

**UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA

DeTec – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

**USO DE CERÂMICA EM SENSORES TÉRMICOS PARA A
DETERMINAÇÃO DA DIFUSIDADE TÉRMICA DE SOLOS EM
FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE**

FABIANI JULIANI BRUM

Ijuí, RS – Brasil

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FABIANI JULIANI BRUM

**USO DE CERÂMICA EM SENSORES TÉRMICOS PARA A
DETERMINAÇÃO DA DIFUSIDADE TÉRMICA DE SOLOS EM
FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Matemática – Área de Concentração em Modelagem Matemática, da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Dr. Gilmar de Oliveira Veloso

Ijuí, RS – Brasil
2007

UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO
GRANDE DO SUL

DeFEM – DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA

DeTec – DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**“USO DE CERÂMICA EM SENSORES TÉRMICOS PARA A
DETERMINAÇÃO DA DIFUSIDADE TÉRMICA DE SOLOS EM
FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE”**

elaborada por

FABIANI JULIANI BRUM

Como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Gilmar de Oliveira Veloso – DeFEM (Orientador)

Prof. Dr. Gilberto Carlos Thomas - DeFEM

Prof. Pós Dr. Genei Antônio Dalmago – Embrapa Trigo

Ijuí (RS), 19 de abril de 2007.

AGRADECIMENTOS

Nenhum trabalho consegue atingir seus objetivos plenos se, durante a execução, não contar com contribuição de pessoas e entidades. Agradecer por essa contribuição é o mínimo que se pode e se deve fazer.

Inicialmente, agradeço a **Deus**, por ter me alcançado a graça da coragem, do ânimo e da proteção para superar os obstáculos de um trabalho que em muito tem sido desafiador.

Agradeço também à **minha família**, pelo amor, confiança, apoio, incentivo e credibilidade.

Ao professor orientador, **Dr. Gilmar de Oliveira Veloso**, pelo privilégio de poder compartilhar os seus saberes, tomar emprestado seus livros e merecer a sua confiança.

Aos **professores e colegas do Mestrado**, por terem propiciado a oportunidade de trocarmos experiências e juntos construirmos conhecimentos. Obrigado também, pelo convívio harmonioso e pelo incentivo. Aos **departamentos da UNIJUÍ** – Departamento de Agronomia; Departamento de Física, Estatística e Matemática, meu agradecimento.

A todos aqueles com os quais convivi, pelo trabalho em busca de alternativas, cujos nomes não mencionei, mas que guardo em minha memória, pela ajuda e boa vontade, pela disponibilidade e confiança, meus sentimentos de gratidão.

RESUMO

O controle da quantidade de água (umidade) é importante, pois é um fator que influencia no crescimento das plantas, na qualidade do produto e na produtividade. Diante da dificuldade de manejo adequado da irrigação e levando em consideração a importância do manejo da água na Região Noroeste que tem a sua economia alavancada no setor primário (agricultura, produção de citros, plantação de cana de açúcar, pastagens para o gado). O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método para avaliar o teor de umidade do solo através do conhecimento da difusividade térmica da cerâmica. Para atingir este objetivo, foram feitos experimentos com amostras de solo com vários teores de umidade utilizando como sensor térmico de dissipação de calor, uma fonte de calor acoplada em um termopar ambos colocados no interior de uma cerâmica (tijolo comum). O uso do material poroso permite que o sensor seja utilizado em qualquer tipo de solo. A partir da medição das temperaturas em função do tempo, numa determinada posição, foi possível obter as difusividades térmicas para várias condições de umidades e dois tipos de solos: Latossolo Vermelho e Areia. O procedimento numérico consiste na resolução da equação do calor unidimensional em regime transitório (problema direto) e o método iterativo de Levenberg-Marquardt (solução do problema inverso). Os resultados mostram que as amostras com solo mais úmido apresentam valores de difusividade térmica maiores do que as amostras com menor umidade. Também foi construída uma curva de retenção de umidade do solo, que relaciona o teor de umidade do solo com a difusividade térmica da cerâmica.

Palavras-chave: solos, problema inverso, difusividade térmica, sensor térmico umidade do solo, modelagem matemática.

ABSTRACT

The amount of water (moisture) control is important, because it is a factor that influences the plants growth, the product quality and the productivity. In the face of the difficulty of appropriate handling of the irrigation and considering the importance of the water handling in the Northwest Region that has its economy based in the primary sector (agriculture, citrus production, sugar cane growing, cattle pastures). The present work aims to develop a method to evaluate the soil moisture content by knowing thermal diffusivity of the ceramic. To reach this objective, experiments with soil samples with several moisture content were done by using a heat source joined to a thermocouple as a thermal sensor of heat dissipation, both put into a ceramic (common brick). The use of the porous material allows the sensor to be used in any kind of soil. Starting from the measurement of the temperatures as function of time, in a certain position, it was possible to obtain the thermal diffusivities for several moisture conditions and two kinds of soils: Latossolo Vermelho and Sand. The numerical procedure consists of solving the heat equation in transitory regime (direct problem) and the iterative Levenberg-Marquardt method (inverse problem solution). The results show that the samples with moister soil present thermal diffusivity values higher than the samples with lower moisture. A soil moisture retention curve was also built, which relates the soil moisture content with the ceramic thermal diffusivity.

Key words: soils, inverse problem, thermal diffusivity, thermal sensor, soil moisture, mathematical modeling.

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
LETRAS GREGAS	15
INTRODUÇÃO	17
PRIMEIRO CAPÍTULO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.1 SOLO.....	20
1.1.1 <i>Propriedades Físicas Do Solo</i>	23
1.1.1.1 Densidade	23
1.1.1.1.1 Porosidade do Solo	24
1.1.1.2 Teor de Umidade do Solo.....	26
1.1.2 <i>Propriedades Térmicas do Solo</i>	27
1.1.2.1 Calor Específico	28
1.1.2.2 Condutividade Térmica do Solo.....	29
1.1.2.3 Difusividade Térmica	30
1.2 CERÂMICA	31
1.2.1 <i>Propriedades e Fatores de Degradação das Cerâmicas</i>	32
1.3 SENSORES	33
1.3.1 <i>Métodos Indiretos para Determinação do Conteúdo de Água do Solo</i>	34
1.3.1.1 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)	34
1.3.1.2 Blocos de Resistência Elétrica.....	36
1.3.1.3 Tensiômetros	36
1.3.1.4 Condutividade Térmica	38
1.3.1.5 Irrigas.....	39
1.3.1.6 Sonda de Nêutrons.....	41
1.3.1.7 Sensores de Dissipação de Calor	42
1.4 PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	44
1.5 PROBLEMA INVERSO	46
SEGUNDO CAPÍTULO - ESQUEMA FÍSICO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA	
INVERSO	53
2.1 PROBLEMA DIRETO	54

2.2 ESQUEMA NUMÉRICO	56
2.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO	58
2.3.1 Algoritmo do Método de Levenberg-Marquardt	58
TERCEIRO CAPÍTULO – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS SOLOS	61
3.2 DETERMINAÇÃO DA COLETA DA UMIDADE	61
3.3 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR	64
3.4 COLETA DE TEMPERATURA COM OS TERMOPARES	65
3.5 VERIFICAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	72
QUARTO CAPÍTULO – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	75
4.1 AJUSTE NÃO – LINEAR USANDO O MÉTODO DE LEVENBERG – MARQUARDT	75
4.2 CURVA DE CALIBRAÇÃO DE UMIDADE DAS AMOSTRAS DE SOLO	82
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Perfil detalhado da formação do solo.....	22
Figura 1.2	Amostra de solo indicando as frações em relação à densidade e porosidade....	25
Figura 1.3	Alguns tipos de barro que formam a cerâmica.....	31
Figura 1.4	Modelo de um sensor TDR.....	35
Figura 1.5	Diagrama de um tensiômetro comum no qual a tensão da água interna segue a tensão da água no solo.....	38
Figura 1.6	Irriga com elemento poroso espesso de baixa tensão.....	40
Figura 1.7	Sensor irrigas com cápsula porosa mini.....	40
Figura 1.8	Irrigas de 25 kPa com cuba para teste de imersão.....	40
Figura 1.9	Esquema da técnica da sonda de nêutros para medir a umidade do solo.....	42
Figura 1.10	Esquema da transferência de calor entre dois corpos.....	44
Figura 1.11	Representação esquemática do problema direto e inverso.....	46
Figura 2.1	Esquema da colocação do termopar dentro da cerâmica.....	53
Figura 2.2	Esquema de discretização dos nodos.....	56
Figura 3.1	Amostras prontas para serem colocados os solos.....	61
Figura 3.2	Esquema do Funil de Buchner.....	62
Figura 3.3	Funil de Buchner Laboratório Física dos solos UNIJUÍ.....	63
Figura 3.4	Sensor desenvolvido.....	65
Figura 3.5	Resistor.....	65
Figura 3.6	Computador e placa analógica/digital do Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática.....	66
Figura 3.7	Comparação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo seco.....	67
Figura 3.8	Comparação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo saturado.....	67

Figura 3.9	Variação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo seco.....	68
Figura 3.10	Variação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo saturado.....	68
Figura 3.11	Esquema da colocação dos termopares.....	69
Figura 3.12	Amostra de latossolo vermelho e areia com sensor e termopares.....	69
Figura 3.13	Temperatura em função do tempo para um solo latossolo vermelho seco.....	70
Figura 3.14	Temperatura em função do tempo para um solo arenoso seco.....	71
Figura 3.15	Temperatura em função do tempo para um solo latossolo vermelho úmido.....	71
Figura 3.16	Temperatura em função do tempo para um solo arenoso úmido.....	72
Figura 3.17	Análise de ΔT do latossolo vermelho em função do tempo para diferentes umidades.....	73
Figura 3.18	Análise de ΔT da areia em função do tempo para diferentes umidades.....	73
Figura 4.1	Ajuste de curva para tensão de $20kPa$ (Latosolo Vermelho).....	76
Figura 4.2	Ajuste de curva para tensão de $40kPa$ (Latosolo Vermelho).....	77
Figura 4.3	Ajuste de curva para tensão de $60kPa$ (Latosolo Vermelho).....	78
Figura 4.4	Ajuste de curva para tensão de $100kPa$ (Latosolo Vermelho).....	78
Figura 4.5	Ajuste de curva para tensão de $40kPa$ (Areia).....	79
Figura 4.6	Ajuste de curva para tensão de $60kPa$ (Areia).....	80
Figura 4.7	Ajuste de curva para tensão de $100kPa$ (Areia).....	80
Figura 4.8	Ajuste de curva para tensão de $200kPa$ (Areia).....	81
Figura 4.9	Curva de calibração do Latossolo Vermelho.....	83
Figura 4.10	Curva de calibração da Areia.....	84
Figura 4.11	Relação entre a difusividade térmica e tensão do Latossolo Vermelho.....	85
Figura 4.12	Relação entre a difusividade térmica e tensão da Areia.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparativo dos valores calculados do Latossolo Vermelho.....	82
Tabela 4.2 – Comparativo dos valores calculados da Areia.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s - área de solo [m^2]

A - área de transferência de calor [m^2]

A_{sol} - área de líquido [m^2]

A_{st} - área de secção transversal solo [m^2]

a_0, a_1, a_2, a_3 - coeficientes obtidos por ocasião dos ajustes dos dados

C - capacidade térmica ou calor específico volumétrico [$J.m^{-3}.^{\circ}C^{-1}$]

c_a - calor específico da água [$cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ ou $J..m^{-3}.K^{-1}$]

c_p - calor específico de uma substância [$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]

C_s - calor específico do solo [$cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ ou $J..m^{-3}.K^{-1}$]

Cl - clima

dT - variação térmica [$^{\circ}C$]

dT/dx - gradiente de temperatura [$^{\circ}C.m^{-1}$]

d_c - diâmetro do cilindro [m]

Fo – número de Fourier [*adimensional*]

f_i - resíduo no ponto T_i

G - função desconhecida no problema inverso

$G(\hat{P}_k)$ - valores estimados para a função G

h - coeficiente de transferência de calor por convecção [$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$]

i - instantes de tempo

I - número total de medidas experimentais

Id - tempo (idade)

J - matriz jacobiana

J_k - matriz jacobiana calculada para a iteração k

k - condutividade térmica [$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]

K – condutividade hidráulica [$m.s^{-1}$]

K_0 - condutividade hidráulica saturada [$m.s^{-1}$]

K_c - constante de proporcionalidade da Lei de Darcy [$m.s^{-1}$]

$K(\theta)$ - função condutividade hidráulica [$m.s^{-1}$]

l_1, l_2 - carga piezométrica [m]

L - comprimento do resistor (da fonte) [m]

L_c – distância do resistor até a extremidade da cerâmica [m]

L_{cil} - altura do cilindro [m]

L_f - comprimento do filtro [m]

L_s - comprimento do caminho seguido pela solução [m]

L_{sol} - comprimento do caminho seguido pela solução [m]

m_T - massa total da amostra [kg]

m_s - massa das partículas sólidas [kg]

m_l - massa da solução do solo (líquidos) [kg]

m_g - massa de gás [kg]

M - Conteúdo de umidade expresso em % na base de peso ou na base de volume [%]

M_o - material original (rocha)

n - número de nodos

N - tamanho da amostra

O - organismos vivos

of - “off set”, valor ajustado na fábrica

$\overset{1}{P}$ - vetor de parâmetros desconhecidos

P - parâmetros desconhecidos

$\overset{2}{q}$ - vetor fluxo de calor do solo [$W.m^{-1}$]

q - densidade de fluxo [$W.m^{-1}$]

Q - quantidade de calor [J]

R - coeficiente de correlação Pearson

s_d - declividade geralmente ajustada da fábrica

SE - erro padrão

$S(\hat{\beta})$ - é a soma dos erros quadrados ou função objetiva

Δt - variação de tempo [s]

t - tempo [s]

T - temperatura [°C]

T - variação de temperatura [°C]

T_{cer} - temperatura da cerâmica [°C]

T_{solo} - temperatura do solo [°C]

T_{op} - topografia

U - umidade gravimétrica [$kg \cdot kg^{-1}$]

v - módulo da velocidade real média [$m \cdot s^{-1}$]

\vec{v} - vetor velocidade real média [$m \cdot s^{-1}$]

v_z - vazão [$m^3 \cdot s^{-1}$]

V - volume do solo [m^3]

V_a - volume de água [m^3]

V_g - volume ocupado pelos gases [m^3]

V_l - volume ocupado pela água [m^3]

V_p - volume de poros ou volume do espaço poroso [m^3]

V_s - volume ocupado pelas partículas sólidas [m^3]

V_{sol} - volume de solução [m^3]

V_T - volume total da amostra [m^3]

x - distância [m]

$\|x\|$ - norma do vetor Euclidiano

\bar{x} - média amostral das temperaturas experimentais [$^{\circ}C$]

X - variável independente (leitura padrão)

y - função de ajuste da variável T

Y_i - valor dos resultados experimentais nos tempos t_i

LETRAS GREGAS

α - difusividade térmica [$m^2.s^{-1}$]

- razão de vazios (porosidade do solo) [$m^3.m^{-3}$]

ε_i - tolerância ou precisão

Θ - umidade adimensional [$m^3.m^{-3}$]

θ - umidade a base de volume [$m^3.m^{-3}$]

θ_s - umidade do solo saturado [$m^3.m^{-3}$]

θ_r - umidade residual [$m^3.m^{-3}$]

λ_k - parâmetro de amortização

μ - média populacional

ρ_r - densidade das partículas ou densidade real [$kg.m^{-3}$]

ρ_s - densidade do solo ou densidade aparente [$kg.m^{-3}$]

σ - desvio padrão

ψ - potencial total da água no solo [$J.m^{-3}$]

ψ_t é o gradiente de potencial total da solução [$J.m^{-3}$]

ψ_g - potencial gravitacional da água [$J.m^{-3}$]

ψ_m - potencial matricial da água [$J.m^{-3}$]

ψ_{os} - potencial osmótico da água [$J.m^{-3}$]

ψ_p - potencial de pressão da água [$J.m^{-3}$]

$\psi_m(\theta)$ - função potencial mátrico [$J.m^{-3}$]

$\nabla \psi_g$ - gradiente do potencial gravitacional [$J.m^{-3}$]

Ω_k - matriz diagonal do problema inverso

INTRODUÇÃO

A água é essencial para a produção vegetal e o seu manejo racional é decisivo para o desenvolvimento das plantas, evitando a falta ou o excesso. O conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância para a agricultura, sobretudo na determinação de sua variação, na otimização do manejo do solo e da água. Para isto, atualmente existem muitas técnicas e equipamentos, porém, o problema é complexo e não tem uma solução definida, tanto no que diz respeito aos equipamentos existentes como no tratamento matemático.

O controle da quantidade de água (umidade) é importante, pois é um fator que influencia no crescimento das plantas, na qualidade do produto e na produtividade. A falta ou excesso de água dentre as fases do ciclo de crescimento de uma cultura limita a produtividade, determinando, em muitos casos, a sua diminuição.

Para a maximização da produtividade é necessário aplicar a quantidade exata de água, no momento exato. Nas últimas décadas, a produtividade e a qualidade das culturas agrícolas, aumentou sensivelmente devido a uma melhor preparação do solo, uso de fertilizantes, melhores variedades, controle de pragas e melhores práticas agrícolas. A água no solo tem se tornado freqüentemente o fator limitante da produtividade, mesmo em climas considerados úmidos.

A modelagem matemática de fluxo de umidade em meios porosos não saturados é complexa devido a diferentes aspectos. Os solos contêm partículas sólidas que são habitualmente desordenadas, e espaços porosos, que são preenchidos com gás e fluido, formando tortuosos caminhos interconectados. A água pode ser transportada por vários

gravidade, e fluxo de líquido e vapor devido a diferenças na pressão total). Frequentemente, existe uma combinação de diversos mecanismos de transporte variando de local para local e mudando com o teor de umidade.

Segundo Cary & Fisher, 1983 a determinação do potencial matricial da água ou tensão da água no solo proporciona um meio de indicar quando irrigar e quanto de água aplicar ao solo e para determinar o fluxo de água no solo e a sua disponibilidade para as plantas, REECE, (1996).

Uma alternativa para determinação do teor de umidade do solo é o uso de curvas de calibração ou curva de retenção de água no solo. Para que este método funcione é necessário conhecer as propriedades termo-físicas do solo (ou da cerâmica). Sendo assim é importante implementar estudos com este propósito, com o objetivo de fornecer subsídios científicos e técnicos para o controle do teor de umidade em solos.

Neste trabalho foi desenvolvido e testado um modelo matemático para simular a distribuição de temperatura num meio poroso (bloco de cerâmica), inserido no interior de diferentes amostras de solo, submetida a um aquecimento visando a determinação indireta do teor de umidade do solo, considerando que a umidade do solo é a mesma do meio poroso. Através do conhecimento da difusividade térmica do meio poroso (bloco de cerâmica) pode-se construir uma curva de retenção de umidade e conhecer o teor de umidade do solo.

Atualmente, há vários equipamentos (sensores) para medir e monitorar a umidade do solo, tais como a sonda de nêutrons, resistência elétrica, TDR, capacitância elétrica ou obter valores da umidade por meio da curva de retenção da água obtidas em laboratório.

Devido ao alto custo dos sensores comerciais disponíveis, torna-se necessário desenvolver algum sensor de baixo custo, precisão e de fácil manuseio, isto é, acessível ao pequeno e médio produtor.

O método que leva em conta a dissipação do calor num meio poroso, além de seu uso em pesquisa, apresenta o potencial para aplicações em campo. Entre as principais vantagens desse método, pode-se citar: construção relativamente simples e custo

moderado; portabilidade; leitura adicional da temperatura do solo; leitura independente do teor de sais na solução; e o fato de os sensores poderem ser usados por longo período de tempo sem necessidade de recalibração ou manutenção periódica, como acontece com os tensiômetros.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para medir o potencial matricial de água de solos utilizando um meio poroso (bloco de cerâmica). Cada solo tem a sua curva de retenção, isto significa que quando mudar o solo, uma curva de retenção deverá ser construída para cada tipo de solo. Com o uso do meio poroso, este problema é eliminado, ou seja, uma curva é construída e servirá para vários tipos de solo.

O trabalho de dissertação está constituído de quatro capítulos. O primeiro compreende um estudo sobre o solo, suas propriedades físicas e térmicas. Foram realizados também, estudos sobre a cerâmica, sobre o uso de sensores térmicos e alguns métodos indiretos para determinação da umidade do solo, sobre a transferência de calor e sobre o problema inverso.

No segundo capítulo está descritos, o esquema físico, e a solução do problema inverso.

No terceiro capítulo descreve-se todo o procedimento experimental envolvido no trabalho.

Já no quarto capítulo foi realizada a verificação do modelo através de simulações numéricas e comparação com resultados experimentais bem como a análise dos resultados.

PRIMEIRO CAPÍTULO – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são discutidos assuntos que darão embasamento à pesquisa, como alguns conceitos sobre o solo, buscando demonstrar sua importância e relevância no entendimento de sua formação, propriedades físicas e térmicas.

