

CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR PARA MEDIDAÇÃO DE UMIDADE DO SOLO COM TERMO-RESISTOR A TEMPERATURA CONSTANTE

Paulo Cesar de Souza Mendes

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Informação e Energia

**Amauri Oliveira, Dr.
Orientador**

**Salvador, Bahia, Brasil.
Outubro de 2006**

CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE DO SOLO COM TERMO-RESISTOR A TEMPERATURA CONSTANTE

Paulo Cesar de Souza Mendes

Dissertação de Mestrado apresentada em outubro de 2006

Amauri Oliveira, Dr.
Orientador

Amauri Oliveira, Dr.
Componente da Banca Examinadora

Márcio Fontana, Dr.
Componente da Banca Examinadora

José Sérgio da Rocha Neto, Dr.
Componente da Banca Examinadora

Salvador, Bahia, Brasil.
Outubro de 2006

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos que desejaram o seu sucesso.

Agradecimentos

Ao professor Amauri por sua orientação, motivação, troca de conhecimentos, propostas alternativas de solução para as questões surgidas e sua presença constante nas etapas que conduziram ao sucesso deste trabalho.

Ao professor Paulo Burgos e sua equipe do laboratório de Geotecnia por todo apoio prestado nos ensaios com os solos e nos assuntos relacionados com a ciência do solo.

Ao professor Costa e Silva por considerar minha aptidão e incentivar meu retorno à universidade após muitos anos de graduado e atuando no mercado na área de engenharia elétrica.

Aos colegas Ricardo Travi e Irineu por toda colaboração que recebi na realização deste trabalho.

Aos professores Adhemar, Ana, Caiuby, Cesar, Jes, Niraldo e Trabuco, dos quais tive a oportunidade de ser aluno.

Aos funcionários das secretarias dos Cursos de Engenharia Elétrica e Mestrado em Engenharia Elétrica da UFBA pelo apoio administrativo.

A Deus por nós todos.

Resumo

As diversas aplicações em engenharia e em agricultura da informação do teor de umidade do solo têm motivado a pesquisa e desenvolvimento de métodos de medição dessa informação. Há métodos em que se obtém diretamente a quantidade de água contida no solo através de amostras retiradas deste e os que utilizam uma grandeza física associada à umidade permitindo identificar, em laboratório e em campo, quão úmido o solo se encontra. Este trabalho tem como propósito caracterizar um sensor de fácil montagem e baixo custo que utiliza um método térmico para medição da umidade do solo. A partir de um modelo de condução de calor em um meio, gerado por uma fonte de calor de temperatura constante, é definida uma grandeza térmica que varia com a umidade do solo, e construído o sensor de umidade. Ensaios são realizados em laboratório com o sensor no ar em temperatura ambiente e com sensor inserido em amostras de solos de tipos conhecidos com temperaturas controladas. Estes ensaios mostram as características de funcionamento do sensor e validam o método de medição aplicado.

Abstract

The variety of applications in Engineering and Agriculture of the soil water content information has motivated researches and the development of different methods in measuring such information. There are methods in which one can measure the amount of water in the soil through samples taken from it and the ones that use a physical quantity associated to the humidity allowing to identify in laboratories and in the field how humid the soil really is. This work has a purpose in characterizing a sensor easy enough to assemble and effective cost that uses a thermal method for measuring the humidity found in the soil. Using a heat conduction model in an environment that has a heat source at the constant temperature, it is defined a thermal quantity that varies with the humidity found in the soil, and then building the sensor of humidity. Experiments are carried out in laboratories with the sensor in the air and in room temperature and also with the sensor inserted in samples of known kind of soils with temperatures under control. These experiments show the characteristics of how the sensor operates and validate the method of such applied measurement.

Índice Analítico

1	Introdução	1
1.1	Visão Geral, Objetivos e Metodologia	1
1.2	Organização do Trabalho	2
2	Métodos de Medição do Teor de Umidade do Solo	5
2.1	Introdução	5
2.2	Método da Estufa	5
2.3	Método das Pesagens	7
2.4	Método do Tensiômetro	8
2.5	Método do Acetileno	10
2.6	Método da Bomba de Nêutrons	10
2.7	Método da Reflectometria no Domínio do Tempo	12
2.8	Método Acústico	14
2.9	Método da Capacitância Elétrica	17
2.10	Método dos Blocos de Resistência Elétrica	20
2.11	Método Térmico	23
2.12	Comentários	26
3	Características do Sensor	27
3.1	Introdução	27
3.2	Fundamentação Teórica	27
3.2.1	Termistor	28
3.2.2	Condução de Calor a partir de uma Fonte Pontual em Regime Transitório	29
3.3	Características Construtivas do Sensor de Umidade	33
3.3.1	Bloco Sensor	33
3.3.2	Circuito Elétrico para o Sensor de Umidade	34
3.3.3	Bloco de Gesso	38
3.3.4	Comentários	41
4	Ensaios com o Sensor	43
4.1	Introdução	43
4.2	Ensaio 1 – Validação do Modelo	43

4.2.1	Objetivo do Ensaio.....	43
4.2.2	Recursos Utilizados no Ensaio	44
4.2.3	Determinação da Grandeza $Ght(t)$	45
4.2.4	Determinação da Umidade no Bloco de Gesso	46
4.2.5	Características de Resposta do Sensor.....	47
4.2.6	Comentários	55
4.3	Ensaio 2 – Solo A.....	57
4.3.1	Objetivo.....	57
4.3.2	Preparação do Solo para o Ensaio	57
4.3.3	Recursos Utilizados no Ensaio	60
4.3.4	Realização das Medições	62
4.3.5	Resultado das Medições.....	65
4.3.6	Comentários	77
4.4	Ensaio 3 – Solo B.....	78
4.4.1	Objetivo.....	78
4.4.2	Preparação do Solo para o Ensaio	79
4.4.3	Recursos Utilizados no Ensaio	81
4.4.4	Realização das Medições	81
4.4.5	Resultado das Medições.....	81
4.4.6	Comentários	92
5	Comentários Finais e Perspectivas Futuras	93
Referências Bibliográficas		95
I	Código-Fonte das Rotinas em <i>Matlab</i>.....	99
I.1	<i>CalculaGthE1.m</i>	99
I.2	<i>PlotaTempAE1.m</i>	101
I.3	<i>VariaveisGhtE1.m</i>	102
I.4	<i>AjustesGhtE1.m</i>	103
I.5	<i>CalculaGthE2.m</i>	104
I.6	<i>VariaveisGhtE2.m</i>	110
I.7	<i>AjustesGhtE2.m</i>	114
I.8	<i>PlotaTempAE2.m</i>	117
I.9	<i>CalculaGhtE3.m</i>	119
I.10	<i>VariaveisGhtE3.m</i>	121
I.11	<i>AjustesGhtE3.m</i>	123

<i>I.12 PlotaTempAE3</i>	125
II Caracterização Geotécnica dos Solos dos Ensaios 2 e 3.....	127

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Principais características construtivas do sensor	19
Tabela 2.2: Textura dos três tipos de solo usados nos experimentos	19
Tabela 2.3: Condutividade e difusidade térmica da cerâmica e gesso. Phene et al.[12]	24
Tabela 3.1: Dados relacionados às amostras de gesso	40
Tabela 3.2: Dados relacionados às amostras de gesso seco em estufa	41
Tabela 4.1: Umidades do sensor no ensaio	48
Tabela 4.2: Massas mr, mru e mrs das amostras de solo.....	59
Tabela 4.3: Umidades corrigidas do solo no corpo de prova – Ensaio 2	67
Tabela 4.4: Massas mr, mru e mrs das amostras de solo – Ensaio 3.....	80
Tabela 4.5: Umidades corrigidas do solo no corpo de prova – Ensaio 3	82
Tabela II.1: Frações constituintes dos solos	128

Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema do Tensiômetro	9
Figura 2.2: Esquema da Bomba de Nêutrons. Klar [1].....	11
Figura 2.3: Velocidade do som x grau de saturação para solo barro-arenoso...	16
Figura 2.4: Velocidade do som x grau de saturação para solo barro	16
Figura 2.5: Velocidade do som x grau de saturação para solo barro-argiloso ...	16
Figura 2.6: Foto dos tubos dos elementos transmissor (tamanho aproximado de 6,00 x 90,00 cm) e receptor (tamanho aproximado de 2,50 x 90,00 cm). Adamo et al. [6].....	17
Figura 2.7: Esquema construtivo do capacitor. Rende e Biage [7]	18
Figura 2.8: Circuito básico do sensor. Rende e Biage [7]	19
Figura 2.9: Curvas de umidade (%) absorvida pelo sensor versus resistência (Ω) elétrica, umidade versus resistência estimada e erro. Lima [10]	22
Figura 2.10: Esquema construtivo do sensor em bloco de gesso. Lima [10]	23
Figura 3.1: Representação das superfícies com temperaturas T_s , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 e T_a	30
Figura 3.2: Circuito elétrico análogo ao modelo térmico	31
Figura 3.3: Desenho de construção do bloco sensor de umidade (medidas em centímetro).....	34
Figura 3.4: Circuito elétrico para o termistor em temperatura constante em configuração realimentada.....	34
Figura 3.5: Montagem para estimar condutância térmica máxima e mínima	35
Figura 4.1: Esquema de inter-relação recursos aplicados ao ensaio 1	45
Figura 4.2: Exemplo do arquivo com os dados das medições de V_s e $Rs2$	49
Figura 4.3: Exemplo do arquivo com os dados das medições de T_a	50
Figura 4.4: Ght do sensor versus tempo para valores de umidade do bloco	50
Figura 4.5: Temperatura no bloco sensor em função do tempo para valores de umidade do bloco.....	51
Figura 4.6: Temperatura ambiente em função do tempo para valores de umidade do bloco	51
Figura 4.7: Ght versus Umidade para diferentes tempos de medição	52
Figura 4.8: Ght versus Umidade a 180s.....	53
Figura 4.9: Ght versus Umidade a 1200s.....	54

Figura 4.10: Rs versus Tempo com Bloco Sensor Seco.....	56
Figura 4.11: Rs versus Tempo com Bloco Sensor Saturado	56
Figura 4.12: Foto do bloco sensor com a adaptação	62
Figura 4.13: Esquema de inter-relação recursos aplicados ao ensaio 2.....	62
Figura 4.14: Esquema do corpo de prova	64
Figura 4.15: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 25°C.....	69
Figura 4.16: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 35°C.....	69
Figura 4.17: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s, 1800s e 2400s na temperatura ambiente de 25°C.....	70
Figura 4.18: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s, 1800s e 2400s na temperatura ambiente de 35°C.....	70
Figura 4.19: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 180s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C	71
Figura 4.20: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 600s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C	71
Figura 4.21: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 1800s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C	72
Figura 4.22: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 2400s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C	72
Figura 4.23: Aproximação Ght(180) do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C	73
Figura 4.24: Aproximação Ght(1800) do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C	74
Figura 4.25: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 25°C	75
Figura 4.26: Temperatura no solo versus tempo para alguns valores de umidade na temperatura ambiente de 25°C	75
Figura 4.27: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 35°C	76
Figura 4.28: Temperatura no solo versus tempo para alguns valores de umidade na temperatura ambiente de 35°C	76
Figura 4.29: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3.....	84
Figura 4.30: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3.....	84
Figura 4.31: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s e 1800s na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3.....	85

Figura 4.32: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s e 1800s na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3	85
Figura 4.33: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 180s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C – Ensaio 3	86
Figura 4.34: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 600s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3	86
Figura 4.35: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 1800s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3	87
Figura 4.36: Aproximação Ght(180) do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3	88
Figura 4.37: Aproximação Ght(1800) do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3	89
Figura 4.38: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3	90
Figura 4.39: Temperatura no solo versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3	90
Figura 4.40: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3	91
Figura 4.41: Temperatura no solo versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3	91
Figura II.1: Curvas Granulométricas	128
Figura II.2: Carta de Plasticidade	129

Lista de Símbolos

- % umidade – teor de umidade, em %;
- A - área do termistor, em m^2 ;
- A - resistência do termistor NTC, em Ω , quando a temperatura tende para infinito;
- AC - índice de atividade de Skempton;
- B - constante do termistor NTC, em K;
- c - calor específico do termistor, em $K^{-1}J/kg$;
- C - capacitância elétrica, em F;
- C_n - capacitância térmica da seção n, em $K^{-1}J$;
- Com - capacitância dos poros, em F;
- C_s - capacitância do líquido dentro dos poros, em F (método da capacitância elétrica);
- C_s - capacitância térmica do termistor, em $K^{-1}J$;
- d - distância entre as placas do capacitor, em cm;
- E - permissividade elétrica, em F/cm ;
- f - porosidade do solo;
- $G_{ht,s,n}$ - grandeza que corresponde no regime permanente à condutância térmica entre os pontos de temperatura T_s e T_n , em W/K e $W/^\circ C$;
- γ_s - peso específico dos sólidos, em kN/m^3 ;
- h - coeficiente de transferência de calor na superfície do termistor, em $K^{-1}W/m^2$;
- H - radiação térmica incidente no termistor, em W/m^2 ;
- I_P - índice de plasticidade, em %;
- I_s - corrente elétrica que atravessa o termistor, em A;
- $K_{m,n}$ - condutância térmica da seção n, em $K^{-1}W$;
- $K_{s,n}$ - condutância elétrica (em S) entre os pontos s e n do circuito elétrico equivalente ou condutância térmica (em $K^{-1}W$) entre os pontos s e n do sistema térmico;

- l - comprimento da linha de transmissão no solo das duas hastes da sonda, em m;
- m - massa do termistor, em kg;
- m_r - massa do recipiente, em g;
- m_{rs} - massa do recipiente com a amostra de solo após a secagem, em g;
- m_{ru} - massa do recipiente com a amostra de solo cuja umidade se quer determinar, em g;
- m_s - peso da amostra seca, em gf;
- m_u - peso da amostra úmida, em gf;
- m_w - peso da água evaporada na estufa, em gf;
- P_e - potência elétrica fornecida ao termistor, em W;
- p_e - pressão eficaz, em Pa;
- P_s - peso do solo contido no saco plástico, em g;
- R - resistência elétrica, em Ω (método do bloco de resistência elétrica);
- R_m - resistência da fonte ao capacitor, em ohm;
- R_s - resistência do líquido contido nos poros do dielétrico, em Ω (método da capacidade elétrica);
- R_s - resistência elétrica do termistor, em Ω ;
- S - área das placas do capacitor, em cm^2 (método da capacidade elétrica);
- S - grau de saturação com o líquido (método acústico);
- t - tempo de percurso do sinal no solo, em s;
- T_a - temperatura do meio ambiente, em K;
- T_b - temperatura em um ponto do bloco sensor, em K;
- t_c - constante de tempo que caracteriza a resposta do sistema, em s;
- T_n - temperatura na superfície da seção n, em K;
- T_{n0} - temperatura inicial da seção n, em K;
- T_s - temperatura do termistor, em K;
- u - teor de umidade com base no peso úmido (método das pesagens);
- $U\%$ - umidade, em % (método do bloco de resistência elétrica);
- v - velocidade de propagação da onda eletromagnética no solo, em m/s;

- v - velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo, em m/s;
- V_{AB} - tensão elétrica nos terminais do sensor capacitivo, em V;
- V_i - tensão elétrica aplicada ao sensor capacitivo, em V;
- V_s - tensão nos terminais do termistor, em V;
- V_t - volume total de amostra, em ml;
- V_v - volume do conteúdo de água mais o volume do conteúdo de ar no solo, em cm^3 ;
- V_w - volume de água da amostra, em ml;
- V_{ws} - volume de água a ser acrescentado à amostra de solo, em cm^3 ;
- w - freqüência angular de excitação do capacitor;
- w_1 - teor de umidade do solo contido no saco plástico, em %;
- w_2 - teor de umidade do solo a ser alcançado com acréscimo de água, %;
- w_L - limite de liquidez, em %;
- ϵ - constante dielétrica aparente do solo;
- θ - teor de umidade com base no volume;
- ρ_a - peso aparente do solo, em gf/ml;
- ρ_b - densidade do solo, em Mg m^{-3} ;
- ρ_r - peso específico real do solo, em gf/ml;
- ρ_{tot} - densidade total, em g/cm^3 ;
- ρ_w - peso específico da água, em gf/ml ;
- ψ - fator e amplificação;

Lista de Acrônimos

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- AC: *Alternating Current*;
- DC: *Direct Current*;
- NTC: *Negative Temperature Coefficient*;
- PTC: *Positive Temperature Coefficient*;
- TDR: *Time Domain Reflectometry*;
- USCS: *Unified Soil Classification System*;
- VCC: Voltagem em Corrente Contínua;
- VDC: *Voltage Direct Current*.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Visão Geral, Objetivos e Metodologia

A informação da quantidade de água presente no solo tem aplicação de fundamental importância nos estudos do solo em engenharia e em agricultura. Em engenharia nos projetos de estradas, estabilidade de taludes naturais e aterros, fundações, contenção de encostas, e outras. Em agricultura na informação da quantidade de água disponível para as plantas no sistema solo-planta-atmosfera e em sistemas automatizados de irrigação.

As informações de umidade podem ser obtidas por meio de métodos adequados de uma amostra retirada do solo e levada ao laboratório, assim como *em situ*, por dispositivos que enterrados permitem transformar essas informações em grandezas do domínio da eletricidade. O desenvolvimento na área de instrumentação, na coleta e tratamento dessas informações obtidas dessa forma indireta, tem trazido grandes benefícios no manejo da irrigação em agricultura. O processamento de informações de umidade no solo juntamente com outros dados como, o tipo de cultura, a etapa de desenvolvimento da planta e condições climáticas, em sistemas automatizados de irrigação do solo, podem indicar o momento da irrigação e a quantidade de água a ser aplicada ao solo. Isso proporciona benefícios diretamente relacionados com o compromisso de conservação da natureza e com o retorno econômico do negócio agrícola, através da redução de consumo de recursos hídricos e melhora nos níveis de produção.

Os métodos de medição da quantidade de água no solo vêm sendo estudados, desenvolvidos e aperfeiçoados com foco em buscar recursos de instrumentação capazes de monitorar a umidade do solo com algumas

características desejáveis como: baixo custo, tratamento das informações através de sistemas automatizados, exatidão das medições com adequação aos propósitos da aplicação, permitir repetição no espaço e no tempo, vida útil elevada, longo período de uso sem necessitar manutenção, segurança para o operador no manuseio dos dispositivos de medição e rapidez na obtenção dos resultados.

Neste cenário, a contribuição de um novo método de obter informações de umidade do solo tem valor inquestionável. O presente trabalho tem como objetivo participar desta contribuição desenvolvendo e caracterizando um sensor com aplicação na determinação da umidade do solo através de um método térmico de medição fundamentado no comportamento de busca de equilíbrio térmico do calor gerado por um termo-resistor com o meio no qual está inserido. A partir de um modelo para o comportamento de transferência para o meio da energia térmica gerada por uma fonte pontual de calor, são estabelecidas as relações de suporte a esse modelo adotado, construído o sensor de umidade e realizados os ensaios de laboratório com o sensor. O primeiro ensaio foi realizado com sensor fora do solo, no ar, e na temperatura ambiente observando seu comportamento quanto à umidade e medidas elétricas, buscando atestar a consistência do modelo. Comprovado com o resultado do ensaio a possibilidade de uso do modelo, ou seja, de estabelecer correspondência entre a umidade no sensor e as medidas elétricas obtidas a partir do sensor, os trabalhos seguiram com ensaios com o sensor inserido em amostras com diferentes umidades de dois tipos de solos, com o propósito de verificar e comprovar o uso do sensor como uma alternativa viável de medição da informação do teor de umidade do solo.

1.2 Organização do Trabalho

Os elementos de texto desta dissertação têm sua estrutura em capítulos. O primeiro capítulo, a Introdução, trata do cenário de aplicação da medição da informação da umidade do solo, dos objetivos a serem alcançados com a realização deste trabalho e introduz a metodologia seguida neste trabalho. Os capítulos seguintes são apresentados na ordem em que as atividades do trabalho foram realizadas, com o propósito de fornecer um melhor entendimento do

desenvolvimento dessas atividades, com foco nos seus objetivos, na metodologia para a obtenção dos resultados e na apresentação e análise dos resultados.

No Capítulo 2 são descritos métodos de medição de umidade do solo, resultado de uma pesquisa bibliográfica realizada com o objetivo de conhecer os métodos existentes, buscar elementos que contribuam com a realização do trabalho e confirmar a originalidade no método adotado para o sensor caracterizado neste trabalho.

No Capítulo 3 são descritos o modelo teórico de suporte a construção e operação do sensor, a construção do sensor e os ensaios realizados com gesso utilizado na construção do sensor. Através do modelo teórico é definida uma grandeza representada por Ght que traduz a umidade medida através do sensor.

No Capítulo 4 são descritos os três ensaios realizados em laboratório com o sensor. O primeiro ensaio mostra que, com o modelo adotado, é possível relacionar a grandeza Ght com a umidade no sensor, ou seja, o ensaio valida aplicação do modelo. Os dois ensaios seguintes comprovam a aplicação do sensor na medição da umidade do solo. Neste capítulo estão descritos os objetivos de cada ensaio, os recursos utilizados nos ensaios, a formulação da grandeza representada por Ght e os resultados e comentários das medições efetuadas nos ensaios.

O capítulo final, Capítulo 5, contém as considerações finais do trabalho incluindo sugestões para trabalhos futuros.

Após aos capítulos são indicadas as referências bibliográficas e, através de anexos, descritos os programas de cálculos e gráficos dos ensaios (Anexo I) e as características geotécnicas dos solos utilizados nos ensaios (Anexo II).

Capítulo 2

Métodos de Medição do Teor de Umidade do Solo

2.1 Introdução

Os métodos hoje existentes de medição de umidade do solo têm suas aplicações conforme os objetivos a serem alcançados, considerando principalmente suas características de precisão, aplicabilidade em campo ou laboratório, tempo de leitura e custo para medição. O objetivo deste capítulo é fornecer informações, resultado de uma pesquisa bibliográfica, sobre os métodos de medição de umidade de solo mais utilizados em atividades de laboratório e de campo. Neste capítulo, esses métodos são descritos e apontadas algumas de suas vantagens e desvantagens, sem no entanto compará-los. A pesquisa foi realizada com o propósito de conhecer os métodos existentes, de identificar nesses métodos elementos de contribuição com os trabalhos de caracterização do sensor de umidade objeto desta dissertação e confirmar a originalidade do método adotado nesta caracterização.

Os métodos de medição da umidade do solo são classificados em diretos e indiretos. No direto a água é extraída de uma amostra de solo e quantificada. No indireto utiliza propriedades físicas (resistência elétrica, pressão, capacidade, reflexão de um pulso elétrico, etc.) que variam com o conteúdo de água no solo.

2.2 Método da Estufa

Conforme Klar [1], o método da estufa consiste em pesar amostras úmidas e secas do solo e determinar diretamente o teor de umidade. Do solo de interesse é retirada uma amostra e levada ao laboratório em recipiente hermeticamente fechado ou refrigerado para não perder a umidade até a primeira

pesagem. A mostra do solo é pesada e colocada em estufa a 105°C, não menos que 24h, até o peso ficar constante. Obtido o peso da amostra seca calcula-se a umidade conforme a equação (2.1):

$$\% \text{ umidade} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Sendo: m_u , m_s e m_w , respectivamente, peso da amostra úmida, peso da amostra seca e peso da água evaporada na estufa.

Este resultado representa o teor de umidade com base em peso seco. Podendo ser apresentado com base no peso úmido quando considerado o peso da amostra úmida m_u no denominador.

Outra forma de apresentar o teor de umidade é com base no volume (θ), dado pelas equações (2.2) e (2.3):

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (2.2)$$

Sendo,

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} \quad \text{e} \quad V_t = \frac{m_s}{\rho_a},$$

então,

$$\theta = \frac{m_w}{m_s} \times \rho_a \quad (2.3)$$

Em que: V_w , V_t , ρ_w , ρ_a , m_s e m_w são respectivamente, volume de água da amostra, volume total de amostra, peso específico da água, peso aparente do solo, peso da amostra seca e peso da água evaporada na estufa.

Apesar do método da estufa, também denominado de termogravimétrico padrão, ser simples, absoluto, não oneroso e servir de referência para os demais métodos, é demorado e trabalhoso.

2.3 Método das Pesagens

O Método das Pesagens fundamenta-se na saturação da água da amostra do solo, obtendo-se um padrão que servirá de referência às determinações da umidade deste solo [1].

O padrão é obtido da seguinte forma:

- Em um frasco especial (ou um balão) de 500 ml, colocar água pela metade e 100 g de terra seca em estufa a 105°C;
- Agitar bem o frasco para melhor homogeneização água-solo;
- Completar o frasco com água;
- Pesar o conjunto obtendo o peso m_1 , este então é considerado o peso padrão para o solo em medição.

Em qualquer época para conhecer o teor de umidade naquele solo, coloca amostra de 100 g do solo com metade de água no frasco usado como padrão, faz a homogeneização água-solo, completa o frasco com água o volume a 500 ml e pesa o frasco, obtendo o peso m_2 . O teor de umidade com base no peso úmido, u , é determinado através da equação (2.4).

$$u = (m_1 - m_2) \times \frac{\rho_r}{\rho_r - 1} \quad (2.4)$$

Em que ρ_r é o peso específico real do solo.

Para expressar o resultado com base no peso seco usa-se (2.5):

$$\% \text{umidade} = \frac{100 \times u}{100 - u} \quad (2.5)$$

Exemplo [2] :

Num balão de 500 ml foram colocados 100 g do solo seco a 105°C, completado com água até os 500 ml, e pesado. Este peso foi correspondente a 971,0 g. A densidade deste solo é 2,32. Quando se desejou conhecer a unidade deste solo, 100g foi retirado dele, colocado no balão de 500 ml e completado o volume do balão até 500 ml. O peso encontrado foi correspondente a 952,0 g.

Usando-se a equação (2.4), foi calculada a unidade com base em peso úmido:

$$u = (971,0 - 952,0) \times \frac{2,32}{2,32 - 1} = 33,38$$

Apresentando com a Eq. (2.5) o resultado com base em peso seco:

$$\% \text{umidade} = \frac{100 \times 33,38}{100 - 33,38} = 50,1\%$$

De acordo com Klar [1], é um método demorado, simples, barato e apresenta boa precisão para fins práticos.

2.4 Método do Tensiômetro

Neste método é utilizado o tensiômetro que mede diretamente o potencial matricial de água no solo e indiretamente o teor de umidade do solo.

O tensiômetro é um equipamento formado por um tubo de metal ou de plástico, com uma cápsula porosa geralmente de cerâmica na extremidade inferior, e na parte superior um manômetro e um local para adição de água. Na Figura 2.1 é mostrado um esquema de construção do tensiômetro. Seu funcionamento adequado requer continuidade hidráulica desde a membrana porosa até o manômetro. Para isso retira-se o ar da membrana porosa através de uma bomba de vácuo. Isso pode ser feito com o seguinte procedimento [3]: preencher o tubo com água destilada; mergulhar o tensiômetro por mais de dois dias em um recipiente com água abaixo do nível de água dentro do tubo e cobrindo a membrana porosa; com uma bomba de vácuo fazer a sucção da água através da membrana porosa até parar a subida de bolhas de ar; completar o

tubo com água e fechá-lo; retirar o tensiômetro do recipiente com água e pendurá-lo para que a água evapore através da cápsula; aguardar que o manômetro indique pelo menos 50 kPa; colocar a cápsula no recipiente com água, devendo a leitura da pressão cair rapidamente para valor entre 0 e 5 kPa; revisar o tensiômetro quanto à entrada de ar e testá-lo novamente caso a pressão não caia para este valor.

