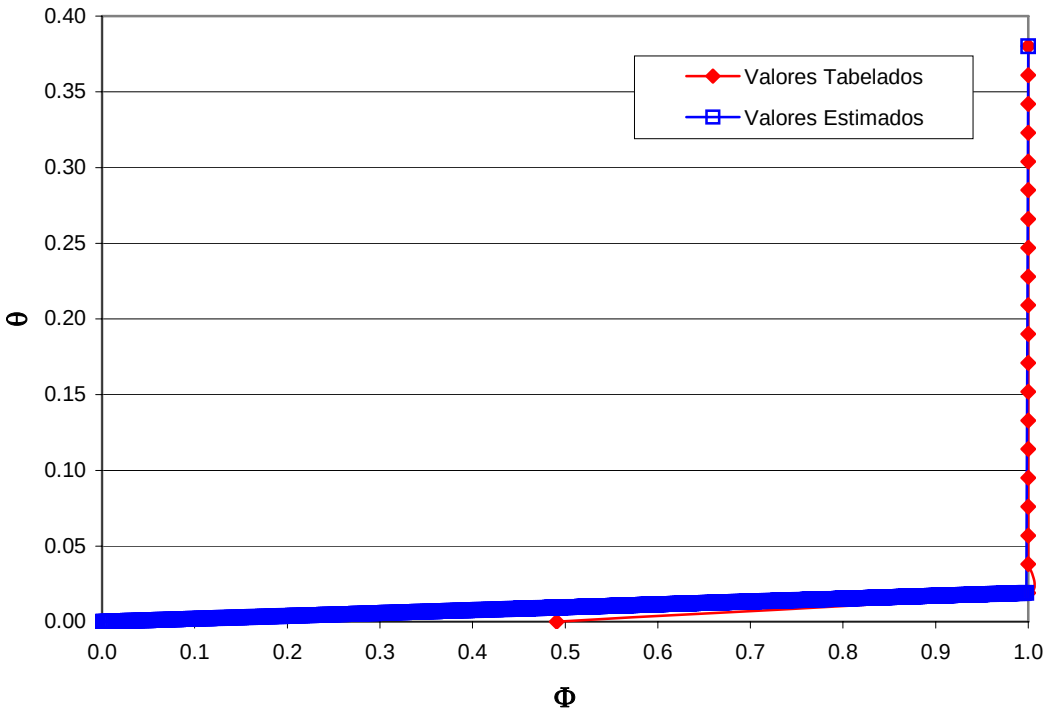

Figura A.19: Gráfico ϕ x θ - Areia

Tabela A.23: Equações de Ajuste – θ – Areia

Umidade Relativa	Equação de Ajuste
0.000 – 0.996	0.01904*ϕ
0.998 – 1.000	-180.12+180.5*ϕ

Derivada (dϕ/dθ):

Obteve-se a derivada dϕ/dθ através da Eq.(A.3), compreendida entre os segmentos descritos na Tabela A.23.

As constantes C_1 para cada seguimento e a equação de ajuste para as derivadas dϕ/dθ são descritas na Tabela A.24.

Tabela A.24: Equações de Ajuste – dϕ/dθ –Areia

Umidade Relativa	Constante C_1	Equação de Ajuste
0.000 – 0.006	0.01904	1/0.01904
0.998 – 1.000	180.5	1/180.5