Além disso, é apresentada uma breve revisão sobre a cerâmica, sobre os métodos indiretos para determinação do conteúdo de água do solo através de sensores, sobre a transferência de calor e sobre o problema inverso.

1.1 SOLO

O solo refere-se a uma camada externa e agricultável da superfície terrestre, REICHARDT (2004). Sua origem é a rocha que por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou em um material poroso de características peculiares. Ele também reconhece cinco fatores na formação do solo: o material original (rocha) M_o , o tempo (idade) Id , o clima Cl , a topografia T_{op} , e os organismos vivos O . Da combinação dos quatro últimos fatores atuando em diferentes intensidades sobre o mesmo material original M_o , podem resultar diferentes tipos de solo. A partir disto REICHARDT (2004), utiliza uma linguagem matemática para dizer que:

$$Solo = f(M_o, Id, Cl, T_{op}, O) \quad (1.1)$$

Os solos são materiais resultantes da meteorização ou intemperismo¹ das rochas, por desintegrações, a mecânica e a química. Na verdade ele é resultante da decomposição e recomposição de partículas minerais e de substâncias orgânicas. Esta decomposição se dá paralelamente, enquanto os organismos agem na destruição dos restos dos vegetais e dos animais, a força do intemperismo age com menor velocidade na decomposição das partículas minerais e na formação de novos compostos

A decomposição mecânica se dá através de agentes como a água, temperatura e o vento, formando-se os pedregulhos e areias (solos de partícula grossa) e até os siltes² (partículas intermediárias), e somente em condições especiais se forma a argila (partículas finas). Enquanto que a decomposição química se dá através do processo da modificação química ou mineralógica das rochas de origem. Nessa decomposição o principal agente é a água que, gera a oxidação, a carbonatação e hidratação (figura 1.1).

O solo é uma camada mais superficial da crosta terrestre, onde se desenvolve a fauna e a flora. Ele é constituído de duas partes, a primeira é uma camada escura geralmente, que fica em cima e é composta pela mistura de restos de animais e vegetais, formando a parte orgânica do solo, a outra camada contém a areia, calcário e argila, que forma a parte mineral, juntamente com a água e o ar. Os solos também podem ser formados pelo transporte de sedimentos levados pela chuva, vento, pelas águas dos rios e entre outros.

¹ Meteorização ou intemperismo, para DIAS; CARNEIRO (1953) é a ação lenta de desgaste das rochas pelos agentes atmosféricos (temperatura, umidade,...).

² Para COSTA (2004), silte ou limo é o elemento fino do solo e fica compreendido entre a areia e a argila.

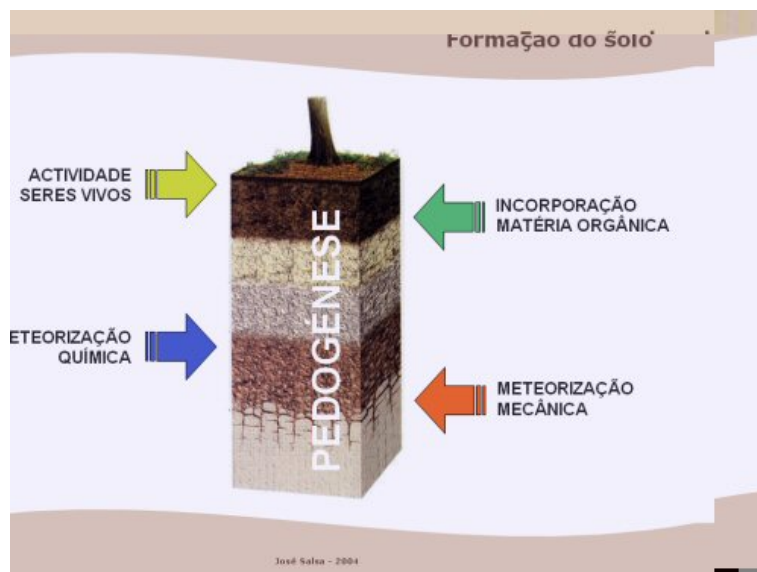


Figura 1.1 Perfil detalhado da formação do solo (SALSA, 2004).

O solo representa uma fase relativamente superficial e instável neste vasto processo geológico, e pode ser definido como o meio natural para o desenvolvimento das plantas terrestres, tal como se formou (solo dito natural), ou mais ou menos modificado como resultado da sua utilização pelo homem. Ele é um sistema, constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos. As partículas sólidas formam um arranjo poroso (porosidade)³ tal que os espaços vazios (poros), têm a capacidade de armazenar líquidos e gases.

A parte sólida do solo é constituída pelas matérias minerais e orgânicas e se constituem de partículas classificadas de acordo com o tamanho dos grãos. A união dessas diversas partículas juntamente com outros materiais orgânicos e inorgânicos, determina a estrutura do solo. A parte líquida é constituída pela água, contendo minerais dissolvidos e materiais orgânicos solúveis. Ela ocupa quase todo o espaço vazio entre as partículas sólidas, dependendo da umidade do solo. E a parte gasosa, ocupa os espaços vazios não ocupados pela água.

O solo possui duas propriedades: as propriedades físicas e as propriedades térmicas. Dentre as propriedades físicas destaca-se a textura, a estrutura, a cor, o teor de umidade e a densidade.

³ Porosidade para Costa (2004) é a percentagem de interstícios (pequeno intervalo entre as partes de um todo) vazios ou preenchidos por fases líquidas e/ou gasosas com relação ao volume da rocha.

1.1.1 Propriedades Físicas do Solo

Neste trabalho, será dado destaque apenas ao teor de umidade e a densidade, por fazerem parte da dissertação.

1.1.1.1 Densidade

Densidade para LIBARDI (1999), refere-se à massa que o volume de um determinado corpo possui, ou seja, o quociente da massa pelo volume desse corpo.

Na concepção de COSTA (2004), a densidade das partículas do solo é uma grandeza adimensional, definida como a razão da massa de uma partícula isolada do solo e da massa de água que ocupa volume igual ao da partícula. Existem dois tipos de densidade, a real ou verdadeira e a aparente.

A densidade, real ou verdadeira refere-se ao peso da unidade de volume das partículas de solo, excluindo os espaços vazios. E a densidade aparente que diz respeito ao peso de unidade de volume do solo, incluindo os espaços vazios.

REICHARDT (2004), define algumas relações entre massa e volume para descrever as três frações do solo: a sólida, líquida e gasosa e suas inter-relações, para após determinar as densidades. Discriminação das massas e dos volumes de cada fração:

$$m_T = m_s + m_l + m_g \quad (1.2)$$

$$V_T = V_s + V_l + V_g \quad (1.3)$$

onde m_T [kg] é a massa total da amostra; m_s [kg] é a massa das partículas sólidas; m_l [kg] é a massa da solução do solo, que pode ser diluída, é tomada como massa de água; m_g [kg] é a massa de gás, isto é, ar do solo, que é uma massa desprezível em relação a m_s e m_l . V_T [m^3] é o volume total da amostra; V_s [m^3] é o volume ocupado pelas

partículas sólidas; $V_l [m^3]$ é o volume ocupado pela água e $V_g [m^3]$ é o volume dos gases (não desprezível como no caso de sua massa).

LIBARDI (1999) e REICHARDT (2004) afirmam que a densidade dos sólidos de uma amostra de solo, também chamado de densidade das partículas ou densidade real (ρ_r) [$kg.m^{-3}$] é a razão entre a massa total e o volume total dos sólidos da amostra:

$$\rho_r = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.4)$$

Eles definem também, a densidade do solo (ρ_s) [$kg.m^{-3}$] ou densidade aparente como, sendo a massa do solo seco por unidade de volume:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (1.5)$$

onde $V [m^3]$ é o volume do solo, e $m_s [kg]$ é a massa das partículas sólidas.

1.1.1.1.1 Porosidade do Solo

A porosidade está ligada diretamente à definição de densidade. A porosidade total ε , também é denominada: Volume Total de Poros (VTP) de um solo. Segundo REICHARDT (2004), a porosidade total é afetada pelo nível de compactação. Quanto maior ρ_s , menor ε . Quando se conhece ρ_s , utiliza-se outra fórmula para estimar ε :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_r} \quad (1.6)$$

onde $\rho_s [kg.m^{-3}]$ é a densidade aparente e $\rho_r [kg.m^{-3}]$ é a densidade real.

Já LIBARDI (1999), define a porosidade como um índice que qualifica a fração do volume do solo ocupada pelos poros, representada por:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} = \frac{V_l + V_g}{V} = \frac{V - V_s}{V} \left[m^3 . m^{-3} \right] \quad (1.7)$$

onde $V_p = V_a + V_{ar} = V - V_s =$ volume de poros ou volume do espaço poroso $[m^3]$; $V_a [m^3]$ é o volume ocupado pela água e $V_{ar} [m^3]$ é o volume ocupado pelo ar.

COSTA (2004), afirma que porosidade, tal como a densidade aparente, varia apreciavelmente com a textura, estrutura e o teor do solo em matéria orgânica. Elas não apresentam valor constante, podendo variar com seu teor de água, devido a fenômenos de contração e expansão dos materiais do solo.

Os valores elevados de densidade aparente estão relacionados aos baixos valores da porosidade e vice-versa, podendo, portanto a densidade aparente servir como indicador da porosidade.

A porosidade pode ser distinguida como porosidade não capilar e porosidade capilar. A porosidade não capilar corresponde a espaços intersticiais relativamente grandes (macroporos), que podem ser esvaziados de água por forças extrativas fracas. E a porosidade capilar corresponde a espaços intersticiais pequenos para reterem água devido à ação sensível de fenômenos de capilaridade (microporos).

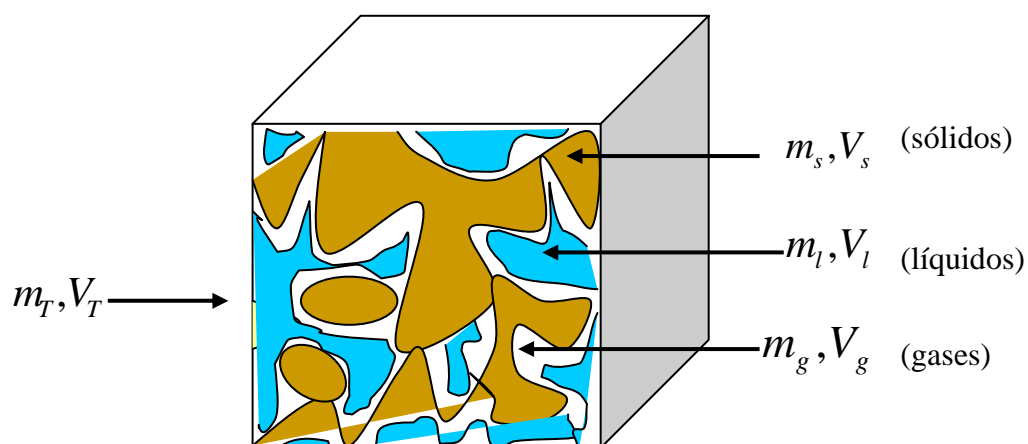


Figura 1.2 Amostra de solo indicando as frações em relação à densidade e porosidade (elaboração do autor com dados – REICHARDT, 2004).

1.1.1.2 Teor de Umidade do Solo

CAPUTO (2000), define a umidade de um solo como a razão entre o peso da água contida num certo volume de solo e o peso da parte sólida existente neste mesmo volume.

Para LIBARDI (1999) e REICHARDT (2004), a umidade do solo é o índice básico de quantificar a quantidade de água em uma amostra de solo. Para medir a umidade do solo em laboratório, duas técnicas são utilizadas:

a) **Umidade à base de massa** (gravimétrica), que é a razão entre a massa de água e a massa de sólidos (solo seco) de uma amostra de solo:

$$U = \frac{m_l}{m_s} = \frac{m_T - m_s}{m_s} \quad (1.8)$$

Por ser considerada adimensional, a equação (1.8) pode ser apresentada em porcentagem:

$$U \% = \frac{m_T - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (1.9)$$

onde U é a umidade gravimétrica [$kg \cdot kg^{-1}$]; m_l [kg] a massa da solução do solo; m_s [kg] a massa das partículas sólidas e m_T [kg] é a massa total da amostra.

b) **Umidade à base de volume** (volumétrica), que é a razão entre o volume de água presente numa amostra de solo e o volume da amostra:

$$\theta = \frac{V_l}{V_T} \quad (1.10)$$

Como a equação (1.10) também é considerada adimensional ela pode ser escrita na seguinte forma percentual:

$$\theta\% = \frac{V_l}{V_T} \cdot 100 \quad (1.11)$$

onde θ é a umidade à base de volume [$m^3 \cdot m^{-3}$]; V_l [m^3] o volume ocupado pela água e V_T [m^3] é o volume total da amostra.

Conforme, REICHARDT (1990) e COSTA (2004), existem vários métodos para determinar a umidade do solo. Dentre eles citam: a) os cilindros volumétricos (anéis volumétricos), onde o solo é posto dentro desses anéis com cuidado até a borda, para assim ocupar o volume exato do anel, logo ele é pesado e em seguida colocado em uma estufa a 105°C por 24 horas para a retirada de sua umidade. Após ir na estufa ele é pesado novamente e assim determinado o seu teor de umidade; b) o Funil de Buchner, conhecido como método da placa de sucção; as amostras de solo saturadas são colocadas dentro desse funil e após 24 horas tiradas. O funil, passa a extrair por sucção a água, de uma forma uniforme que não prejudique a amostra (este aparelho é para as pressões menores); logo a seguir são pesadas as amostras e realizadas os experimentos; depois estas amostras são colocadas em uma estufa a 105°C por 24 horas para ser retirado o restante do teor de umidade; c) a Panela de Pressão de Richards, onde também são colocadas as amostras saturadas; só que nesse método as pressões são maiores do que no Funil de Buchner, quer dizer o solo vai ficando com menos umidade mais rapidamente, após a pesagem, as amostras são colocadas em uma estufa com a mesma temperatura por 24 horas.

1.1.2 Propriedades Térmicas do Solo

A penetração do calor dentro de uma massa de solo e a amplitude da variação da temperatura é influenciada pelas propriedades térmicas do solo. O fluxo de calor no solo envolve operações simultâneas de vários mecanismos de transporte. Quando a água está presente, o calor latente (troca de fase) é um fator adicional envolvido na transferência de calor.

PREVEDELLO (2002), afirma que a temperatura do solo é um dos fatores mais importantes para o desenvolvimento das plantas. O solo, além de armazenar e permitir os

processos de transferência de água, solutos e gases, também armazena e transfere calor. A capacidade de um solo de armazenar e transferir calor é determinada por suas propriedades térmicas e pelas condições meteorológicas que, por sua vez, influenciam todos os processos químicos, físicos e biológicos do solo.

O calor específico e a condutividade térmica são as propriedades térmicas do solo de importância no estudo termodinâmico e agrônômico. O primeiro se refere ao solo como reservatório de calor e o segundo como transmissor de calor.

1.1.2.1 Calor Específico

REICHARDT (2004), define o calor específico como a quantidade de calor sensível cedida ou recebida pela unidade de massa ou de volume de solo, quando sua temperatura varia de $1^{\circ}C$. Como a umidade do solo é variável, o calor específico do solo em estado natural não é uma característica só do solo, mas do conjunto solo-água. Para solos secos ele se considera constante e de solo para solo ele varia, dependendo das porções de matéria mineral e orgânica.

Segundo HILLEL (1998), o valor do calor específico pode ser calculado somando as capacidades de calor dos vários componentes, de acordo com as frações de seus volumes.

É possível calcular o calor específico de uma substância $c_p [J .kg^{-1} .^{\circ}C^{-1}]$ a partir da capacidade térmica de um corpo $c [J .m^{-3} .^{\circ}C^{-1}]$ e da densidade desse corpo $\rho_s [kg .m^{-3}]$.

$$c_p = \frac{c}{\rho_s} \quad (1.12)$$

Também é possível determinar o calor específico de uma substância a partir da quantidade de calor cedida a um corpo dessa substância $Q [J]$, da variação térmica que ele sofre $dT [^{\circ}C]$, e da densidade desse corpo ρ_s , ou seja:

$$c_p = \frac{Q}{\rho_s \cdot dT} \quad (1.13)$$

O solo é formado pelas fases sólida, líquida e gasosa, e o calor específico ou a capacidade térmica pode ser determinado pela adição das capacidades térmicas dos diferentes constituintes. A capacidade calorífica, em geral, da fração gasosa pode ser desprezada. Assim, podendo ser representada por:

$$c_s = (1 - \varepsilon)c_p + \theta \cdot c_a \quad (1.14)$$

onde c_s é o calor específico do solo [$cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ ou $J..m^{-3}.K^{-1}$]; ε a porosidade; c_p o calor específico da fração sólida, para fins de conversão $1cal = 4,18 J$ [$cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ $J..m^{-3}.K^{-1}$]; θ a umidade à base de volume [$m^3 .m^{-3}$] e c_a o calor específico da água [$cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ ou $J..m^{-3}.K^{-1}$]. REICHARDT (2004), cita que segundo Kersten (1949), Reichardt et al. (1965) e Demattê (1967), um valor médio de $0,16 cal.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ pode ser tomado para fração sólida de solos minerais. Sendo a densidade média das partículas $2,65 g..cm^{-3}$, resulta em um valor médio de $0,4 cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ para c_p . Assim a equação 1.15 pode ser expressa:

$$c_s = 0,4(1 - \varepsilon) + \theta \quad (1.15)$$

Para solos orgânicos a fração sólida deve ser separada em mineral ($c_p=0,4$) e orgânica ($c_p=0,6$).

1.1.2.2 Condutividade Térmica do Solo

HILLEL (1998), define a condutividade térmica k como a quantidade de calor transferida por unidade área de um corpo por unidade de tempo para o gradiente de uma unidade de temperatura.

Segundo REICHARDT (2004), a condutividade térmica k [$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$] pode ser definida a partir da equação de Fourier, na qual a densidade de fluxo de calor no solo \dot{q} é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$, e A é a área de transferência de calor, isto é:

$$\dot{q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.16)$$

CAMPBELL et al., (1994); REICHARDT (2004) afirmam que a condutividade térmica do solo além de depender da composição da fração sólida do solo também é uma função de densidade do solo.

1.1.2.3 Difusividade Térmica

A difusividade térmica mede a relação entre a capacidade do material conduzir energia térmica e a capacidade de acumular energia térmica (INCROPERA & WITT, 1990).

REICHARDT (2004) define a difusividade térmica do solo pela seguinte equação:

$$\alpha = \frac{k}{\rho_s \cdot c_s} \quad (1.17)$$

onde α é a difusividade térmica do solo [$m^2.s^{-1}$]; k é a condutividade térmica do solo [$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$] e c_s é o calor específico por unidade volumétrica do solo [$cal.cm^{-3}.^{\circ}C^{-1}$ ou $J.m^{-3}.K^{-1}$].

Ele ainda afirma, que a difusividade térmica do solo é uma função de umidade, da densidade e da composição do solo.

1.2 CERÂMICA

A indústria da cerâmica é uma das mais antigas do mundo, pois ela é de fácil fabricação e sua matéria-prima tem em abundância (barro), figura 1.3.



Figura 1.3 Alguns tipos de barro que formam a cerâmica (WANDECK, 2000).

No Brasil, a cerâmica tem um papel importante para economia do país, com participação no PIB⁴ estimado em 1%. A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fez com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada.

O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos. No Brasil existem todos estes segmentos, com maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção.

A cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

⁴ PIB é o Produto Interno Bruto.

O setor cerâmico é amplo e heterogêneo e está dividido em sub setores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Ela pode ser dividida em dois grupos: a cerâmica tradicional (clássica) e a cerâmica avançada. A cerâmica tradicional pode ser subdividida em cerâmica vermelha ou estruturada; cerâmica branca; refratários; isolantes térmicos; vidros; abrasivos; cimento e agregados leves. Já a cerâmica avançada se utiliza a mesma matéria prima, porém sua composição, morfologia e tamanho das partículas são controlados por um processo de fabricação de nível tecnológico mais elevado. Ela pode ser dividida nos seguintes segmentos: peças de motores; capacitores cerâmicos; osciladores elétricos; semicondutores e supercondutores.

1.2.1 Propriedades e Fatores de Degradação das Cerâmicas

É bastante extensa a faixa de variação de propriedades das cerâmicas, dependendo da constituição, cozimento, processo de moldagem, entre outros. Segundo BAUER (1994), as propriedades das cerâmicas são: peso, resistência mecânica, absorção da água e duração.

Em relação ao peso, há cerâmicas mais leves do que a água, e outras de grande peso. O volume aparente é o volume de água deslocado por uma peça já saturada por 24 horas de imersão. O peso específico aparente é a relação entre o peso da peça seca ao ar e seu volume aparente.

A resistência ao desgaste depende muito da quantidade de vidro formado. A absorção de água depende da compactação, das constituições iniciais. Chama-se de absorção ou porosidade aparentes à percentagem de aumento de peso que a peça apresenta após 24 horas de imersão em água.