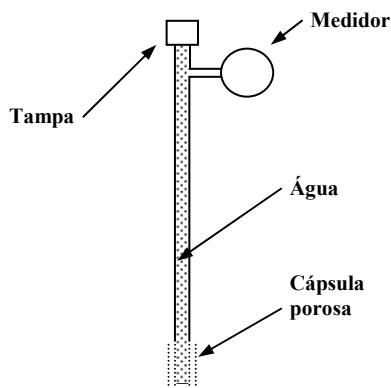


Figura 2.1: Esquema do Tensiômetro

A membrana porosa fica em contato com o solo quando o tensiômetro é instalado neste. A água do solo estando num potencial mais baixo que a água contida nos poros da membrana, ocorrerá um deslocamento de água através dos poros saturados, criando uma sucção no tensiômetro que será registrada no manômetro. Um deslocamento no sentido inverso buscando o equilíbrio surgirá quando o solo for umedecido, alterando a pressão no manômetro.

Os tensiômetros estão disponíveis com manômetros do tipo metálico ou de mercúrio. Os metálicos são de mais fácil instalação e manutenção e mais seguros em termos de proteção ambiental. Os tensiômetros de mercúrio são mais utilizados devido ao seu menor custo e a sua sensibilidade. Os manômetros podem ser substituídos por sensores eletrônicos, isto é, transdutores de pressão, que possuem uma precisão maior e permitem um monitoramento contínuo e automatizado do potencial matricial.

A faixa de leitura dos tensiômetros está compreendida de zero até 75 kPa [3]. Para tensões superiores a esta, que ocorre em solos muito secos, o ar

penetra nos poros da cápsula porosa e o tensiômetro deixa de funcionar. O tempo de resposta do tensiômetro, ou seja, o tempo necessário para o equilíbrio entre a energia da água do solo e do tensiômetro, é influenciado pela condutância hidráulica da cápsula porosa, condutividade hidráulica do solo e sensibilidade do tensiômetro.

De uma forma geral os tensiômetros são bastante utilizados no manejo de irrigação.

2.5 Método do Acetileno

De acordo com Klar [1], o método do acetileno utiliza a medição de pressão do gás acetileno gerado pela reação da água com o carbureto de cálcio. Num recipiente hermeticamente fechado coloca-se o solo juntamente com o carbureto de cálcio em excesso. A pressão do gás acetileno produzido é medida através de um manômetro. O teor de umidade do solo é diretamente proporcional a esta pressão. Esse método é rápido, simples, barato e indicado para os casos sem exigência de muita precisão.

2.6 Método da Bomba de Nêutrons

Os métodos de determinação de teor de umidade e densidade do solo através da energia nuclear, vêm sendo utilizados e aperfeiçoados desde a década de 50. Têm como base a interação entre o teor de água no solo e radiação de nêutrons ou raios gama.

A atenuação do fluxo de raios gama monoenergéticos passando por uma coluna de solo, depende do peso específico aparente do solo, logo, este fluxo sofre variação como teor de umidade do solo. A dissipação de nêutrons é mais específica a água. Estes métodos podem ser classificados em dois tipos: de atenuação e dissipação das partículas.

O método de atenuação tem como base a atenuação do fluxo de radiação quando passa pelo solo, sendo necessário colocar dois tubos no solo, um para emitir os raios e outro para absorção. Esse método por requerer um fluxo elevado de partículas é mais adequado para o uso em laboratórios. Possui excelente precisão para amostras pequenas.

O método de dissipação das partículas considera o retorno da radiação dissipada na vizinhança na própria fonte que emitiu a radiação, bastando estar um só tubo para acesso. Seu princípio consiste em determinar o poder dissipador do sistema solo-água. Existe uma estreita relação entre este poder e o teor de água no solo, pois depende diretamente da quantidade de átomos de hidrogênio, que têm a habilidade de moderar eficientemente a energia cinética dos nêutrons rápidos por possuírem a mesma massa que estes, o que proporciona choques elásticos. Logo, os nêutrons emitidos por uma fonte são eficientemente moderados pela água dos solos nas vizinhanças da fonte. Este método, também chamado bomba de nêutrons, é de uso mais comum nas condições do campo.

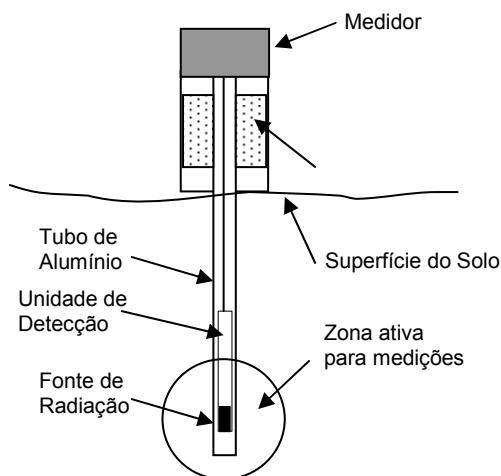


Figura 2.2: Esquema da Bomba de Nêutrons. Klar [1]

A bomba de nêutrons (Figura 2.2) consiste de dois principais componentes: uma sonda e um contador. A sonda possui uma fonte de nêutrons rápidos e um detector para o fluxo de nêutrons lentos espalhados pelo solo. A sonda é introduzida num tubo de polietileno ou alumínio previamente colocado no solo. Os nêutrons lentos incidem sobre o detector, composto por um cristal cintilador, originando um fóton luminoso que excita uma célula fotomultiplicadora dando um impulso elétrico que se pode registrar no contador.

Estes métodos que usam radiação possibilitam medidas em diferentes profundidades do solo, sendo que para medições muito próximas a superfície do solo, devido à esfera de influência da sonda, não oferece precisão. Estes

métodos têm a vantagem na rapidez das medidas, cerca de um minuto, e podem ser repetidas várias vezes sem alterar a estrutura do solo. Têm a desvantagem no custo atual dos equipamentos e erros nos resultados para solos ricos em outras fontes de hidrogênio que não a água (matéria orgânica e outros elementos como cloro, ferro e boro, etc). Não permitem um monitoramento contínuo.

O uso destes medidores deve ser feito somente por pessoas treinadas em radioproteção.

2.7 Método da Reflectometria no Domínio do Tempo

Este método conhecido também pela sigla TDR se baseia no tempo de reflexão de pulsos elétricos propagados ao longo de uma sonda introduzida no solo. Esta sonda composta por duas hastes paralelas atua como um guia de onda com o pulso elétrico se propagando no solo como uma onda plana. As hastes atuam como condutores e o solo como meio dielétrico. As constantes de propagação de ondas eletromagnéticas no solo dependem das propriedades deste, especialmente sua umidade e condutividade elétrica. As propriedades dielétricas do solo são influenciadas por sua umidade. O fato da constante dielétrica da água (80,4 a temperatura 293 K) ser muito maior que a do ar (1,0 a temperatura 293 K) e dos constituintes do solo (entre 3,0 e 7,0 a temperatura 293 K), permite a monitoração da umidade do solo através das medidas de suas propriedades dielétricas. A técnica TDR determina a constante dielétrica do solo através da medição do tempo de propagação da onda eletromagnética neste solo.

A relação entre a velocidade de propagação (v) no meio e a constante dielétrica pode ser expressa de forma aproximada [4], como (2.6):

$$v = \frac{c}{\epsilon^{0,5}} \quad (2.6)$$

Em que $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ (velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo) e ϵ corresponde a constante dielétrica aparente.

Esta equação foi obtida a partir de hipóteses simplificadoras e tem sido utilizada na determinação indireta da umidade do solo.

A velocidade (v) é obtida com o conhecimento do comprimento (l) da linha de transmissão no solo das duas hastes da sonda ($2 \times l$) e pela medição do tempo (t) de percurso do sinal no solo (2.7):

$$v = \frac{2 \times l}{t} \quad (2.7)$$

Assim, a constante dielétrica pode ser calculada por (2.8):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{c \times t}{2 \times l}} \quad (2.8)$$

De acordo com Oliveira Filho et. al.[4], foi verificado, utilizando vários tipos de solo e com granulometrias diferentes, que a umidade volumétrica (θ) embora função em menor grau do tipo de solo, densidade, temperatura e conteúdo de sal, é primordialmente função da constante dielétrica (ε). E a primeira proposta de um modelo de calibração empírico relaciona ε e θ através da equação (2.9):

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (2.9)$$

Esta relação possui uma precisão de $\pm 0,01$.

Conforme Joaquim Junior [5], apesar da aplicabilidade desta equação para muitas situações, outras calibrações têm sido propostas, como as baseadas na relação linear entre θ e $\varepsilon^{0,5}$, na relação entre ε e os constituintes do solo, num modelo misto e uma outra (2.10) incorporando a densidade do solo.

$$\theta = \frac{\varepsilon^{0,5} - 0,819 - 0,168\rho_b - 0,159\rho_b^2}{7,17 + 1,18\rho_b} \quad (2.10)$$

Sendo ρ_b a densidade do solo em $Mg\ m^{-3}$.

As medições do tempo t podem ser feitas utilizando-se um gerador de sinal e um osciloscópio. O gerador de sinais é conectado ao osciloscópio através de um cabo coaxial de 50 Ohms. As hastes de metal são conectadas ao osciloscópio através de um cabo, por exemplo, um cabo de antena de TV 300 Ohms. Um conector T na conexão com o osciloscópio recebe o cabo coaxial do gerador e o cabo de antena de TV de interligação as hastes da sonda. Um casamento de impedância deve ser feito entre o conector T e o cabo de TV, afim de não ocorrer reflexão do pulso neste ponto, o que pode levar a uma não percepção do tempo de trânsito do pulso para umidades diferentes. No osciloscópio se fará leitura do tempo entre a emissão do pulso e sua reflexão. Uma calibração preliminar deste conjunto se faz necessária.

Este método permite leitura rápida e de uma maneira prática. Um método não destrutivo para a determinação do teor de umidade no solo. Pode ser utilizado em sistemas automatizados de irrigação, tendo em vista a aquisição de dados em tempo real. Permite a determinação simultânea da constante dielétrica e condutividade elétrica do solo.

2.8 Método Acústico

O método acústico relaciona a velocidade de propagação do som no solo com o grau de saturação de água neste. Quanto mais úmido o solo maior a velocidade de propagação do som. Adamo et al. [6] analisaram esta relação. Partindo de um modelo sobre a velocidade de propagação de ondas elásticas e de estudos do solo de outros autores, analisaram os efeitos dos valores de freqüência dos sinais acústicos e, com a introdução de simplificações e hipóteses apropriadas à natureza do estudo, encontraram uma conveniente e prática relação entre a velocidade do som solo e a umidade deste (2.11):

$$v = \Psi \sqrt{\frac{0,306 \times a \times \rho_e^{1/3}}{\rho_{\text{tot}} \times f}} \quad (2.11)$$

Em que:

- ψ é o Fator de Amplificação. Depende das propriedades granular do solo, podendo ser determinado experimentalmente com a medição da velocidade do som em uma amostra de solo;
- ρ_e é a Pressão Eficaz. Definida através da pressão do ar e da pressão de capilaridade, podendo ser escrita em termos do grau de saturação do líquido;
- ρ_{tot} é a Densidade total. Pode ser expressa em termos da densidade do solo e da densidade da água;
- f é a porosidade do solo;
- $\rho_{tot} \times f$ é um produto que pode ser escrito em termos do grau de saturação do solo.

O grau de saturação é definido como (2.12):

$$S = \frac{V_w}{Vv} \quad (2.12)$$

Em que, V_w representa o volume do conteúdo de água no solo e V_v o volume do conteúdo de água mais o volume do conteúdo de ar no solo.

A partir destas relações teóricas, Adamo et al. [6] mostraram curvas representando a relação teórica entre a velocidade do som e o grau de saturação, para profundidade de 40 cm do sensor no solo, Fatores de Amplificação de $4,1 \cdot 10^3$ e $4,5 \cdot 10^3$, para solos barro-arenoso (Figura 2.3), barro (Figura 2.4) e barro-argiloso (Figura 2.5).

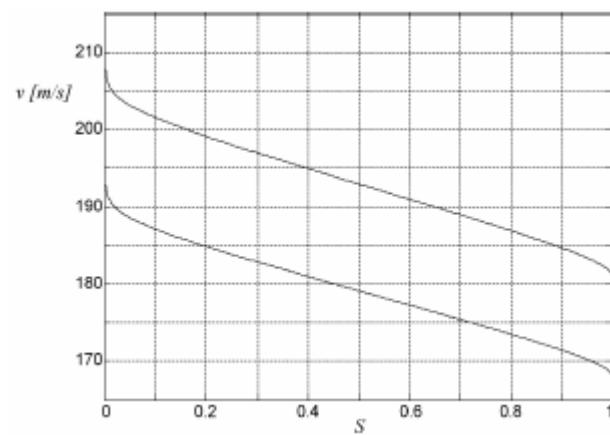


Figura 2.3: Velocidade do som x grau de saturação para solo barro-arenoso

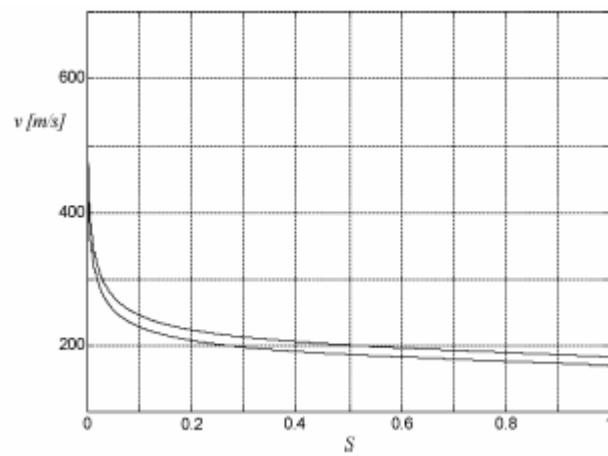


Figura 2.4: Velocidade do som x grau de saturação para solo barro

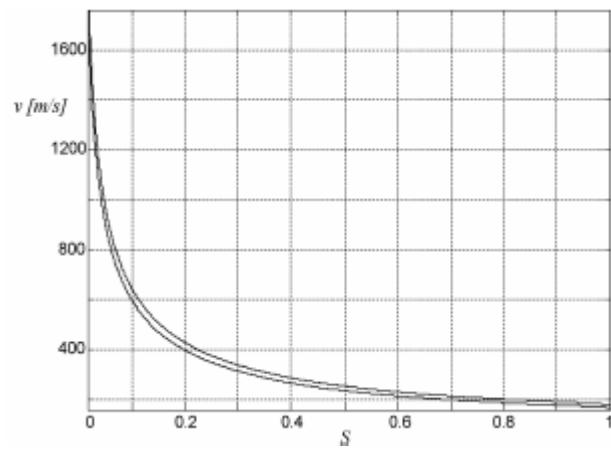


Figura 2.5: Velocidade do som x grau de saturação para solo barro-argiloso

Um protótipo de um sensor de umidade para verificação e estudo dos resultados foi construído por Adamo et al. [6]. Este sensor é constituído por um transmissor de ondas acústicas, um receptor, um enlace de rádio freqüência entre o transmissor e o receptor, uma unidade de processamento de sinal, um computador pessoal e uma unidade homem-máquina portátil.

O transmissor contém um pequeno motor DC girando em uma velocidade controlada com um pequeno excêntrico no seu eixo. Um sensor de pressão de alta sensibilidade converte as ondas acústicas recebidas em sinais elétricos. O estágio analógico de pré-condicionamento do sinal recebido fica montado no mesmo tubo do sensor receptor. O enlace de radiofreqüência permite uma precisa sincronização entre o transmissor e receptor.

Os transmissores e receptores foram montados dentro dos tubos mostrados na Figura 2.6.



Figura 2.6: Foto dos tubos dos elementos transmissor (tamanho aproximado de 6,00 x 90,00 cm) e receptor (tamanho aproximado de 2,50 x 90,00 cm). Adamo et al. [6]

Conforme Adamo et al. [6] estes sensores representam uma implementação de medida da umidade no solo e em outros materiais, simples e de custo eficaz, e com aplicação na obtenção de curvas experimentais de velocidade do som versus umidade.

2.9 Método da Capacitância Elétrica

Este método utiliza a variação da capacidade elétrica com a variação da permissividade de um material poroso contido entre as placas paralelas de um capacitor.

A capacidade pode ser definida como (2.13) [7]:

$$C = \frac{E \times S}{d} \quad (2.13)$$

Sendo E , S e d , respectivamente, a permissividade elétrica, área das placas e distância entre as placas.

O capacitor construído de forma apropriada, permitindo que a umidade do material poroso entre em equilíbrio com a umidade do solo, terá a permissividade variando com o teor de umidade do solo, ou seja, com o aumento na umidade do solo no qual o capacitor está inserido, o material poroso do dielétrico absorverá certa quantidade de água proporcional a esta unidade. Da mesma forma, quando o solo torna-se mais seco, o dielétrico perderá água, também em função da umidade presente no solo ao redor do capacitor.

Rende e Biage [7] caracterizaram o comportamento de um sensor capacitivo de umidade, construído conforme esquema mostrado na Figura 2.7. O sensor é alimentado por uma fonte de tensão senoidal de amplitude de 9 V e freqüência de 2 kHz, conforme mostrado na Figura 2.8, sendo, R_s , C_{pm} , C_s e R_m ($R_m >> R_s$), respectivamente, resistência do líquido contido nos poros do dielétrico, capacidade dos poros (que se mantém constante), capacidade do líquido dentro dos poros (a qual varia com a umidade), resistência da fonte ao capacitor.

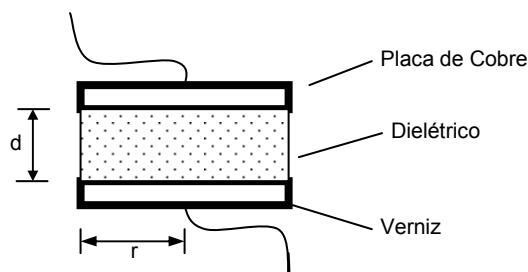


Figura 2.7: Esquema construtivo do capacitor. Rende e Biage [7]

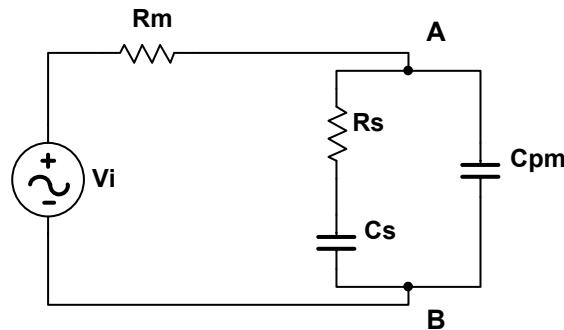


Figura 2.8: Circuito básico do sensor. Rende e Biage [7]

Analizando o circuito da Figura 2.8 pode ser observado que a tensão elétrica V_{AB} no sensor varia com a umidade, pois C_s varia com a umidade e C_{pm} é constante.

Rende e Biage [7] realizaram experimentos com diferentes dimensões do capacitor, diferentes tipos de materiais do dielétrico e diferentes tipos de solos, conforme mostrado na Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

Tabela 2.1: Principais características construtivas do sensor

Sensor	Dielétrico	Raio, r (mm)	Distancia, d (mm)	d/r
1	Pedra Pomes Sintética	12,5	5	0,4
2	Pedra Pomes Sintética	25,0	20	0,8
3	Amostra de Solo	25,0	20	0,8
4	Amostra de Solo	30,0	30	1,0

Tabela 2.2: Textura dos três tipos de solo usados nos experimentos

Solo	Cascalho	Areia Fina	Limo	Argila
A	51	36	01	12
B	23	26	04	47
C	06	06	09	79

Para cada um destes experimentos obtiveram o comportamento da variação da amplitude da tensão de saída do sensor com a variação da umidade considerando os pontos de saturação do solo, capacidade de campo e ponto de murchamento.

Rende e Biage [7] observaram que nos sensores testados, com dielétrico tanto de pedra pomes e quanto de material do solo, a umidade retida no sensor é uma função da textura do solo e que, devido à capacidade sofrer influência, ou da característica do solo ou da sua composição química, não é possível se obter uma curva universal de calibração. No entanto, os sensores podem ser utilizados perfeitamente para monitorar a umidade do solo, desde que tenha referência de calibração de acordo com as curvas que relacionam as tensões de saída com a umidade.

Outro ensaio realizado consistiu em efetuar medidas simultaneamente com o sensor capacitivo e com um tensiômetro, comparando as curvas de respostas de tensão elétrica no sensor versus valores de umidades obtidas para o sensor e para o tensiômetro, considerando o ponto de saturação, capacidade de campo e ponto de murchamento. Foi observado que todos os sensores calibrados entram em equilíbrio com o potencial matricial do solo e não com presença de água no solo. Esse fato é importante na aplicação do sensor em agricultura, pois teorias que tratam de irrigação e determinam a quantidade de água disponível para as plantas estão baseadas no potencial matricial do solo.

2.10 Método dos Blocos de Resistência Elétrica

Esse método utiliza a variação da resistência elétrica entre um par de eletrodos inserido em blocos construídos de materiais capazes de absorver água como, cimento, argila, fibra de vidro, gesso, nylon, etc.

Os blocos enterrados absorvem ou perdem água buscando entrar em equilíbrio com umidade do solo. A resistência elétrica entre os eletrodos irá variar conforme a umidade do bloco, ou seja, a resistência elétrica varia na razão inversa da umidade do solo.

Os blocos de fibra de vidro foram desenvolvidos por Coleman e Hendrix [8]. Os de gesso por Bouyoucos e Mick [9].

Bouyoucos e Mick [9] afirmam que as leituras de resistência nos blocos de gesso devem ser interpretadas em termos da água disponível no solo para as plantas e que em todos os solos a porcentagem de água disponível é aproximadamente a mesma para um dado valor de resistência.

Conforme Klar [1], a resistência elétrica do solo depende também da textura e concentração de sais solúveis. O gesso mantém uma concentração eletrolítica constante correspondente a uma solução saturada de sulfato de cálcio que funciona como um buffer resistindo a pequenas variações de salinidade do solo. O que não acontece com materiais inertes como a fibra de vidro que são altamente sensíveis a variações da salinidade do solo. Os blocos de gesso, mesmo cobertos por resinas, tem durabilidade baixa pois são solúveis. Por estas e outras razões, estes blocos oferecem pequena precisão principalmente a potenciais matriciais superiores a -1,0 bar. Porém com grande vantagem em medições continuadas em campo.

Outro fator de influência na condutibilidade elétrica no bloco de gesso é a sua temperatura, o que foi considerado por Lima [10] nos trabalhos em que caracteriza um sensor que pode ser utilizado interligado a um sistema de determinação do teor de água disponível no solo. No sensor de Lima [10], construído em bloco de gesso, estão inseridos dois eletrodos de metal e um sensor de temperatura. Em seus experimentos estabelece a relação entre a resistência elétrica entre os eletrodos, normalizada para 25 °C, e a umidade absorvida pelo bloco de gesso e a relação dessa resistência elétrica com as pressões na faixa de água disponível para as plantas, entre a capacidade de campo (0,33 atm) e o ponto de murchamento (15 atm), para dois tipos de solo (franco, franco-arenoso) e areia.

Lima [10] observa que em todos os solos a porcentagem de água disponível no solo é aproximadamente a mesma para um dado valor de resistência, o que confirma a afirmativa de Bouyoucos e Mick [11] de que as leituras de resistências devem ser interpretadas em termos da água disponível no

solo. Outra observação é que a faixa de água disponível para as plantas está inserida na faixa de umidade absorvida pelo sensor.

Com os valores obtidos experimentalmente, relacionando teor de umidade absorvida pelo sensor com a resistência elétrica entre os eletrodos normalizada para 25 °C, foi possível encontrar uma equação polinomial (2.14) aproximada de relação entre estas quantidades:

$$\begin{aligned}
 R = & -0,00000000102 \times U^7 + 0,00000040016 \times U^6 - 0,00006415196 \times U^5 + \\
 & + 0,00547471378 \times U^4 - 0,27280483741 \times U^3 + 8,28062708986 \times U^2 - \\
 & - 154,65822054297 \times U + 1651,17365275634
 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Na Figura 2.9 é mostrada através dos pequenos círculos vazios a resistência efetivamente medida na prática nos experimentos realizados. Mostradas pelas curvas, em linha cheia, a resistência R estimada através do polinômio da equação (2.14) e a diferença entre os valores da resistência encontrados nos experimentos e os valores obtidos através da equação polinomial.

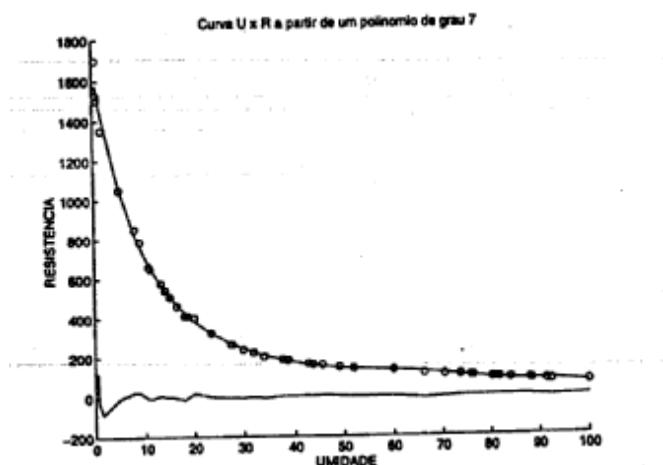


Figura 2.9: Curvas de umidade (%) absorvida pelo sensor versus resistência (Ω) elétrica, umidade versus resistência estimada e erro. Lima [10]

Como a faixa de água disponível para as plantas está contida na faixa de umidade absorvida pelo sensor, os valores relacionando água disponível no solo

com a resistência elétrica do bloco de gesso podem ser obtidos através desta equação polinomial.

Estes blocos de gesso têm vida útil na faixa de três a cinco anos de utilização sob condições de solos irrigados, são de fácil construção e manejo, podem ser utilizados em toda a faixa de água disponível no solo para as plantas, oferecem condições de medições continuadas em campo, podem ter suas informações tratadas através de um sistema automatizado de medição.

Na Figura 2.10 são mostrados desenhos sem escala do sensor desenvolvido por Lima [10]. Um desenho ilustra o bloco de gesso com suas dimensões, os três fios de conexão com o sensor de temperatura e os dois fios de conexão com os eletrodos do resistor elétrico. No outro desenho, através de um corte do bloco de gesso, são ilustrados os eletrodos da resistência elétrica. Estes eletrodos são concêntricos feitos de tubos cobre eletrolítico com altura de 40 mm e totalmente perfurados para permitir um completo fluxo da umidade absorvida através do conjunto.

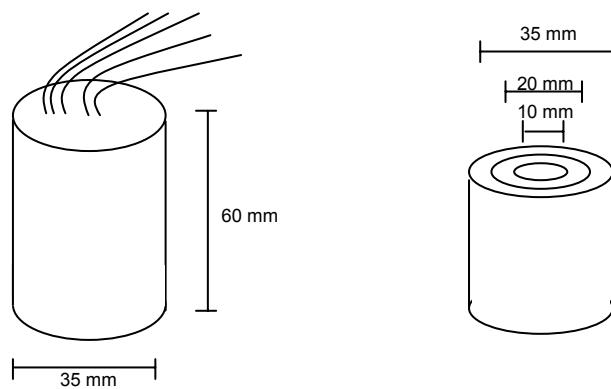


Figura 2.10: Esquema construtivo do sensor em bloco de gesso. Lima [10]

2.11 Método Térmico

A diferença de pressão causada entre a água contida em um bloco de material poroso enterrado e a água do solo, fará com que o bloco absorva ou ceda água ao solo, isto é, o bloco de gesso terá sua umidade variando conforme com a umidade do solo, buscando o equilíbrio. Por ser a água um melhor condutor térmico que o ar, na medida em que o ar é substituído por água em um material poroso, as propriedades térmicas neste material se alteram. Na Tabela

2.3 são mostrados os valores da condutividade térmica e difusidade térmica da água, do ar e de dois materiais porosos na condição de saturado e seco. O método térmico relaciona a variação no teor de água no material poroso com a variação das propriedades térmicas (condutividade, difusidade, calor específico) neste material.

Tabela 2.3: Condutividade e difusidade térmica da cerâmica e gesso. Phene et al.[12]

Material Usado	Condutividade Térmica Seco	Condutividade Térmica Saturado	Difusidade Térmica Seco	Difusidade Térmica Saturado	Razão K_{seco}/K_{sat}	Razão k_{seco}/k_{sat}
—cal/sec.cm.°C—		—cm ² /sec—				
Cerâmica	0,00114	0,00184	0,00118	0,00383	1,61	3,25
Gesso	0,00076	0,00192	0,00101	0,00510	2,53	5,05
Água		0,00144		0,00144		
Ar	0,000058		0,187			

A transmissão de calor pode ser definida como a transmissão de energia de uma região para outra, como resultado da diferença de temperatura entre essas regiões. O processo de transmissão de calor pode ser feito através da condução, radiação e convecção. A transmissão do calor gerado por uma fonte no interior do bloco de gesso se dará por condução e convecção. Por condução, através das partículas sólidas de gesso, do ar existente nos espaços não preenchidos com água, da água presente nos poros ou absorvida pelas partículas sólidas, da solução do gesso. Por convecção, pelo movimento da água, pelo fluxo de massa causado por gradientes de temperatura que levam as moléculas de água ou vapor de um local de temperatura mais quente para outro de temperatura mais fria.

Phene et al. [12] propôs um sensor baseado na transmissão de calor em um meio poroso utilizando um diodo de junção P-N envolvido por uma bobina de aquecimento (ambos colocados dentro de um bloco de gesso). As medidas de tensão elétrica no diodo correspondem às variações de temperatura no centro do

sensor. Essas medidas são realizadas antes e após o aquecimento da bobina. A calibração do sensor é efetuada relacionando as variações da diferença de temperatura com as tensões de água no solo.

Conforme Beneveli et. al. [13], o sensor térmico SOLUMID 1 desenvolvido por Silva e Oliveira [14] e aperfeiçoado por Cardoso [15] é concebido para operar em regime transitório. Esse sensor é constituído de um transdutor de temperatura e uma fonte de fluxo uniforme de calor colocados no interior de um bloco de gesso com formato de um cilindro. A fonte de calor consiste de uma resistência elétrica colocada o mais próximo possível do transdutor, pois o desequilíbrio entre esses elementos, associado ao regime transitório, conduz a uma baixa acurácia nas medidas. Uma corrente elétrica constante passando pelo resistor durante 60 s produzirá um aumento da temperatura medida através do transdutor. Variação na umidade do sensor faz variar as propriedades térmicas do meio poroso, que por sua vez varia a temperatura medida.

De acordo Beneveli et. al. [13], o sensor SOLUMID 1 tem sido usado em estudos experimentais apresentando bons resultados.

Um outro sensor, baseado no método térmico e estudado por Reece [16], utiliza dentro de um bloco de gesso um fio de aquecimento e um par termoelétrico. O aumento de temperatura medida com o tempo (10 a 60s), causado pela passagem de corrente elétrica pelo fio (fonte linear de calor com resistência de 32 W), possibilita estimar o teor de água no solo com o auxílio de curvas de calibração. Reece [16] propôs a calibração deste sensor utilizando uma relação onde o potencial matricial varia unicamente proporcional ao inverso da variação da condutividade térmica, independente da intensidade da corrente aplicada e do tempo de aquecimento.

Oliveira [17] realizou um estudo para avaliação em campo e em laboratório do sensor SOLUMID modelo SG-10. Nesse estudo coloca que sensores de dissipação de calor podem ser considerados como mais uma alternativa viável de determinação da tensão de água no solo. Para isso, deve ser utilizada curva de calibração adequada ao tipo de material poroso utilizado no sensor e a intensidade e duração da corrente elétrica utilizada na fonte de calor. Sugere que

sejam feitas mudanças quanto ao tipo de material poroso, no caso o gesso, visando evitar uma matriz estável causada pela solubilidade do gesso.

2.12 Comentários

Os métodos existentes de medição do teor de umidade no solo evidenciam a importância do conhecimento do teor de umidade do solo no sistema água-solo. Um método que contribui com uma nova proposta de monitoramento do teor umidade do solo tem seu valor inquestionável. O método proposto nesta dissertação é um método térmico com originalidade na forma de obter as características térmicas associadas à umidade que se quer medir. O método busca o monitoramento do teor de umidade considerando as características de baixo custo, exatidão, automação, segurança para o operador, fácil calibração, razoável rapidez na obtenção da informação, permitir repetição das medições no espaço e no tempo e evitar amostragem destrutiva.

Capítulo 3

Características do Sensor

3.1 Introdução

A construção do sensor de umidade, objeto de caracterização neste trabalho, parte de um modelo que permite encontrar a condutância térmica entre dois pontos de um meio no qual se propaga o calor gerado por uma fonte de temperatura constante. Utilizando dois termistores tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) e um bloco de material poroso, constrói-se com o suporte do modelo o sensor de umidade. Um circuito elétrico fornece energia elétrica a um dos termistores fazendo-o operar em temperatura constante. Com medidas adequadas da energia elétrica fornecida ao sensor e da temperatura em um ponto do bloco, poderá ser estabelecida a relação de variação condutância térmica com a umidade do meio.

Este capítulo descreve o modelo, as características de montagem dos termistores no bloco poroso, o circuito elétrico em configuração realimentada que habilita o termistor operar em temperatura constante, o dimensionamento deste circuito dentro da faixa de variação da condutância térmica do material poroso entre dois pontos onde estão instalados os dois termistores e o ensaios realizados com o gesso utilizado como material poroso.

3.2 Fundamentação Teórica

Sensor é um dispositivo que gera uma grandeza no domínio da eletricidade que pode ser utilizada como medida de um parâmetro físico, químico ou biológico. No caso do sensor de umidade, informações de grandezas no domínio da eletricidade representam a medida de umidade no solo. Um modelo teórico permite explicar a relação entre estes dois domínios e é construído a

partir do comportamento de termistores e da transmissão de calor gerado por uma fonte de calor pontual em um meio constituído de um material poroso.

3.2.1 Termistor

Conforme Oliveira [18], sensores termo-resistivos têm sido estudados e aplicados em diversas sub-áreas do conhecimento como: termodinâmica, mecânica dos fluídos, instrumentação eletrônica, instrumentação biomédica, microeletrônica e outras. Entre estes sensores estão os termistores do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) que têm suas resistências elétricas decrescendo com o aumento das suas temperaturas e os PTC (Positive Temperature Coefficient) que apresentam suas resistências elétricas variando diretamente com suas temperaturas. Os sensores termo-resistivos têm de uma maneira geral seu comportamento expresso por duas equações: uma com base na primeira lei da termodinâmica, relacionando a energia entregue ao sensor com a energia perdida dele para o meio ambiente que o envolve, mais a variação de sua energia interna; a outra relacionando sua resistência elétrica com sua temperatura.

Considerando o termistor aquecido por efeito Joule e inserido em um meio no qual a transmissão do calor se dá por condução e convecção, a relação citada com base na primeira lei da termodinâmica pode ser escrita conforme a equação (3.1).

$$V_s I_s = hA(T_s - T_a) + mc \frac{d(T_s - T_a)}{dt} \quad (3.1)$$

Sendo V_s , I_s , h , A , T_a , T_s , m , c e $d(T_s - T_a)/dt$, respectivamente, tensão elétrica no termistor, corrente elétrica que atravessa o termistor, coeficiente global de transferência de calor, área do termistor, temperatura do meio ambiente, temperatura do termistor, massa do termistor, calor específico do termistor e variação da temperatura do termistor com o tempo.

Na equação (3.1):

- $V_s I_s$ é a potência elétrica entregue ao termistor (Pe);
- $h A$ é condutância térmica (K);
- $hA(T_s - T_a)$ é a potência térmica perdida pelo termistor para o meio;
- mc é a capacidade térmica (C);
- $d(T_s - T_a)/dt$ Taxa de variação energia interna do termistor em relação ao tempo devido a sua capacidade térmica.

Para o termistor NTC a relação entre sua resistência elétrica e sua temperatura, pode ser descrita pela seguinte equação (3.2):

$$\ln(R_s) = \frac{B}{T_s} + \ln(A) \quad (3.2)$$

Em que A e B são constantes do termistor.

3.2.2 Condução de Calor a partir de uma Fonte Pontual em Regime Transitório

Hipóteses que simplificam a análise da condução de calor em regime transitório permitem desenvolver com aprofundamento suficiente o entendimento do modelo aplicado para a construção do sensor de umidade. Supõem um meio de tamanho infinito, com temperatura inicialmente uniforme T_a . Este meio é dividido em seções compreendidas entre superfícies esféricas concêntricas, cujas temperaturas em cada superfície possuem o mesmo valor e inicialmente com valor igual ao da temperatura T_a . Uma fonte pontual de calor com temperatura constante (T_s), inferior a temperatura de ebulição água e maior que T_a , é colocada no centro das esferas. Supõem também que a variação da temperatura neste ponto no instante inicial ocorrerá por salto, de T_{a0} para T_s , e que a resistência térmica entre esta fonte e o meio é desconsiderada por ser muito pequena em relação às demais resistências do sistema. As temperaturas nas superfícies distantes do centro são constantes e iguais à temperatura T_a . Na

Figura 3.1 são ilustradas a representação de cinco superfícies pela intercessão de plano que passa no centro das esferas.

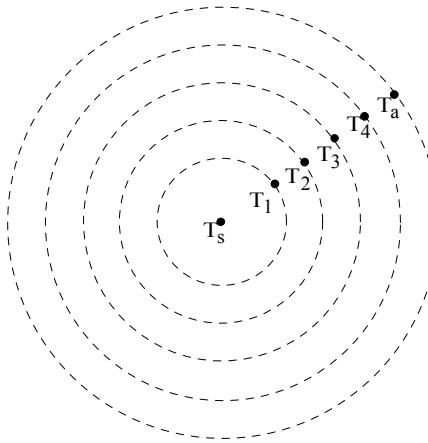


Figura 3.1: Representação das superfícies com temperaturas T_s , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 e T_a

Um termistor operando com temperatura constante (T_s) é colocado como a fonte de calor no centro das esferas no sistema suposto. A relação, por unidade de tempo, entre a energia elétrica entregue termistor, a energia dissipada deste para a primeira seção e a interna devida sua capacidade térmica, pode ser escrita (3.3) considerando a equação (3.1).

$$P_e = K_{s,1}(T_s - T_1) + C_s \frac{d(T_s - T_{a0})}{dt} \quad (3.3)$$

A diferença entre a quantidade de calor que entra em uma seção e a que dela sai, muda energia interna desta seção. Este equilíbrio de energias pode ser escrito, por unidade de tempo, para as seções ilustradas na Figura 3.1, conforme as equações (3.4), (3.5), (3.6) e (3.7).

Para a 1º seção:

$$K_{s,1}(T_s - T_1) - K_{1,2}(T_1 - T_2) - C_1 \frac{d(T_1 - T_{10})}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

Para as outras seções:

$$K_{1,2}(T_1 - T_2) - K_{2,3}(T_2 - T_3) - C_2 \frac{d(T_2 - T_{20})}{dt} = 0 \quad (3.5)$$

$$K_{2,3}(T_2 - T_3) - K_{3,4}(T_3 - T_4) + C_3 \frac{d(T_3 - T_{30})}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

$$K_{3,4}(T_3 - T_4) - K_{4,a}(T_3 - T_4) - C_4 \frac{d(T_4 - T_{40})}{dt} = 0 \quad (3.7)$$

Sendo:

- P_e a potência elétrica fornecida ao termistor;
- $K_{m,n}$ a condutância térmica da seção n;
- T_s a temperatura do termistor;
- T_n a temperatura na superfície da seção n;
- C_s a capacidade térmica do termistor;
- C_n a capacidade térmica da seção n;
- T_{n0} a temperatura inicial da seção n.

Um sistema elétrico análogo [19] ao sistema térmico representado por essas equações de equilíbrio térmico pode ser obtido substituindo as grandezas potência elétrica, temperatura, capacidade térmica e condutância térmica, respectivamente por corrente elétrica, tensão elétrica, capacidade elétrica e condutância elétrica. O circuito elétrico análogo ao modelo térmico é mostrado na Figura 3.2.

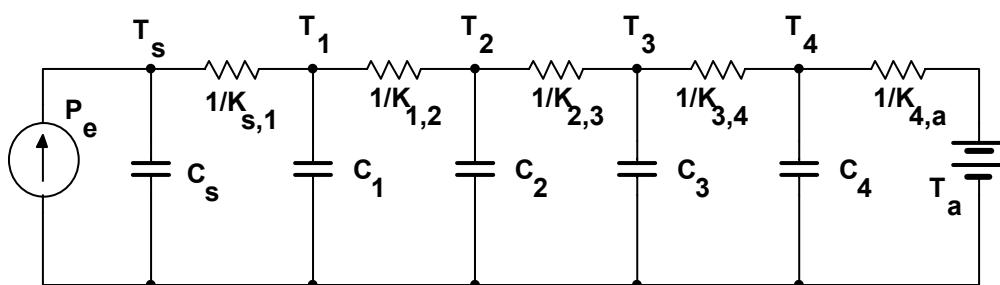


Figura 3.2: Circuito elétrico análogo ao modelo térmico

Nas hipóteses assumidas para a montagem do sistema térmico, a temperatura T_s é constante, passando por salto da sua condição inicial para o valor T_s . Assim, a ação do capacitor C_s representado no circuito pode ser desconsiderada, o que significa seu tempo de carga muito menor comparado com os demais capacitores do circuito.

A grandeza representada por $Ght_{s,n}(t)$ é definida pela equação (3.8), conforme circuito elétrico da Figura 3.2, relação entre a variação no tempo da corrente elétrica análoga a potência $P_e(t)$ do modelo térmico e da diferença de tensão elétrica entre as tensões elétricas análogas as temperaturas T_s e $T_n(t)$ deste modelo. No regime transitório, a busca do equilíbrio para essa grandeza responde através das constantes de tempo geradas pelas capacitâncias e resistências do circuito elétrico. Atingindo o regime permanente, isto é, com todos os capacitores considerados carregados, a grandeza Ght representa a condutância elétrica de valor $K_{s,n}$ entre o ponto de tensão elétrica de valor T_s e um ponto de tensão T_n do circuito, e pode ser descrita pela equação (3.9).

$$Ght_{s,n}(t) = \frac{P_e(t)}{T_s - T_n(t)} \quad (3.8)$$

$$K_{s,n} = \frac{P_e}{T_s - T_n} \quad (3.9)$$

Assim, para o sistema térmico, conhecendo-se a potência elétrica fornecida ao termistor, a temperatura desse termistor e a temperatura em um ponto do meio, a grandeza $Ght_{s,n}(t)$, que corresponde no regime permanente à condutância térmica entre os pontos de temperatura T_s e T_n , pode ser encontrada. Sendo o meio um material poroso, a variação da quantidade de água presente neste meio faz variar suas propriedades térmicas e consequentemente variar a grandeza $Ght_{s,n}(t)$.

3.3 Características Construtivas do Sensor de Umidade

O sensor de umidade objeto de caracterização neste trabalho é formado pelos seguintes elementos: um bloco cilíndrico de material poroso; dois termistores tipo NTC inseridos neste bloco; terminais de conexão do sensor ao circuito elétrico para o sensor e ao medidor das informações de temperatura em um ponto do sensor; um bloco de resina para fixar os terminais de conexão ao bloco cilíndrico de material poroso. Este conjunto, que constitui o sensor de umidade, é chamado no decorrer deste trabalho de bloco sensor. Um dos termistores atua como gerador de calor a temperatura constante fornecendo a energia térmica ao meio no qual está inserido e o outro permite obter a informação de temperatura em um ponto do bloco sensor. O circuito elétrico tem a função de fornecer potência elétrica ao termistor gerador de calor e, em condições ideais, manter constantes a resistência elétrica e a temperatura deste termistor. O modelo teórico descrito no item 3.2, suporte de construção do sensor de umidade, pode ser estendido ao bloco sensor. Decerto as temperaturas estarão distribuídas em superfícies de formas diferentes daquelas do modelo, por ser o bloco de tamanho finito e possuir interfaces com o solo e com a resina de proteção dos terminais. O gesso é o material poroso utilizado na construção do bloco sensor.

3.3.1 Bloco Sensor

Na Figura 3.3 pode ser visto o desenho de construção do bloco sensor. São mostrados as dimensões do bloco de gesso, do bloco de resina, a posição de instalação dos termistores e o terminal de conexão. S1 representa o termistor gerador de calor, distante 1,65cm do termistor S2 de medição temperatura no bloco. Os termistores são de fabricação da BOWTHORPE THERMISTORS de código GM102 para S1 e da Siemens Matsushita Components de código S861/3 k/+40 para o S2. Esses termistores foram escolhidos considerando suas características físicas e de operação. E, para o S1, considerando também a compatibilidade com tensão de operação do amplificador operacional do circuito elétrico para sensor.

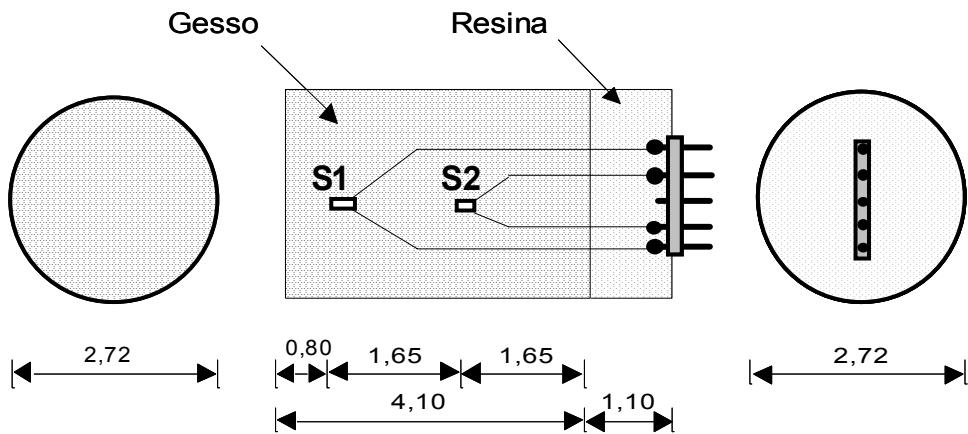


Figura 3.3: Desenho de construção do bloco sensor de umidade (medidas em centímetro)

3.3.2 Circuito Elétrico para o Sensor de Umidade

O circuito elétrico para o sensor de umidade é uma fonte controlada que em configuração realimentada fornece potência elétrica ao termistor gerador de calor e permite manter constante a resistência elétrica desse, consequentemente, com base na equação (3.2), manter a sua temperatura constante. O circuito elétrico é mostrado na Figura 3.4.

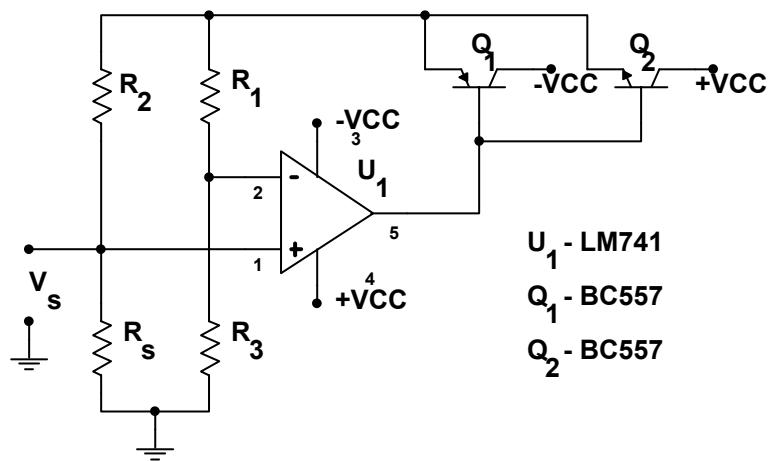


Figura 3.4: Circuito elétrico para o termistor em temperatura constante em configuração realimentada

Ligada a fonte $+VCC$ e $-VCC$ de alimentação do circuito, a temperatura do termistor S1 (com resistência R_s) atinge sua temperatura T_s projetada de

operação. A ponte de resistores garante a relação $R_1.R_s \approx R_2.R_3$. Uma redução da solicitação de potência causada pela carga dos capacitores representativos da capacidade térmica do sistema, provoca uma redução da diferença de potencial elétrico na resistência R_s do termistor, que tende a causar uma diferença de tensão elétrica momentânea entre os pontos 1 e 2 do amplificador operacional, esta diferença faz com que a corrente elétrica fornecida a ponte de resistores diminua de forma a igualar as tensões elétricas entre estes dois pontos. Desta forma, o termistor opera como uma fonte de calor constante que fornece energia térmica ao meio, podendo ser escrita a equação (3.10) a partir da equação (3.8) da grandeza G_{ht} .

$$G_{ht,s,b}(t) = \frac{V_s^2(t)}{R_s(T_s - T_b(t))} \quad (3.10)$$

O dimensionamento do circuito da Figura 3.4 inicia com a estimação, por meio de ensaios, das condutâncias térmicas para as umidades máximas e mínimas com o bloco sensor, utilizando a montagem mostrada na Figura 3.5.

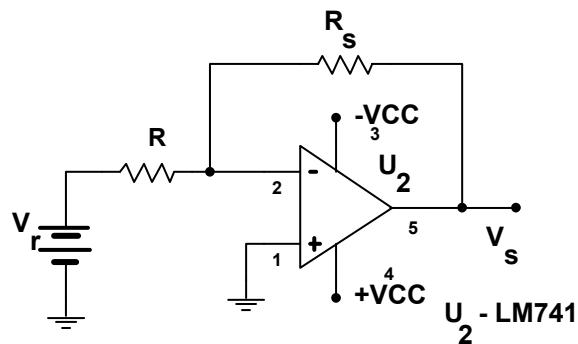


Figura 3.5: Montagem para estimar condutância térmica máxima e mínima

No circuito da Figura 3.5, o ponto 2 é um ponto de terra virtual, desta forma, a corrente que passa no termistor de resistência R_s é a mesma que passa no resistor R e pode ser encontrada pela relação V_r/R . Com os valores conhecidos de V_s e da corrente em R_s , pode ser obtido o valor da potência P_s entregue ao termistor. Com o valor de R_s , utilizando a equação (3.2), tem-se o

valor da temperatura T_s no termistor de resistência R_s . Conhecidos os valores de P_s , T_s e da temperatura T_b em um ponto do bloco de gesso, com a aplicação da equação (3.10), pode ser obtido para a montagem o valor da condutância térmica máxima e o valor da mínima entre os pontos de temperaturas T_s e T_b . Máxima na condição do bloco de gesso saturado, e mínima quando o bloco estiver na condição de seco. Os valores encontrados para as condutâncias térmicas foram:

$$G_{ht_{max}} = 3,5 \text{ mW / } ^\circ\text{C}$$

$$G_{ht_{min}} = 1,5 \text{ mW / } ^\circ\text{C}$$

A temperatura escolhida de operação do termistor S1 do sensor de umidade foi de cerca de 70°C , acima da temperatura ambiente local, aproximadamente na faixa de 20 a 40°C e distante da temperatura de ebulação da água. Com a equação (3.2) e as informações dos parâmetros A e B oriundos das especificações do termistor, calcula-se o valor da temperatura de S1.

$$\ln(R_s) = \frac{B}{T_s} + \ln(A)$$

$$\ln(270) = \frac{2910}{T_s} + \ln(0,0577)$$

$$T_s = 344,34\text{K}$$

$$T_s = 71,19^\circ\text{C}$$

Com a equação (3.10) determina as tensões e correntes máximas e mínimas no termistor S1:

$$V_{max} = \sqrt{0,0035 \times 270 \times (71,19 - 20)} = 6,96\text{V}$$

$$V_{\text{mim}} = \sqrt{0,0015 \times 270 \times (71,19 - 40)} = 3,55V$$

$$I_{s\max} = \frac{V_{\max}}{R_s} = 25,78mA$$

$$I_{s\min} = \frac{V_{\min}}{R_s} = 13,15mA$$

Alimentado o amplificador operacional com +18V e -18V, sua saturação ocorre próxima a 17V. Com mais uma queda de tensão de cerca de 0,7V no transistor, para operação do amplificador operacional fora da saturação, a tensão que alimenta a ponte resistores deve ficar menor que 16,3V e a tensão sobre R_2 fica com o valor máximo de:

$$V_{R_2} = 16,3 - 6,96 = 9,34V$$

E o valor de R_2 :

$$R_2 = \frac{9,34}{0,02578} = 362,3\Omega$$

Para valores de resistores comerciais:

$$R_2 = 330\Omega$$

Para que as tensões nos pontos 1 e 2 do amplificador operacional U1 tenham valores iguais, a relação $R_1 \cdot R_s = R_2 \cdot R_3$ deve ser atendida. Atribuindo para R_3 o valor de 220 Ω , obtém-se novo valor para R_s .

$$R_s = \frac{R_2 \times R_3}{R_1} = \frac{330 \times 220}{270} = 268,89\Omega$$

Para os valores medidos de R_1 , R_2 e R_3 utilizados na montagem do circuito, o valor de R_s fica:

$$R_s = \frac{322,23 \times 217,72}{267,10} = 262,66\Omega$$

E o valor de T_s :

$$T_s = \frac{2910}{\ln\left(\frac{262,66}{0,0577}\right)} = 345,47K$$

$$T_s = 345,47 - 273,15 = 72,32^{\circ}C$$

3.3.3 Bloco de Gesso

Os métodos térmicos e de blocos de resistência elétrica, utilizam blocos de materiais porosos que inseridos no solo, absorvem ou cedem umidade, entrando em equilíbrio com o teor de água contido no solo. O gesso de estuque ou paris tem sido bastante utilizado na confecção dos blocos de absorção dado o seu baixo custo e por apresentar características que fornecem aos blocos um bom desempenho [9]: praticidade de moldagem, bom índice de porosidade, equilíbrio de umidade com o solo relativamente rápido, vida útil na condição de solo irrigado em torno de três a cinco anos e bloqueio a pequenas variações de salinidade no solo e na água. Apresenta como desvantagem se dissolver com o tempo devido a sua solubilidade, tornando os blocos uma matriz instável para a medida.

O gesso também foi o material poroso escolhido para a construção do sensor de umidade caracterizado neste trabalho devido às características desempenho citadas e por atender aos propósitos do trabalho.

Para moldagem dos blocos foram realizados ensaios com dois tipos de gesso: um gesso tipo paris ou de estuque e um gesso de maior resistência à compressão. O gesso tipo paris utilizado foi o Gessojato de fabricação da Sondatec – Tecnologia de Concreto Ltda e o um gesso de maior resistência à compressão foi o gesso tipo pedra Herodent Soli-Rock da Vigodent.