As cerâmicas podem desagregar-se em consequência de agentes físicos externos, agentes químicos internos e agentes mecânicos. Esses agentes físicos, para BAUER (1994), é a umidade, vegetação e o fogo. A umidade e a vegetação agem através dos poros (a porosidade é um índice da qualidade do produto e de sua duração). O fogo também é prejudicial à cerâmica, pois esta tem sua resistência à compressão diminuída à medida que aumenta a temperatura. Como os componentes se dilatam o calor pode desagregar uma peça.

Os agentes químicos internos também podem ser altamente perniciosos. A umidade absorvida do ar pode vir a dissolver os sais da cerâmica, os quais virão a cristalizar na superfície, ocasionando o que se chama de eflorescência, que além de dar má aparência, pode ocasionar o deslocamento e queda do revestimento.

Os agentes mecânicos, por seus esforços, podem vir a destruir a peça. Geralmente as cerâmicas têm maior resistência à compressão do que a flexão. As cerâmicas também devem ter boa resistência ao choque, que é tão comum no transporte e no uso.

1.3 SENSORES

A água é importante na produção vegetal e o seu manejo racional é decisivo para o desenvolvimento das plantas, evitando a falta ou excesso. Desta maneira, o conhecimento da distribuição do teor de água (umidade) no solo torna-se cada vez mais necessário, uma vez que está intimamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta, onde o domínio desse conhecimento é, certamente, um dos fatores indispensáveis para uma agricultura sustentável e sem prejuízos ao meio ambiente.

Um método de quantificação ideal da água no solo deve basear-se numa propriedade física dependente apenas do seu conteúdo, produzindo uma resposta direta, rápida e confiável, LACERDA et al., (2005).

Para TEIXEIRA (2005), a umidade do solo, embora seja um conceito físico simples, apresenta dificuldades na sua determinação e na sua forma de obter um valor representativo devido à variabilidade temporal e espacial das características físicas do solo. Há várias maneiras de se medir a umidade de um solo, onde os métodos para sua determinação são: o método direto e o método indireto.

Como método direto para a determinação da umidade do solo, pode-se citar o gravimétrico. O método gravimétrico apresenta resultados precisos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial, mas para medidas no campo o acondicionamento e transporte das amostras podem reduzir a precisão dos resultados e, ainda, para amostragens repetidas em uma pequena área, podem causar interferência no

local em estudo. Segundo COUTO e SANS (2002), o processo gravimétrico é um método clássico e o mais utilizado na determinação do conteúdo de água do solo.

TEIXEIRA (2005), afirma que como método direto tem-se o gravimétrico, que pode ser realizado com a utilização de uma estufa ou de um forno microondas. Esse método é destrutivo o que impede a repetição da medida da umidade no local. Os métodos indiretos são aqueles que por meio dos quais se torna possível determinar a quantidade de água presente nos solos. Esses métodos podem também apresentar algumas desvantagens, tais como a necessidade da realização da curva de calibração, que podem ser influenciada por características do solo e por variações do meio ambiente.

Dentre os métodos indiretos pode-se citar: sonda de nêutrons, resistência elétrica, ressonância magnética, o reflectometria no domínio do tempo (TDR), os sensores de dissipação de calor.

1.3.1 Métodos Indiretos para Determinação do Conteúdo de Água do Solo

Medidas de umidade e salinidade requeriam, no passado, instrumentação especial para cada uma das determinações. Os métodos de campo para medidas de umidade do solo consistem em atenuação da radiação gama, dispersão de nêutrons e blocos de gesso. Os métodos para medidas da salinidade incluem sensor de salinidade de poros de cerâmica e métodos de medida da condutividade elétrica do solo. Nesse último método, além de necessidade do conhecimento do tipo de solo, há a necessidade de uma medida independente da umidade do solo para a calibração do equipamento.

1.3.1.1 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

O método da medição da umidade do solo em função do tempo de reflexão de pulsos elétricos é conhecido pela sigla TDR ou reflectometria no domínio do tempo (figura 1.4). Seu uso constitui uma nova e importante ferramenta para medidas da umidade do solo. Ele tem sido usado como um método para medida da constante dielétrica e condutividade elétrica do solo pela determinação do tempo de trânsito e dissipação, respectivamente, de um pulso eletromagnético lançado ao longo de sondas metálicas paralelas inseridas no solo.

Segundo TEIXEIRA (2005), os sensores TDR constituem uma técnica promissora que busca solucionar os problemas. Dentre as vantagens da técnica, destacam-se: característica não-destrutiva, rapidez na obtenção dos resultados, segurança do operador, além de permitir a multiplexação (Baker & Allmaras, 1990; Herkelrath et al., 1991) e, dessa forma, o monitoramento contínuo da água no solo, tanto no espaço quanto no tempo (Topp et al., 1980). Além disso, permite medidas simultâneas de conteúdo de água e condutividade elétrica no campo (Dasberg & Dalton, 1985; Dalton & Van Genuchten, 1986), permite realizar leituras próximo à superfície e, sobretudo, no laboratório (Nadler et al., 1991). Apesar das inúmeras vantagens da técnica, ainda são poucos os trabalhos que comparam métodos para a determinação da umidade do solo.

O princípio de funcionamento do método TDR baseia-se na emissão de um pulso elétrico, por um gerador de pulso, que é propagado ao longo de uma sonda inserida no solo, na qual acontece a reflexão do pulso. Fazem-se leituras de características do pulso elétrico refletido ao longo da sonda por meio de um osciloscópio. Com o tempo de reflexão do pulso na sonda se calcula a constante dielétrica do meio no qual as sondas estão inseridas.

Dentre os sensores da umidade volumétrica do solo que têm sido considerados confiáveis estão o TDR e a sonda de nêutrons. Entre outras dificuldades, as medidas de umidade volumétrica requerem ajustes específicos para cada solo, visto que a relação entre teor volumétrico de água e tensão de água varia de acordo com fatores como a composição granulométrica e o teor de matéria orgânica do solo, TEIXEIRA (2005).

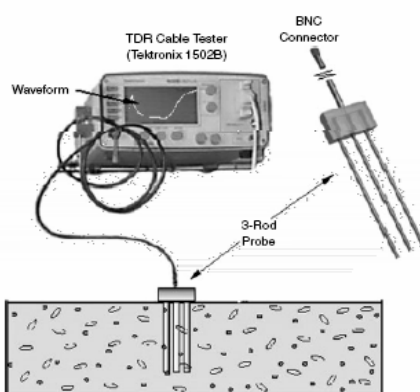


Figure 2. TDR cable tester with three-rod probe embedded vertically in surface soil layer

Figura 1.4 Modelo de um sensor TDR (VALERO, 2006).

Em solos de textura mais grossa as plantas começam a ter dificuldades para absorver as quantidades de água necessárias em tensões de água mais baixas, visto que a condutividade hidráulica não saturada do solo diminui muito mais rapidamente em solos de textura mais grossa. Este fator é frequentemente considerado nos valores críticos de tensão de água recomendados para manejo de Irrigação.

1.3.1.2 Blocos de Resistência Elétrica

Os blocos de resistência elétrica são elementos porosos com eletrodos inseridos, cuja passagem de corrente elétrica entre estes eletrodos, causada principalmente pela solubilização em água dos seus eletrólitos componentes (Ca^{2+} e SO_4^{2-}), é uma função não linear da tensão da água no solo, os blocos são geralmente fabricados de gesso. Esses blocos de gesso requerem calibração individual periódica, visto que a sua resposta deteriora no tempo, principalmente em solos com tensão de água baixa, que causem importante solubilização e movimentação do cálcio e do sulfato.

As características deste sensor são o baixo custo, e de fácil fabricação. Suas limitações são a deterioração da resposta no tempo, a necessidade de calibração individualizada dos sensores, a baixa sensibilidade em tensões de água inferiores a 50 kPa, grande influência da temperatura nas leituras que costumam ser corrigidas para a temperatura de referência (25 °C) e a grande sensibilidade destes blocos aos sais de alta solubilidade do solo, que aumentam a condutividade elétrica. O revestimento dos eletrodos com gesso promove um “predomínio” da solução saturada em CaSO_4 , o que diminui o efeito demais sais (íons) da solução do solo. Provavelmente, a limitação mais grave dos blocos de gesso é a faixa de tensão de água em que opera com segurança, visto que modernamente tem se recomendado à irrigação em tensões de água no solo que variam, tipicamente, de 10 a 50 kPa, para a maioria das hortaliças, flores, fruteiras e em varias das culturas anuais CALBO (2000).

1.3.1.3 Tensiômetros

O tensiômetro foi um instrumento desenvolvido em 1922, por Gardner e colaboradores, ele fornece de forma direta o potencial ou a tensão de água no solo e de forma indireta a umidade, além disso, possui mais vantagens como o de sua utilização que

é relativamente fácil e de produzir resultados de boa precisão. A utilização de tensiômetros para obtenção do conteúdo de água do solo através da curva de retenção é uma alternativa barata, sendo por isso mais acessível. Possui ainda, as vantagens de determinar o potencial total da água do solo, ser de utilização relativamente fácil e de produzir resultados de boa precisão LACERDA (2005).

O tensiômetro é constituído de uma cápsula porosa, geralmente feita de cerâmica, conectada a um manômetro através de um tubo, geralmente de PVC, preenchido com água (figura 1.5). Deve ser instalado de forma a proporcionar um perfeito contato entre a cápsula porosa e o solo. Já o tensiômetro utilizado por RICHARDS & NEAL (1936) era composto, basicamente, por uma membrana porosa, a qual consiste na parte sensível do equipamento, e de um medidor de pressão capaz de medir a energia com que a água é retida no solo, conectada por uma tubulação em um sistema vedado para a atmosfera.

Quando o potencial matricial da água no solo é menor que o da água nos poros da cápsula, a água se desloca do tensiômetro para o solo, através dos poros saturados, criando uma tensão de sucção medida pelo manômetro. Quando o solo está úmido, o fluxo ocorre na direção inversa, até que um novo equilíbrio seja alcançado KLAR, (1988). A formação de bolhas de ar na água do tensiômetro é prejudicial ao seu correto funcionamento, o material de confecção deve ser impermeável e ainda evita-se trabalhar em condição muito seca GUERRA, (2000). Caso formem-se bolhas deve-se fluxar o tensiômetro, ou seja, trocar a água expulsando as bolhas.

Para CALBO (2000), o tensiômetro com cápsula porosa contendo água em sua cavidade é denominado tensiômetro comum, e é um dispositivo de medição de tensão ou sucção que é mantido em contato com a superfície do solo, ou neste inserido. Em equilíbrio, sua leitura é diretamente a tensão da água no solo, em unidade de energia dividida por volume (pressão). O tensiômetro não requer calibração. Quando se refere à calibração de tensiômetro, o que se está calibrando, na verdade, é o manômetro deste instrumento.

As principais características do tensiômetro comum são as respostas à facilidade de construção e a faixa de operação adequada à maioria das aplicações de manejo de irrigação de fruteiras, hortaliças e de culturas anuais. Sua limitação principal é o acúmulo de ar na

cavidade da cápsula porosa. Por esta razão, o tensiômetro comum requer manutenção freqüente, não sendo, portanto, um sensor adequado para a automatização de sistemas não assistidos (figura 1.5).



Figura 1.5 Diagrama de um tensiômetro comum no qual a tensão da água interna segue a tensão da água no solo (CALBO, 2000).

O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do aparelho. O equilíbrio ocorre quando a cápsula porosa entra em contato com o solo e a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo. Caso a água do solo esteja sob tensão, ela exerce uma sucção sobre o instrumento, retirando água deste, fazendo com que a pressão interna diminua. Como o instrumento é vedado, ocorre a formação do vácuo; a leitura dessa pressão negativa fornece o potencial matricial da água no solo.

1.3.1.4 Condutividade Térmica

Um método confiável de se estimar a tensão da água no solo é através do acompanhamento da condutividade térmica de cápsulas porosas de acordo com sua impregnação com água. Neste caso, a variação da massa de água na cápsula porosa é acompanhada através dos seus efeitos diretos sobre a condutividade térmica. O sensor de tensão de água por condutividade térmica é constituído de uma fonte de calor, com dissipação térmica ajustada e estável, usualmente uma resistência elétrica centralizada, e de um sensor para acompanhar a diferença de temperatura entre dois pontos, ao longo do

raio de cápsulas porosas cilíndricas. Neste sistema, cada cápsula porosa precisa ser calibrada, individualmente, e a relação entre a tensão de água e a diferença de temperatura medida não é linear (Oliveira, 1999) e aumenta conforme o solo seca. Apesar de requerer calibração individualizada, trata-se de um sistema estável que se presta para automação de sistemas não-assistidos. No sensor de condutividade térmica a faixa de tensões água de trabalho depende da porosidade e da distribuição das dimensões dos poros na cápsula porosa.

1.3.1.5 Irrigas

Considerando-se a carência de recursos hídricos, a necessidade de produzir alimentos, o uso não-razional da água e o desperdício de insumos já não são mais eticamente aceitáveis. Desta forma, o uso de sistemas de controle de irrigação torna-se imperativo e deve ser exigido para os agricultores, por autoridades responsáveis por financiamentos agrícolas, distrito de irrigação e pela outorga da licença de uso de água, de modo geral. Estas ações devem ser iniciadas prioritariamente em bacias hidrográficas com menor volume de água disponível por agricultor, ou por unidade de área cultivada. O momento é de decisão e não cabem mais desculpas de que os sistemas de controle de irrigação são caros, complicados, tomam tempo e trazem poucos benefícios. Surge então o Irrigas, um sistema simples e de baixo custo, fundamentado em um sensor estável, robusto e que não requer manutenção (Calbo, 2000; Calbo & Silva, 2001).

O Irrigas consiste de uma cápsula porosa (sensor) conectada por um tubo plástico a um dispositivo de medição da permeabilidade ao ar da cápsula, que pode ser uma simples cuba transparente. A cápsula porosa do Irrigas é instalada no solo, na profundidade efetiva das raízes. Em solo úmido, a permeabilidade ao ar da cápsula porosa diminui para zero em poucos minutos, conforme a tensão da água tende para o equilíbrio com a tensão da água no solo. A obstrução da passagem do ar é causada pela embebição da cápsula porosa com água. Na cápsula porosa, rotas livres de água, através das quais o ar pode permear, ocorrem somente quando a tensão da água se torna maior que a tensão crítica ou de borbulhamento, característica da cápsula porosa. Este é o indicativo do momento da irrigação. Nas figuras 1.6 a 1.8, mostra-se modelos e situações do método irrigas.

As principais características do Irrigas são a simplicidade de fabricação e uso, a pequena troca de água com o solo, a linearidade de resposta nas medições de tensão de água em função da pressão de gás aplicado e o fato de praticamente não requerer manutenção, em suas aplicações sob pressão positiva, em solos minerais. Como limitações, sua superfície porosa pode sofrer impregnação com partículas finas de argila e matéria orgânica, se utilizado com pressão negativa. Uma solução parcial para este problema é a lavagem da superfície externa com material abrasivo após cada ciclo da cultura. Também tem sido difícil, com a tecnologia atual, a fabricação de cápsulas porosas para tensão inferior a 10 kPa, para uso em substratos de vasos, porque estas cápsulas têm ficado quebradiças.

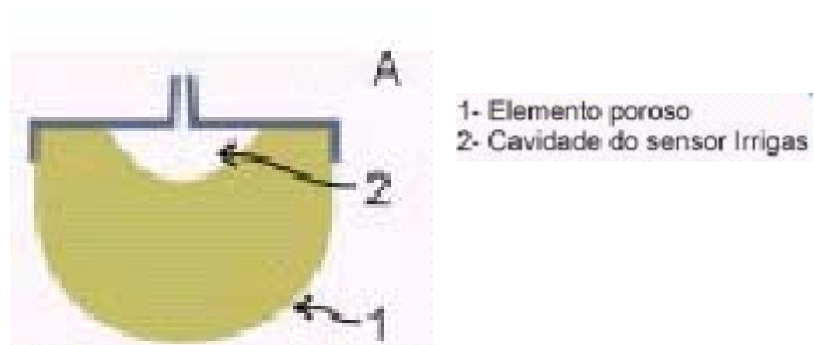


Figura 1.6 Irriga com elemento poroso espesso de baixa tensão (CALBO, 2000).



Figura 1.7 Sensor irrigas com cápsula porosa mini (CALBO, 2000).



Figura 1.8 Irrigas de 25 kPa com cuba para teste de imersão (CALBO, 2000).

1.3.1.6 Sonda de Nêutrons

Esse método foi bastante utilizado até a década de 90. Apesar das dificuldades inerentes ao processo de moderação de nêutrons em um meio heterogêneo (solo, água, ar), a curva de calibração de uma sonda de nêutrons em laboratório era obtida acondicionando-se o solo, com vários teores de água, em tonéis onde eram fixados tubos de acesso. Os teores de água e as contagens da sonda de nêutrons no centro dos tonéis seguiam uma relação linear que era obtida através da técnica dos mínimos quadrados. (ENCARNAÇÃO et al., 1991).

Neste método para determinar a umidade do solo, se instala tubos de alumínio ou de aço nos locais até as profundidades desejadas (figura 1.9). Em seguida, uma sonda contendo uma fonte de nêutrons com alta energia e um contador para detectar os fluxos de nêutrons termalizados e abaixada do tubo até a profundidade desejada.

Desde que a quantidade de hidrogênio associado com a água no solo e geralmente muito maior que aquela associada com argila, matéria orgânica ou outras partículas do solo, o fluxo de nêutrons termalizados é proporcional a quantidade de água em um volume de solo. Para COUTO E SANS (2002), neste método, os nêutrons são termalizados no interior de uma amostra de solo grande. Com todas as vantagens e desvantagens inerentes a esse fato, as medições de água no solo com base nesse método são puramente empíricas e depende de uma boa curva de calibração relacionando a contagem dos nêutrons termalizados com a umidade do solo, determinado pelo processo gravimétrico.

Um problema dessa técnica é a definição da umidade de saturação que em geral é uma fração entre 0,9 e 1,0 da porosidade do solo, sendo, assim, uma séria fonte de erro na determinação da reta de calibração de uma sonda de nêutrons (ENCARNAÇÃO et al., 1991).

COUTO E SANS (2002), mostram que desta calibração ajusta-se uma equação polinomial da seguinte forma:

$$M = of + s_d (a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3) \quad (1.18)$$

onde:

M = Conteúdo de umidade expresso em % na base de peso ou na base de volume.

of = “off set”, valor ajustado na fábrica, geralmente é zero.

s_d = Declividade geralmente ajustada da fábrica para $S = 1$.

a_0, a_1, a_2, a_3 = são coeficientes obtidos por ocasião dos ajustes dos dados (calibração de campo).

X = é a variável independente (leitura padrão).

Portanto, para $of = 0$ e $S = 1$.

$$M = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 \quad (1.19)$$

Geralmente a sonda vem com uma calibração de fábrica, mas recomenda-se fazer uma curva para condições locais. A sonda de nêutrons é muito utilizada em pesquisas, mas também pode ser utilizada para monitorar a água do solo para fins de irrigação.

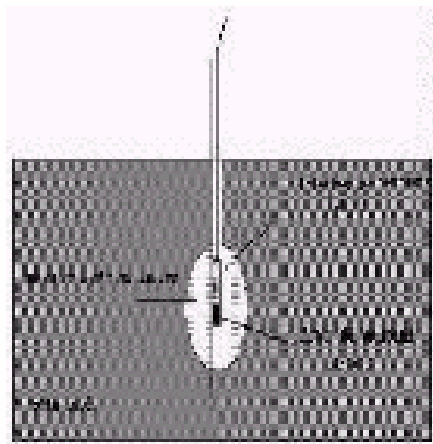


Figura 1.9 Esquema da técnica da sonda de nêutrons para medir a umidade do solo (COUTO, 2002).

1.3.1.7 Sensores de Dissipação de Calor

O uso dos sensores de dissipação de calor consiste em estabelecer as curvas de calibração para os solos estudados. Segundo Oliveira (1999), entre as principais vantagens

desse método pode-se citar: construção relativamente fácil e custo moderado, portabilidade, leitura adicional da temperatura do solo, leitura independente do teor de sais na solução, e o fato de os sensores poderem ser usados por longo período de tempo sem necessidade de recalibrar ou fazer manutenção periódica, como acontece nos tensiômetros.

Para FLINT et al. (2002), os sensores

Além dos estudos já apresentados, pode ser citado também, o trabalho feito por NIDAL & REEDER (2000), que utilizam uma fonte de calor pontual para determinar a condutividade térmica de solos com umidades e densidades variadas. Também se pode citar o trabalho que CAMPBELL et al. (1994), realizou para estimar o efeito da massa específica e da umidade do solo na condutividade térmica dos solos estudados, usando o método de pulso de calor, para solos com densidades volumétricas, texturas, umidades e temperaturas diferentes. Sendo que a medida da condutividade térmica foi realizada usando o método analisado e descrito por SHIOZANA & CAMPBELL (1990). Os resultados encontrados confirmam que o aumento da massa específica do solo a um determinado aumento da umidade, aumenta a condutividade térmica do solo.