Os ensaios consistiram em montar blocos com diferentes concentrações de água e gesso, todos de forma cilíndrica, com diâmetros semelhantes e alturas variadas, mas compatíveis com possíveis alturas para montagem do bloco do sensor. Observou-se nos ensaios a capacidade de absorção de água pelo bloco, a praticidade para uso da mistura gesso/água na moldagem do bloco, aspecto visual quanto à uniformidade de distribuição da mistura gesso/água no molde do bloco e solubilidade do bloco quando submetido repetidas vezes ao processo de saturação e secagem.

Na Tabela 3.1 são mostrados os valores das medições realizadas para as proporções de preparo das misturas de gesso e água utilizadas. Para todas as proporções, a praticidade de preparo da mistura foi idêntica, observando-se o cuidado de evitar a formação de bolhas de ar quando se efetua a mistura. A viscosidade da concentração 100/30 para ambos tipos de gesso dificulta o enchimento do molde, já a fluidez nas concentrações de 100/100 e 100/67 requer o cuidado maior de permanecer misturando o gesso e água enquanto se preenche os moldes, a fim de manter a proporção gesso/água da mistura que cai no molde.

No aspecto visual, as superfícies externas dos blocos, após desenformados, apresentaram-se rugosas para as concentrações 100/100 e 100/67 para o gesso tipo paris, e lisa e uniforme para as demais concentrações nos dois tipos de gesso.

Os blocos 100/100 e 100/67 de gesso paris, retirados da água na segunda saturação dos testes, perdiam massa de gesso, deixando os dedos brancos de gesso quando esfregados. Esses blocos foram descartados do prosseguimento dos testes.

Na determinação da porosidade, as massas secas foram obtidas com os blocos na temperatura ambiente, pois ensaios realizados com secagem em estufa a 105 °C em outros blocos de mesmas concentrações gesso/água, mostraram que com repetidas idas a estufa perdiam, uns mais rápidos que outros dependendo do tipo de gesso e da concentração de gesso e água, resistência a esforços provocados pelas mãos, esfarelando-se em alguns casos.

Tabela 3.1: Dados relacionados às amostras de gesso

REF	G/H	V	P1	P2	P3	U1	PE1	P4	P5	U2	PE2
A1	100/30	32,31	53,74	56,14	51,30	9,43	14,98	55,71	49,88	11,69	18,04
A2	100/50	34,86	52,98	54,46	49,55	9,91	14,08	54,70	44,09	24,06	30,44
A3	100/67	30,62	44,48	45,46	41,44	9,70	13,13	45,59	xx	xx	xx
A4	100/100	30,97	41,45	43,50	39,07	11,34	14,30	43,35	xx	xx	xx
B1	100/30	27,48	48,73	49,31	45,88	7,48	12,48	49,49	45,36	9,10	15,03
B2	100/50	34,57	56,23	56,29	51,22	9,90	14,67	56,32	46,05	22,30	29,71
B3	100/67	34,40	54,60	53,43	48,58	9,98	14,10	53,27	40,21	32,48	37,97

A1, A2, A3 e A4: Referências dadas às amostras para o gesso tipo paris;

B1, B2 e B3: Referências dadas às amostras para o gesso tipo pedra;

G/H: Proporção Gesso/Água na moldagem;

V: Volume da amostra;

P1: Peso da amostra após desenformada com 24h de moldada;

P2: Peso da amostra saturada (mergulhada na água por 10min) após 74h de desenformada;

P3: Peso da amostra deixada na temperatura ambiente por 24h após saturação, e antes da 2^a saturação;

U1: Taxa de umidade $((P2 - P3)/P3) \cdot 100\%$;

PE1: Porosidade efetiva $((P2 - P3)/V) \cdot 100\%$;

P4: Peso da amostra na 2^a saturação (mergulhada na água por 10min);

P5: Peso da amostra deixada na temperatura ambiente por 8 dias após 2^a saturação;

U2: Taxa de umidade $((P4 - P5)/P5) \cdot 100\%$;

PE2: Porosidade efetiva $((P4 - P5)/V) \cdot 100\%$;

Pelos resultados apresentados optou-se em utilizar na construção do sensor o gesso pedra na proporção 100/50, pois tem maior resistência quando

comparado ao gesso paris 100/50 e ao gesso pedra de 100/67, e porosidade próxima a do gesso paris 100/50.

Escolhido o tipo de gesso, com o propósito de comparar as porosidades nos blocos com secagem na temperatura ambiente e na estufa, os blocos tipo de gesso paris 100/50, pedra 100/50 e pedra 100/67 foram colocados em estufa com aumento gradativo da temperatura por uma hora até atingir 105°C e aí deixados por mais duas horas. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 3.2, que confirma a proximidade nos valores de porosidade e umidade para os blocos paris 100/50 e pedra 100/50.

Certamente outros tipos de gesso poderiam ser testados e outras premissas de ensaios consideradas, mas o objetivo dos ensaios foi verificar se um tipo de material mais resistente que o gesso paris, no caso o gesso pedra, possui capacidade de absorção de umidade equivalente e pode ser utilizado na construção do sensor de umidade.

Tabela 3.2: Dados relacionados às amostras de gesso seco em estufa

REF	G/H	V	P4	P6	U3	PE3
A2	100/50	34,86	54,70	41,33	32,35	38,35
B2	100/50	34,57	56,32	43,49	29,50	37,11
B3	100/67	34,40	53,27	37,46	42,21	45,96

A2: Referência dada à amostra para o gesso tipo paris;
 B2 e B3: Referências dadas às amostras para o gesso tipo pedra;
 G/H: Proporção Gesso/Água na moldagem;
 V: Volume da amostra;
 P4: Peso da amostra na 2^a saturação (mergulhada na água por 10min). Ver tabela 3.1;
 P6: Peso da amostra deixada em estufa após medida P5 (ver tabela 3.1);
 U3: Taxa de umidade $((P4 - P6)/P6) \cdot 100\%$;
 PE3: Porosidade efetiva $((P4 - P6)/V) \cdot 100\%$;

3.3.4 Comentários

Este capítulo mostrou a construção do sensor de umidade, ou seja, do dispositivo com capacidade de gerar uma grandeza no domínio da eletricidade

que pode ser utilizada como medida da umidade contida em um meio de material poroso. A grandeza elétrica se revela pela potência elétrica dissipada no termistor gerador de calor e pelas resistências elétricas correspondentes às temperaturas sentidas pelo termistor gerador de calor e pelo termistor utilizado para medição de temperatura no interior do bloco de gesso. Essa grandeza elétrica no regime permanente representa a condutância térmica entre os pontos onde estão instalados os dois termistores e traduz com seus os valores os diversos valores de umidade detectada pelo sensor. Para essa tradução é necessário estabelecer a relação entre os valores de umidade e de condutância térmica. Os capítulos seguintes buscam essa relação e a validação do modelo, isto é, a confirmação da aplicação do sensor de umidade construído a partir do modelo.

Capítulo 4

Ensaios com o Sensor

4.1 Introdução

Este capítulo caracteriza o sensor de umidade quanto às relações entre a grandeza $Ght(t)$ e a umidades medidas no bloco sensor e no solo. Estas relações são obtidas através de três ensaios realizados em laboratório. O primeiro ensaio busca validar o modelo que suporta o método de medição através de testes realizados com o sensor fora do solo. O segundo e terceiro buscam a confirmação da aplicação do sensor em medição de umidade do solo. Para isso o sensor é introduzido em duas amostras de solo e obtidas as características de respostas do sensor nesses dois tipos de solo. A caracterização geotécnica dos solos utilizados nos ensaios está apresentada no Anexo II.

4.2 Ensaio 1 – Validação do Modelo

4.2.1 Objetivo do Ensaio

Este ensaio estabelece a relação entre os valores medidos de umidade no bloco poroso do sensor e da grandeza $Ght(t)$ entre os pontos onde estão instalados os dois termistores, o que recebe potencia elétrica gerando calor e o que é utilizado para a medida da temperatura em um ponto no bloco. A relação entre estes valores deve, para comprovar o uso do método, permitir conhecer a umidade sentida pelo sensor através da informação medida da condutância térmica. Este ensaio foi composto por medições realizadas com o sensor de umidade fora do solo, no ar, e na temperatura ambiente entre 21°C e 24 °C. O entendimento da montagem que permitiu a realização do ensaio pode ser obtido na descrição sobre os dos recursos aplicados ao ensaio.

4.2.2 Recursos Utilizados no Ensaio

Os seguintes recursos foram utilizados neste ensaio:

- Bloco Sensor;
- Circuito Elétrico para o Sensor de Umidade;
- Fonte de Alimentação Minipa modelo - MPS 3003 - Power Supply. Foram utilizadas duas fontes de alimentação para fornecer tensão de +18 VDC e -18VDC ao circuito elétrico para o sensor;
- Multímetro Digital Agilent – 34401A - 61/2 Digital Multimeter. Foram utilizados dois multímetros digitais. Um para coletar as informações da tensão V_s medida no termistor S1. O outro multímetro foi utilizado para coletar as informações da resistência elétrica do termistor S2;
- Balança Digimed KN 300. Essa balança foi utilizada para medir o peso do bloco sensor para determinar os valores correspondentes à umidade no bloco de gesso;
- Multiteste APPA – ET 2800. Mede em intervalos de 30 segundos a temperatura ambiente em uma posição próxima ao bloco sensor;
- Rotinas desenvolvidas em C++. Essas rotinas tratam as informações coletadas nos multímetros digitais da Agilent fornecendo os relatórios das medições, a cada 3 segundos, dos valores de tensão V_s e resistência elétrica do termistor S2;
- Rotinas desenvolvidas em MatLab R12. Essas rotinas calculam os valores da grandeza $Ght(t)$ e da temperatura no termistor S2. Traçam os gráficos que relacionam $Ght(t)$ e umidade, e temperaturas com o tempo. Aproximam os valores de $Ght(t)$ versus os de umidade a expressões matemáticas (um polinômio do 4º grau) que traduzem a relação entre esses valores;
- Microcomputador. Suporta os programas e Softwares que possibilitam as coletas e tratamentos dos dados;

O esquema mostrado na Figura 4.1 ilustra como estão inter-relacionados entre si os recursos do ensaio.

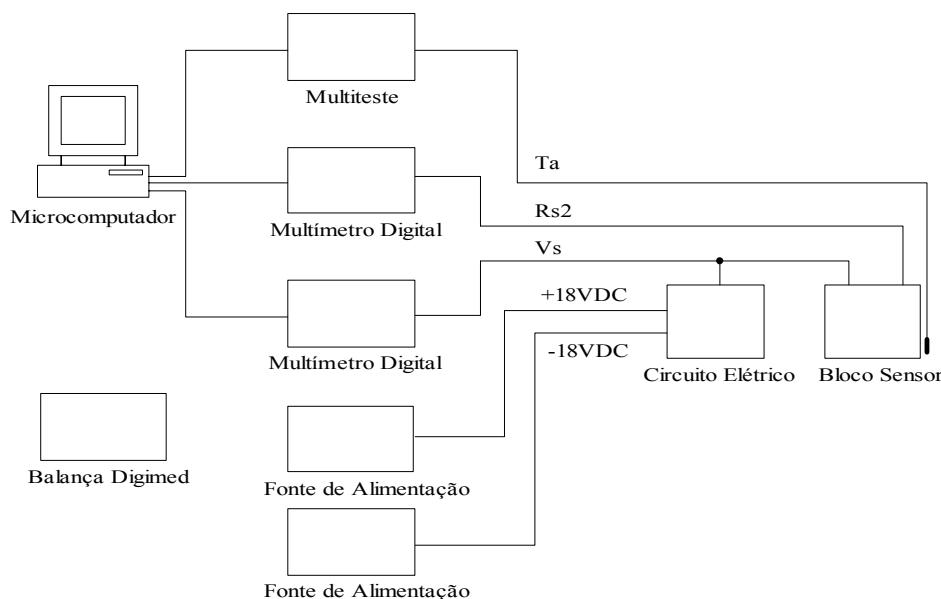


Figura 4.1: Esquema de inter-relação recursos aplicados ao ensaio 1

4.2.3 Determinação da Grandeza $G_{ht}(t)$

Neste ensaio para cada valor de umidade do bloco dentro da faixa que vai do bloco sensor saturado até seco foram coletados os dados correspondentes aos valores de tensão V_s sobre o termistor gerador de calor, de resistência R_s do termistor de medição da temperatura T_b no bloco sensor e de temperatura ambiente T_a .

Os dados coletados foram utilizados para a determinação das características de variação no tempo da relação entre a potência P_e fornecida ao termistor gerador de calor e a diferença de temperatura nos pontos T_s e T_b (ver Figura 3.2). Essa relação representa em regime permanente a condutância térmica entre os pontos onde estão instalados os dois termistores e expressa pela equação (3.10), neste capítulo reescrita conforme a equação (4.1).

$$G_{ht_{s,b}}(t) = \frac{\frac{V_s^2(t)}{R_s}}{T_s - T_b(t)} \quad (4.1)$$

Substituindo os valores de R_s e T_s calculados no Capítulo 3, a equação (4.1) pode ser escrita por (4.2):

$$G_{ht_{s,b}}(t) = \frac{\frac{V_s^2(t)}{262,66}}{72,32 - T_b(t)} \quad (4.2)$$

Da equação (3.2) vem (4.3):

$$\ln(R_{s2}(t)) = \frac{B}{T_b(t)} + \ln(A) \quad (4.3)$$

Sendo A e B constantes do termistor S2 e de acordo com as especificações do fabricante do termistor,

$$B = 3988 \quad \text{e,}$$

$$\ln(A) = \frac{3988}{298,15} + \ln(3000)$$

Da equação (4.3) a temperatura $T_b(t)$ em °C fica (4.4):

$$T_b(t) = \frac{3988}{\ln(R_{s2}(t)) + \frac{3988}{298,15} - \ln(3000)} - 273,15 \quad (4.4)$$

4.2.4 Determinação da Umidade no Bloco de Gesso

A umidade no bloco de gesso foi calcula pela relação (4.5):

$$\% \text{ umidade} = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 = \frac{mw}{ms} \times 100 \quad (4.5)$$

Em que:

mu, ms e mw, representam respectivamente, massa do bloco de gesso úmido, massa do bloco de gesso seco e massa da água evaporada. Da massa do bloco sensor foram abatidas, a massa da resina (8,726 g) e as massas dos componentes (0,527 g) que formam o circuito elétrico para o bloco sensor, obtendo-se a massa do bloco de gesso.

Esta equação corresponde àquela utilizada no método da estufa descrito no Capítulo 2 na quantificação da umidade em solos com base no peso seco, em que a massa seca vem da secagem da amostra do solo em estufa a 105°C. No caso do bloco sensor, evitou-se colocá-lo na estufa a fim de prever danos no gesso conforme descrito no item 3.3.3. Assim sendo, a massa seca do bloco considerada no cálculo da umidade foi a menor massa seca obtida com a secagem do bloco em temperatura ambiente e com o auxílio de ventilador. A umidade no bloco pode ser calculada desta forma sem prejuízos na formação dos resultados e análise dos mesmos, já que as bases de cálculo obedecem a uma definição.

4.2.5 Características de Resposta do Sensor

Inicialmente o bloco sensor foi submerso em água por 10 minutos, tempo superior aquele em que as bolhas de ar na água deixavam de existir, para atingir a máxima umidade do bloco aplicada ao ensaio. Na seqüência, o bloco sensor foi pesado para obter a massa para o cálculo da umidade, enrolado em papel filme para evitar perder umidade durante os testes, conectado aos recursos de medição e iniciados os testes na seguinte seqüência: acionar o medidor da temperatura ambiente T_a , acionar os medidores da resistência $Rs2$ e tensão V_s , alimentar o circuito que fornece potência a R_s após 10 segundos do início do acionamento dos medidores de $Rs2$ e V_s .

Estas primeiras medições foram realizadas observando os valores da variável $Ght(t)$, fornecidos pelos programas C++ na tela do microcomputador,

com o propósito de buscar um tempo de duração para as medições deste ensaio. O tempo escolhido foi de 40 minutos, acima daquele em que o valor $Ght(t)$ tem a variação no tempo muito pequena podendo ser considerado com estável.

Concluída as medições para este valor de umidade, o bloco foi desconectado dos recursos de medição e pesado, novamente, sem o papel filme.

Estes procedimentos de medição foram repetidos para valores de umidades obtidas com a secagem do bloco em temperatura ambiente e com ventilador, até o valor mínimo de umidade conseguido com esta forma de secagem.

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores de umidade calculados com base na equação (4.5) e considerando a massa do bloco úmido como o massa do bloco após o término de cada procedimento de medição.

Tabela 4.1: Umidades do sensor no ensaio

REF	P1 (g)	P2 (g)	U (%)
Teste 1	47,80	47,60	24,43
Teste 2	47,65	47,53	24,21
Teste 3	46,80	46,78	21,77
Teste 4	45,84	45,78	18,53
Teste 5	44,80	44,75	15,19
Teste 6	43,86	43,83	12,20
Teste 7	42,84	42,81	8,89
Teste 8	41,78	41,76	5,48
Teste 9	40,79	40,78	2,30
Teste 10	40,08	40,07	0,00

REF : Nomeação dada aos testes.
P1: Massa do sensor antes das medições.
P2: Massa do sensor após as medições.
U: Umidade do bloco sensor.

Na Figura 4.2 e na Figura 4.3 são mostradas como exemplo partes dos arquivos de V_s , $Rs2$ e T_a . valores coletados de

```
% Sensor S4
% data: 08/06/2005
% inicio: 09:29
% fim: 10:09
% tempo entre as medidas = 3 s
% massa sensor completo inicial: 47.65g final: 47.53g
% j tem addr22 addr23
001 0003 0.00000 3022.86660
002 0006 0.00000 3021.96460
003 0009 0.00000 3021.07160
004 0012 0.00000 3020.24340
005 0015 -6.95774 3019.43690
006 0018 -6.69073 3018.69650
007 0021 -6.62115 3018.01970
.....
.....
796 2388 -6.20657 2769.21360
797 2391 -6.20645 2769.12840
798 2394 -6.20642 2769.03800
799 2397 -6.20627 2768.94390
800 2400 -6.20623 2768.85480
801 2403 -6.20612 2768.77850
```

j: Número seqüencial da medida.
 tem: Tempo (s).
 addr22: Valor de V_s (mV).
 addr23: Valor de $Rs2$ (Ω).

Figura 4.2: Exemplo do arquivo com os dados das medições de V_s e $Rs2$

WinDMM 300 Temp. 08/06/05					
Sample	Time	Elapsed Time	Function	Unit	Reading
1	09:29:45	0:0 0:08,4	Input Reading	°C	23,5000
2	09:30:15	0:0 0:38,4	Input Reading	°C	23,7000
3	09:30:45	0:0 1:08,4	Input Reading	°C	23,8000
4	09:31:15	0:0 1:38,4	Input Reading	°C	23,9000
5	09:31:45	0:0 2:08,4	Input Reading	°C	24,1000
6	09:32:15	0:0 2:38,4	Input Reading	°C	24,1000
7	09:32:45	0:0 3:08,4	Input Reading	°C	24,3000
8	09:33:15	0:0 3:38,4	Input Reading	°C	24,3000
.....					
76	10:07:14	0:37:38,4	Input Reading	°C	27,3000
77	10:07:44	0:38:08,4	Input Reading	°C	27,4000
78	10:08:14	0:38:38,4	Input Reading	°C	27,4000
79	10:08:44	0:39:08,4	Input Reading	°C	27,4000
80	10:09:14	0:39:38,4	Input Reading	°C	27,5000
81	10:09:44	0:40:08,4	Input Reading	°C	27,5000
82	10:10:14	0:40:18,0	Input Reading	°C	26,6000

Figura 4.3: Exemplo do arquivo com os dados das medições de T_a

De posse dos dados coletados na medição, foram obtidos para cada valor de umidade do bloco, os gráficos que relacionam a variação de G_{ht} no tempo, a variação da temperatura do bloco sensor com o tempo e a variação no tempo da temperatura ambiente próxima ao bloco sensor. Esses gráficos são mostrados na Figura 4.4, na Figura 4.5 e na Figura 4.6.

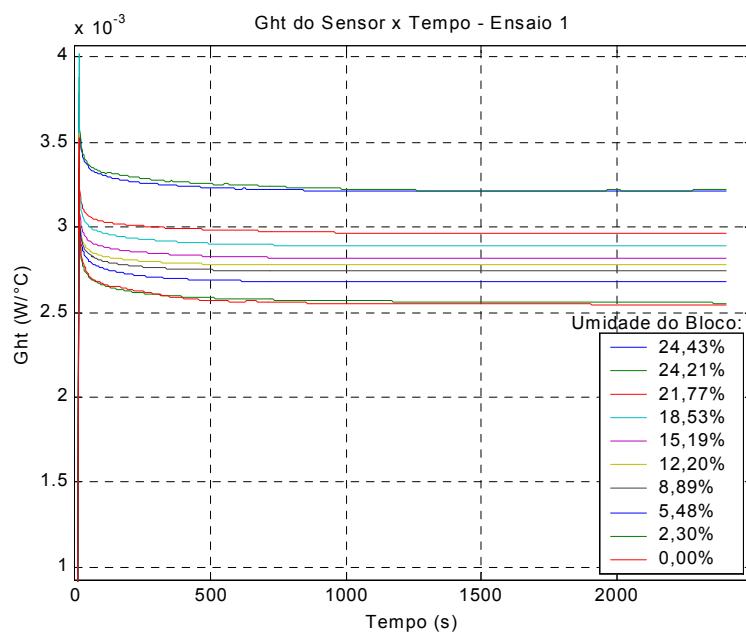


Figura 4.4: G_{ht} do sensor versus tempo para valores de umidade do bloco

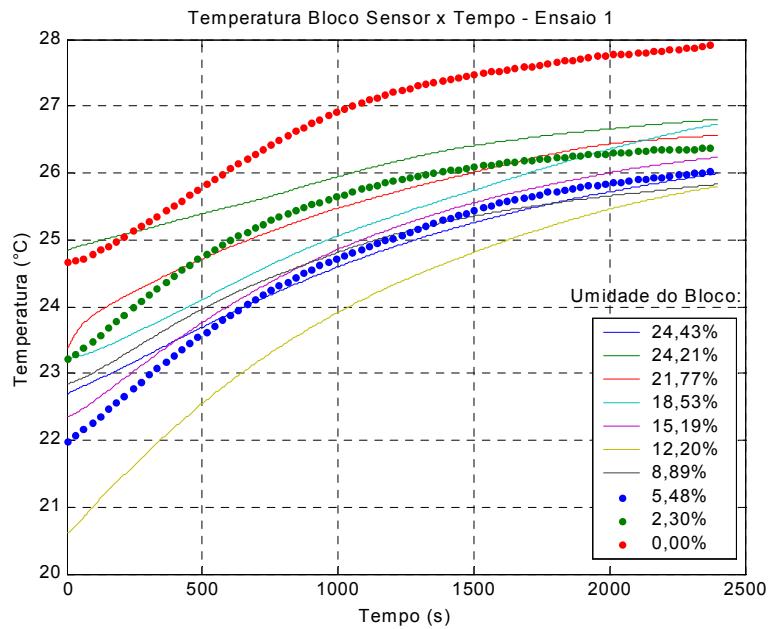


Figura 4.5: Temperatura no bloco sensor em função do tempo para valores de umidade do bloco

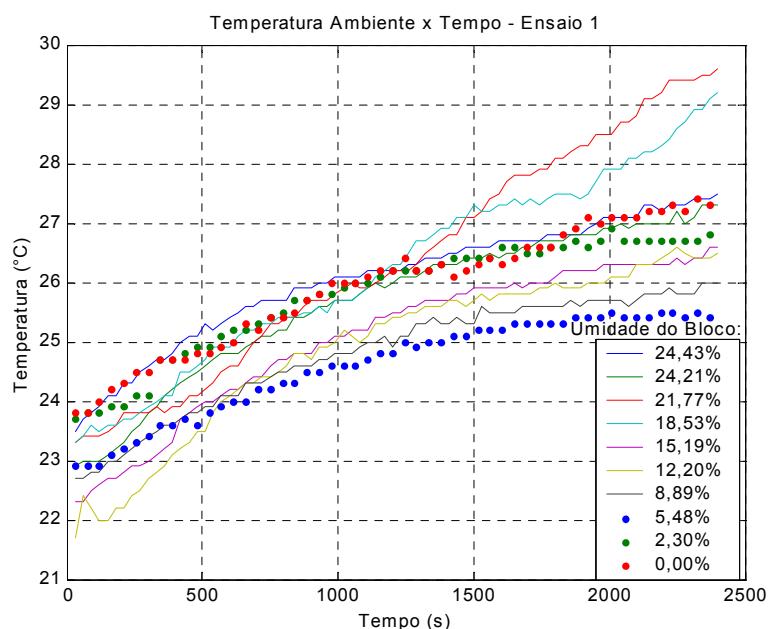


Figura 4.6: Temperatura ambiente em função do tempo para valores de umidade do bloco

Com os dados obtidos foi possível buscar a relação entre a grandeza G_{ht} e a umidade no bloco, ou seja, obter uma relação entre estas duas grandezas que proporcione, a partir da grandeza G_{ht} , chegar ao valor da umidade no bloco. Para isso, foram plotados os dados de G_{ht} versus umidade e a partir deles encontrada uma curva de aproximação. Nos gráficos da Figura 4.7 estão as curvas de aproximação para os tempos de 3min, 10min, 20min, 30min e 40min, computados do início da alimentação do circuito elétrico para o sensor. Os pontos representam os dados encontrados nas medições, e as linhas cheias, as aproximações com polinômios do 4º grau obtidos com recursos do MabLab R12.

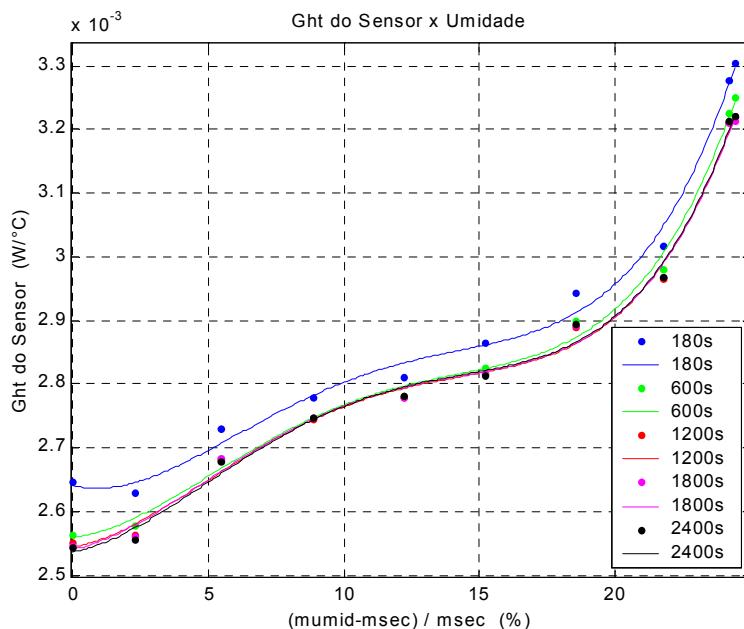
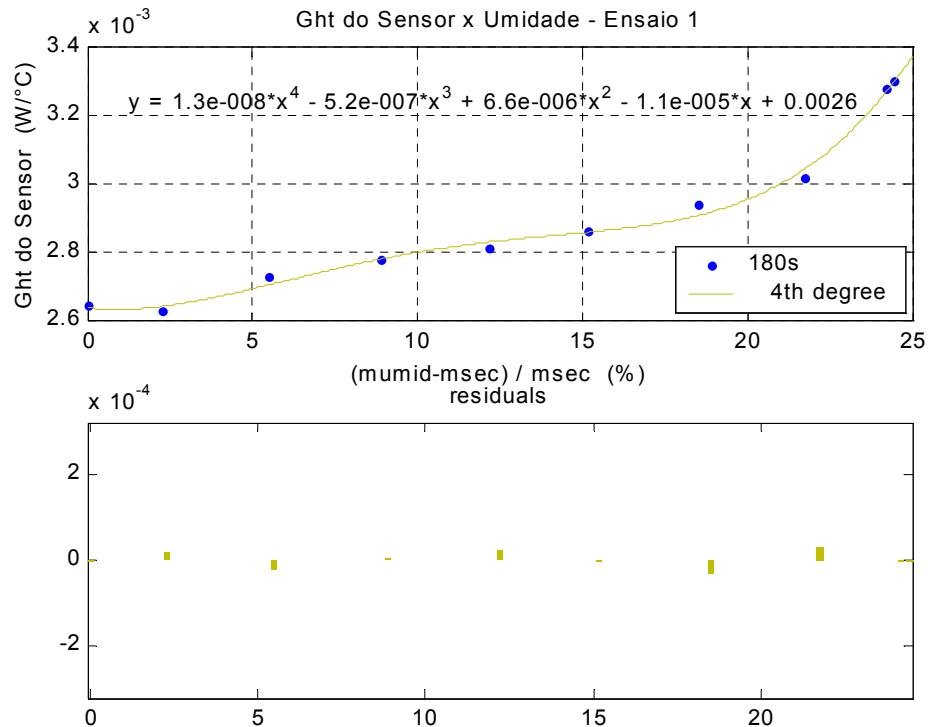


Figura 4.7: G_{ht} versus Umidade para diferentes tempos de medição

Do gráfico da Figura 4.7 foram escolhidas as curvas a 180s e 1200s para apresentar mais detalhes das informações de aproximação à função polinomial. Na Figura 4.8 e na Figura 4.9 são mostrados as curvas, as equações e os resíduos em gráficos de barra. Os resíduos indicam as diferenças entre os valores ajustados pelas curvas e os medidos.



$$y = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$$

Coefficients:

$$p1 = 1.2818e-008$$

$$p2 = -5.2031e-007$$

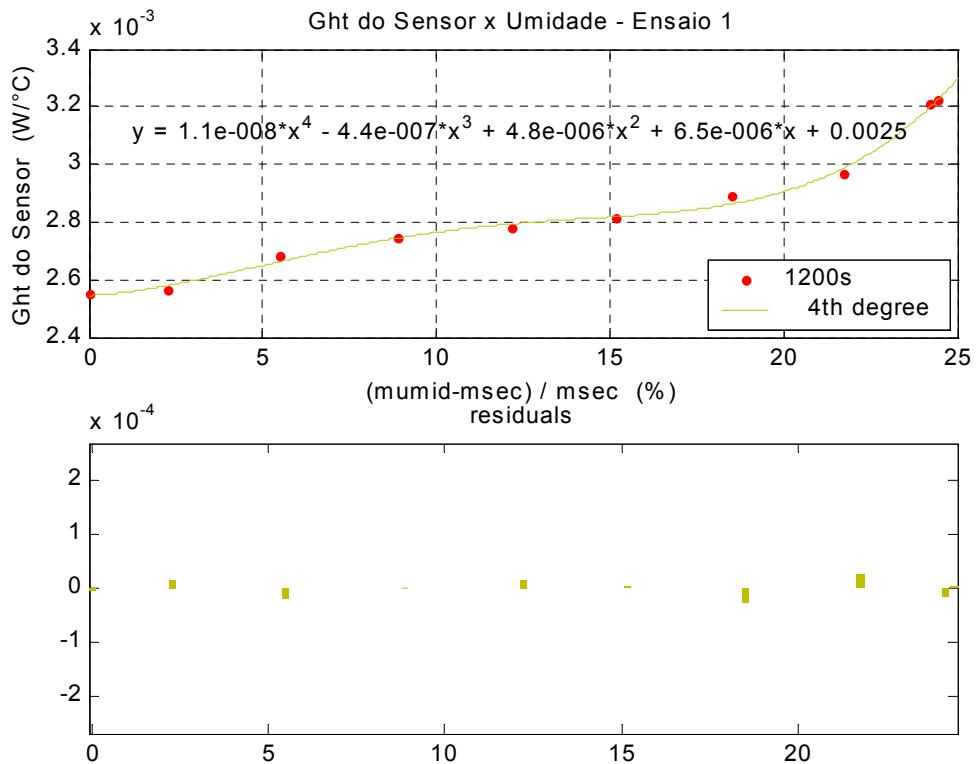
$$p3 = 6.596e-006$$

$$p4 = -1.0529e-005$$

$$p5 = 0.0026408$$

$$\text{Norm of residuals} = 5.8319e-005$$

Figura 4.8: Ght versus Umidade a 180s



$$y = p1*x^4 + p2*x^3 + p3*x^2 + p4*x + p5$$

Coefficients:

$$p1 = 1.1359e-008$$

$$p2 = -4.3785e-007$$

$$p3 = 4.7885e-006$$

$$p4 = 6.5265e-006$$

$$p5 = 0.0025446$$

$$\text{Norm of residuals} = 4.9205e-005$$

Figura 4.9: Ght versus Umidade a 1200s

4.2.6 Comentários

Nas hipóteses assumidas para montagem do sistema térmico (item 3.2.2), a temperatura T_s do termistor S1 passa por salto de sua condição inicial para seu valor constante de operação. Com o auxílio do LabView, uma placa de aquisição de dados e do MatLab, foi medido o tempo entre a alimentação do circuito elétrico para o sensor e a estabilização da temperatura T_s , para o bloco sensor na condição de umidade mais alta e na mais baixa. Ambos valores encontrados foram próximos de cinco segundos (Figura 4.10 e Figura 4.11), muito pequenos quando comparados com os tempos para obtenção da grandeza Ght . O que confirma a hipótese assumida.

Na tomada da temperatura ambiente a ponta de prova do medidor de temperatura foi colocada muito próxima ao sensor, em contato com a superfície do bloco de gesso, assim, nos gráficos da Figura 4.6, os valores de temperatura iniciam com valores próximos a temperatura do ambiente e aumentam sob a ação da temperatura do bloco, uma vez que a do ambiente mantém-se com baixa flutuação.

Observa-se através das curvas da Figura 4.4 de variação de Ght no tempo, um comportamento que corresponde ao modelo descrito no Capítulo 3. Analisando o circuito elétrico (Figura 3.2) análogo ao sistema térmico, assim que a fonte de corrente deste circuito é ativada, o que corresponde ativar o circuito elétrico para o sensor (Figura 3.4) e fornecer potência elétrica ao termistor S1, a grandeza $Ght(t)$ medida assume seu valor máximo e diminui com o aumento de carga nos capacitores (Figura 3.2) até alcançar um regime que pode ser tratado como estável quando as variações de $Ght(t)$ no tempo tornam-se relativamente pequenas. Outro aspecto que valida o modelo é a produção de um resultado funcional com a possibilidade mostrada de tradução, por uma expressão matemática, da umidade no meio pela grandeza Ght .

O objetivo de melhorar a precisão da curva de relação Ght x Umidade foge do propósito deste ensaio, que foi o de comprovar a validade do modelo. Apesar de que esta precisão possa vir a ser alcançada com os trabalhos apropriados de

calibração do sensor, nos quais deverão ser certamente considerada a ação da temperatura ambiente.

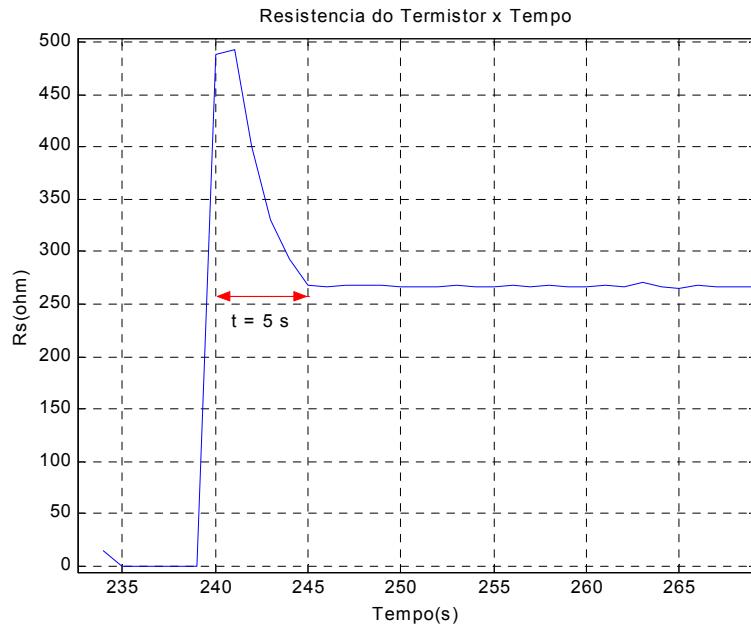


Figura 4.10: Rs versus Tempo com Bloco Sensor Seco

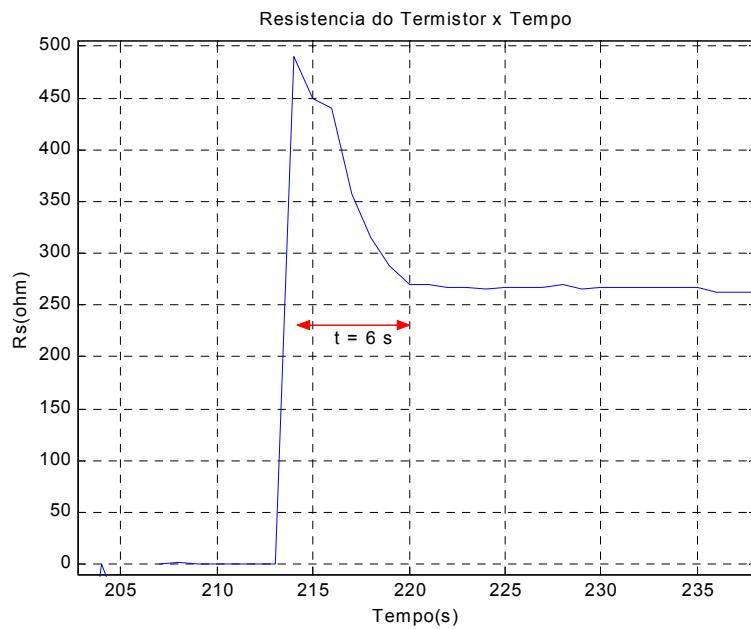


Figura 4.11: Rs versus Tempo com Bloco Sensor Saturado

4.3 Ensaio 2 – Solo A

4.3.1 Objetivo

Confirmada a validade do modelo com o ensaio 1, onde a umidade contida no bloco sensor foi traduzida pela a informação da grandeza G_{ht} que em regime permanente representa a condutância térmica entre os dois pontos no bloco, o objetivo do ensaio 2 é comprovar a possibilidade de uso do sensor na determinação da umidade do solo. Para isso, foram obtidas as características da grandeza G_{ht} versus umidade do solo realizando medições com o sensor inserido em amostras de um solo de propriedades (Anexo II) e umidades conhecidas. Para observar o comportamento da variação da condutância térmica no bloco sensor com a temperatura, as medições foram realizadas com o solo mantido em câmara climatizada a 25°C e 35°C, com umidade relativa do ar de 70%.

4.3.2 Preparação do Solo para o Ensaio

O solo foi espalhado em bandejas e deixado secar na sombra em temperatura ambiente com sua umidade monitorada visualmente até permitir ser quarteado e passado em peneira nº4. Após ser peneirado, foi devolvido às bandejas para continuar secando, agora com sua umidade monitorada por medição até atingir a estabilidade. Dessa forma, foi obtido o solo mais seco para uso neste ensaio. Todo este processo durou 20 dias.

Deste solo seco foram retiradas de bandejas diferentes porções de 4 kg e acondicionadas em sacos plásticos fechados para manter a umidade alcançada na secagem. A partir dessas porções foram obtidos os solos utilizados nas montagens dos corpos de prova com as umidades desejadas, de acordo com o seguinte procedimento:

- Separar um dos sacos plásticos com a porção de 4 kg de solo;
- Determinar a umidade do solo contido neste saco;
- Calcular a quantidade de água destilada a ser acrescentada ao solo do saco para se chegar à umidade desejada;

- Despejar o solo do saco numa bandeja e borifar uniformemente a água misturando-a com o solo;
- Devolver a mistura de solo úmido ao saco plástico e fechá-lo, mantendo nesta condição por mais de 12 h para obter melhor homogeneização da umidade no solo;
- Determinar a umidade do solo, contido no saco, imediatamente antes de montar o corpo de prova;
- Etiquetar o saco com as informações de umidade, data e hora.

Para determinar umidade do solo contido no saco foram retiradas duas amostras deste solo e colocadas em recipientes de porcelana, de pesos conhecidos, com dimensões de 6,5 cm de diâmetro médio e 4,0 cm de altura. De posse dos pesos dos recipientes vazios, dos pesos dos recipientes com o solo úmido e dos recipientes com o solo seco, foi aplicada a equação (4.6) e tomada a média aritmética entre os valores de umidades encontrados.

$$\% \text{ umidade} = \frac{m_{ru} - m_{rs}}{m_{rs} - m_r} \times 100 = \frac{mw}{ms} \times 100 \quad (4.6)$$

Sendo:

- m_{ru} a massa do recipiente com a amostra de solo cuja umidade se quer determinar;
- m_{rs} a massa do recipiente com a amostra de solo após a secagem;
- m_r a massa do recipiente;
- mw a massa da água perdida da amostra de solo com a secagem, isto é, massa da água contida na amostra de solo úmido;
- ms a massa da amostra de solo após a secagem.

A equação (4.6) fornece o teor de umidade no solo com base no peso seco. Para ter o valor de m_{rs} , foi aquecido em forno de microondas durante 12 minutos, deixado esfriar coberto e pesado, o recipiente com a amostra de solo. Considerando a baixa presença de mica e fosfato neste solo, para proporcionar

maior rapidez na secagem da amostra de solo, consequentemente maior agilidade na obtenção dos resultados de umidade, a equipe do laboratório de Geotecnia da UFBA recomendou o uso do forno de microondas. Recomendou também considerando sua experiência, para alcançar teores de umidade muito próximos aos valores encontrados com o uso estufa padrão a 105°C, secagem por 12 minutos para o tipo de forno, o tipo de solo, a potência do forno e a quantidade de solo das amostras, utilizados.

Como ilustração são mostrados na Tabela 4.2 os valores das massas mr , mru e mrs aplicados no cálculo de um dos valores de umidade utilizados no ensaio.

Tabela 4.2: Massas mr , mru e mrs das amostras de solo

Amostra	mr	mru	mrs
1	132,44g	183,15g	171,51g
2	133,61g	133,61g	177,16g

Substituindo na equação (4.6) os valores da Tabela 4.2, foram obtidos os valores de umidade das amostras 1 e 2, e o valor de umidade do solo contido no saco plástico:

$$\% \text{ umidade 1} = \frac{183,15 - 171,51}{171,51 - 132,44} \times 100 = \frac{12,96}{39,07} \times 100 = 29,79\%$$

$$\% \text{ umidade 2} = \frac{190,12 - 177,16}{177,16 - 133,61} \times 100 = \frac{12,96}{43,55} \times 100 = 29,75\%$$

$$\% \text{ umidade} = \frac{\% \text{ umidade 1} + \% \text{ umidade 2}}{2} = 29,78\%$$

Para calcular o volume de água a ser acrescentado na porção de solo contida no saco plástico, elevando para o valor desejado a umidade deste solo, a seguinte expressão (4.7) foi aplicada considerando a massa específica da água igual a 1g/cm^3 :

$$V_{ws} = \frac{Ps}{100 + w1} \times (w2 - w1) \quad (4.7)$$

Em que:

- V_{ws} é o volume de água a ser acrescentado (cm^3);
- Ps é massa do solo contido no saco plástico (g);
- $w1$ é o teor de umidade do solo contido no saco plástico (%);
- $w2$ é o teor de umidade do solo a ser alcançado com acréscimo de água (%).

Um exemplo de cálculo da quantidade de água a ser acrescentada para aumentar de 8,00% para 20,00% a umidade na porção 4.048,00g de solo contida no saco plástico:

$$V_{ws} = \frac{4.098,0}{100 + 8,00} \times (20,00 - 8,00) = 455,33cm^3$$

4.3.3 Recursos Utilizados no Ensaio

Para permitir a realização deste ensaio foram aplicados os seguintes recursos materiais:

- Bloco Sensor. No bloco sensor utilizado no ensaio 1 (Figura 3.3), foi feita uma adaptação utilizando silicone e um cabo, para estender para fora do solo os terminais de conexão com o circuito de fornecimento de potência elétrica ao termistor S1 e com o medidor da resistência Rs2. Na Figura 4.12 é mostrada a foto do bloco sensor com a adaptação.
- Circuito Elétrico para o Sensor de Umidade.
- Fonte de Alimentação Minipa modelo - MPS 3003- Power Supply. Foram utilizadas duas fontes de alimentação para fornecer tensão DC de +18 e -18VDC ao circuito elétrico para o sensor de umidade.

- Multímetro Digital Agilent – 34401A - 61/2 Digital Multimeter. Foram utilizados dois multímetros digitais. Um para coletar as informações da tensão elétrica V_s (Ver Figura 3.4) medida no termistor S1 (Ver Figura 3.3). O outro para coletar as informações da resistência elétrica do termistor S2 (Ver Figura 3.3).
- Balança Marte. Utilizada para pesar o bloco sensor e os recipientes e as amostras de solo utilizados na medida do teor de umidade do solo
- Balança Gehaka – BG 2000. Foi utilizada para pesar o solo contido do saco plástico e o corpo de prova.
- Forno de Microondas Sharp – Carouseu II. Utilizado para secar as amostras de solo nos procedimentos de medida do teor de umidade dessas amostras.
- Multiteste APPA – ET 2800. Foi utilizado para medir, em intervalos de 30 segundos, a temperatura no solo em uma posição próxima ao bloco sensor.
- Câmara de Climatização Feutron KPK-200. Submete o corpo de prova a temperaturas e umidades relativas do ar constantes.
- Rotinas desenvolvidas em C++. Essas rotinas tratam as informações coletadas com os multímetros digitais da Agilent, fornecendo os relatórios das medições, a cada 3 segundos, dos valores de tensão V_s (Ver Figura 3.4) e resistência elétrica do termistor S2 (Ver Figura 3.3).
- Rotinas desenvolvidas em MatLab R12. A partir dos dados coletados, essas rotinas calculam os valores da grandeza $Ght(t)$ e da temperatura no termistor S2 (Ver Figura 3.3), utilizando as mesmas equações do ensaio 1. Traçam os gráficos que relacionam as grandezas $Ght(t)$, temperatura, umidade e tempo. Aproximam os valores de $Ght(t)$ versus os de umidade a expressões matemáticas (um polinômio do 4º grau) que traduzem a relação entre esses valores.
- Microcomputador. Suporta os programas e Softwares que possibilitam as coletas e tratamentos dos dados.



Figura 4.12: Foto do bloco sensor com a adaptação

O esquema da inter-relação entre si dos recursos do ensaio é mostrado na Figura 4.13.

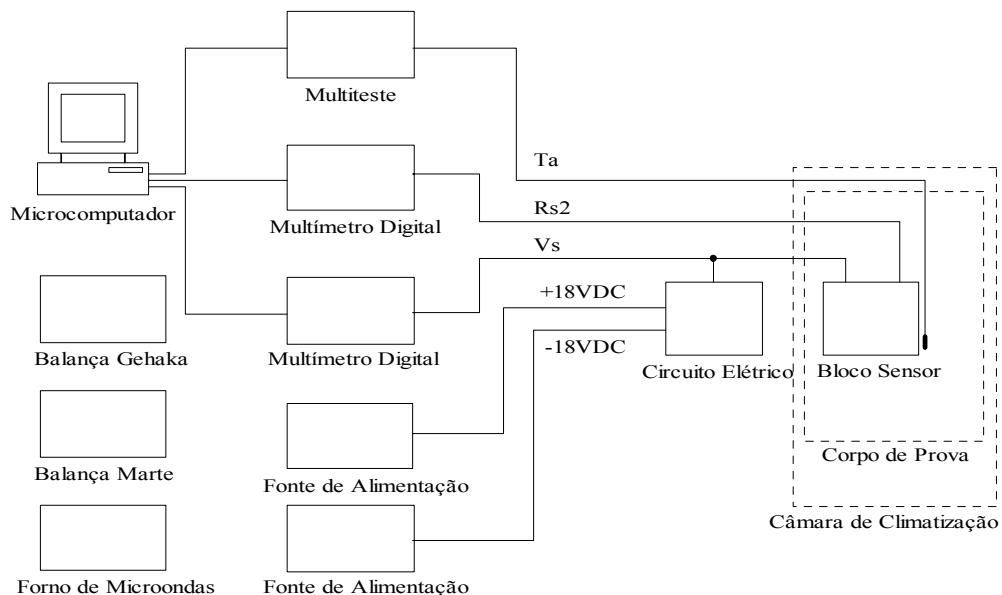


Figura 4.13: Esquema de inter-relação recursos aplicados ao ensaio 2

4.3.4 Realização das Medições

No ensaio 1 as medições foram realizadas para diversos teores de umidade do bloco sensor com ele fora do solo, envolto em papel filme, no ar e na temperatura ambiente. Neste segundo ensaio o bloco sensor foi inserido numa amostra de solo e foram realizadas as medições de respostas do sensor para

teores de umidade do solo mantido sob ação de umidade relativa do ar de 70% e temperaturas de 25°C e 35°C.

Para cada valor de umidade do solo utilizado nas medições, foi montado um corpo de prova para simular o sensor de umidade dentro do solo em campo e permitir a realização dos testes em laboratório. O corpo de prova tem seu esquema mostrado na Figura 4.14.e é constituído por uma vasilha cilíndrica de 13 cm de altura e 14 cm de diâmetro (de alumínio para melhor troca de calor com o ambiente), pelo bloco sensor, pelo solo e pela ponta de prova de medição de temperatura do solo.

O ensaio iniciou com as medições para o solo na condição de mais seco alcançado na sua preparação e para o bloco sensor seco na temperatura ambiente no mesmo tempo de secagem do solo.

Para cada valor de umidade de solo, as ações de montagem dos corpos de prova e de medições ocorreram conforme os seguintes procedimentos:

- Pesar o bloco sensor, o recipiente de alumínio e a ponta de prova do medidor de temperatura do solo;
- Colocar no recipiente de alumínio, em camadas de dois em dois centímetros, o solo de umidade conhecida, compactando-o as mãos até alcançar quatro centímetros;
- Colocar, centralizado na vasilha de alumínio, o bloco sensor com leve pressão sobre a camada superior de solo;
- Continuar colocando no recipiente o solo em camadas de dois centímetros e pressionando o solo com a mão, até completar o recipiente;
- Inserir a ponta de prova no solo encostada próxima à superfície do bloco sensor;
- Pesar o corpo de prova;
- Cobrir o recipiente do corpo de prova com papel filme;

- Manter o corpo de prova na temperatura ambiente, entre 20 e 24 horas, para equilíbrio de umidade entre solo e bloco;
- Retirar o papel filme que cobre o corpo de prova. Pesar o corpo de prova e levá-lo a câmara climatização, a 25°C de temperatura e 70% de umidade relativa do ar, acompanhado as medidas de temperaturas do bloco e do solo até alcançar (cerca de quatro horas) as temperaturas de início das medições;
- Iniciar as medições a 25°C;
- Concluídas as medições a 25°C, retirar da câmara climatização o corpo de prova, pesá-lo e devolvê-lo a câmara de climatização a 35°C e 70% de umidade relativa do ar, acompanhado as medidas das temperaturas do bloco e do solo;
- Alcançando (em aproximadamente sete horas) as temperaturas do bloco e solo para os testes, iniciar as medições;
- Concluídas as medições a 35°C, pesar o corpo de prova, desmontar o corpo de prova, devolver o solo para o saco plástico de onde foi retirado e pesar o bloco sensor, a ponta de prova e o recipiente.

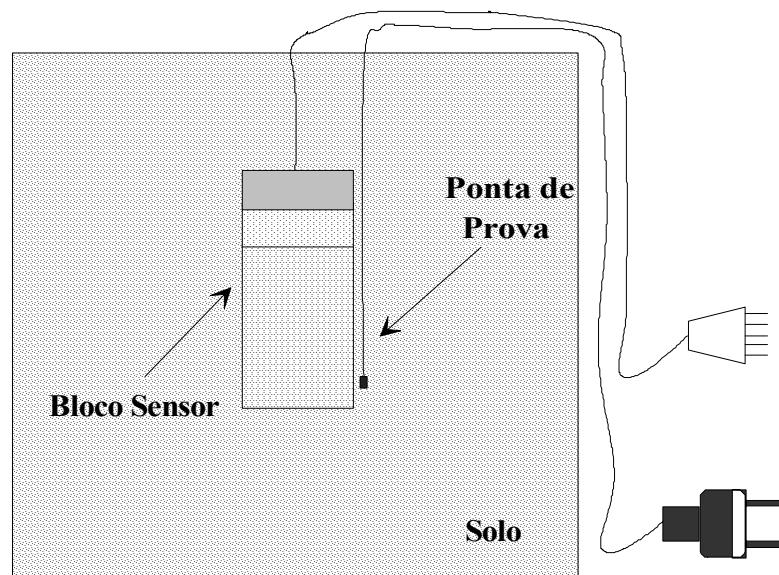


Figura 4.14: Esquema do corpo de prova

4.3.5 Resultado das Medições

Os resultados das medições realizadas caracterizam o sensor de umidade para o tipo de solo e temperaturas ambientes utilizados no ensaio. Na Figura 4.15 e na Figura 4.16 estão mostradas, para as temperaturas ambientes de 25°C e 35°C do ensaio, as curvas de resposta para o sensor de umidade relacionando a grandeza G_{ht} com o tempo para cada valor de umidade do solo. A instabilidade registrada em algumas curvas da Figura 4.15 foi provocada por falha de conexão entre os terminais do circuito elétrico para o sensor de umidade e do multímetro de medição. Optou-se em manter estas medidas, evitando repeti-las, pois nelas contêm as informações de G_{ht} que podem ser aplicadas sem prejuízos aos resultados.

Os valores de umidade considerados na apresentação dos resultados precisaram de adequação para melhor representar a umidade do solo envolta do bloco sensor, tendo em vista que os corpos de prova ficaram descobertos durante o processo de medição, ocorrendo perda de umidade. Na desmontagem dos corpos de prova pôde ser observada perda de umidade maior na camada da superfície do solo e menor, praticamente sem alteração, nas camadas inferiores. Apesar dessa falta de uniformidade na distribuição da umidade, um valor próximo e representativo da umidade pode ser encontrado, com auxílio da equação (4.7), a partir da umidade e da massa do solo contido no corpo de prova na sua montagem e das massas do solo após as medições em 25°C e 35°C. A seguir é mostrado um exemplo dessa adequação para o valor mais alto de umidade no ensaio fornecendo esclarecimento adicional e referência quanto à ordem de grandeza dos valores aplicados no cálculo do ajuste e das massas dos componentes do corpo de prova.