1.4 PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura, SISSOM (1988). Sempre que existir essa diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor.

Um exemplo disso é se dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato direto (figura 1.10), ocorrerá uma transferência de calor do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura até que haja equilíbrio térmico entre eles.

$$\text{Se } T_1 > T_2 \Rightarrow T_1 > T > T_2$$

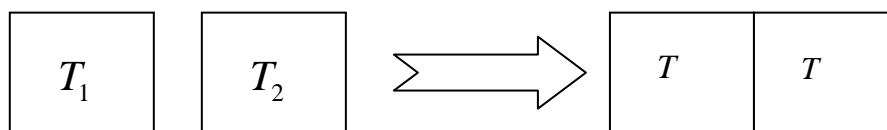


Figura 1.10 Esquema da transferência de calor entre dois corpos (elaboração do autor).

Existem diferentes processos de transferência de calor que podem ser chamados de mecanismos de transferência de calor. Esses mecanismos podem ser reconhecidos como, transferência de calor por condução, por convecção e por radiação.

A transferência de calor por condução ocorre em um meio estacionário, e pode ser definida como um processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta

temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. A transferência de calor por condução é representada pela fórmula da Lei de Fourier e pode ser enunciada seguinte forma: “A quantidade de calor transferida por condução, na unidade de tempo, em um material, é igual ao produto das seguintes quantidades”. Fórmula da Lei de Fourier:

$$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dx} \quad (1.20)$$

onde: \dot{q} é o fluxo de calor por condução [$W.m^{-1}$]; k é a condutividade térmica do material [$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]; A é área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direção do fluxo [m^2]; $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão de variação da temperatura T com a distância, na direção x do fluxo de calor [$^{\circ}C.m^{-1}$].

Já a transferência de calor por convecção, ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento e pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido traves da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. Ela pode ser calculada através da relação proposta por Isaac Newton:

$$\dot{q} = h.A.\Delta T \quad (1.21)$$

onde: \dot{q} é o fluxo de calor transferido por convecção [$W.m^{-1}$]; A é área de transferência de calor [m^2]; ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e h o coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película [$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$].

A transferência de calor por radiação ocorre, quando na ausência de um meio interveniente, existe uma troca líquida de energia (emitida na forma de ondas eletromagnéticas) entre duas superfícies a diferentes temperaturas.

Como foi descrita acima, a transferência de calor pode ocorrer por condução, convecção, irradiação, e ainda por transporte de calor latente e fluxo de umidade. Muitos autores como (Kirkham & Powers, 1972 e Jury et al, 1991), tem idéias diferentes sobre como ocorre a transferência de calor em solos com diferentes umidades (solos secos, úmidos e muito úmidos), mas todos concordam que em camadas contínuas de água e na parte sólida das partículas de solo interconectadas ocorre a transferência de calor, predominantemente, através da condução, devido ao contato existente entre as fases líquidas, sólidas e gasosas nos espaços intra-porais.

1.5 PROBLEMA INVERSO

Seja um fenômeno físico governado por um conjunto de equações. Quando se deseja encontrar os efeitos resultantes a partir do conhecimento das causas, trata-se de um *problema direto*. Por outro lado, quando se deseja encontrar as causas desconhecidas, através de observações dos efeitos desse fenômeno, trata-se de um *problema inverso*. Causas, num modelo matemático, são as condições iniciais e de contorno, termos de fonte e propriedades do sistema (material).

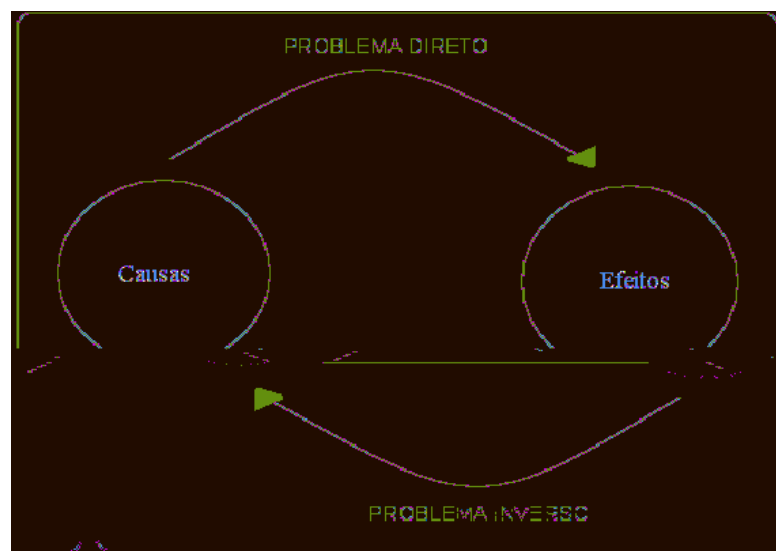


Figura 1.11 Representação esquemática do problema direto e inverso.

No início do século, HADAMARD (1923), introduziu o conceito de um problema bem-posto baseado na proposição de que o modelo matemático de um problema físico tem que satisfazer as propriedades de existência, unicidade de solução e estabilidade da solução em relação aos dados (que tem dependência contínua e suave com os dados de entrada). Se uma das propriedades não é satisfeita, HADAMARD, chama o problema de mal-posto.

Muitos problemas inversos interessantes e importantes para a ciência, tratam tipicamente com modelos matemáticos mal-postos, enquanto que os correspondentes problemas diretos são bem-postos. Na maioria destes casos, a existência e a unicidade pode ser forçada através da ampliação ou redução do espaço solução (espaço do “modelo”). No entanto, as soluções ainda mantêm-se instáveis sob perturbações nos dados, e a restauração dessa estabilidade em muitos casos é impossível devido justamente à presença de erros de medida nesses dados, características inerentes em problemas reais.

O estudo da teoria da aproximação envolve dois tipos de problemas genéricos. Um problema ocorre quando uma função é dada de forma explícita, mas deseja-se encontrar um tipo de função “mais simples”, como uma função polinomial, que possa ser utilizada para determinar valores aproximados da função dada (interpolação). O outro problema na teoria da aproximação refere-se ao ajuste da função aos dados encontrados, e encontrar a “melhor função” em uma determinada classe para representar todos os dados possíveis. O método dos mínimos quadrados é o procedimento mais conveniente para se determinar a melhor curva de aproximação, RICHARD e FAIRES (2003).

O método dos mínimos quadrados é provavelmente a técnica de aproximação mais usada na análise numérica e em problemas práticos, lineares e não lineares, CUNHA (2003).

Em geral, busca-se aproximações para m dados que são medidas obtidas experimentalmente com um certo grau de incerteza:

$$f_i(\vec{P}) = Y_i - y(T_i, P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (1.22)$$

para $n = 1, \Lambda, m$; onde f_i é o resíduo no ponto T_i ; y_i são valores dados que serão aproximados; $y(T_i, P_1, P_2, \dots, P_n)$ é uma função de ajuste da variável T e dos parâmetros P_1, P_2, \dots, P_n e \vec{P} é um vetor com os parâmetros de ajuste.

Então, o problema de minimização da soma dos resíduos é apresentado da seguinte maneira:

Minimizar

$$S(\vec{P}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(\vec{P}) = \sum_{i=1}^m f_i^2(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (1.23)$$

Sendo assim, a resolução do problema inverso primeiramente consiste, na determinação dos parâmetros desconhecidos, isto é possível, através da utilização do método dos mínimos quadrados (equação (1.23)), reescrita dessa maneira:

$$S(\vec{P}) = \sum_{i=1}^I Y_i - G_i(\vec{P})^2 \quad (1.24)$$

onde: $S(\vec{P})$ é a soma dos erros quadrados ou função objetiva; $\vec{P} = [P_1, P_2, \Lambda, P_m]^T$ é o vetor de parâmetros desconhecidos (com m igual ao número de parâmetros); $G_i(\vec{P}) = G(\vec{P}, t_i)$ é a função desconhecida avaliada com as soluções do problema direto correspondentes aos tempos t_i em que foram efetuadas as medições experimentais; $Y_i = Y(t_i)$ é o valor dos resultados experimentais nos tempos t_i ; e I é o número total de medidas experimentais.

A equação (1.24) pode ser reescrita na forma matricial do seguinte modo:

$$S(\vec{P}) = [Y - G(\vec{P})]^T [Y - G(\vec{P})] \quad (1.25)$$

onde a transposta de $[Y - G(\vec{P})]$ é definida por:

$$[Y - G(\vec{P})]^T = [Y_1 - G_1, Y_2 - G_2, \dots, Y_I - G_I] \quad (1.26)$$

Para minimizar a norma dos mínimos quadrados dado pela equação (1.25), é necessário igualar a zero as derivadas de $S(\hat{P})$ em relação aos respectivos parâmetros desconhecidos P_1, P_2, Λ, P_m , isto é:

$$\frac{\partial S(\hat{P})}{\partial P_1} = \frac{\partial S(\hat{P})}{\partial P_2} = \Lambda = \frac{\partial S(\hat{P})}{\partial P_m} = 0 \quad (1.27)$$

O que pode ser escrito matricialmente considerando-se o gradiente da equação (1.26):

$$\nabla S(\hat{P}) = 2 \cdot \frac{\partial G^T(\hat{P})}{\partial P} \cdot [Y - G(\hat{P})] = 0 \quad (1.28)$$

onde

$$\frac{\partial G^T(\hat{P})}{\partial P} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial P_1} \\ \frac{\partial}{\partial P_2} \\ \frac{\partial}{\partial P_3} \\ \frac{\partial}{\partial P_4} \end{bmatrix} \cdot [G_1 \ G_2 \ \Lambda \ G_t] \quad (1.29)$$

A transposta da matriz definida por (1.29) é denominada de matriz jacobiana ou matriz sensibilidade:

$$J(\hat{P}) = \left(\frac{\partial G^T(\hat{P})}{\partial P} \right)^T \quad (1.30)$$

que de forma explícita é escrita como:

$$J(\vec{P}) = \begin{matrix} \frac{\partial G_1}{\partial P_1} & \frac{\partial G_1}{\partial P_2} & \frac{\partial G_1}{\partial P_3} & \frac{\partial G_1}{\partial P_4} \\ \frac{\partial G_2}{\partial P_1} & \frac{\partial G_2}{\partial P_2} & \frac{\partial G_2}{\partial P_3} & \frac{\partial G_2}{\partial P_4} \\ \text{M} & \text{M} & \text{M} & \text{M} \\ \frac{\partial G_l}{\partial P_1} & \frac{\partial G_l}{\partial P_2} & \frac{\partial G_l}{\partial P_3} & \frac{\partial G_l}{\partial P_4} \end{matrix} \quad (1.31)$$

Usando a definição da matriz jacobiana, a equação (1.28) pode ser reescrita como:

$$\nabla S(\vec{P}) = -2J^T(\vec{P})[Y - G(\vec{P})] = 0 \quad (1.32)$$

Caso o problema inverso seja linear, a matriz jacobiana é uma matriz com elementos constantes e conhecidos, logo a solução da equação (1.32) pode ser obtida de forma explícita pela expressão:

$$\vec{P} = (J^T J)^{-1} J^T Y \quad (1.33)$$

No caso do problema inverso ser não linear, a matriz jacobiana possui dependência funcional do vetor de parâmetros desconhecidos \vec{P} . A solução da equação (1.32) para problemas de estimação não linear, requer então o uso de um procedimento iterativo, o qual é obtido pela linearização do vetor dos valores estimados para a função G , $G(\vec{P})$, com a expansão da Série de Taylor para a solução correta \vec{P}_k para a iteração k . Assim a linearização é dada por:

$$G(\vec{P}) = G(\vec{P}_k) + J_k(\vec{P} - \vec{P}_k) \quad (1.34)$$

onde: $G(\vec{P}_k)$ são os valores estimados para a função G e J_k é a matriz jacobiana calculada para a iteração k . A equação (1.34) substitui a equação (1.33) e o vetor \vec{P} dos parâmetros desconhecidos é então obtido pela fórmula iterativa:

$$\hat{P}_{k+1} = \hat{P}_k + [(J_k)^T J_k]^{-1} (J_k)^T [Y - G(\hat{P}_k)] \quad (1.35)$$

O processo iterativo dado pela equação (1.36) é definido pelo método de Gauss, porém sua atualização é feita pelo método de Newton (ou Newton - Raphson).

Sendo assim, a solução do problema inverso é dada pela equação (1.33), caso o problema seja linear, e pela equação (1.35) quando for não-linear. Porém, a solução destas equações requer que a matriz $J^T J$ seja não singular, ou seja, é necessário que

$$|J^T J| \neq 0 \quad (1.36)$$

No caso específico do processo iterativo dado pela equação (1.35), é necessário também que o determinante da matriz $J^T J$ não seja muito pequeno. Acontece que a maioria dos problemas inverso são mal-postos (com $|J^T J| \approx 0$), especialmente perto da condição inicial usada para os parâmetros desconhecidos, dificultando o uso das equações (1.34 e 1.35).

A presença da matriz $\lambda_k \Omega_k$ na equação (2.13), objetiva amortecer e estabilizar as oscilações que surgem em decorrência do problema mal-posto. Como o problema geralmente é mal-posto no início do procedimento iterativo, a amortização é grande para estas iterações. Porém, com avanço do processo iterativo o parâmetro λ_k é gradualmente reduzido e o método de Levenberg-Marquardt, tende para o método de Gauss dado pela equação (1.35).

O processo iterativo proposto pelo método de Levenberg-Marquardt pode ser truncado, quando as seguintes condições são satisfeitas:

$$S(\hat{P}_{k+1}) < \varepsilon_1 \quad (1.37)$$

$$\left\| (J_k)^T [Y - G(\hat{P}_k)] \right\| < \varepsilon_2 \quad (1.38)$$

$$\left\| \hat{P}_{k+1} - \hat{P}_k \right\| < \varepsilon_3 \quad (1.39)$$

onde: ε_1 , ε_2 e ε_3 são tolerâncias dadas e $\|x\| = \sqrt{x^T x}$ é a norma do vetor Euclidiano.

O critério dado pela equação (1.37), verifica se a norma dos mínimos quadrados é suficientemente pequena. A equação (1.38) verifica se a norma do gradiente de $S(\hat{P})$ é suficientemente pequena. E o terceiro critério, (1.39), verifica se as mudanças do vetor de parâmetros são muito pequenas, o que é esperado quando o método converge.

SEGUNDO CAPITULO – ESQUEMA FÍSICO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

Neste capítulo apresentam-se as descrições do problema direto e do problema inverso. O problema direto consiste na resolução da equação de condução de calor unidimensional em coordenadas cartesianas. O problema inverso, por sua vez, será aplicado com o intuito de obter o valor da temperatura ajustado sendo que para a resolução deste problema será empregado o método iterativo de Levenberg-Marquardt.

A metodologia consiste, basicamente, em considerar uma amostra com diferentes tipos solos com vários teores de umidade, estudada dentro de um recipiente cilíndrico de diâmetro d_c e altura L_{cil} , com um sensor de cerâmica com formato de um paralelepípedo dentro no seu interior (figura 2.1). Supõe-se que a amostra esteja inicialmente a uma temperatura T_{solo} (temperatura do solo) e que no instante $t = 0$, seja submetida a uma fonte de calor linear (resistor) com fluxo constante de calor localizada no centro da cerâmica. Na fronteira da cerâmica é considerada uma troca de calor por condução com a temperatura do solo. Assume-se que o teor de umidade da cerâmica depois de algum tempo é o mesmo do solo.

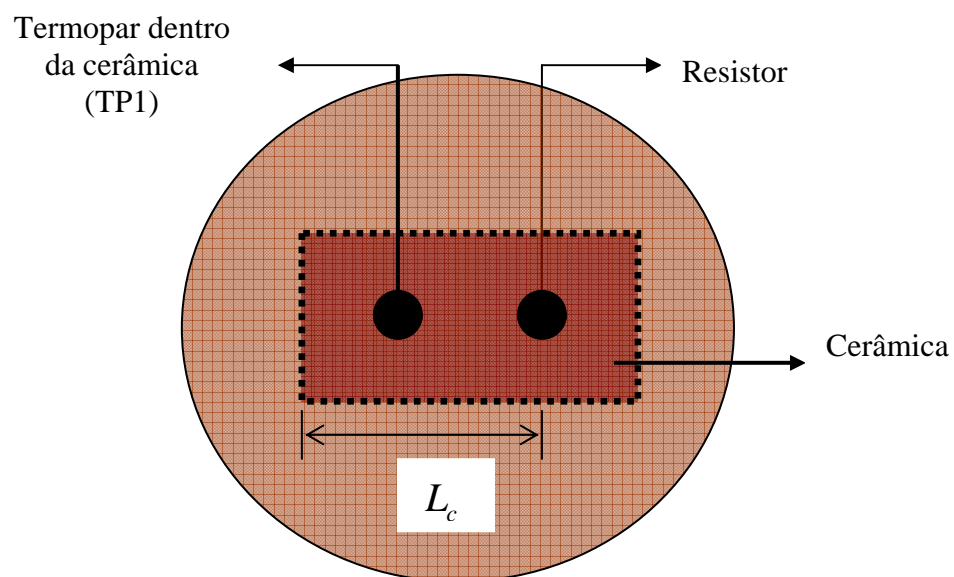


Figura 2.1 Esquema da colocação do termopar dentro da cerâmica (elaboração do autor).

Uma vez iniciado o fornecimento de calor para a amostra de solo, estabelece-se assim um regime transitório e os valores da temperatura são medidos em intervalos de tempo Δt constantes; o fluxo de calor ocorre por condução do centro da cerâmica (região mais quente devido a fonte de calor) e nas extremidades (região mais fria).

Algumas hipóteses simplificadoras foram consideradas:

- A convecção, associada aos processos de evaporação-condensação, não são considerados neste trabalho;
- As propriedades físicas da cerâmica são consideradas constantes (condutividade térmica, difusividade térmica, a densidade e o calor específico);
- O modelo não considera o movimento de água e vapor (no caso de solo úmido) quando existe um gradiente de temperatura.

2.1 PROBLEMA DIRETO

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho foi direcionado para a investigação da condução do calor em um corpo retangular, submetido a um fluxo de calor gerado por um resistor. Define-se o regime permanente, que é alcançado depois de algum tempo, quando a temperatura e o fluxo de calor dependem somente da posição.

Para obter o regime transiente e, considerando-se um meio homogêneo, com gradientes de temperatura, a equação da difusão do calor com fonte, que constitui o instrumento teórico básico para a análise da condução do calor, pode ser escrita da seguinte forma, em 3-D, transiente, em coordenadas cartesianas, BEJAN (1996):

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} \quad (2.1)$$

onde T é a temperatura [°C]; t é o tempo [s]; x , y e z são as variáveis no espaço; q é o fluxo de calor transferido [W . m⁻¹]; k é a condutividade térmica [W . m⁻¹ . °C⁻¹] e α é a difusividade térmica [m² . s⁻¹].

Na análise da transferência de calor, a razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica é uma propriedade importante, chamada de difusividade térmica α [$m^2.s^{-1}$], dada pela seguinte equação (INCROPERA, 1990):

$$\alpha = \frac{k}{\rho_s c_p} \quad (2.2)$$

onde k é a condutividade térmica [$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]; c_p é o calor específico a uma pressão constante [$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]; ρ_s é a densidade desse corpo [$kg.m^{-3}$] e α é a difusividade térmica [$m^2.s^{-1}$].

A equação (2.1), em 1D, fica na forma:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho}{k} \quad (2.3)$$

Para resolver as equações (2.3), cuja a solução analítica está representada em BEJAM (1996), é necessário especificar a condição inicial e suas condições de contorno. A condição inicial é representada por:

$$T(x,0) = \frac{T_{cer} + T_{solo}}{2} \quad (2.4)$$

onde T_{cer} é a temperatura da cerâmica [$^{\circ}C$] e T_{solo} é a temperatura do solo [$^{\circ}C$], x a distância [m].

e as condições de contorno são:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x=0} = \frac{\rho}{L} \quad (2.5)$$

$$T(x = L_c, t) = T_{solo} \quad (2.6)$$

onde: L é o comprimento do resistor (da fonte) [m], L_c é o comprimento do sensor [m].

A equação (2.4) supõe que a distribuição de temperatura seja uniforme no instante $t = 0$ (denominada condição de Dirichlet ou condição de contorno de primeira espécie). A equação (2.5) sugere a existência de um fluxo de calor $\frac{q}{L}$ constante ou fixo na superfície, em $x = 0$ (denominada condição de Newmann ou condição de segunda espécie). A equação (2.6) sugere que a distribuição de temperatura seja uniforme no instante, em $x = L$.

2.2 ESQUEMA NUMÉRICO

Hoje em dia, é possível simular numericamente os regimes transitórios e estacionários de muitos fenômenos, nos quais a transferência de calor por condução é importante. Um dos métodos que podem ser utilizados para fazer estas simulações é o método de diferenças finitas. Nele, o meio condutor é discretizado espacialmente por uma malha, cujos nodos servem como centro para um conjunto de pequenos sistemas termodinâmicos. A malha é considerada uniforme, e a posição de um nó é indicada por um número m .