Da equação (4.7) foi obtida a equação (4.8) que expressa a umidade corrigida (w_2) conhecendo-se a massa (P_{s1}) e umidade (w_1) do solo utilizado na montagem do corpo de prova e a massa (P_{s2}) do solo no corpo de prova após ter perdido umidade durante os procedimentos de testes.

$$w2 = \frac{Ps2 \times (100 + w1) - 100 \times Ps1}{100 \times Ps1} \quad (4.8)$$

Os valores de massa encontrados para a mais alta umidade aplicada ao ensaio foram:

Massa do corpo de prova após a montagem: 3.334,9 g.

Massa do bloco sensor antes da montagem do corpo de prova: 52,14 g.

Massa da vasilha de alumínio do corpo de prova: 106,75 g.

Massa da ponta de prova do medidor de temperatura: 21,86 g.

Massa do corpo de prova após medição em 25°C: 3.319,8 g.

Massa do corpo de prova após medição em 35°C: 3.278,5 g.

Massa do bloco sensor após medição em 35°C: 57,68 g

Assim, aplicando a equação (4.8), a umidade corrigida para o solo contido no corpo de prova após os testes em 25°C, ficou:

$$Ps1 = 3.334,9 - 106,75 - 21,86 - 52,14 = 3.154,15g$$

$$Ps2 = 3.319,8 - 106,75 - 21,86 - 57,68 = 3.133,51g$$

$$w2 = \frac{3.133,51 \times (100 + 37,44) - 100 \times 3.154,15}{100 \times 3.154,15} = 36,54\%$$

E a umidade corrigida para o solo contido no corpo de prova após os testes em 35°C:

$$Ps1 = 3.334,9 - 106,75 - 21,86 - 52,14 = 3.154,15g$$

$$Ps2 = 3.278,5 - 106,75 - 21,86 - 57,68 = 3.092,21g$$

$$w2 = \frac{3.092,21 \times (100 + 37,44) - 100 \times 3.154,15}{100 \times 3.154,15} = 34,74\%$$

Na Tabela 4.3 estão mostrados, para cada corpo de prova aplicado ao ensaio, os valores corrigidos das umidades. Para o corpo de prova 3 a medição em 35°C foi desconsiderada por ter o medidor apresentado falha durante a medição.

Tabela 4.3: Umidades corrigidas do solo no corpo de prova – Ensaio 2

Corpo de Prova	Umidade do solo usado na montagem do corpo de prova (%)	Umidade corrigida solo para medições em 25°C (%)	Umidade corrigida solo para medições em 35°C (%)
1	7,23	7,10	6,95
2	10,04	9,82	9,48
3	13,00	12,65	-
4	13,51	13,23	12,69
5	18,69	18,17	17,55
6	23,14	22,57	21,55
7	28,06	27,48	25,95
8	30,62	30,57	28,06
9	34,26	33,32	32,04
10	37,44	36,54	34,74

Na Figura 4.17 e na Figura 4.18, para as temperaturas ambientes de 25°C e 35°C, estão mostradas as curvas ajustadas de respostas da grandeza Ght em função da umidade no solo para os tempos de medição de 180s, 600s, 1800s e 2400s, contados a partir da alimentação circuito elétrico para o sensor. Separadamente para cada um desses tempos de medição, na Figura 4.19, na Figura 4.20, na Figura 4.21 e na Figura 4.22 estão mostradas as curvas ajustadas de respostas nas temperaturas ambiente de 25°C e 35°C. As curvas ajustadas foram obtidas por aproximação a um polinômio do 4º grau utilizando recursos do MatLab R12.

Na Figura 4.23 e na Figura 4.24 estão os detalhes da aproximação aos polinômios do 4º grau das curvas da grandeza G_{ht} versus umidade para os tempos de 180s e 1800s.

Os gráficos da Figura 4.25, da Figura 4.26, da Figura 4.27 e da Figura 4.28, mostram os resultados das medições das temperaturas no bloco obtidas através do termistor S2. e das temperaturas no solo próximas ao bloco. Para as temperaturas no solo a apresentação dos gráficos é parcial para os valores de umidade, permitindo melhor visualização e entendimento da variação destas temperaturas no tempo.

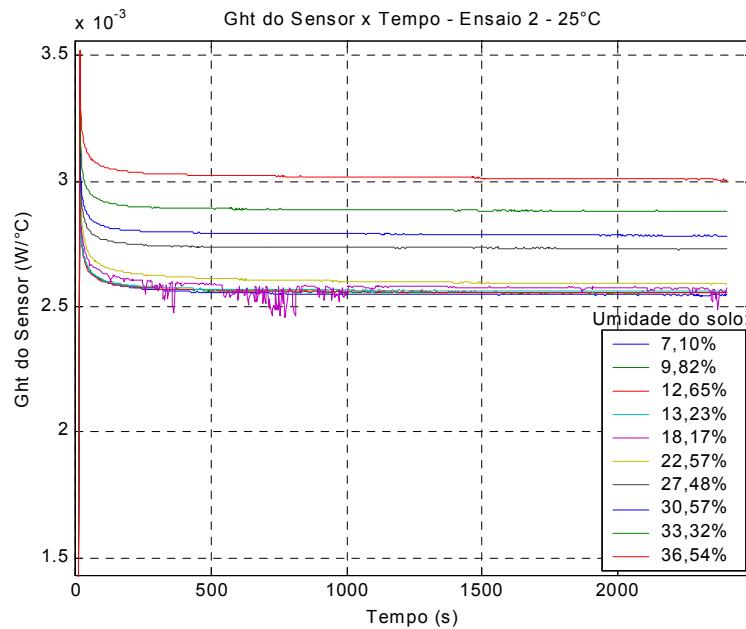


Figura 4.15: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 25°C

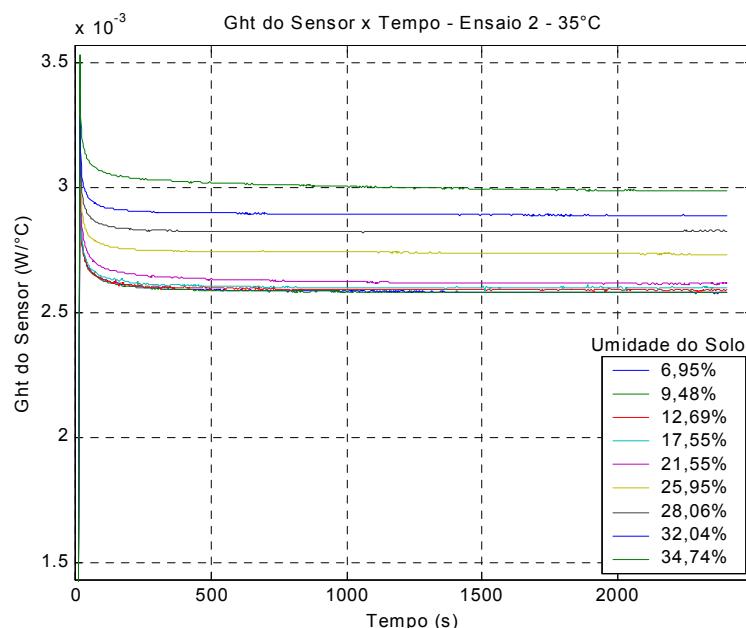


Figura 4.16: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 35°C

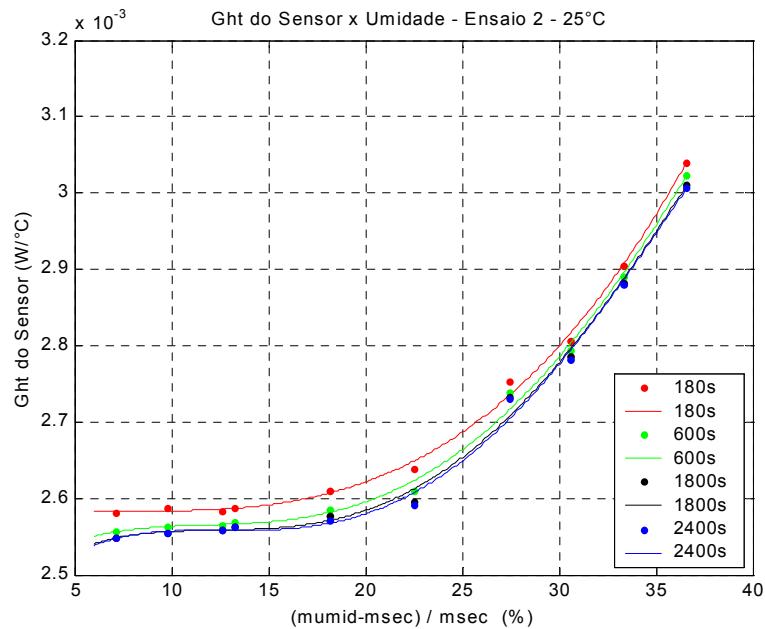


Figura 4.17: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s, 1800s e 2400s na temperatura ambiente de 25°C

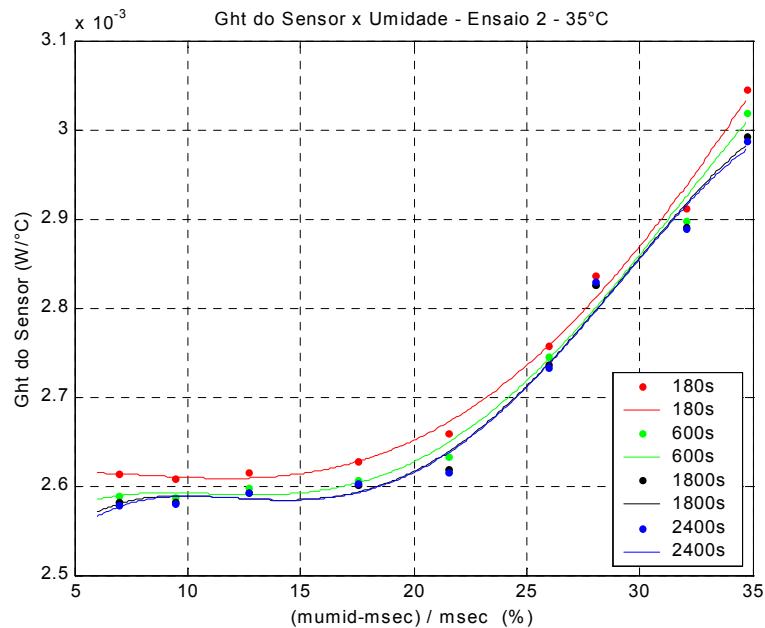


Figura 4.18: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s, 1800s e 2400s na temperatura ambiente de 35°C

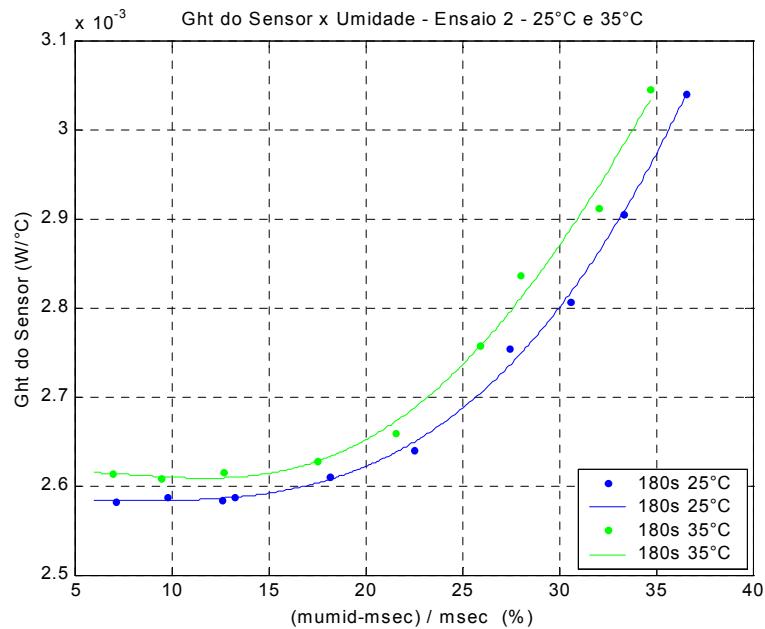


Figura 4.19: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 180s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C

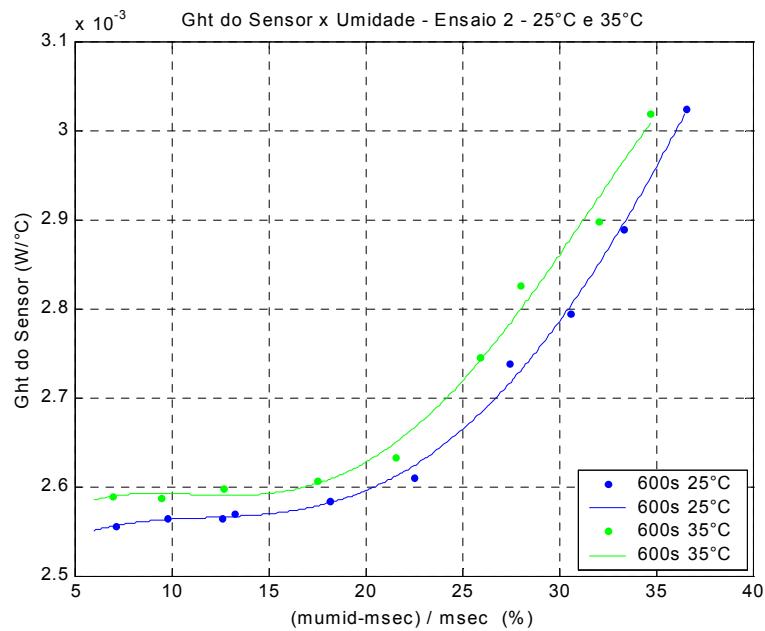


Figura 4.20: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 600s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C

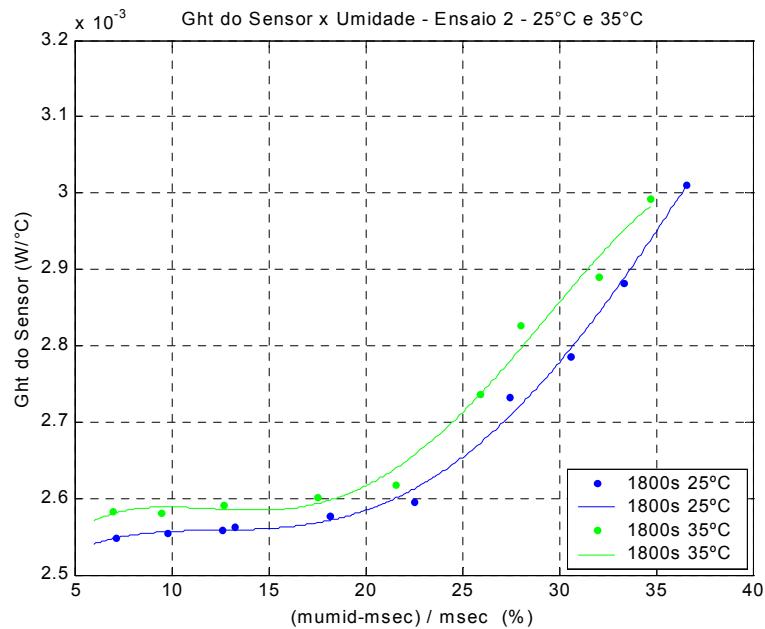


Figura 4.21: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 1800s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C

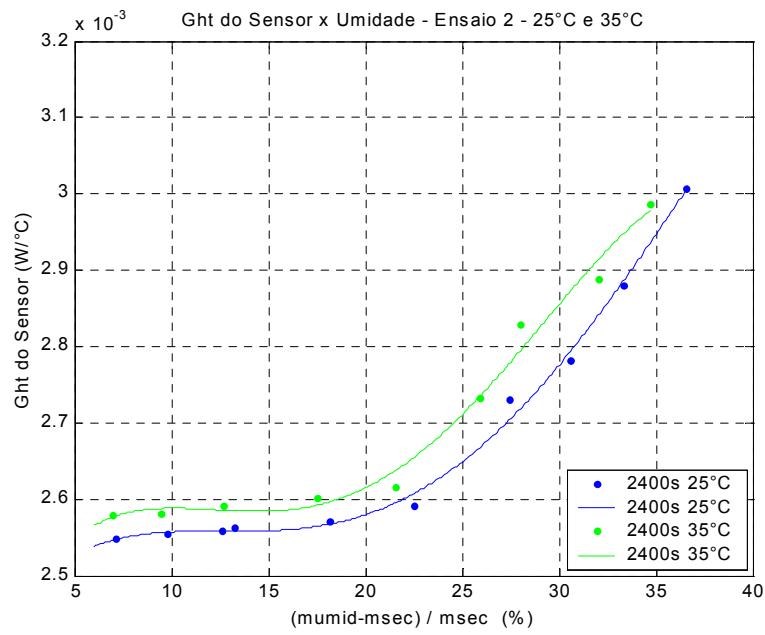


Figura 4.22: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 2400s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C

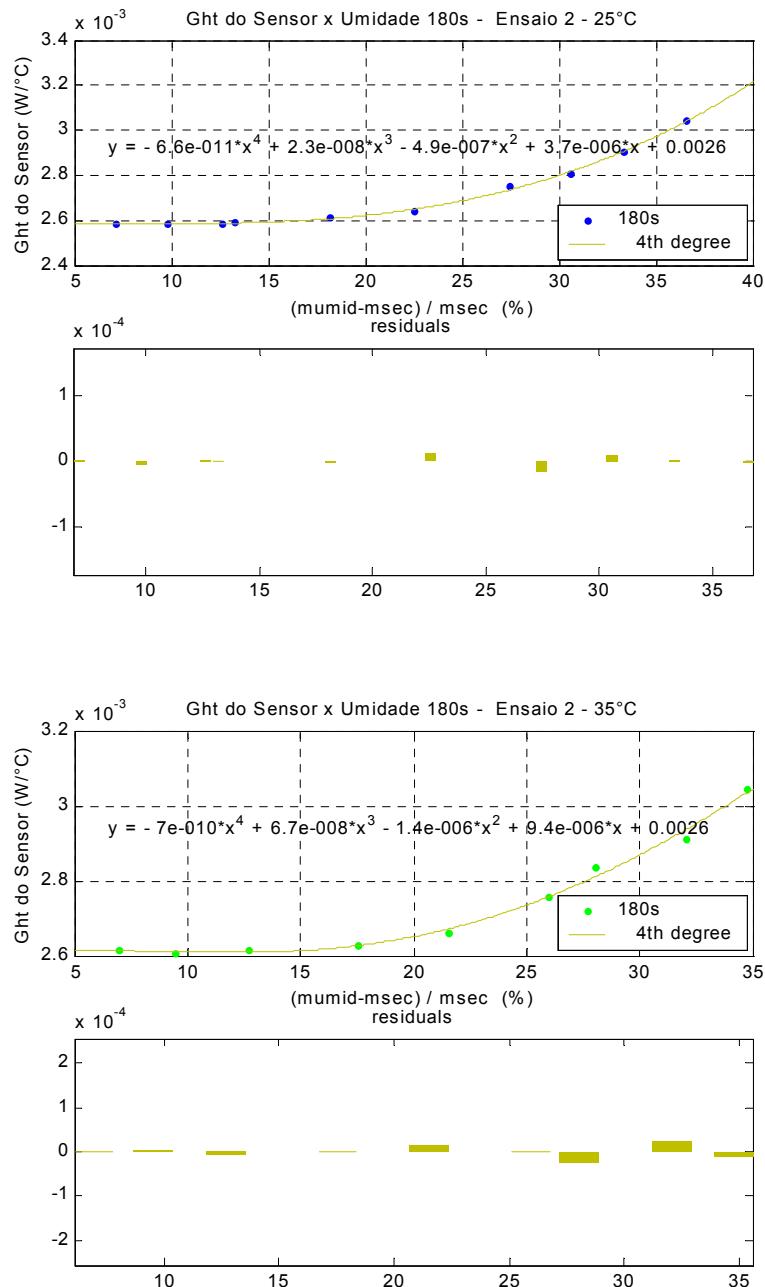


Figura 4.23: Aproximação $Ght(180)$ do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C

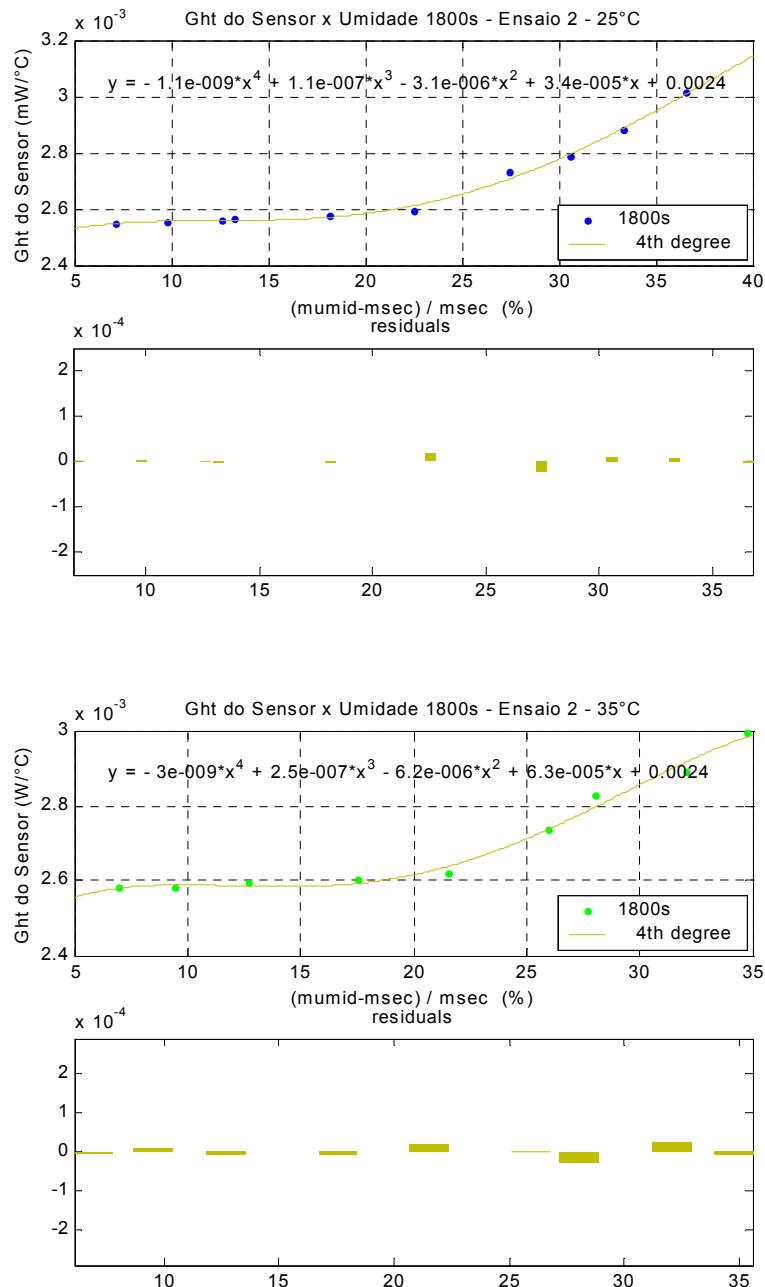


Figura 4.24: Aproximação $Ght(1800)$ do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de $25^\circ C$ e $35^\circ C$

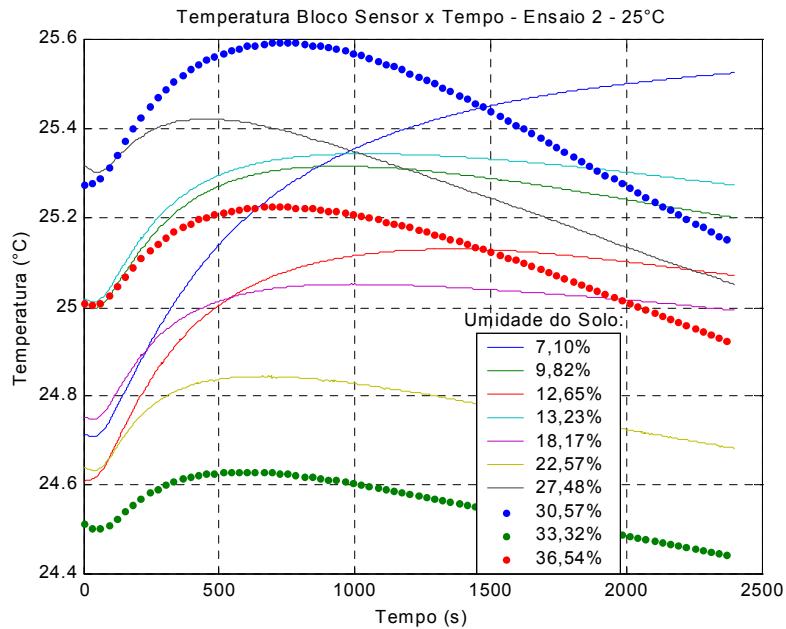


Figura 4.25: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 25°C

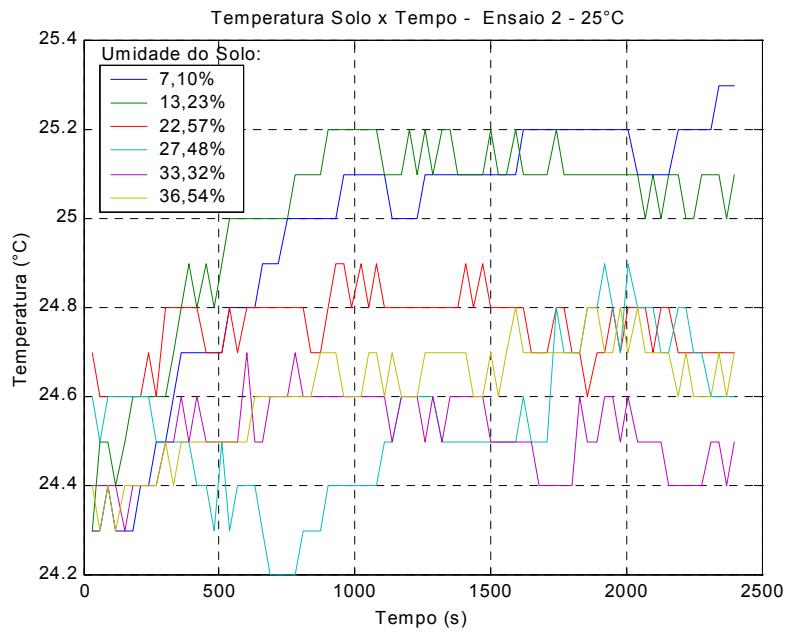


Figura 4.26: Temperatura no solo versus tempo para alguns valores de umidade na temperatura ambiente de 25°C

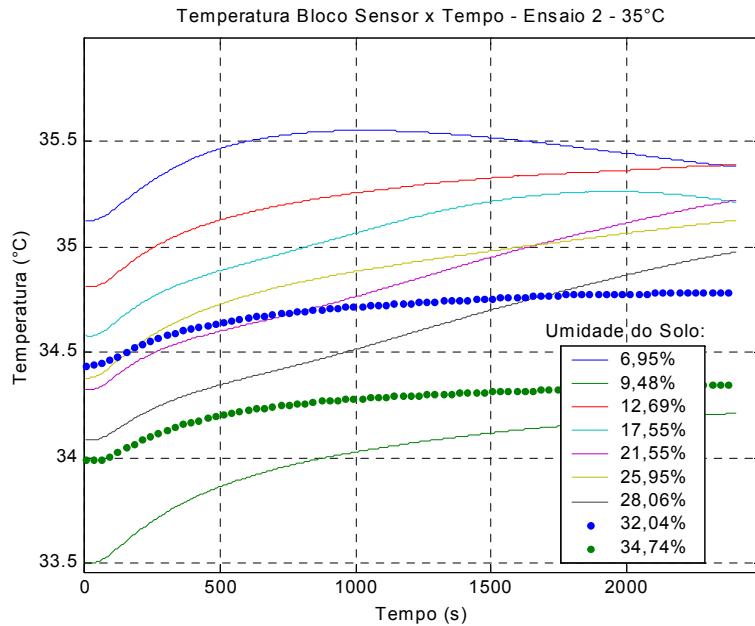


Figura 4.27: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 35°C

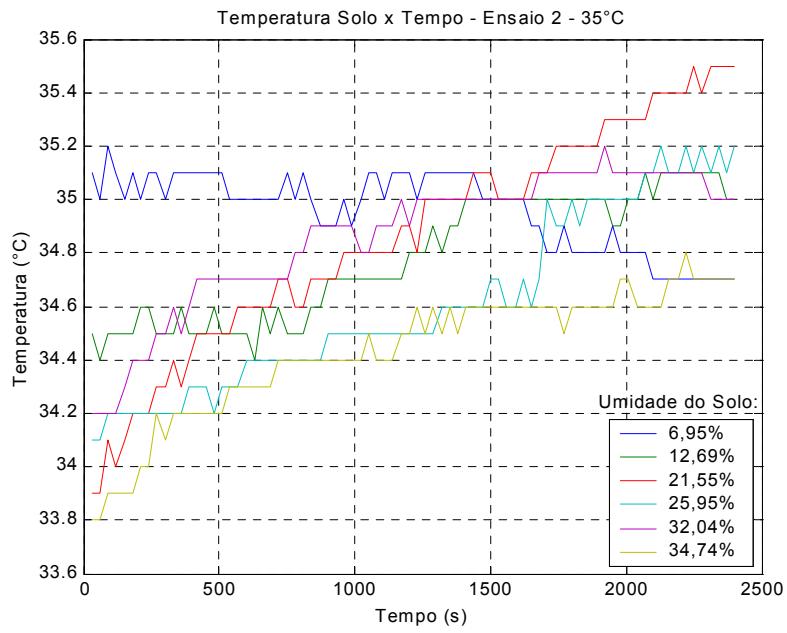


Figura 4.28: Temperatura no solo versus tempo para alguns valores de umidade na temperatura ambiente de 35°C

4.3.6 Comentários

Para as condições de realização do ensaio os resultados permitem, entre outras, as seguintes observações:

- Os resultados das medições atestam o uso método para determinação da umidade do solo do ensaio pois uma curva de calibração pode ser obtida relacionando a grandeza Ght a umidade do solo e a temperatura do solo;
- A umidade do solo pode ser relacionada com a grandeza $Ght(t)$ tanto no regime permanente quanto no transitório, como pode ser observado na Figura 4.17 e na Figura 4.18. Na condição de medição para $Ght(t)$ no regime transitório, o sensor recebe a alimentação elétrica toda vez em que a leitura da umidade é requerida, e permanece alimentado apenas durante o tempo necessário para a medição. Uma leitura seguinte só deve ser efetuada após a fonte de alimentação ser desconectada do sensor e ocorrer o equilíbrio das temperaturas do bloco de gesso e do solo. As referências cruzadas entre os valores elétricos medidos (para Ght e temperatura) e os de calibração do sensor, fornecem a umidade do solo. No caso do regime permanente, os resultados das medições são tomados após a grandeza $Ght(t)$ atingir o regime permanente. Atingindo este regime e mantendo a ativa a fonte de alimentação, as leituras de umidade podem ser obtidas continuadamente desde que a temperatura do solo permaneça com o mesmo valor da temperatura da primeira da medição ou um outro dispositivo forneça essa referência temperatura, uma vez que, o valor de Ght varia com a temperatura do meio. Eleger uma ou outra forma de operação depende da aplicação a ser dada ao sensor. Nas duas formas de operação as medições devem ser tomadas com equilíbrio de umidade estabelecido entre o gesso e o solo;
- O sensor tem sensibilidade de resposta a partir de valor próximo a 15% de umidade do solo, como pode ser observado nos gráficos da Figura 4.17 e da Figura 4.18;

- O aumento da temperatura do solo de 25°C para 35°C aumenta todos os valores de Ght no tempo para toda a faixa de umidade do solo do ensaio (Figura 4.19 a Figura 4.22);
- As respostas de temperaturas (Figura 4.25 e Figura 4.27) no ponto S2 apresentam comportamentos similares, exceto para a umidade de 7,10%, possivelmente causado por um aumento na temperatura da câmara de climatização durante a medição. Fato sem interferência na determinação de Ght, pois o aumento da temperatura é pequeno e há compensação pela variação da potência fornecida a S1;
- A ação de um ventilador existente no interior da câmara diretamente sobre o corpo de prova descoberto, provocou redução maior de umidade na camada superior do solo caso o corpo de prova estivesse protegido da ventilação. No ensaio 3 evitou-se ação do ventilador protegendo o corpo de prova com uma cobertura de papel filme;
- A calibração apurada do sensor é necessária para seu uso na medição da umidade do solo. Requer determinar a ação da temperatura solo na variação da grandeza Ght com a umidade.

4.4 Ensaio 3 – Solo B

4.4.1 Objetivo

O objetivo do ensaio 3 é obter as características do sensor de umidade para um solo (Anexo II) com propriedades diferentes do solo utilizado no segundo ensaio e reafirmar a possibilidade de uso do sensor na determinação da umidade do solo. Os testes deste ensaio foram basicamente os mesmos aplicados ao ensaio 2, diferindo, no uso de estufa elétrica padrão no lugar do forno de microondas para a secagem do solo devido à presença de mica na composição do solo, na preparação do solo para o ensaio e em impedir a ação direta do ventilador da câmara de climatização no solo do corpo de prova. O roteiro de apresentação deste item do capítulo é o mesmo do item 4.3, sendo repetido por conveniência para tornar independente a leitura dos dois ensaios e ao mesmo tempo permitir, quando necessário, a associação e comparação de ambos.

4.4.2 Preparação do Solo para o Ensaio

O procedimento para obter o solo de umidade mais baixa utilizado no ensaio 3 foi o mesmo adotado no ensaio 2. Pelas propriedades do solo, o tempo de duração do processo de secagem foi menor, de 17 dias. Dos solos contidos nos sacos plásticos foram obtidos os solos com as umidades do ensaio conforme o seguinte procedimento:

- Separar um dos sacos plástico com a porção de 4 kg de solo;
- Retirar do saco três amostras do solo para determinar a umidade deste;
- Logo após encontrar a umidade do solo, despejar o solo do saco numa bandeja e acrescentar a quantidade calculada de água destilada para se chegar à umidade desejada (borrifar uniformemente água no solo e misturá-los);
- Devolver a mistura solo úmido ao saco plástico e fechá-lo, mantendo nesta condição por mais de 12 h para obter melhor homogeneização da umidade no solo e até 24 h para a montagem do corpo de prova;
- Imediatamente antes de montar o corpo de prova retirar do saco três amostras solo para determinar a umidade do solo utilizado na montagem corpo de prova;
- No saco com solo restante colocar etiqueta com as informações de umidade, data e hora;
- Após os testes, desfazer o corpo de prova e misturar o solo ao do saco (conservar o saco fechado).

A presença de mica no solo impede o uso do forno de microondas para se obter o peso da amostra de solo seco na determinação da umidade do solo. As três amostras retiradas do saco plástico para a determinação da umidade do solo contido no saco, foram acondicionadas em recipientes de alumínio cilíndricos (5cm de altura e 7,5cm de diâmetro) e colocadas em estufa a 105°C por 24h para secar o solo. Da expressão (4.6), conhecendo-se os valores de m_{ru} , m_{rs} e m_s , foram calculados os valores da umidade do solo. Na Tabela 4.4 são mostrados,

como exemplo, valores dessas massas para um dos valores de umidade aplicado ao ensaio.

Tabela 4.4: Massas mr, mru e mrs das amostras de solo – Ensaio 3

Amostra	mr	mru	mrs
1	30,62g	72,22g	64,08g
2	29,31g	71,63g	64,08g
3	29,73g	72,10g	63,78g

Com os valores de mr, mru e mrs da Tabela 4.4 e com a equação (4.6) são obtidos os teores umidade de solo correspondentes a cada amostra:

$$\% \text{ umidade 1} = \frac{72,22 - 64,08}{64,08 - 30,62} \times 100 = \frac{8,14}{33,46} \times 100 = 24,33\%$$

$$\% \text{ umidade 2} = \frac{71,63 - 63,32}{63,32 - 29,31} \times 100 = \frac{8,31}{34,01} \times 100 = 24,43\%$$

$$\% \text{ umidade 3} = \frac{72,10 - 63,78}{63,78 - 29,73} \times 100 = \frac{8,32}{34,05} \times 100 = 24,43\%$$

A média aritmética entre esses valores de umidade fornece a umidade do solo no saco:

$$\% \text{ umidade} = \frac{\% \text{ umidade 1} + \% \text{ umidade 2} + \% \text{ umidade 3}}{3} = 24,39\%$$

Com o uso da expressão (4.7), da mesma forma que no ensaio 2, foi calculada a quantidade de água a ser acrescentada ao solo para alcançar a umidade aplicada ao ensaio. Abaixo um exemplo de cálculo do volume de água necessário para aumentar de 6,28% para 14,00% a umidade dos 4018,0g de solo contido no saco.

$$V_{ws} = \frac{4.018,0}{100 + 6,28} \times (14,00 - 6,28) = 291,86 \text{ cm}^3$$

4.4.3 Recursos Utilizados no Ensaio

O esquema dos recursos utilizados neste ensaio e as descrições dos mesmos podem ser obtidos no item 4.3.3, pois basicamente são os mesmos do ensaio 2, com a diferença no uso da estufa elétrica padrão marca Solotest no lugar do forno de microondas para secar a amostra de solo na determinação da umidade do solo.

4.4.4 Realização das Medições

Os corpos de prova foram montados e as medições realizadas conforme os procedimentos descritos no item 4.3.4, com a diferença de que o corpo de prova quando colocado na câmara climatização foi protegido da ação da ventilação direta do ventilador existente na câmara, evitando maior perda de umidade do solo na superfície do corpo de prova. As medições também iniciaram com o solo de umidade mais baixa obtido no processo de sua secagem na temperatura ambiente e com bloco sensor deixado na temperatura ambiente no mesmo tempo de secagem do solo. Neste ensaio, o tempo de coletas das informações elétricas do sensor para cálculo dos valores a grandeza G_{ht} e da temperatura no bloco sensor, foi de 1800s contados a partir da alimentação do circuito elétrico para o sensor, tempo observado no ensaio 2 como suficiente para considerar que a grandeza $G_{ht}(t)$ atingiu seu regime permanente.

4.4.5 Resultado das Medições

Apesar da proteção da ação do ventilador do climatizador no solo contido no corpo de prova, ocorreram perdas de umidade no solo, ainda que reduzidas quando comparadas com o ensaio 2. A Tabela 4.5 contém para cada corpo de prova as correções nos valores de umidade do solo.

Tabela 4.5: Umidades corrigidas do solo no corpo de prova – Ensaio 3

Corpo de Prova	Umidade do solo usado na montagem do corpo de prova (%)	Umidade corrigida solo para medições em 25°C (%)	Umidade corrigida solo para medições em 35°C (%)
1	6,56	6,51	6,42
2	9,63	9,57	9,52
3	14,98	14,89	14,81
4	20,78	20,55	20,47
5	24,39	24,31	24,26
6	31,38	31,11	31,02
7	37,08	36,81	36,76
8	41,74	41,35	41,30

Para a correção nos valores de umidade foi utilizada a equação (4.8) e a seguir é ilustrado o ajuste realizado para a umidade mais alta aplicada ao ensaio a partir dos valores correspondentes aos pesos dos componentes do corpo de prova.

Os valores das massas encontradas para a mais alta umidade aplicada ao ensaio 3, foram:

Massa do corpo de prova após a montagem: 3616,6 g.

Massa do bloco sensor antes da montagem do corpo de prova: 51,35 g.

Massa da vasilha de alumínio do corpo de prova: 106,75 g.

Massa da ponta de prova do medidor de temperatura: 21,86 g.

Massa do corpo de prova após medição em 25°C: 3613,8 g.

Massa do corpo de prova após medição em 35°C: 3612,5 g.

Massa do bloco sensor após medição em 35°C: 57,95 g.

Assim, aplicando a equação (4.8), a umidade corrigida para o solo contido no corpo de prova após os testes em 25°C, ficou:

$$Ps1 = 3.616,6 - 106,75 - 21,86 - 51,35 = 3.436,64\text{g}$$

$$Ps2 = 3.613,8 - 106,75 - 21,86 - 57,95 = 3.427,24g$$

$$w2 = \frac{3.427,24 \times (100 + 41,74) - 100 \times 3.436,64}{100 \times 3.436,64} = 41,35\%$$

E a umidade corrigida para o solo contido no corpo de prova após os testes em 35°C:

$$Ps1 = 3.616,6 - 106,75 - 21,86 - 51,35 = 3.436,64g$$

$$Ps2 = 3.612,5 - 106,75 - 21,86 - 57,95 = 3.426,09g$$

$$w2 = \frac{3.426,09 \times (100 + 41,74) - 100 \times 3.436,64}{100 \times 3.436,64} = 41,30\%$$

As respostas da grandeza Ght no tempo para as umidades no solo do ensaio e para as temperaturas de 25°C e 35°C estão mostradas através dos gráficos da Figura 4.29 e da Figura 4.30. As características do sensor que relacionam a grandeza Ght à umidade do solo para os tempos de medição 180s, 600s e 1800s, contados a partir do instante em que o circuito elétrico para o sensor é ligado, estão mostradas nos gráficos da Figura 4.31 e Figura 4.32. Para as temperaturas de 25°C e 35°C foram plotadas em um mesmo gráfico (Figura 4.33, Figura 4.34 e Figura 4.35) as curvas de respostas Ght versus umidade do solo, mostradas separadamente nos tempo de 180s, 600s e 1800s, o que permite observar a variação de Ght com a temperatura do bloco. Acompanhando o ensaio 2 na aproximação por uma curva contínua dos valores medidos de Ght , um polinômio 4º foi utilizado, e detalhes desta aproximação estão mostrados na Figura 4.36 e Figura 4.37. Os comportamentos das temperaturas no interior do bloco sensor obtidas através do termistor S2 e das temperaturas no solo medidas próximas ao bloco, estão expostos na Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41.

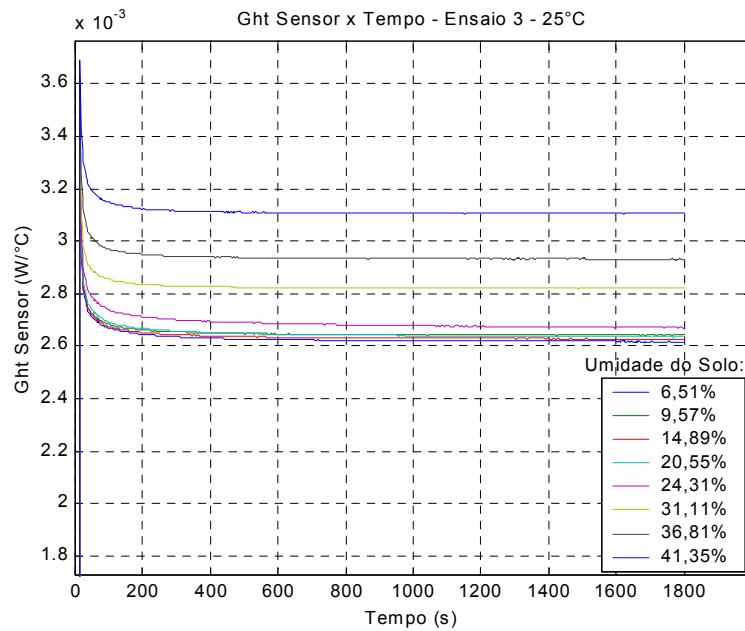


Figura 4.29: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3

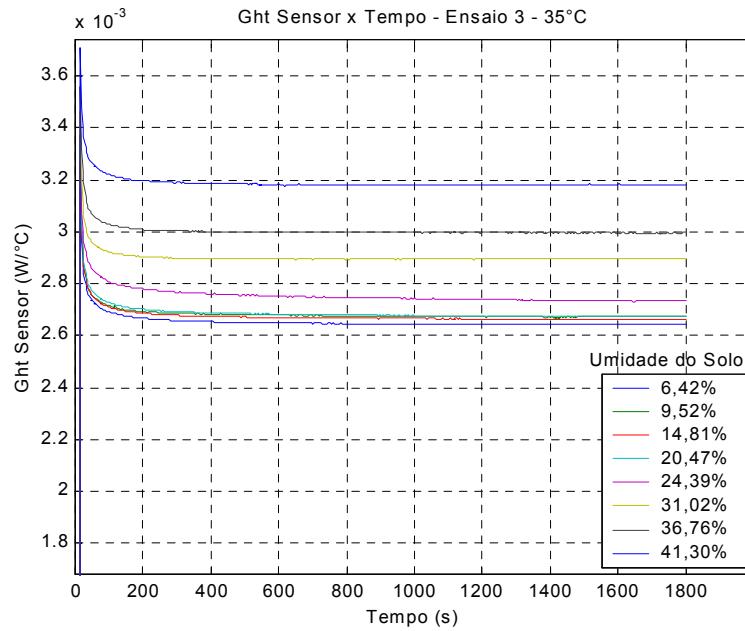


Figura 4.30: Ght do sensor em função do tempo para todos os valores de umidade do solo na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3

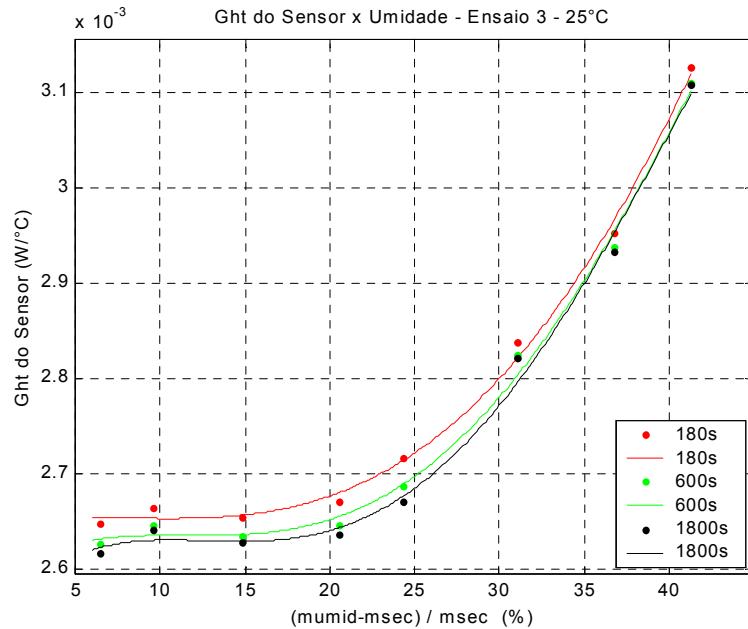


Figura 4.31: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s e 1800s na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3

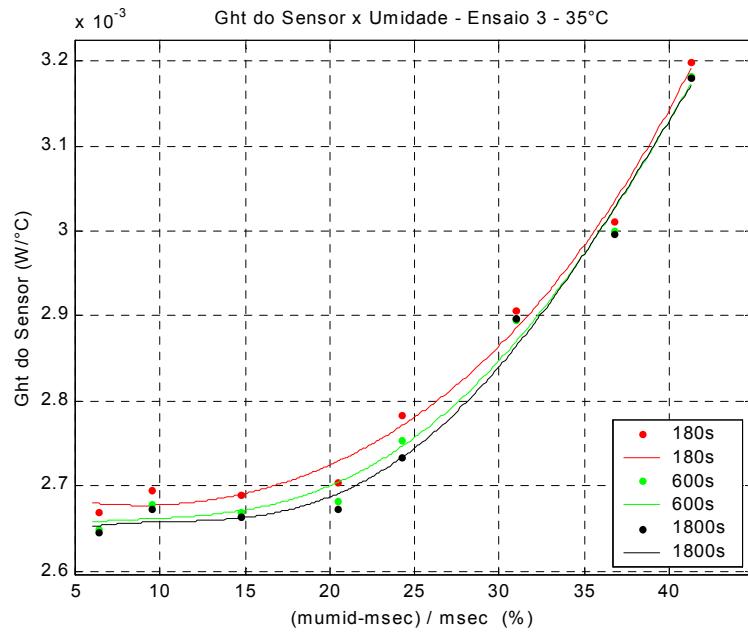
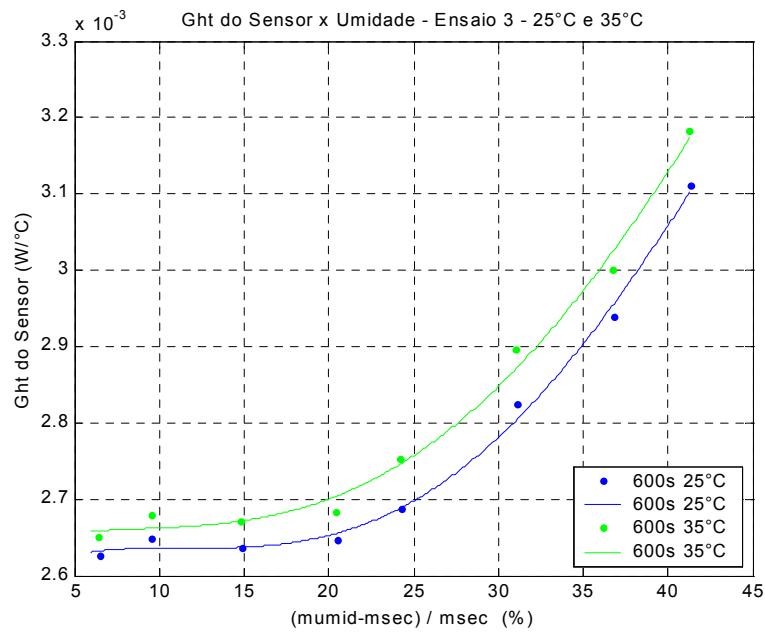
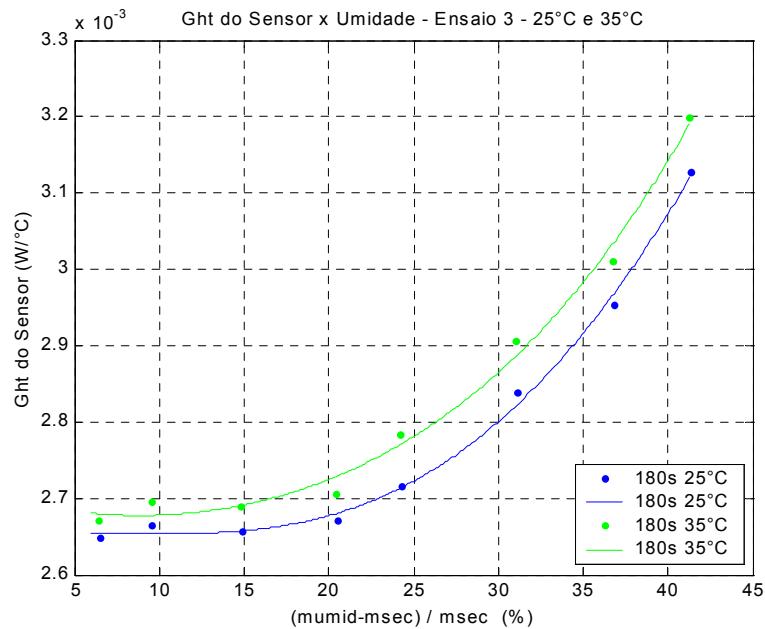


Figura 4.32: Ght do sensor em função da umidade em 180s, 600s e 1800s na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3



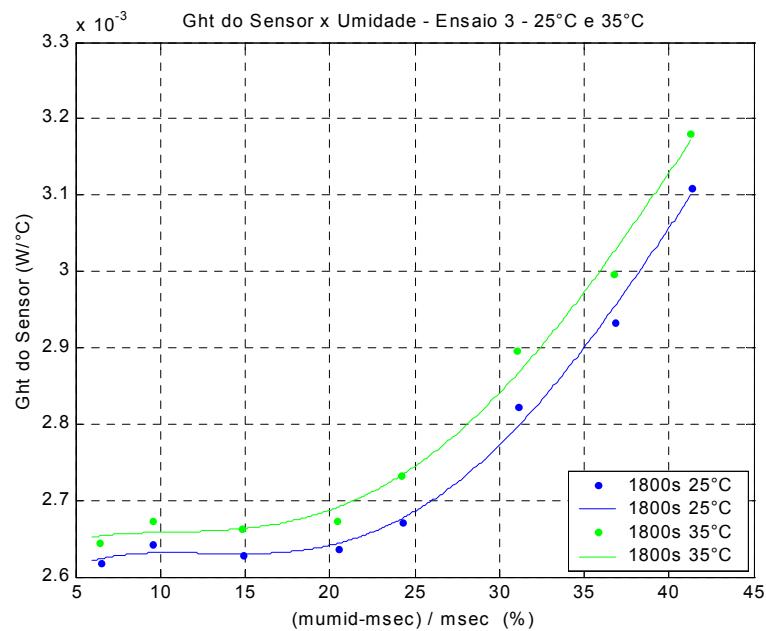


Figura 4.35: Ght do sensor versus umidade do solo para tempo de medição de 1800s nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3

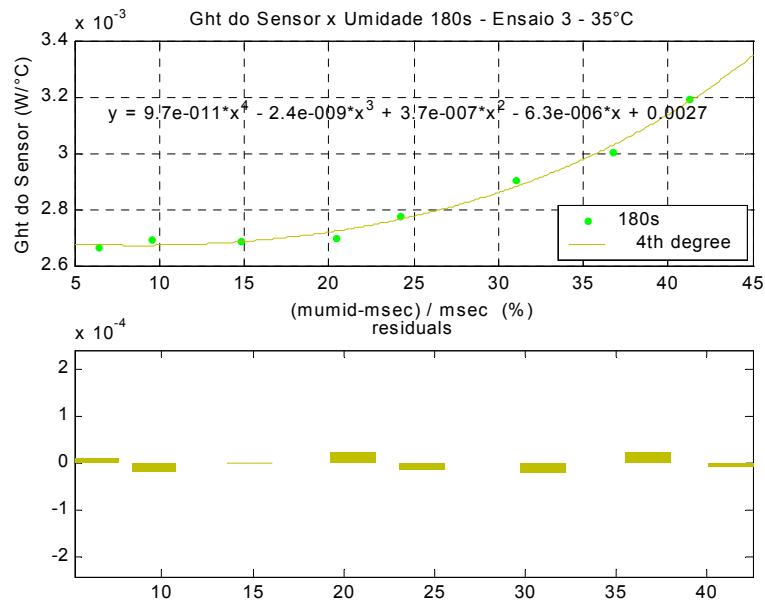
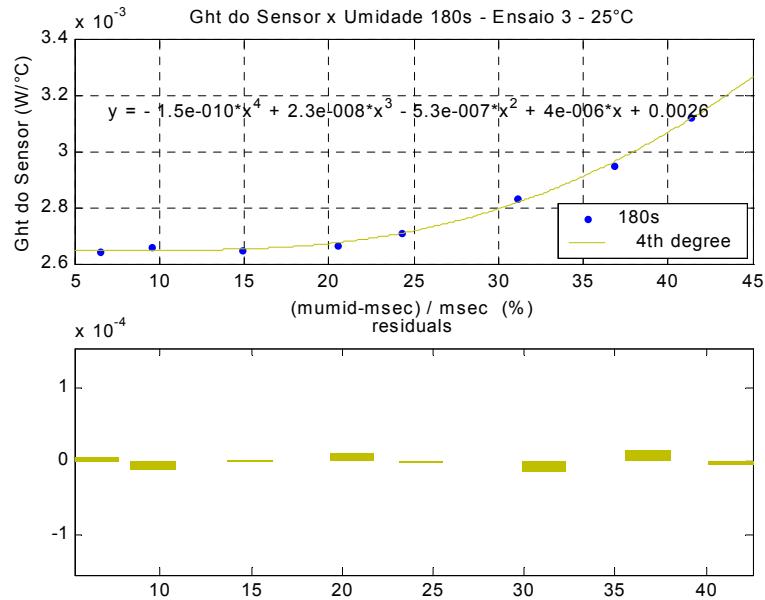