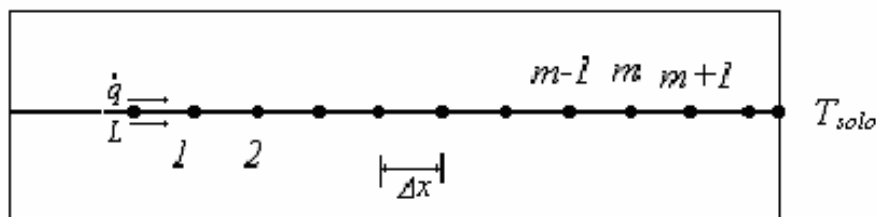


Figura 2.2 Esquema de discretização dos nodos.

Pela Série de Taylor, (MALISKA, 1995), e levando em conta a variação da energia térmica acumulada e a presença de geração de calor, a equação explícita em diferenças finitas pode ser representada para qualquer nodo interno, como:

$$T_m^{p+1} = 2Fo(T_{m-1}^p + T_{m+1}^p) + T_m^p(1 - 2Fo) \quad (2.7)$$

Esta equação pode ser utilizada para o nodo zero:

$$T_m^{p+1} = 2Fo \left(2T_{m+1}^p + q \frac{\Delta x^2}{k} \right) + T_m^p(1 - 2Fo) \quad (2.8)$$

Aplicando a conservação de energia para um volume de controle no último nodo, obtém-se:

$$T_m^{p+1} = 2Fo(T_{m-1}^p + T_{solo}) + T_m^p(1 - 2Fo) \quad (2.9)$$

No método explícito, existe uma característica que não satisfaz, e é o de ser condicionalmente instável. Em um problema de regime transiente, a solução para as temperaturas nodais deve se aproximar continuamente dos valores finais (regime estacionário) no decorrer do tempo. A fim de impedir a instabilidade (divergência da solução em relação aos valores reais do estado estacionário), o valor de Δt , ou o número de Fourier Fo , associado à malha, é representado por:

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (2.10)$$

Esse valor deve ficar abaixo de um certo limite, que depende de Δx e de outros parâmetros do sistema. Para o problema em questão, o critério de estabilidade utilizado é o da exigência de que o coeficiente associado ao nodo analisado, no instante de tempo anterior, ser maior que zero ou no mínimo nulo (positividade dos coeficientes). Um critério mais restritivo é associado à equação (2.9):

$$Fo \leq \frac{1}{2} \quad (2.11)$$

2.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

Para a solução do problema inverso, considera-se uma função $G_i(\vec{P})$ com parâmetros desconhecidos. No caso de obter por uma função polinomial de 3º grau ter-se-ia:

$$G_i(\vec{P}) = P_1 T_i^3 + P_2 T_i^2 + P_3 T_i + P_4 \quad (2.12)$$

para $i = 1, 2, \dots, n$; onde n é o número de dados experimentais obtidos em diferentes instantes de tempo; P_1, P_2, P_3, P_4 são os parâmetros desconhecidos e T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são as soluções do problema direto no tempo correspondente ao i -ésimo dado experimental.

Uma alternativa para a resolução de problemas inversos é a utilização do método de Levenberg-Marquardt, OZISIK & ORLAND, (2000). Tal método diminui as dificuldades encontradas usando o processo iterativo:

$$\vec{P}_{k+1} = \vec{P}_k + [(J_k)^T J_k + \lambda_k \Omega_k]^{-1} (J_k)^T [Y - G(\vec{P}_k)] \quad (2.13)$$

onde: λ_k é um escalar positivo chamado parâmetro de amortização; $\Omega_k = [(J_k)^T J_k]$ é a matriz diagonal e k é o número de iterações.

2.3.1 Algoritmo do Método de Levenberg-Marquardt

Para a determinação da difusividade térmica (α), na resolução do problema inverso, será usado o método de Levenberg-Marquardt, com a matriz diagonal Ω_k , definida de modo que:

$$\Omega_k = \text{diag} [(J_k)^T J_k] \quad (2.14)$$

Tendo as medidas da temperaturas experimentais $Y = (Y, Y_1, \dots, Y_I)$ para os tempos t_i , $i = 1, \dots, I$ e sendo conhecida a condição inicial \vec{P}_0 para o parâmetro desconhecido e, escolhido o valor de λ_0 , tem-se o seguinte algoritmo:

- 1) Resolver o problema direto e, com a estimativa disponível para \mathbf{P}_k , determinar o valor de $G(\mathbf{P}_k) = (G_1, G_2, \dots, G_l)$;
- 2) Calcular $S(\mathbf{P}_k)$ usando a equação 1.26;
- 3) Calcular a matriz jacobiana J_k , definida pela equação 1.32 e a matriz Ω_k dada pela equação 2.14, usando os valores atuais de \mathbf{P}_k ;
- 4) Resolver o sistema de equação algébrica, obtido para o sistema iterativo de Levenberg-Marquardt, (equação 2.13):

$$[(J_k)^T J_k + \lambda_k \Omega_k] \Delta \mathbf{P}_k = (J_k)^T [Y - G(\mathbf{P}_k)] \quad (2.15)$$

para calcular $\Delta \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k+1} - \mathbf{P}_k$.

- 5) Calcular a nova estimativa para \mathbf{P}_{k+1} , através da expressão:

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_k + \Delta \mathbf{P}_k \quad (2.16)$$

- 6) Avaliar a função $G(\mathbf{P})$ com nova estimativa \mathbf{P}_{k+1} ;
- 7) Se $S(\mathbf{P}_{k+1}) \geq S(\mathbf{P}_k)$, substituir λ_k por $10 \lambda_k$ e retornar para 4;
- 8) Se $S(\mathbf{P}_{k+1}) < S(\mathbf{P}_k)$, usar a nova estimativa \mathbf{P}_{k+1} e substituir λ_k por $0,1 \lambda_k$;
- 9) Verificar os critérios de parada, dados pelas equações (1.38, 1.39 e 1.40). O procedimento iterativo deve ser interrompido se qualquer uma das condições for satisfeita; caso contrário, substituir k por $k+1$ e retornar a 3.

Esses procedimentos são repetidos com a utilização de diferentes valores para o α na resolução do problema direto. As simulações numéricas, possibilitam a obtenção do valor de α , através da observação da proximidade entre os dados experimentais, a curva ajustada e a solução do problema direto.

TERCEIRO CAPÍTULO – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os experimentos deste trabalho foram realizados no Laboratório de Física dos Solos, no Laboratório de Bromatologia no Campus da UNIJUÍ e no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática na Sede Acadêmica da mesma Universidade, ambos localizados na cidade de Ijuí, no mês de abril, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2006.

Para a realização dos experimentos, foram utilizados a cerâmica, resistor e fios para o desenvolvimento de um sensor e de dois tipos de solos: o Latossolo Vermelho e a Areia. Um dos solos utilizados no experimento, pertence à unidade de mapeamento de Santo Ângelo, classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico. Este solo é derivado do basalto da formação Serra Geral, tendo textura muito argilosa, com mais de 55% de argila. As características gerais deste solo são: solo profundo, coloração vermelha-escura, boa drenagem, textura argilosa com predominância de argilominerais 1:1 e sesquióxidos de ferro e alumínio (EMBRAPA, 1999). Já a areia é um dos tipos de solos que há em nosso estado, principalmente na região da campanha e na região litorânea. A sua formação se dá através de agentes como a água, temperatura e o vento (intemperismo). O solo arenoso possui uma quantidade maior de areia do que de outros componentes (85% de areia). Este solo, por ser formado em grande parte por grãos de areia, deixa espaços entre os grãos, assim proporcionando uma passagem maior de água e circulação de ar.

A coleta do Latossolo Vermelho foi realizada nas proximidades do Campus da UNIJUÍ, e o perfil de solo estava exposto em uma camada de aproximadamente *0,60 m* de profundidade, sendo que este ainda não havia sido cultivado. O solo foi secado naturalmente por *24 horas* e peneirado em uma peneira com malha de *2 mm*. O mesmo

procedimento foi realizado para a areia. A cerâmica que foi utilizada para a construção do sensor, foi obtida em uma fábrica de potes de argila, no município de Ijuí.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS SOLOS

Primeiramente, foram utilizadas unidades experimentais, que consistem de anéis volumétricos de alumínio, com 0,085 m de diâmetro interno e 0,03 m de altura. Em cada anel, com o auxílio de uma tira de borracha, foi preso um pedaço de tecido permeável, que permite a passagem de solução sem diminuir a quantidade de solo da amostra (figura 3.1). Todos os anéis eram numerados para se manter um controle, e sua massa também era pesada. Após, os anéis serem numerados, foi colocada dentro deles o solo (latossolo vermelho e areia), sem nenhum tipo de compactação e depois feito uma nova pesagem.



Figura 3.1 Anéis volumétricos prontos para serem colocados os solos.

3.2 DETERMINAÇÃO DA COLETA DA UMIDADE

Como foi descrito anteriormente, os anéis foram numerados e preenchidos de solo, ou seja, era pesado primeiramente só o anel e depois pesado o anel juntamente com o solo escolhido.

A partir dessa nova pesagem, as amostras tanto de latossolo vermelho como o de areia eram colocadas em um recipiente com uma lâmina de água nunca superior à altura do anel, para que ficassem por 24 horas, tendo considerado suficiente para uma completa

saturação e uniformização da umidade da amostra. Depois de saturadas, as amostras eram colocadas no Funil de Buchner. Os potenciais da água no solo (item 1.6) são expressos em unidade de energia por massa de água [$J.kg^{-1}$], que em geral são modificadas a energia por unidade de volume [$J.m^{-3}$], LIBARDI (1999).

A tensão é apresentada em Pa , ou ainda expressa em termos de uma altura de água, sendo que $1 kPa = 1000 Pa$, que corresponde à pressão exercida por uma altura aproximada de $10 cm$ na coluna de água. Como no Funil de Buchner, os valores são baixos (pressão), utiliza-se tensão até $200 kPa$. Então, costuma-se utilizar o Funil de Buchner, que submete a amostra a uma pressão por coluna de água de até $2 m$ ($200 kPa$).

Foi utilizado apenas o método do Funil de Buchner, (figura 3.2) para a realização dos experimentos (para pressões baixas), já que na Câmara de Pressão de Richards, as pressões são até $2000 kPa$, ou seja, pressões altas.

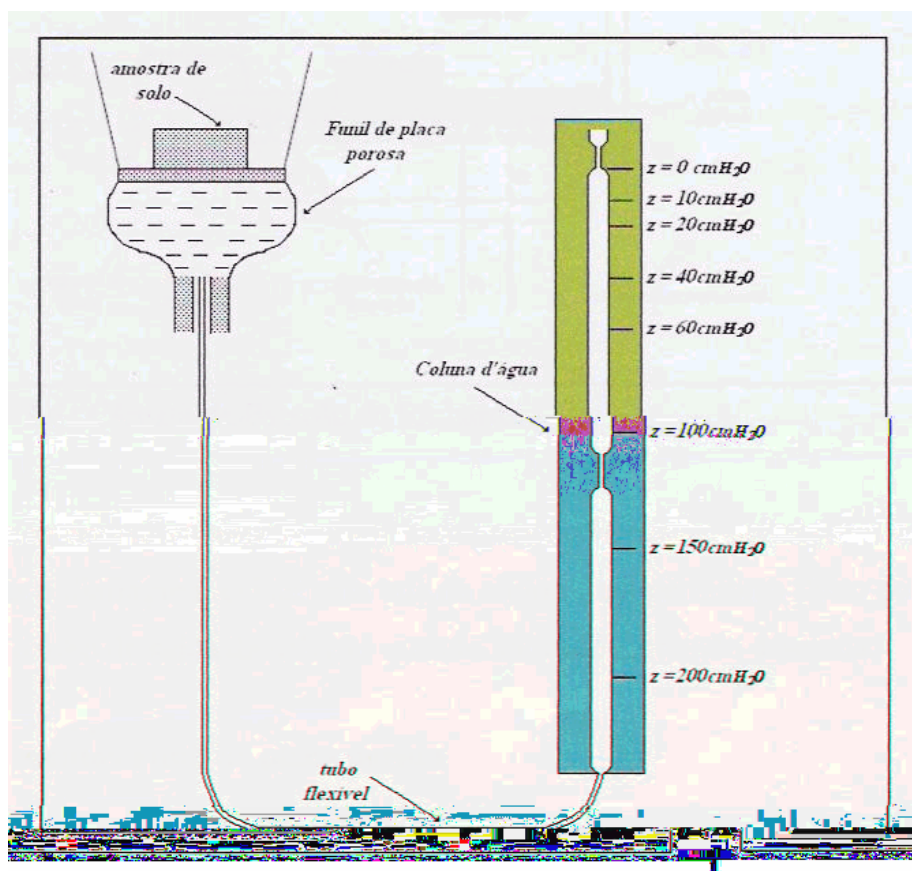


Figura 3.2 Esquema do Funil de Buchner.

O Funil de Buchner utilizado neste trabalho é formado por um funil de plástico polietileno, com uma placa porosa inserida em seu interior, a uma distância de $0,2m$ do fundo (figura 3.3). Os poros da placa devem ser mantidos sempre cheios d'água para que ela se torne permeável somente à solução. A haste do funil é prolongada por meio de um tubo flexível, através do qual pode-se saturar ou dessaturar a placa porosa, pela elevação ou abaixamento, do nível de água mantido constante em sua extremidade. Nesta haste, também há pequenos orifícios (canos presos a grampos) para fora, usados para a retirada de água das amostras (quando é retirada a água do funil começa a criar uma diferença de pressão acontecendo assim à sucção da água).



Figura 3.3 Funil de Buchner Laboratório Física dos solos UNIJUÍ.

A diferença de altura na coluna d'água do tubo flexível em relação à placa porosa, cria uma tensão na água das amostras, fazendo com que elas percam umidade para compensar a diferença de pressão entre um lado e outro do sistema.

O potencial total da solução é o mesmo para qualquer ponto na unidade experimental (amostras) que está na placa porosa. Desta forma, para obter a variação da umidade usando o Funil de Buchner, utilizou-se o procedimento descrito a seguir:

1. Encher a coluna de água até atingir a altura acima da placa porosa para permitir a sua saturação, deixando-a assim saturando por 24 horas;
2. Colocar as amostras previamente saturadas na superfície da placa de cerâmica do funil e deixar descansar por 1 hora para que o solo fique em perfeito contato com a placa, pois ela funciona como uma extensão do sistema solo;
3. Abrir o grampo situado na altura (tubo flexível) correspondente à tensão desejada;
4. Aguardar por 24 horas para que o sistema se estabilize;
5. Retirar as amostras e verificar a massa de cada uma.

Depois da retirada das amostras do funil, foram pesadas, como foi descrito anteriormente, e após, os anéis um a um eram submetidos ao aquecimento com a fonte de calor ligada ao sensor de cerâmica e feito as medidas das temperaturas com ajuda dos termopares que estavam no solo e dentro do sensor. Após esta etapa, as amostras eram deixadas na estufa por um período de 24 *horas* horasAguefe04 -0.6ora(foi d381 09.5rito)5.8()]TJ-9-0.8.



Figura 3.4 Sensor desenvolvido.



Figura 3.5 Resistor.

3.4 COLETA DE TEMPERATURA COM OS TERMOPARES

O aquecimento das amostras de solo e as leituras da temperatura foram realizados no Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática do prédio da Sede Acadêmica da UNIJUÍ.

O arranjo experimental utilizado, representado na figura 3.6, consistiu, basicamente de um cilindro contendo a amostra de solo, um sensor térmico de cerâmica na forma de um paralelepípedo retangular (figura 3.4) acoplado a um computador com processador Pentium 266, 32MB de memória RAM através de uma placa de aquisição de dados.



Figura 3.6 Computador e placa analógica/digital do Laboratório de Medidas Físicas para Modelagem Matemática – UNIJUÍ.

Através do aquecimento das amostras, as informações foram enviadas para uma placa analógica/digital (placa A/D) de aquisição de dados do tipo *LR 7018*, *16 bits*, *8 pontos*, com conversor *485 para 232 – LR 7520*, que dispõe de 8 canais (termopares) de leitura de dados e realiza até 10 leituras por segundo, que converte os dados e os envia para serem armazenados no computador.

A armazenagem dos dados no computador foi feita através de um software adequado para estas leituras, que foi ajustado para fazer as leituras da temperatura de *10 em 10 segundos* durante *1200 segundos (20 minutos)*.

Durante o período de testes, que serviu para uma prévia análise do tempo em que precisaria ser feita a leitura, e para verificar se os dados coletados através do sensor apresentavam a tendência que se esperava, foram feitas leituras de temperatura com amostras de latossolo vermelho e areia secos e úmidos. As figuras 3.7 e 3.8 mostram as curvas de temperatura em função do tempo obtido experimentalmente, para 20 minutos. Analisando estas figuras, observa-se um padrão de comportamento semelhante em cada amostra. À medida que o tempo vai passando, há um aquecimento devido à fonte de calor do sensor até atingir o estado estacionário, para um mesmo ponto. A partir de 20 minutos há poucas alterações na temperatura. As figuras 3.9 e 3.10 mostram as variações de

temperatura. Nelas observa-se que a variação de temperatura ΔT são semelhantes, pois o uso da cerâmica elimina as diferenças existente devido ao solo utilizado. Este fato mostra que somente o teor de umidade da cerâmica, que é o mesmo do solo (Capítulo 2), influência na distribuição da temperatura.

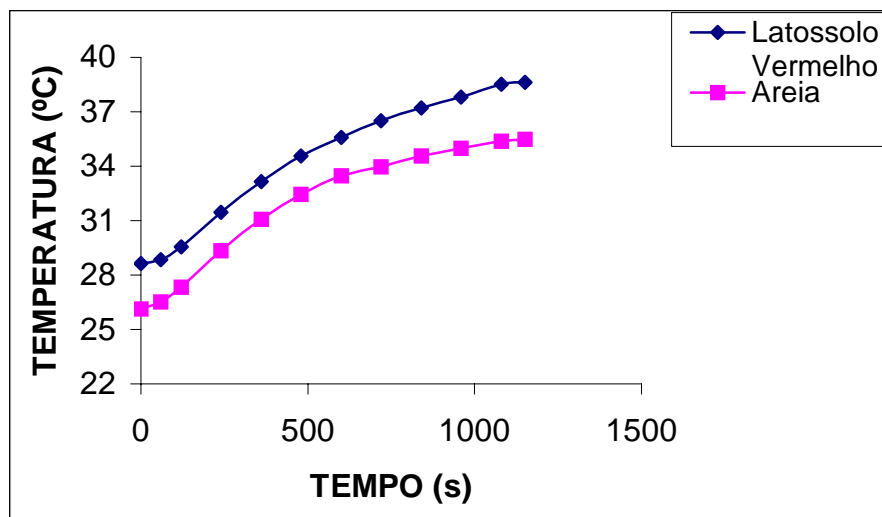


Figura 3.7 Comparação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo seco (03/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

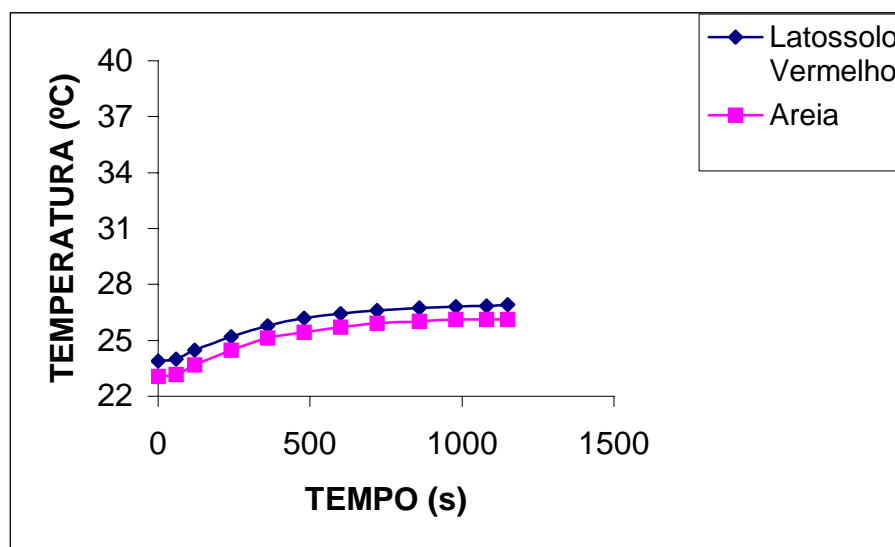


Figura 3.8 Comparação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo saturado (03/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

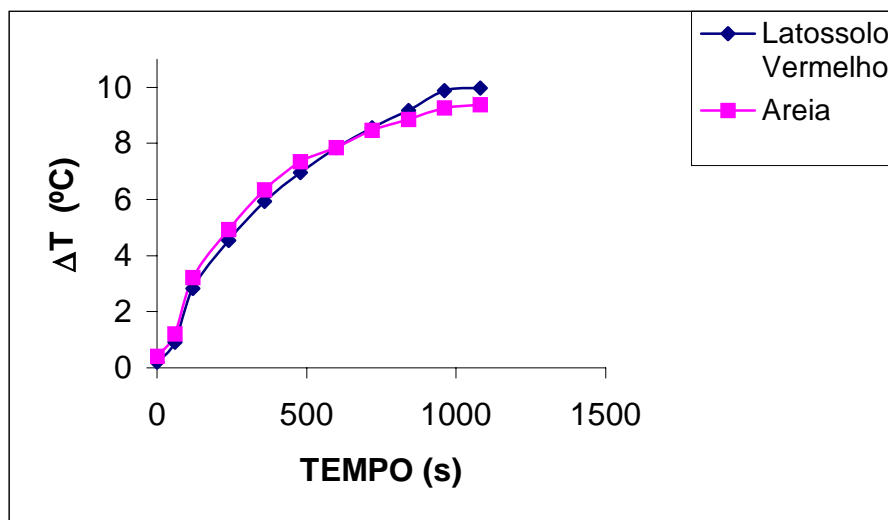


Figura 3.9 Variação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo seco. (03/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

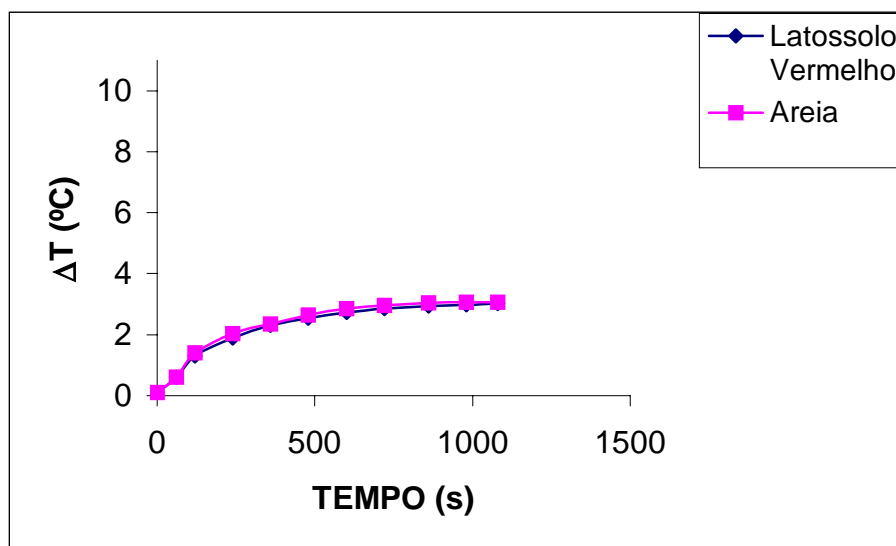


Figura 3.10 Variação da temperatura em função do tempo para os dois tipos de solo saturado (03/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

Para analisar a distribuição de temperatura do solo nas proximidades do sensor, foi utilizado o seguinte arranjo experimental mostrado na figura 3.11:

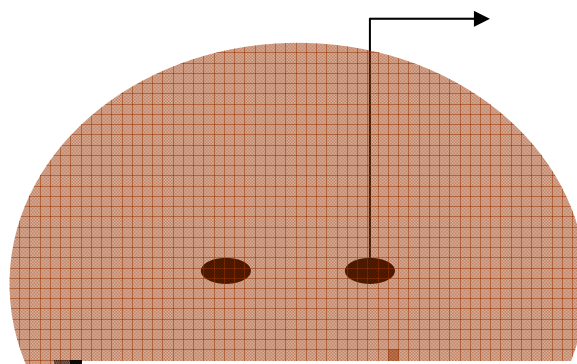


Figura 3.11 Esquema da colocação dos termopares na amostra (elaboração do autor).

Nas amostras, foram colocados 3 termopares devidamente calibrados (um na frente do sensor (TP7), um atrás (TP2) e outro do lado do termopar que está na cerâmica (TP4)), com o objetivo de visualizar a curva de aquecimento nesta região (figura 3.12). Os termopares utilizados para estas medidas são do mesmo tipo do termopar utilizado no sensor. Estas informações podem ser importantes para a formulação das condições de contorno no modelo matemático.

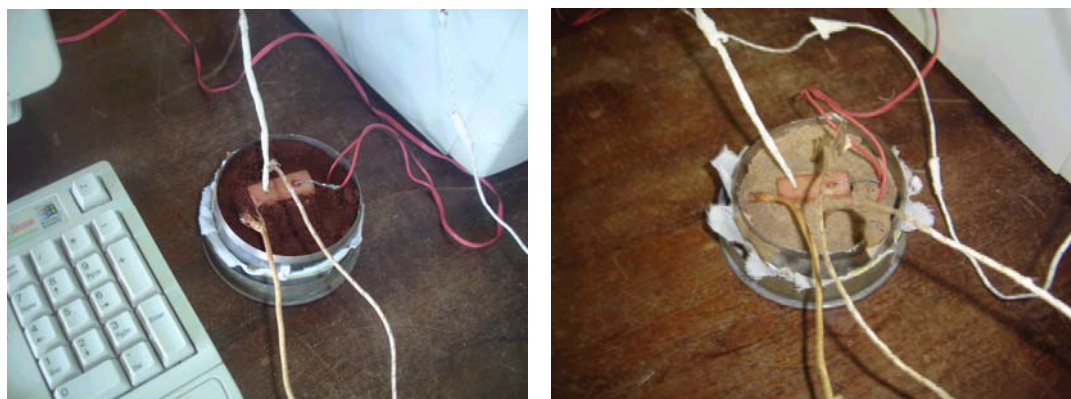


Figura 3.12 Amostra de latossolo vermelho e areia com o sensor e termopares.

Os resultados destas medições estão mostrados nas figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16. Nestas figuras, nota-se que a cerâmica sofre um aumento de temperatura maior que o solo que se encontra na sua vizinhança. Nos termopares que estão ao redor do sensor, as temperaturas registradas começam a ficar constantes num instante de tempo próximo de 16 minutos (960 segundos). Percebe-se que nos primeiros instantes de tempo, o gradiente de temperatura é grande, principalmente para solos secos (cerâmica). Para o solo úmido, o gradiente de temperatura é mais ameno devido a presença maior de água o que faz com que o calor se difunda mais rápido. À medida que o tempo passa, o gradiente de temperatura vai diminuindo, até alcançar o estado estacionário.

Também é possível observar que o solo ao redor do sensor está sofrendo um pequeno aquecimento. Para o solo seco, este aquecimento é maior. Neste trabalho foi considerado que este aquecimento é suficientemente pequeno e não interfere na medida do sensor.

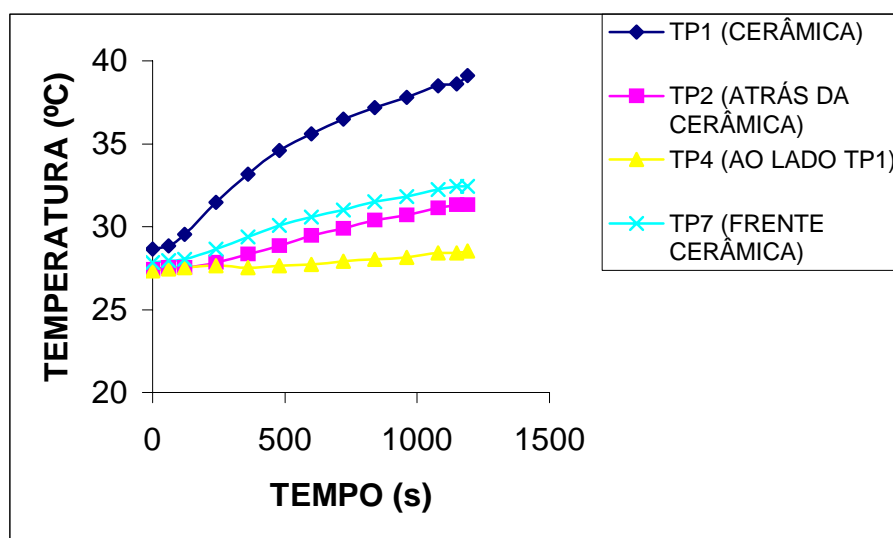


Figura 3.13 Temperatura em função do tempo para um latossolo vermelho seco (05/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

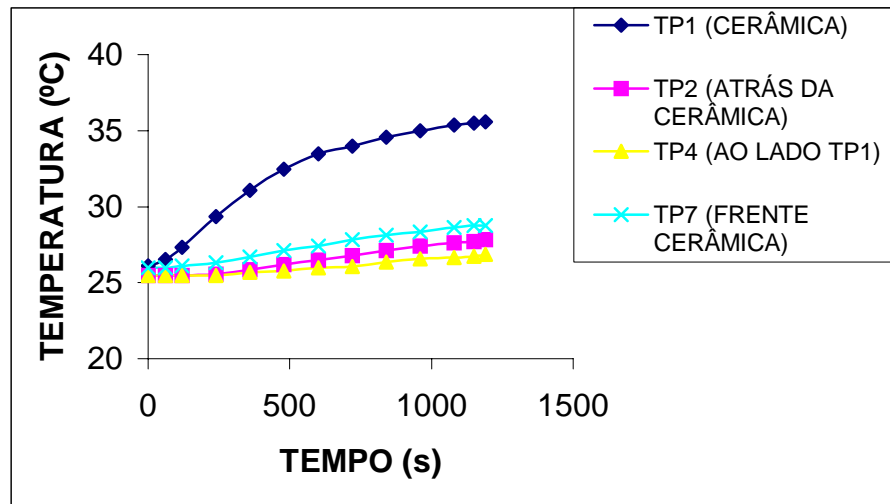


Figura 3.14 Temperatura em função do tempo para um solo arenoso seco (05/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

As figuras 3.15 e 3.16, fazem uma nova comparação do latossolo vermelho e da areia, ambos com bastante umidade, juntamente com os quatro termopares para a verificação das temperaturas ocorridas.

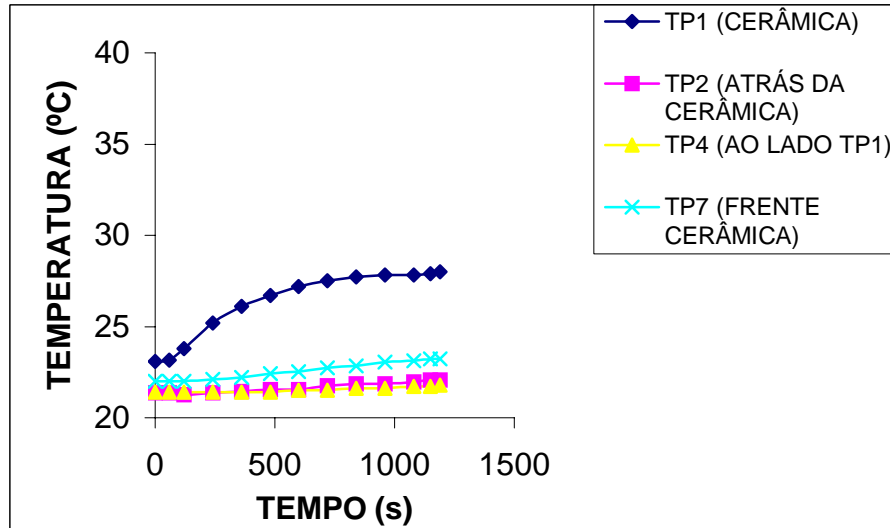


Figura 3.15 Temperatura em função do tempo para um latossolo vermelho úmido (05/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

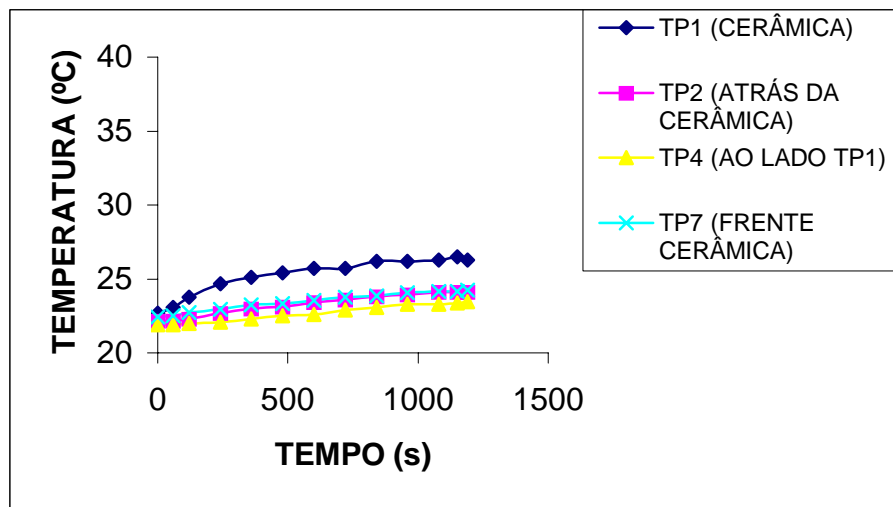


Figura 3.16 Temperatura em função do tempo para um solo arenoso úmido (05/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

3.5 VERIFICAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Após ter sido realizado todo o experimento, foi feita uma comparação da variação da temperatura (ΔT) em função do tempo (s), dos solos: latossolo vermelho e areia (figuras 3.17 e 3.18), para várias tensões (pressões do Funil de Buchner).

Conforme descrita anteriormente, a medição dessas temperaturas, foi realizada em diferentes dias, ou seja, as temperaturas iniciais variavam, dependendo da temperatura ambiente que estava a sala em que estavam sendo realizados os experimentos.

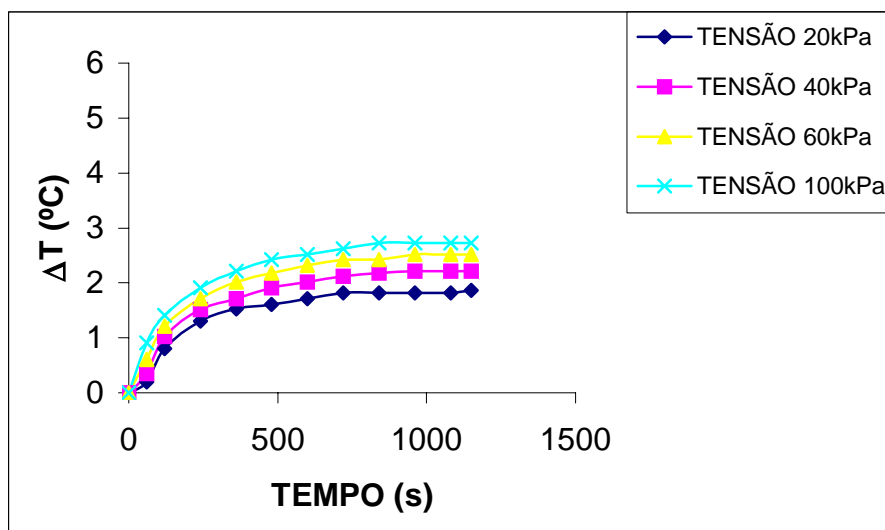


Figura 3.17 Análise de ΔT do latossolo vermelho em função do tempo para diferentes umidades (05/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

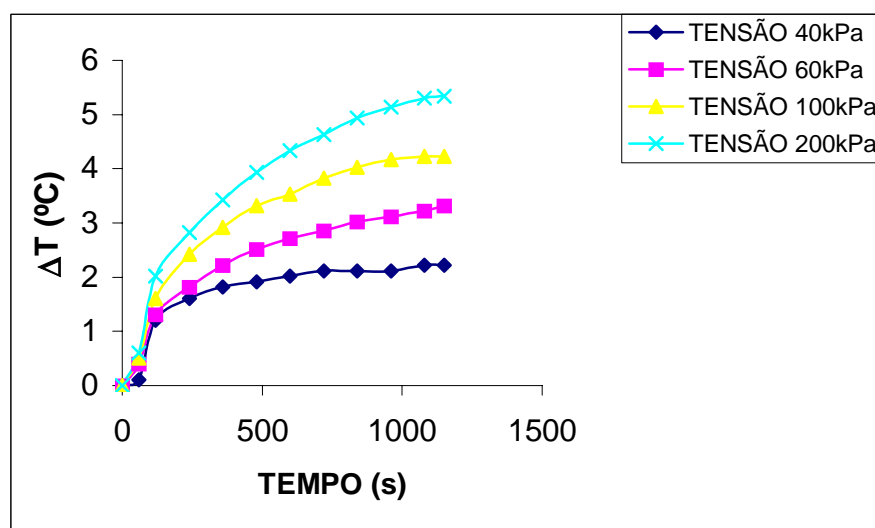


Figura 3.18 Análise de ΔT da areia em função do tempo para diferentes umidades (05/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

Nas figuras 3.17 e 3.19, mostra-se a tendência da variação de temperatura em função do tempo para diferentes tensões, e pode-se perceber tanto no latossolo vermelho, quanto na areia que há um maior aquecimento nas maiores tensões, isso significa que quanto mais seco o solo maior a temperatura no decorrer do tempo.

Percebe-se então, que a tendência mostrada nessas figuras indica que quanto mais seco é o solo, maior são as variações de temperatura. Esse comportamento pode ser

explicado a partir do conceito de calor específico. Ele é definido como a quantidade de calor que faz variar de 1°C a temperatura da massa de um quilograma da substância. A água tem calor específico grande, $1 \text{ cal.g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, o que significa que para aquecer a massa de um grama de água é necessário fornecer 1 caloria. Este fato explica o porque que a água demora a esquentar e também, demora para esfriar; por outro lado, solo seco sofre com variações bruscas de temperatura por causa do baixo calor específico (isto é, enquanto a fonte de calor está ligada, o solo esquentava muito e, quando a fonte é desligada, o solo esfria rápido).

QUARTO CAPÍTULO – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Neste capítulo é mostrado os resultados das simulações numéricas realizados, para obter a curva ajustada em função da difusividade térmica obtida no problema direto para várias tensões e diferentes solos.

4.1 AJUSTE NÃO – LINEAR USANDO O MÉTODO DE LEVENBERG – MARQUARDT

As figuras 4.1 a 4.4, mostram as curvas dos dados experimentais, dos dados calculados no problema direto e as curvas ajustadas de acordo com as variações da difusividade térmica das amostras de solo (latossolo vermelho), utilizando o método iterativo de Levenberg – Marquardt para a função cúbica (equação 2.19), com uma precisão de $1,0 \cdot 10^{-2}$, aproximação inicial do vetor de parâmetro $\vec{P} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e parâmetro de amortização $\lambda = 0,001$. O critério para a escolha da melhor curva para cada tensão foi a que teve a soma dos erros quadrados menor (equação 2.20). Também para uma melhor observação, foi analisado o erro padrão para cada amostra, onde se percebe que os dados calculados pelo modelo estão, na sua quase totalidade, dentro do erro padrão de cada medida, com uma pequena diferença de aproximadamente $0,1^\circ\text{C}$ a $1,5^\circ\text{C}$. As figuras de 4.1 a 4.8 mostram os melhores resultados, tanto para o latossolo vermelho como para areia.

Para uma amostra suficientemente grande a distribuição das médias amostrais em torno da média populacional é Normal (tamanho da amostra N é maior que 30) com desvio padrão $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$, onde σ é o desvio padrão populacional. Chama-se $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ de erro padrão (SE) da média, uma vez que quanto menor seu valor tanto mais próximas estarão as médias amostrais da média populacional μ (i.e. tanto menor será o *erro*). Isto significa que 95% de todas as médias amostrais cairão dentro de $\pm 1,96 \cdot \text{SE}$ de μ . Então intervalos da

forma $(\bar{x} - 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \bar{x} + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}})$, onde \bar{x} é a média amostral), conterão a verdadeira média populacional μ 95% das vezes. O número 1,96 é denominado coeficiente de confiança ou valor crítico.

Um intervalo de confiança de 95% para um parâmetro fornece um intervalo no qual tem-se 95% de confiança da cobertura do verdadeiro valor do parâmetro. Tecnicamente, 95% de todos os intervalos de confiança que foram construídos conterão o verdadeiro valor do parâmetro (dado que todas as suposições envolvidas estejam corretas). Isto significa que se o intervalo de confiança obtido para um parâmetro, para cada uma dentre 100 amostras aleatórias da população, somente 5, em média destes intervalos de confiança não cobrirão.

Neste trabalho o tamanho da amostra é igual ao tamanho da população N que é de 120 (número de pontos experimentais). Nas figuras de 4.1 a 4.8 é mostrado o erro padrão de cada medida na curva dos dados experimentais para 11 pontos (em torno de 8 minutos).

A figura 4.1 mostra o ajuste para a tensão de 20 kPa com média de 28,6142°C e erro padrão de 0,6353°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 5 \cdot 10^{-8} m^2 \cdot s^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,01960655020596$ com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,05945737541; -5,30501751773; 158,52006843024; -1556,37440812740]^T .$$

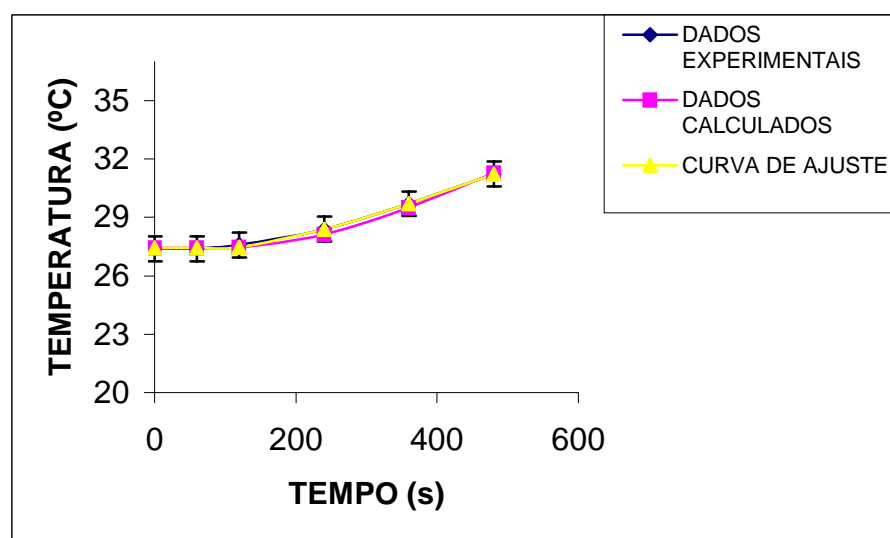


Figura 4.1 – Ajuste de curva para tensão de 20 kPa (Latossolo Vermelho) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A figura 4.2 mostra o ajuste para a tensão de 40 *kPa* com média de 30,8589°C e erro padrão de 0,7613°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,06461221575699$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,10693244006; -10,24089561042; 327,67285115174; -3470,40105178160]^T.$$

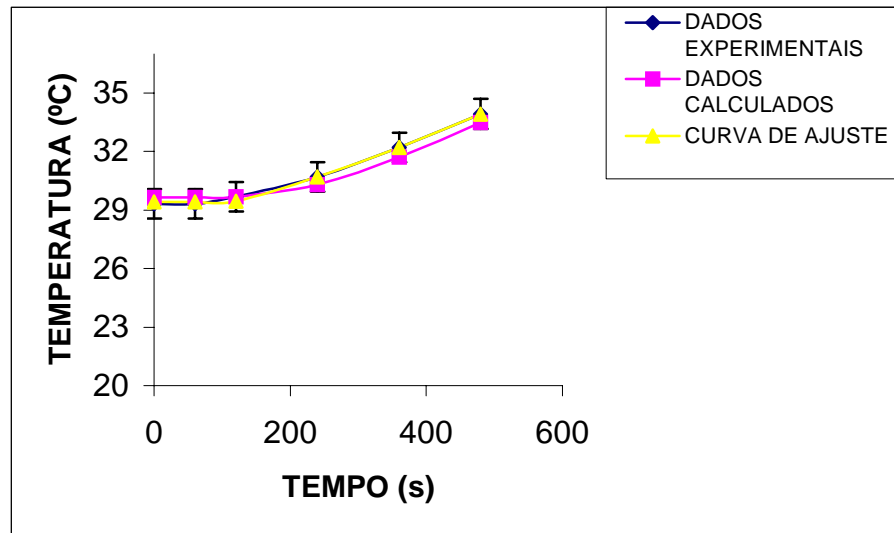


Figura 4.2 – Ajuste de curva para tensão de 40 *kPa* (Latosolo Vermelho) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A figura 4.3 mostra o ajuste para a tensão de 60 *kPa* com média de 31,6575°C e erro padrão de 0,9089°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,08178907123314$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,14989846639; -14,75791896586; 484,91496783784; -5284,10683421915]^T.$$

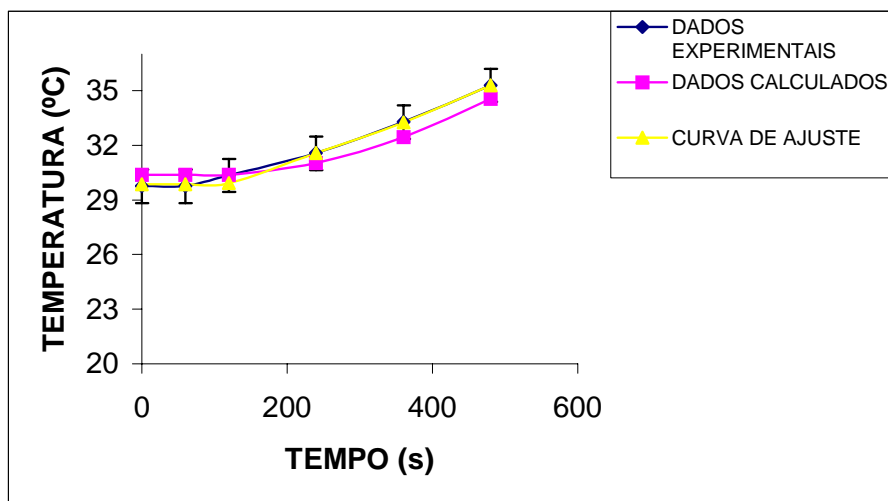


Figura 4.3 – Ajuste de curva para tensão de 60 *kPa* (Latossolo Vermelho) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A figura 4.4 mostra o ajuste para a tensão de 100 *kPa* com média de 32,0571°C e erro padrão de 1,0807°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,68 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,07547631473817$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,07538876565; -7,53241225975; 251,24843088904; -2763,58977504097]^T.$$

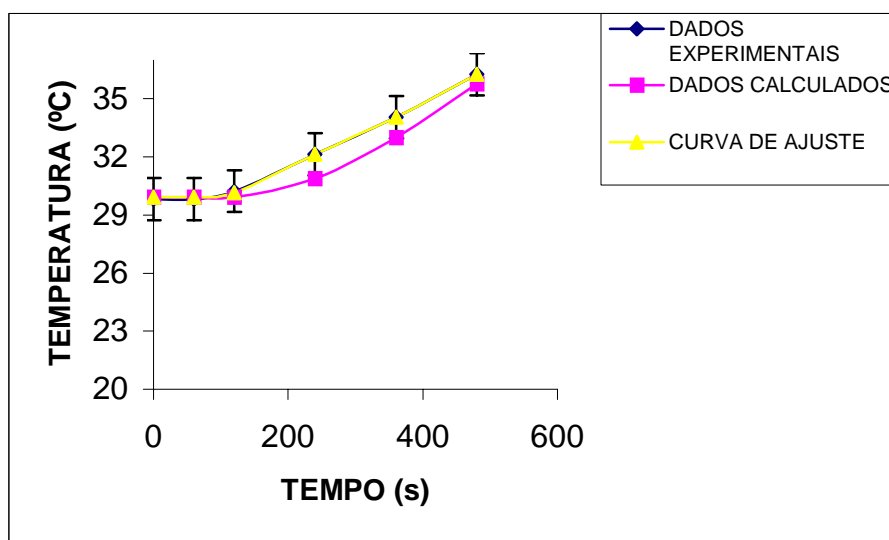


Figura 4.4 – Ajuste de curva para tensão de 100 *kPa* (Latossolo Vermelho) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

Já nas figuras de 4.5 a 4.8, também mostram as curvas dos dados experimentais, dos dados calculados no problema direto e as curvas ajustadas de acordo com as variações da difusividade térmica das amostras de solo (areia).

A figura 4.5 mostra o ajuste para a tensão de 40 *kPa* com média de 25,0680°C e erro padrão de 0,7953°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,88 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,00222820387287$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,12184175663; -9,42442812524; 243,92166598555; -2085,91639866799]^T.$$

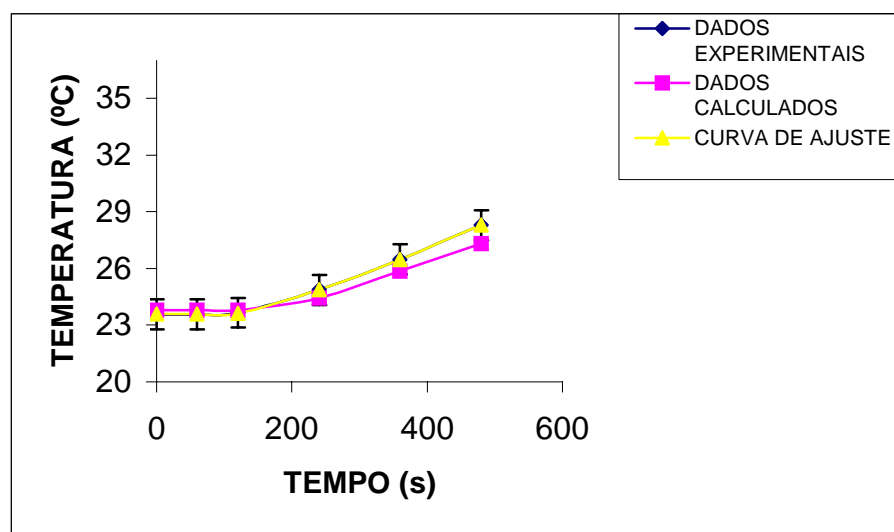


Figura 4.5 – Ajuste de curva para tensão de 40 *kPa* (Areia) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A figura 4.6 mostra o ajuste para a tensão de 60 *kPa* com média de 27,7116°C e erro padrão de 0,947°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,08232919942255$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,15002708850; -12,65278778751; 356,57310768816; -3328,28760649266]^T.$$

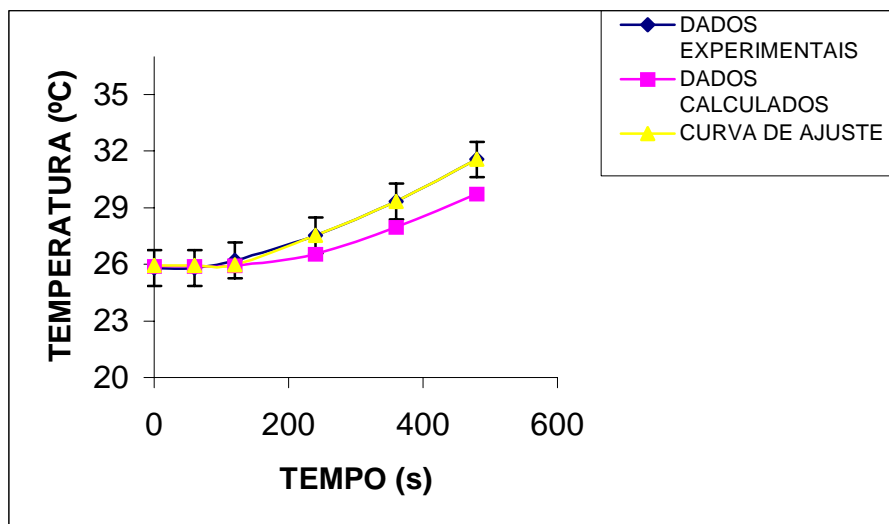


Figura 4.6 – Ajuste de curva para tensão de 60 *kPa* (Areia) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A figura 4.7 mostra o ajuste para a tensão de 100 *kPa* com média de 31,1147°C e erro padrão de 1,2340°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,68 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,07822063089189$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,05408994001; -5,21643690214; 168,49834173410; -1789,44116909093]^T.$$

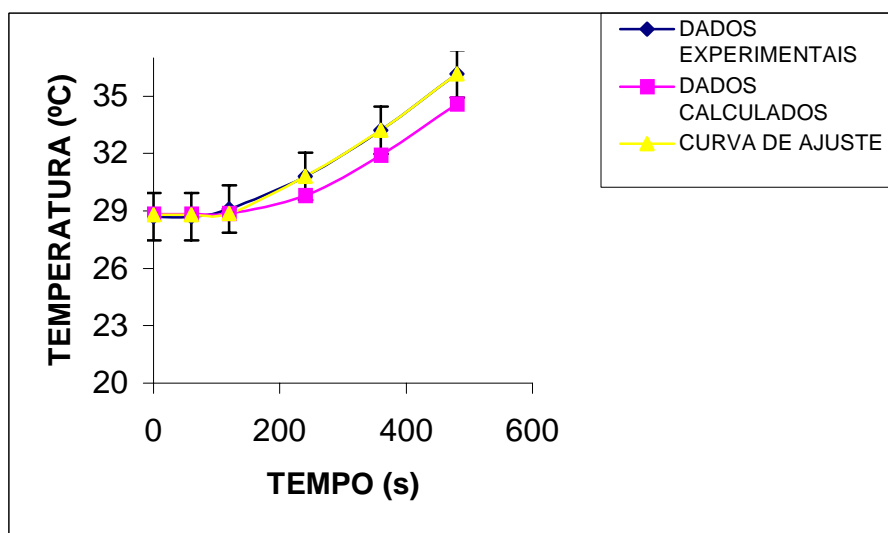


Figura 4.7 – Ajuste de curva para tensão de 100 *kPa* (Areia) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A figura 4.8 mostra o ajuste para a tensão de 200 *kPa* com média de 24,2347°C e erro padrão de 1,4754°C. O valor da difusividade térmica que melhor ajustou-se foi $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, a soma dos erros $S = 0,08024828007483$, com vetor de parâmetros:

$$\vec{P} = [0,023319909312; -1,844787425876; 49,342951915361; -418,825033781376]^T.$$

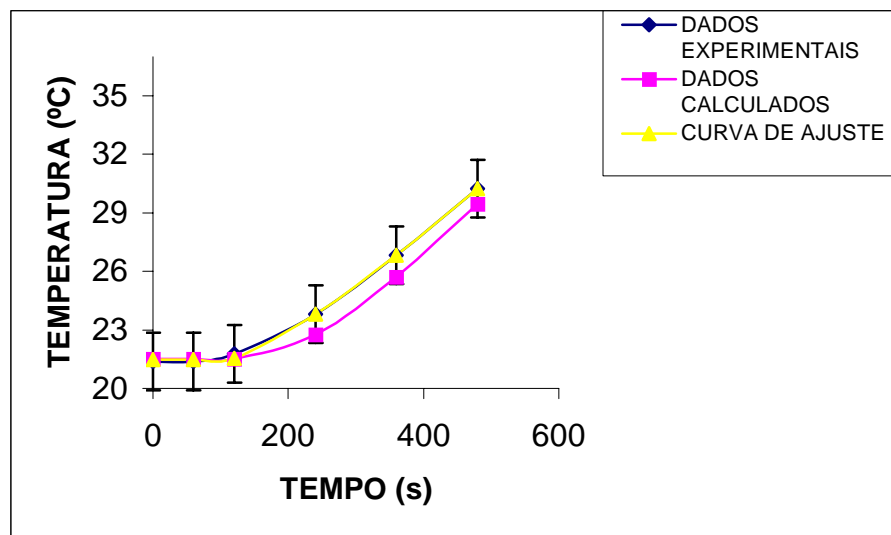


Figura 4.8 – Ajuste de curva para tensão de 200 *kPa* (Areia) (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A difusividade térmica expressa a rapidez de mudança de temperatura do material (meio poroso) quando submetido a fontes de calor externas. Quanto maior a difusividade térmica, mais rapidamente a energia térmica irá se difundir através do meio poroso. Nas figuras 4.1 a 4.8 Observa-se que quanto mais úmido (menor tensão) se encontra o solo, maior é a difusividade térmica (tabela 4.1). A água preenche parcial ou integralmente os espaços livres entre as partículas sólidas do meio poroso aumentando a área de contato entre as partículas, facilitando a propagação do calor.

A partir da análise das figuras do latossolo vermelho, pode-se verificar que para as amostras com maior umidade (menores tensões), os resultados obtidos pelo modelo apresentam uma tendência razoavelmente próxima aos experimentais (melhores que para o solo seco), mantendo-se dentro do erro padrão. Quando o solo é mudado, no caso, para a areia, as curvas apresentam uma mesma tendência que o latossolo vermelho.

Tabela 4.2 – Comparativo dos valores calculados da Areia

TENSÃO (kPa)	θ (cm ³ .cm ⁻¹)	α (10 ⁻⁸ m ² .s ⁻¹)
40	0,1279613	4,88
60	0,0639965	4,8
100	0,0426881	4,68
200	0,0262682	4,3

Observando a figura 4.9, nota-se que quanto mais seco está o solo, menor é a difusividade térmica, ou seja, a taxa de difusão de calor é pequena. Podendo assim, concluir que, para descrever a relação matemática da umidade do solo e da difusividade da cerâmica, poderá ser utilizada a regressão linear, que é um instrumento adequado para a determinação da relação entre as duas variáveis em questão.

Para ajustar os dados, foi feito um ajuste linear por erros mínimos quadrados no programa EXCEL, resultando na seguinte curva:

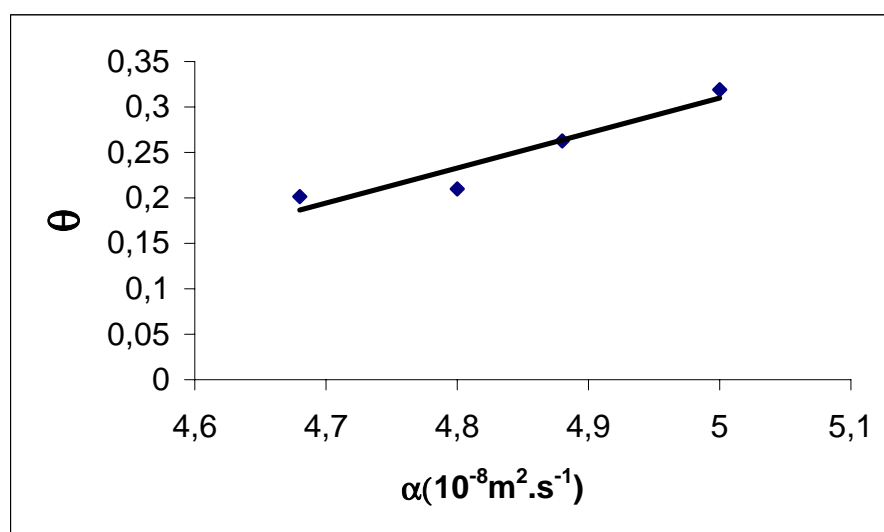


Figura 4.9 – Curva de calibração do Latossolo Vermelho (10/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A reta da figura 4.9 é obtida pela equação:

$$\theta = 4 \cdot 10^8 \cdot \alpha - 1,6227 \quad (4.1)$$

E para determinar a medida da correlação linear entre as variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação Pearson, R . Este coeficiente deve indicar o grau de intensidade da correlação entre duas variáveis. O coeficiente de determinação R^2 é igual ao quadrado do coeficiente de correlação e é sempre positivo. Tomando o resultado da figura 4.9 pode-se concluir que 90,61 % das variações de θ são explicadas pela variação de α .

Na figura 4.10, relativa a areia, tem o mesmo comportamento da figura 4.9, que quanto mais seco está o solo, menor é a difusividade térmica. Essa figura foi obtida através da análise de regressão linear, resultando na seguinte curva:

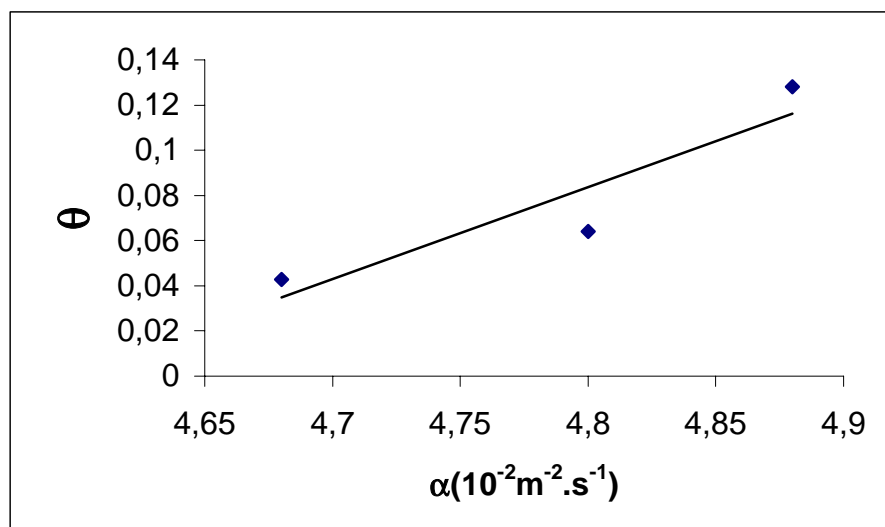


Figura 4.10 – Curva de calibração da Areia (06/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

A reta da figura 4.10 é obtida pela equação:

$$\theta = 4 \cdot 10^8 \cdot \alpha - 1,8686 \quad (4.2)$$

Tomando o resultado da figura 4.10 pode-se concluir que 85,11 % das variações de θ são explicadas pela variação de α .

A figura 4.11 e 4.12, representa a relação entre a difusividade térmica da cerâmica e as tensões de coluna de água da amostra. Quanto maior for a difusividade térmica e a umidade da amostra, menor é a tensão.

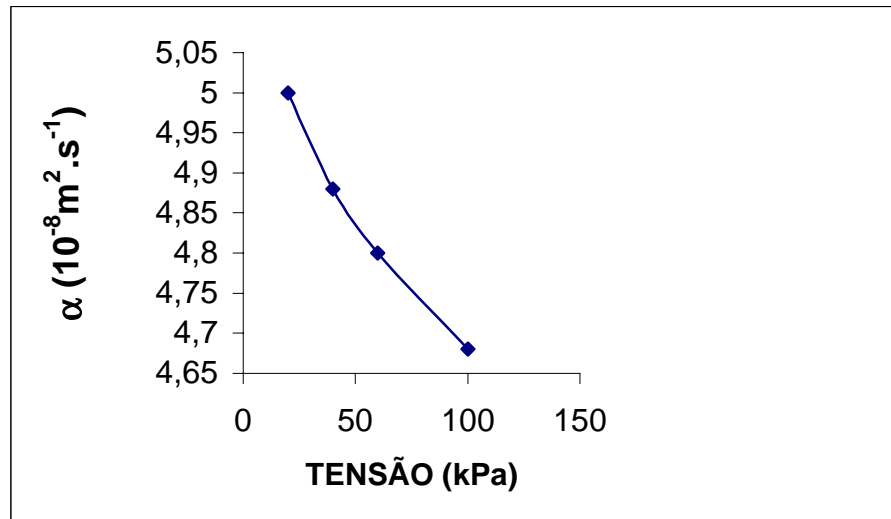


Figura 4.11 – Relação entre a difusividade térmica da cerâmica e tensão do Latossolo Vermelho (10/01/2007 - Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

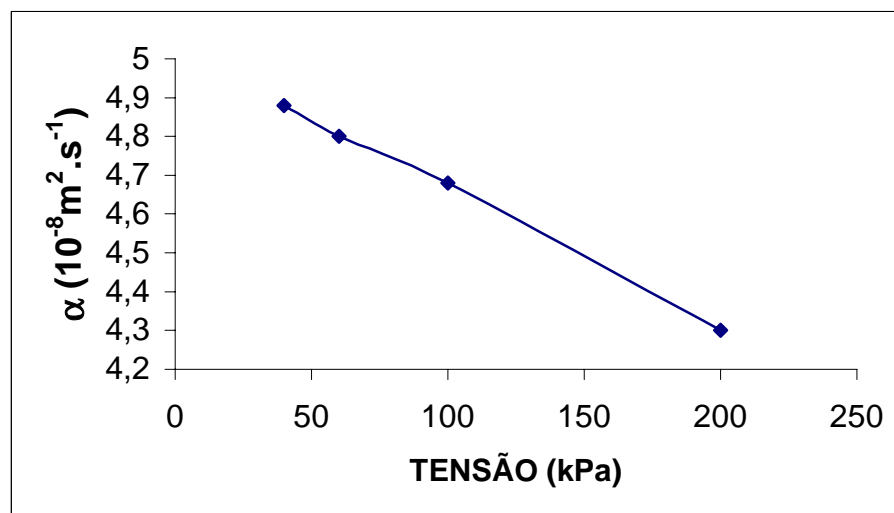


Figura 4.12 – Relação entre a difusividade térmica da cerâmica e tensão da Areia (10/01/2007 – Laboratório de Medidas Físicas/UNIJUÍ).

De acordo com os resultados obtidos neste capítulo, pode-se dizer que a menor taxa de aquecimento está na amostra com o solo mais úmido. Este fato deve-se as bruscas mudanças em suas propriedades termo-físicas. A difusividade térmica depende da

condutividade térmica, da densidade e do calor específico da cerâmica e um aumento do teor de umidade do solo ocasiona um aumento da difusividade, em função do aumento do calor específico e da densidade da cerâmica.

Se o tempo de aquecimento gerado pela fonte de calor for longo, a maior parte desse calor transferido será utilizada para a evaporação da água. Desta forma, é desejável que o tempo de aquecimento e leitura seja curto. Por isso, optou-se considerar a variação de temperatura no tempo de *8 minutos*.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Como resultado concreto do trabalho, construiu-se as curvas de calibração para conhecer o teor de umidade do solo (latossolo vermelho e areia) tendo o conhecimento da difusividade térmica da cerâmica.

2. Em função de problemas na coleta dos dados experimentais, algumas tensões não foram consideradas; as que foram utilizadas do trabalho foram consideradas as melhores.

3. Pode-se dizer que a meta a que se propunha este trabalho foi atingida, contudo, existem muitas lacunas no conhecimento do processo que ainda merecem estudo e que ainda não foram contempladas em virtude da complexidade do fenômeno e do equipamento de laboratório.

4. Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Verificar os resultados obtidos com os valores médios da temperatura observados com termômetros de referência;
- Determinação de outras propriedades tais como o calor específico e condutividade térmica do meio poroso utilizado para conhecer integralmente o comportamento térmico do mesmo;

- Desenvolver outros sensores utilizando outros tipos de cerâmicas e/ou outro tipo de meio poroso (outro tipo de material poroso);
- Incluir no modelo e aplicativo a influência do teor de umidade nas propriedades termo-físicas do meio poroso.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos para a amostra de Latossolo Vermelho e Areia, pode-se fazer as seguintes conclusões:

1. Os resultados estão coerentes com os fenômenos físicos envolvidos, mas observa-se que o modelo matemático descreve bem o processo para tempos pequenos (8 minutos) e é apenas razoável para tempos maiores. Também se observa que o modelo descreve melhor quando o teor de umidade da amostra é grande e para solos mais secos, o modelo apresenta problemas, tanto para o latossolo vermelho como para a areia.
2. Observa-se que os valores da difusividade térmica encontrada pela solução do problema inverso apresentam pequenas variações, mesmo quando o solo muda de úmido para seco, pois, o modelo considera variável apenas a difusividade térmica mantendo todas as outras propriedades termo-físicas constantes.
3. O método proposto tem potencial desde que os procedimentos experimentais realizados sejam mais criteriosos para obter dados mais confiáveis e, que o modelo matemático deve considerar alguma dependência da umidade do solo de uma ou mais propriedades termo-físicas do solo para se aproximar mais do processo real.
4. Analisando os resultados, verifica-se que se o tempo de aquecimento for suficientemente prolongado, as taxas de transferência de calor são significativamente alteradas devido às alterações nas propriedades termo-físicas, considerando que haverá evaporação de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. Água e Agricultura. Disponível em <<http://www.água.bio.br>> Acesso em: 24/07/06.

ALONSO, E. E.; GENS, A. & HIGHT, D. W. **Special Problem Soils**. 9º ECSMFE, Dublin General, Report, Session 5, 5: 1-6. 1987.

_____. Arquivo do Agrônomo Nº 1 – Dezembro/95 (2ª edição – ampliada e totalmente modificada). Disponível em <[http://www.potafos.org/.../d5fbc829a2f54298832569f8004695c5/\\$FILE/Pedologia7-16.pdf](http://www.potafos.org/.../d5fbc829a2f54298832569f8004695c5/$FILE/Pedologia7-16.pdf)>. Acesso em: 15/08/06.

BAKER, J. M.; ALLMARAS, R. R. **System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry**. Soil Science Society American Journal, v. 54, n. 1, p. 1-6, 1990.

BÄR, Adalberto. **Caracterização dos Tijolos e Blocos Cerâmicos Utilizados na Cidade de Ijuí**. Dissertação. UNIJUÍ, Ijuí, 2003.

BAUER, L. A Falcão. **Materiais de Construção**. São Paulo: JC, v.2, 5ª edição, 1994.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 878 p, 1989.

BEBER, Leonardo C. C. **Determinação da Difusividade Térmica de Solos do Tipo Latossolo Vermelho em Função do Teor de Umidade**. Dissertação de Mestrado. UNIJUI, Ijuí, 2006.

BEJAN, A. **Transferência de calor**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1996.

BRUNO, Rogério D. **Variabilidade observada da umidade do solo em floresta tropical e cerrado**. Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo, 2004.

_____. **Cerâmica no Brasil**. Associação Brasileira de Cerâmica, 2002.

CALBO, A.G.; SILVA, W.L.C. **Controle da irrigação facilitado - sinalizador de irrigação para uso com o Irrigas** 43º Congresso Brasileiro de Olericultura, Recife – Julho/2003.

CALBO, A.G.; SILVA, W.L.C. **Irrigas: novo sistema para o controle da irrigação**. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGACAO E DRENAGEM, 11., 2001 Fortaleza. Anais. Fortaleza: ABID, p.177-182, 2001.

CALBO, A.G. **Sistema de Controle gasoso de irrigação baseado na determinação de umidade do solo por meio de cápsulas porosas**. BR PI 0004264-1, 2000.

CAMPBELL, G.S.; and J.M. Normann. **An introduction to environmental biophysics**. Springer-Verlag. New York, 1997.

CAMPBELL, G.S.; JUNGBAUER, J.D.; BIDLAKE, W.R.; HUNGERFORD, R.D. **Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity**. Soil Sci. 158:307-313, 1994.

CAMPBELL, G.S.; GARDNER, W.H. **Psychrometric measurement of soil water potential: Temperature and bulk density effects**. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35:8-12, 1975.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, v.1, 6º edição, 2000.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. de. **Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, jul. /ago. 2004, vol.28, no. 4, p.585-596. ISSN 0100-0683. Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 06/01/06.

COLMAN, E. A; HENDRIX T. M. **The fiberglass electrical soil-moisture instrument**. Soil Sci. 67: 425-438, 1949.

COSTA, Joaquim Botelho da. **Caracterização e Constituição do solo**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 7ª edição, 2004.

COUTO, Lairson; SANS, Luiz Marcelo Aguiar. **Características Físico-Hídricas e Disponibilidade de Água no Solo**. Circular Técnica 21. Sete Lagoas, MG, 2002. Disponível em <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/publica/circul21.pdf>>. Acesso em: 08/08/06.

CUNHA, M. Cristina C. **Métodos Numéricos**. Campinas, São Paulo: UNICAMP, 2ª edição, 2003.

DALTON, F.N. & van GENUCHTEN, M.T. **The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity**. Geoderma, 38:237-250, 1986.

DASBERG, S. & DALTON, F.N. **Time domain reflectometry field measurements of soil water content and electrical conductivity**. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:293-297, 1985.

DEVRIES, D. A. **Thermal properties of soil**. P.210-235. In Physics of Plant Environments. W.R. van Wijk (ed.) North Holland Pub. Co., Amsterdam. The Netherlands, 1963.

DIAS, João de Deus de Oliveira; CARNEIRO, Humberto. **Agricultura Geral**. Rio de Janeiro: Escola Superior de Agricultura de Pernambuco, v.1, 1953.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI, 1999. 412 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 2000.

ENCARNAÇÃO, F.; CARNEIRO, C.; DALL'OLIO, A et al. **Técnica volumétrica de calibração de uma sonda de nêutrons**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 26, nº 7, julho/1991.

FLINT, A L.; CAMPBELL, G.S.; ELLETT, K.M. et al. **Calibration and Temperature Correction of Heat Dissipation Matric Potential Sensors**. Soil Science Society of America Journal 66(5):1439-1445, (October 2002).

FLORA, Luciana C. D. **Influência da Massa Específica na Difusividade Térmica do Solo em Diferentes Umidades**. Dissertação de Mestrado. UNIJUI, Ijuí, 2006.

Gardner, W. H. Water content. In: Klute, A. ed. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Am. Soc. Agron. Madison: WI, 1986. p. 493-544. (Monog. 9).

GUERRA, H. O. C. **Física dos Solos**. Campina Grande: UFCG, 2000. 173p.

GROENEVELT, P.H & PARLANGE, J. Y. **Thermodynamic stability of swelling soils**. Baltimore, Soil Science 118: 1-5, 1974.

HADAMARD, J. **Lecture on Cauchy Problem in Linear Partial Differential Equations**. New Haven: Yale University Press, 1923.

HERKELRATH, W.N.; HAMBURG, S.P. & MURPHY, F. **Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry**. Water Res. Res., 27:857-864, 1991.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. Academic Press London, 1998.

INCROPERA, F. O.; WITT, D. P. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1990.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C.. **Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer**. Cerâmica. São Paulo, v. 45, n. 292-293, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>. Acesso em: 08/08/06.

ITABORAHY, Cláudio Ritti; SANTOS, Devanir Garcia; REZENDE, Lucimar Silva;
PRETO, Luis Augusto. **Agricultura Irrigada.**

NIDAL, H. A; REEDER, C. R. **Soil Thermal Conductivity Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter**. Soil Science Society of America Journal, 64 (4): 1285-1290, (August 2000).

NORTON, F. H; Tradução: SOUZA, Jefferson Vieira de. **Introdução à Tecnologia Cerâmica**. Edgard Blücher Ltda, 1973.

OLIVEIRA, Carlos Alberto da Silva. **Determinação da Tensão de Água em Solo Agrícola Usando um Sensor de Dissipação de Calor**. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v.34, n.8, p.1417-1425, ago. 1999.

OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; PEREIRA, S. **Tecnologia de determinação da umidade do solo via reflectometria no domínio do tempo**. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 3., 2000, Campinas. Disponível em <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?>>. Acesso em 06/07/06.

OZISIK, M. N. **Heat conduction**. New York: Wiley & Sons, 1980.

OZISIK, M. N. **Transferência de Calor: Um Texto Básico**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1990.

OZISIK, M. N.; ORLAND, H. R. B. **Inverse Heat Transfer: Fundamentals and applications**. New York: Taylor & Francis, 2000.

PHENE, C.J.; G.J. HOFFMANN; and S.L., Rawlins. Measuring potential in situ sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. Soil Sci. Soc. Am. J. Proc. 35:27-33, 1971.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2000. 247p.

PRADO, Hélio do. **A Pedologia Simplificada**. Arquivo do Agrônomo - Nº 1 (2ª edição - ampliada e totalmente modificada), dezembro/95. Disponível em <[http://www.potafos.org/.../87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d5fbc829a2f54298832569f8004695c5/\\$FILE/Pedologia1-6.pdf?](http://www.potafos.org/.../87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/d5fbc829a2f54298832569f8004695c5/$FILE/Pedologia1-6.pdf?)>. Acesso em 15/08/06.

PRADO, H. **Manual de classificação de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP/UNESP, 1993. 197p.

PREVEDELLO, C. L. **Determinação da difusividade térmica de meios porosos**. R. BRAS. CI. SOLO, v.17, p. 319-324, 1993.

PREVEDELLO, C. L.; LOYOLA, J. M. T. **Simulação numérica para o processo da infiltração da água no solo**. Scientia agrária, Curitiba, v.3, p. 29-39, 2002.

REECE, C.F. **Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matrix potential**. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:1022-1028, 1996.

REICHARDT, Klaus. **A Água na Produção Agrícola**. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil Ltda, 1978.

- REICHARDT, Klaus. **A Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Manole Ltda, 1990.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP/ESALQ, 1996. 505p.
- REICHARDT, Klaus; TIMM, Luis Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole Ltda, 2004.
- RICHARD, L. B.; FAIRES, J. D. **Análise Numérica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, p. 736, 2003.
- RICHARDS, L.A.; NEAL, O.R. **Some field observations with tensiometers**. Soil Science Society of American Proceedings, Madison, v.1, p.71-91, 1936.
- ROCHA, Genelício Crusoé, LIBARDI, Paulo Leonel, CARVALHO, Laércio Alves de et al. **Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citros**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, jan./fev. 2005, vol.29, no.1, p.41-50. ISSN 0100-0683. Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 04/07/2006.
- SALSA, José. **O Solo: sua origem e formação, a constituição e propriedades**, 2004. Disponível em <http://www.cientic.com/tema_solo>. Acesso em: 20/01/06.
- SANTOS, W. N. dos. **Thermal properties of ceramic materials by non-steady state techniques: I - the laser flash technique**. *Cerâmica*. São Paulo, v. 51, n. 319, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000300006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 23/11/06.
- SANTOS, W. N. dos. **Thermal properties of ceramic materials by the non-steady techniques: II - the hot wire technique**. *Cerâmica*. São Paulo, v. 51, n. 320, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000400011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 23/11/06.
- SEYFRIED, M.S. **Field calibration and monitoring of soil-water content with fiberglass electrical resistance sensors**. Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 1432-1436, 1993.
- SEYFRIED, M.S.; and MURDOCK, M.D. **Response of a new water sensor to variable soil, water content, and temperature**. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:28-34, 2001.
- SILANS, Alain Passerat; SILVA, Fernando Moreira; BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis. **Determinação In Loco Da Difusividade Térmica Num Solo Da Região de Caatinga (PB)**. R. Bras. Ci. Solo, 30:41-48, 2006.
- SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G.S. **Soil thermal conductivity**. Remote sensor. Rev. 5:301-310, 1990.
- SILANS, A.M.B PASSERAT DE. **Determinação das propriedades termodinâmicas de um solo in loco**. Report 404015/86-7. CNPq Brasil, 18 pp. 1988.
- SILVA, Fábio Cesar da. **O Solo como Multifunção Saúde, funções e propriedades. Filtragem. Alimentação. Abrigo Regulador Térmico. Armazenamento.**

Produção. Fragilidade ambiental. ST075 B – Tópicos Especiais em Controle Ambiental (Ênfase em Solos). 2ª aula. Disponível em <<http://www.ceset.unicamp.br>>. Acesso em 16/08/06.

SISSOM, Leighton; PITTS, Donald R. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Guanabara, p.765, 1988.

SKAGGS, R. W. **Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables**. USDA-SCS, Fort Worth, 329 p, 1981.

SOUZA, Claudinei F.; MATSURA, Edson E. **Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.1, p.63-68, 2002, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB – Disponível em <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em 05/08/06.

SPAANS, E.; BAKER, J. **Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature**. Plant Soil 143: 213-217, 1992.

SPIEGEL, Murray R. Probabilidade e Estatística. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1978.

TAYLOR, S. A. & ASHCROFT, G. L. **Physical Edaphology: The Physics of Irrigated and No irrigated Soils**. W. H. Freeman and Company, 1972.

TEIXEIRA, A.S.; COELHO S.L. **Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. *Anais...* Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. 1 CD ROM.

TEIXEIRA, Claudia Fernanda Almeida; MORAES, Sergio Oliveira; SIMONETE, Márcia Aparecida. **Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, maio/abr. 2005, vol.29, n° 2, p.161-168. ISSN 0100-0683. Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 06/01/06.

TEIXEIRA, W. G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J. D. *et al.* **Procedimentos de amostragem e do modo de inserção no solo de sondas TDR na determinação da umidade volumétrica do solo**. Rev. Bras. Ciênc. Solo, jul. /ago. 2003, vol.27, n° 4, p.575-582. ISSN 0100-0683. Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 06/01/06.

TESTEZLAF, Roberto; MATSURA, Edson Eiji; CARDOSO, João Luiz. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**

FREITAS, Paulo Sérgio Lourenço de; REZENDE, Roberto. **Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia.** Maringá, v. 26, n. 3, p. 353-360, 2004.

TOPP, G.C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. **Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines.** Water Resources Research, Washington, v.16, p.574-582, 1980.

TOPP, G.C.; DAVIS, J. L. **Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling.** In: Hillel, D. Advances in irrigation. New York: Academic Press, p.107-127, 1985.

TOPP, G.C. **The Application of Time-Domain Reflectometry (TDR) to Soil Water Content Measurement;** International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status; July 6-10, pp. 85-92; 1987.

_____. **Uso da água na agricultura.** Disponível em <<http://www.planetaorganico.com.br/aguauso>>. Representante oficial da BioFach América Latina/ExpoSustentat. Acesso em: 24/07/06.

VALERO, Roger Mestas; MATSURA, Edson E. **Caracterização Física e Uso da Técnica Da “TDR” na Determinação de Umidade Volumétrica e Condutividade Elétrica em Substratos Orgânicos.** 1º Encontro de Ciência e Tecnologia dos Estudantes Latino-Americanos da Unicamp. Campinas, SP, 2006. Disponível em <<http://www.cori.unicamp.br/CT/Latinos-apres/roger.ppt>>. Acesso em: 17/07/06.

VIEIRA, Lucio Salgado. **Manual da Ciência do Solo.** São Paulo: Agronomia Ceres Ltda, 1975.

VIEIRA, Lucio Salgado. **Manual da Ciência do Solo: com ênfase aos solos tropicais.** São Paulo: Agronomia Ceres Ltda, 2ª edição, 1988.

YOSHIOKA, M.H.; LIMA, M.R. de. **Experimentoteca de solos: infiltração e retenção da água no solo.** Arquivos da APADEC, Maringá, v. 8, n. 1, p. 63-66, 2004.

WANDECK, Renato. 2000. **BÊ-Á-BÁ da Cerâmica.** Disponível em <<http://www.ceramicanorio.com>>. Acesso em 20/01/06.

WIKIPÉDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Calor>>. Acesso em 13/09/06.

WIKIPÉDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation. Apresenta conteúdo enciclopédico. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Salinidade&oldid=1972031>>. Acesso em: 06/07/06.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)