Figura 4.36: Aproximação Ght(180) do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3

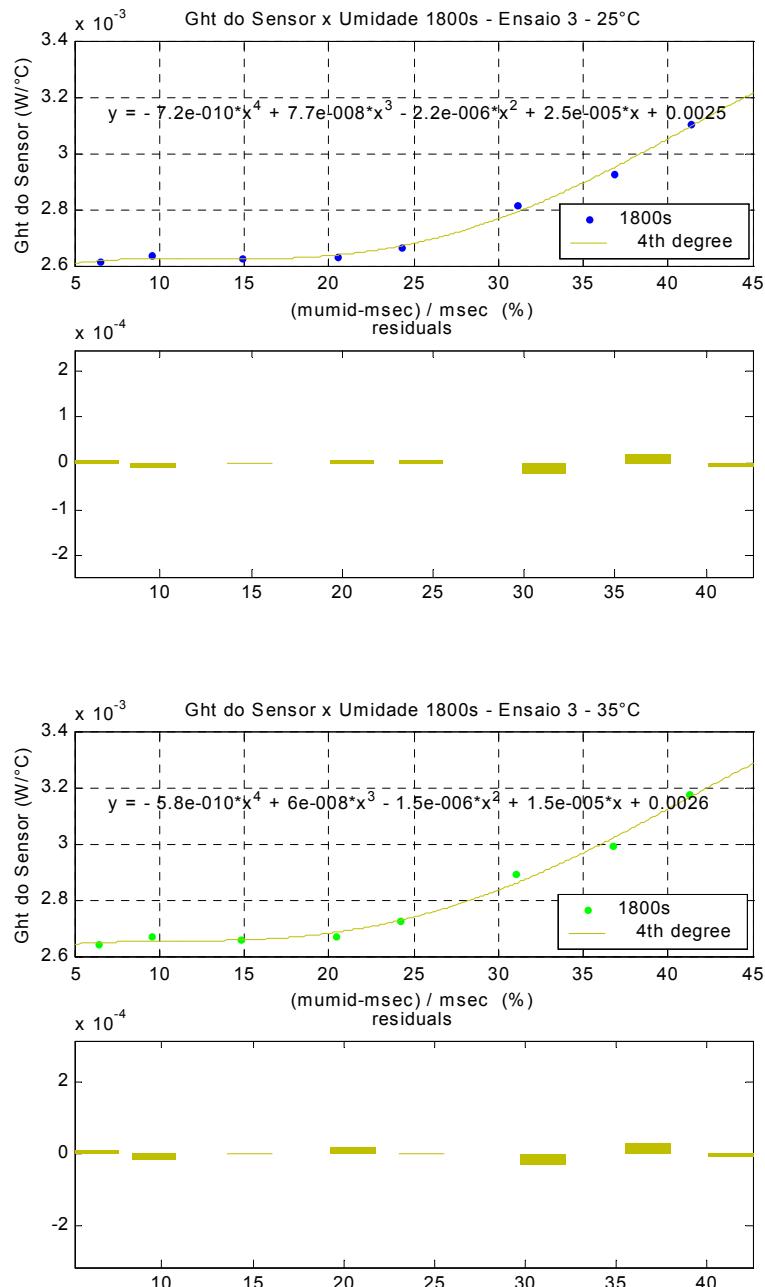


Figura 4.37: Aproximação $Ght(1800)$ do sensor versus umidade do solo nas temperaturas ambientes de 25°C e 35°C - Ensaio 3

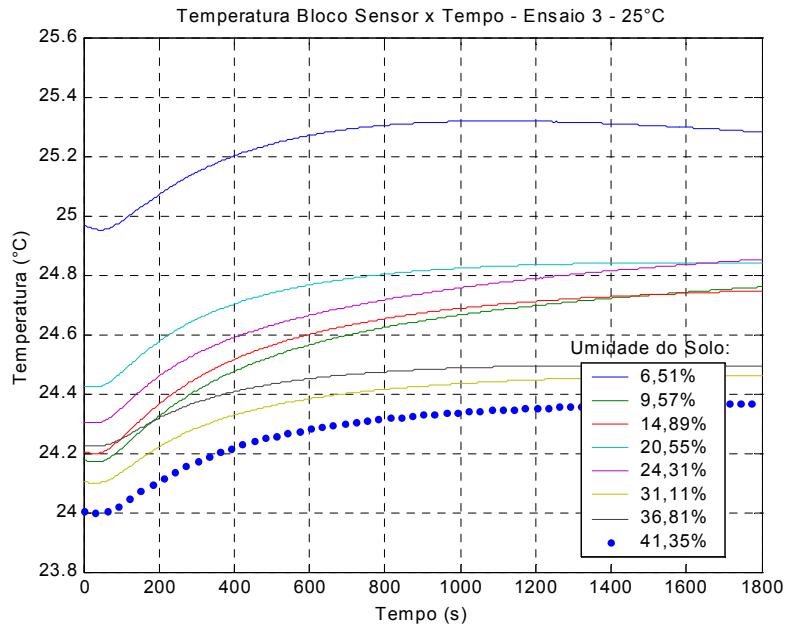


Figura 4.38: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3

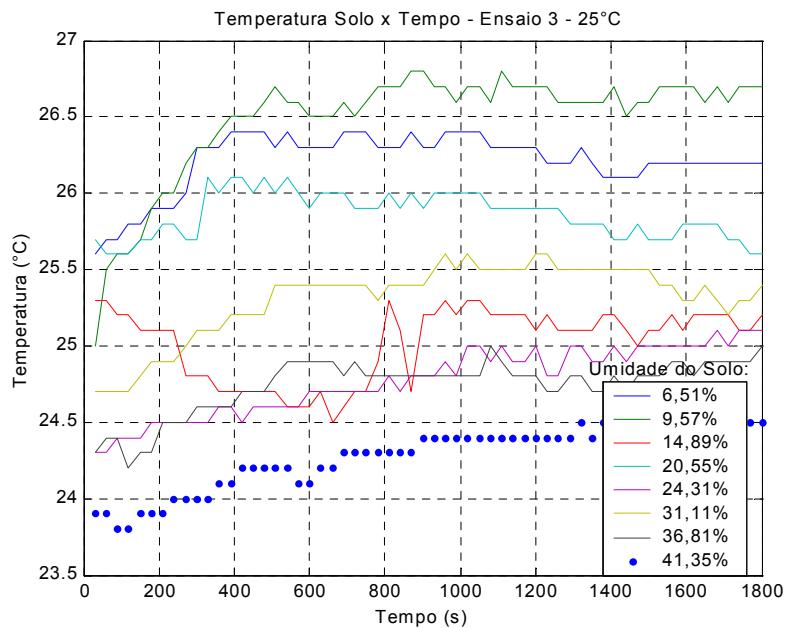


Figura 4.39: Temperatura no solo versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3

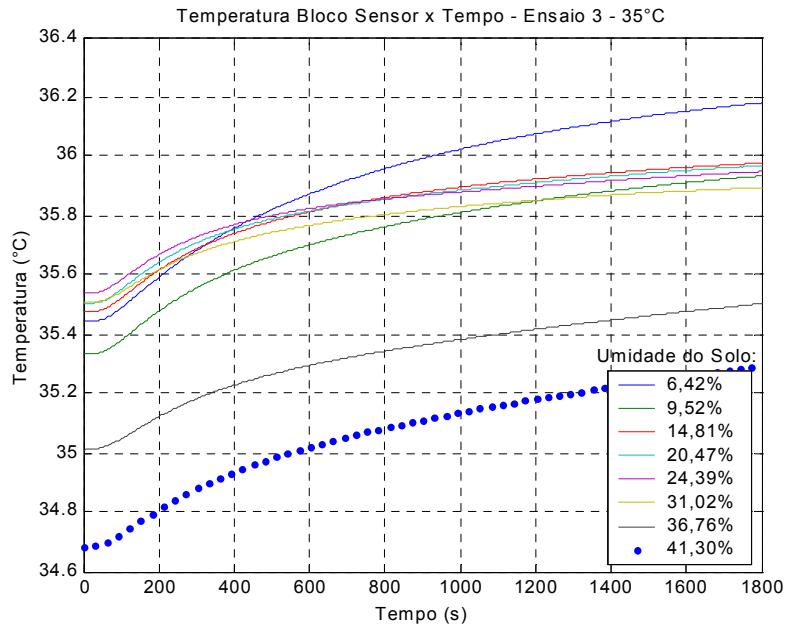


Figura 4.40: Temperatura no bloco sensor versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 25°C – Ensaio 3

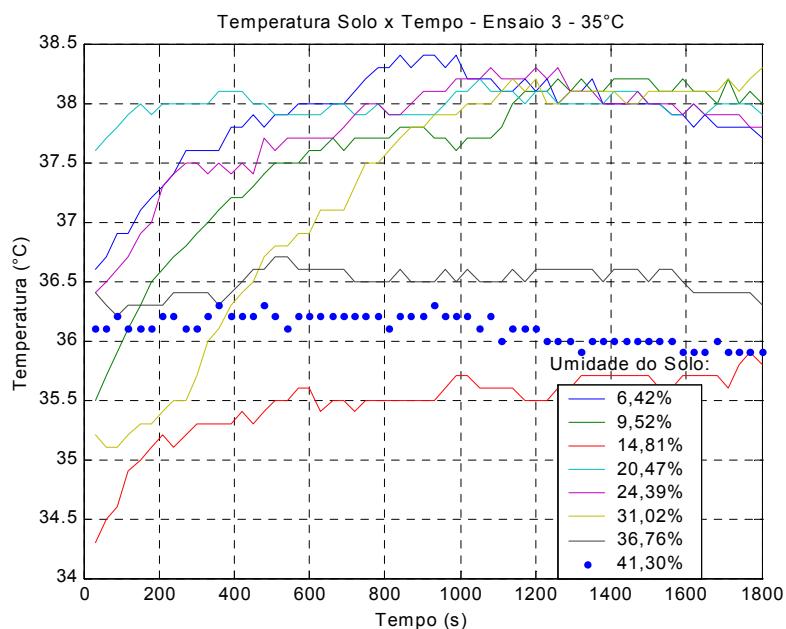


Figura 4.41: Temperatura no solo versus tempo para todos valores umidade de na temperatura ambiente de 35°C – Ensaio 3

4.4.6 Comentários

Os resultados encontrados no ensaio 3 permitem, entre outros, os seguintes comentários:

- O ensaio 3 corrobora o método adotado para medição de umidade do solo. O comportamento da variação de G_{ht} no tempo, mostrado através da Figura 4.29 e da Figura 4.30, é semelhante ao encontrado nos ensaios 1 e 2, nos quais, a grandeza G_{ht} para cada valor de umidade assume seu valor máximo e decresce com o tempo até sua estabilização. Um comportamento semelhante ao ensaio 2 de variação de G_{ht} com a umidade pode ser também observado nos resultados obtidos neste ensaio, mostrados nos gráficos da Figura 4.31 e da Figura 4.32, em que, o valor de G_{ht} aumenta com a umidade do solo segundo um polinômio do quarto grau;
- Conforme mostram os gráficos da Figura 4.31 e da Figura 4.32, o sensor de umidade tem sensibilidade de resposta a partir de valor próximo a 15% de umidade do solo. O que concorda com os resultados do ensaio 2;
- Os resultados do ensaio obtidos com o sensor em temperaturas ambientes de 25°C e 35°C, indicam (Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35) que para toda faixa de variação de umidade solo, o valor de G_{ht} no tempo varia com a temperatura do solo;
- As variações no tempo da temperatura medida através do termistor S2 (Figura 4.38 e Figura 4.40) e próximas a superfície do bloco de gesso (Figura 4.39 e Figura 4.41), têm comportamentos similares para os valores de umidade das medições. Iniciam com temperaturas próximas as iniciais do bloco e aumentam devido à ação da temperatura do termistor S1;
- A aplicação do sensor na medição da umidade do solo requer uma calibração apurada do sensor. A relação entre a grandeza G_{ht} e o tipo de solo e sua temperatura deve ser pesquisada.

Capítulo 5

Comentários Finais e Perspectivas Futuras

Os resultados apresentados nesta dissertação mostram que os objetivos do trabalho realizado foram alcançados: desenvolver e caracterizar um sensor habilitado para medição da umidade do solo, utilizando um método térmico, a partir de um termo-resistor operando em temperatura constante como elemento gerador de calor em um meio poroso e outro termo-resistor atuando na medição da temperatura, neste meio, próxima a fonte de emissão de calor.

Entre as principais características do sensor, podem ser destacados o seu baixo custo e sua razoável facilidade de construção, o que o torna competitivo comparado aos dispositivos dos demais métodos de medição de umidade do solo existentes. Outras características do sensor:

- O sensor responde a partir de valores próximos a 15% de umidade do solo.
- Permite seu uso por sistemas automatizados de manejo de irrigação de solo em agricultura.
- O modelo do método busca a determinação condutância térmica através do regime da grandeza Ght , permitindo leitura continuada da umidade do solo. Também valores de Ght fora do regime podem ser utilizados na calibração do sensor, para isso as leituras devem ser tomadas tendo como referência o início da alimentação elétrica do circuito elétrico para o sensor.

O estágio de desenvolvimento do sensor atingido com esse trabalho abre caminho para trabalhos futuros de detalhamento das atuais características e pesquisa de outras. Como sugestão para esses trabalhos:

- Obter a relação entre a grandeza Ght e o potencial matricial do solo na faixa de água disponível para as plantas, isto é, para valores entre a capacidade de campo e a porcentagem de murchamento permanente.
- Realizar ensaios utilizando outros tipos de solo como areia e arenoso, para obter as respostas de Ght.
- Calibrar o sensor considerando os efeitos da temperatura do solo e tipos de solos.
- De acordo com as hipóteses para a construção do modelo (item 3.2.2), as seções entre as esferas concêntricas compreendidas entre S1 e S2, abrangem além do gesso, o solo. Isso torna dependente do tipo de solo a resposta da grandeza Ght com a umidade. Alterações na posição de instalação dos termistores S1 e S2 no bloco de gesso, de forma que estas seções de esferas concêntricas entre S1 e S2 fiquem confinadas no bloco, podem ser testadas.
- Efetuar testes em campo com o sensor.
- Identificar outros dispositivos de coleta e tratamento das informações fornecidas pelo sensor.

Os resultados aqui apresentados de caracterização do sensor fazem desse trabalho importante contribuição técnico-científica na obtenção da informação do teor de umidade do solo, que seguidos de ciclos de implementação, teste e avaliação de melhorias, consolidarão um produto com aplicação no mercado instrumentos de medição.

Referências Bibliográficas

- [1] KLAR, A. E., *A Água no Sistema Solo-Planta-Atmosfera*. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 1984.
- [2] BERNARDO, S., *Manual de irrigação*. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995.
- [3] MAROVELLI, W. A., SILVA, H. R., SILVA, W. L. C. e CARRIJO, O. A., *Tensiômetros para Manejo da Irrigação em Hortaliças*. EMBRAPA. Disponível em: <<http://www.cnph.embrapa.br/public/folders/tensiometro.html>>. Acesso em: 09 jan. 2006.
- [4] OLIVEIRA FILHO, D., MANTOVANI, E. C. e 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. Anais eletrônicos... Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022000000200052&lng=pt&nrm=abn>. Acesso em: 11 Jul. 2006.
- [5] JOAQUIM JUNIOR, G. O., *Desempenho do Reflectômetro no Domínio do Tempo na Detecção de Variações na Umidade do Solo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.
- [6] ADAMO, F., ADRIA, G., ATTIVISMO, F. and GIAQUINTO N., *An Acoustic Method for Soil Moisture Measurement*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, N. 4, p. 891-898, Aug 2004.
- [7] RENDE, A. and BIAGE, M., *Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils*. J. Braz. Soc. Mech. Sci., Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, 2002. Available from: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-73862002000300012&lng=en&nrm=iso>. Access on: 10 Jan. 2006. doi: 10.1590/S0100-73862002000300012.

- [8] COLEMAN, E. A. and HENDRIX, T. M., *Fiberglass Electrical Soil Moisture Instrument*. Soil Science, 1(67):425-438, 1949.
- [9] BOUYOUCOS, G. J. and MICK, A. H., *An Electrical Resistance Method for the Continuous Measurement of Soil Moisture under Field Conditions*. Tech. Bull. Mich. (St. Coll.) Agric. Exp. Stn, 1(172):18, Apr 1940.
- [10] LIMA, F. M. C., *Caracterização de um Sensor para Determinação da Água Disponível no Solo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- [11] BOUYOUCOS, G. J. and MICK, A. H., *Improvements in the Plaster of Paris Absorption Block Electrical Resistance Method for Measuring Soil Moisture under Filed Conditions*. Tech. Bull. Michigan. Agric. Exp. Stn, 1:455-465, Dec 1946.
- [12] PHENE, J. C., HOFFMAN, G. C. and RAWLINS, S. L., *Measuring soil matric potential in situ by heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction*. Soil Science Society of America. Proceedings. 1971.
- [13] BENEVELI, R. M., CARVALHO, M. O. M. and CARVALHO, J. C., *Using a Thermal Sensor to Determine the Soil Matric Suction of a Gully Slope*. Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, June 28 to July 2, 2004, Rio de Janeiro, A. A. Balkema Publisher, London, UK, vol. 1, p. 767-772.
- [14] SILVA, G. B. and OLIVEIRA, F. B., *Thermal Sensor for Measuring Soil Water Potential. Final Report of Supervised Training*. University of Brasilia, Department of Mechanical Engineering, Brasilia, Brazil, 1992. In Portuguese.
- [15] CARDOSO, F. F., *Thermal Sensor for Measuring Soil Water Stress. Final Report of Supervised Training*, University of Brasilia, Department of Mechanical Engineering, Brasilia, Brazil, 1994. In Portuguese.

- [16] REECE, C. F., *Evaluation of a Line Heat Dissipation Sensor for Measuring Soil Matric Potential*. Soil Science Society of America Journal, 60:1022-1028, 1996.
- [17] OLIVEIRA, C. A. S., *Determinação da Tensão de Água em Solo Agrícola Usando um Sensor de Dissipação de Calor*. Pesq. Agropec. Bras., vol. 8, p. 1417-1425, Brasília, 1999.
- [18] OLIVEIRA, A., *Sensores Termo-Resistivos em Configurações Realimentadas*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica na área de Processamento da Informação. Campina Grande: Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1997.
- [19] KREITH, F., *Princípios da Transmissão de Calor*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1973.

Anexo I

Código-Fonte das Rotinas em *Matlab*

I.1 *CalculaGthE1.m*

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 1
9 % Calcula Ght x Tempo
10 % Plota Graficos Ght x Tempo
11 % Plota Grafico Temperatura no Bloco Sensor x Tempo
12 %-----
13 % Pesos do Bloco Sensor para valores de agua absorvida pelo bloco:
14 % massa inicial: 47.65g (saturado) final: 47.53g; em 08.06.05
15 % massa inicial: 47.80g (saturado) final: 47.60g; em 08.06.05
16 % massa inicial: 46.80g final: 46.78g; em 08.06.05
17 % massa inicial: 45,84g final: 45,78g; em 09.06.05
18 % massa inicial: 44.80g final: 44.75g; em 13.06.05
19 % massa inicial: 43.86g final: 43.83g; em 13.06.05
20 % massa inicial: 42.84g final: 42.81g; em 14.06.05
21 % massa inicial: 41.78g final: 41.76g; em 15.06.05
22 % massa inicial: 40.79g final: 40.78g; em 15.06.05
23 % massa inicial: 40.08g final: 40.07g; em 17.06.05
24
25
26 clear all;
27
28 % Importa dados dos arquivos de medicao e cria variaveis para calculo
29 % de Ght e Temperatura no Bloco Sensor, e plotagem dos graficos:
30 load t0806va.txt;vg01=t0806va;vga01=abs(vg01(:,3));tgm01=vg01(:,4);
31 load t0806va2.txt;vg02=t0806va2;vga02=abs(vg02(:,3));tgm02=vg02(:,4);
32 load t0806va3.txt;vg03=t0806va3;vga03=abs(vg03(:,3));tgm03=vg03(:,4);
33 load t0906va.txt;vg04=t0906va;vga04=abs(vg04(:,3));tgm04=vg04(:,4);
34 load t1306va.txt;vg05=t1306va;vga05=abs(vg05(:,3));tgm05=vg05(:,4);
35 load t1306va2.txt;vg06=t1306va2;vga06=abs(vg06(:,3));tgm06=vg06(:,4);
36 load t1406va.txt;vg07=t1406va;vga07=abs(vg07(:,3));tgm07=vg07(:,4);
37 load t1506va.txt;vg08=t1506va;vga08=abs(vg08(:,3));tgm08=vg08(:,4);
38 load t1506va2.txt;vg09=t1506va2;vga09=abs(vg09(:,3));tgm09=vg09(:,4);
39 load t1706va.txt;vg10=t1706va;vga10=abs(vg10(:,3));tgm10=vg10(:,4);
40
41
42 % Calcula Ght e Temperatura do Bloco Sensor:
43
44 for n=1:800;
45
46 tg01(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm01(n)))-273.15;
47 ght01(n)=(vga01(n)^2)/(262.66*(72.32-tg01(n)));
48

```

```
49 tg02(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm02(n)))-273.15;
50 ght02(n)=(vga02(n)^2)/(262.66*(72.32-tg02(n)));
51
52 tg03(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm03(n)))-273.15;
53 ght03(n)=(vga03(n)^2)/(262.66*(72.32-tg03(n)));
54
55 tg04(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm04(n)))-273.15;
56 ght04(n)=(vga04(n)^2)/(262.66*(72.32-tg04(n)));
57
58 tg05(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm05(n)))-273.15;
59 ght05(n)=(vga05(n)^2)/(262.66*(72.32-tg05(n)));
60
61 tg06(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm06(n)))-273.15;
62 ght06(n)=(vga06(n)^2)/(262.66*(72.32-tg06(n)));
63
64 tg07(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm07(n)))-273.15;
65 ght07(n)=(vga07(n)^2)/(262.66*(72.32-tg07(n)));
66
67 tg08(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm08(n)))-273.15;
68 ght08(n)=(vga08(n)^2)/(262.66*(72.32-tg08(n)));
69
70 tg09(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm09(n)))-273.15;
71 ght09(n)=(vga09(n)^2)/(262.66*(72.32-tg09(n)));
72
73 tg10(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgm10(n)))-273.15;
74 ght10(n)=(vga10(n)^2)/(262.66*(72.32-tg10(n)));
75
76 end;
77
78 Ume1b=[24.43, 24.21, 21.77, 18.53, 15.19, 12.20, 8.89, 5.48, 2.30, 0];
79
80 % Plota Graficos de Ght x Tempo:
81 figure(10);
82 plot(3*(1:800),ght02(1,1:800),...
83      3*(1:800),ght01(1,1:800),...
84      3*(1:800),ght03(1,1:800),...
85      3*(1:800),ght04(1,1:800),...
86      3*(1:800),ght05(1,1:800),...
87      3*(1:800),ght06(1,1:800),...
88      3*(1:800),ght07(1,1:800),...
89      3*(1:800),ght08(1,1:800),...
90      3*(1:800),ght09(1,1:800),...
91      3*(1:800),ght10(1,1:800));
92
93 title('Ght do Sensor x Tempo - Ensaio 1');
94 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Ght (W/°C)');
95 %legend('47,60g','47,53g','46,78g','45,78g','44,75g','43,83g',...
96 %        '42,81g','41,76g','40,78g', '40,07g');
97 legend('24,43%', '24,21%', '21,77%', '18,53%', '15,19%',...
98        '12,20%', '8,89%', '5,48%', '2,30%','0,00%');
99 grid;
100
101 % Plota Graficos de Temperatura do Bloco Sensor x Tempo:
102 figure(11);
103 plot(3*(1:800),tg02(1,1:800),...
104      3*(1:800),tg01(1,1:800),...
105      3*(1:800),tg03(1,1:800),...
106      3*(1:800),tg04(1,1:800),...
107      3*(1:800),tg05(1,1:800),...
108      3*(1:800),tg06(1,1:800),...
109      3*(1:800),tg07(1,1:800),...
110      3*(1:10:800),tg08(1,1:10:800),'.',...
111      3*(1:10:800),tg09(1,1:10:800),'.',...
112      3*(1:10:800),tg10(1,1:10:800),'.');
```

```

114 title('Temperatura Bloco Sensor x Tempo - Ensaio 1 ');
115 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
116 %legend('47,60g','47,53g','46,78g','45,78g','44,75g','43,83g',...
117 %'42,81g','41,76g','40,78g','40,07g');
118 legend('24,43%','24,21%','21,77%','18,53%','15,19%',...
119 %'12,20%','8,89%','5,48%','2,30%','0,00%');
120 grid;
121
122 %-----

```

I.2 *PlotaTempAE1.m*

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 1
9 % Plota os graficos de Temperatura Ambiente x Tempo
10 %-----
11 clear all;
12 load t0806tam.txt;
13 load t0806ta2m.txt;
14 load t0806ta3m.txt;
15 load t0906tam.txt;
16 load t1306tam.txt;
17 load t1306ta2m.txt;
18 load t1406tam.txt;
19 load t1506tam.txt;
20 load t1506ta2m.txt;
21 load t1706tam.m;
22
23 taa01=t0806tam; taab01=taa01(:,1)';
24 taa02=t0806ta2m; taab02=taa02(:,1)';
25 taa03=t0806ta3m; taab03=taa03(:,1)';
26 taa04=t0906tam; taab04=taa04(:,1)';
27 taa05=t1306tam; taab05=taa05(:,1)';
28 taa06=t1306ta2m; taab06=taa06(:,1)';
29 taa07=t1406tam; taab07=taa07(:,1)';
30 taa08=t1506tam; taab08=taa08(:,1)';
31 taa09=t1506ta2m; taab09=taa09(:,1)';
32 taa10=t1706tam; taab10=taa10(:,1)';
33 taab10=taab10(1:25:2000);
34
35 figure(20);
36 plot(30*(1:80),taab01(1,1:80),...
37 30*(1:80),taab02(1,1:80),...
38 30*(1:80),taab03(1,1:80),...
39 30*(1:80),taab04(1,1:80),...
40 30*(1:80),taab05(1,1:80),...
41 30*(1:80),taab06(1,1:80),...
42 30*(1:80),taab07(1,1:80),...
43 30*(1:1.5:80),taab08(1,1:1.5:80),'.',...
44 30*(1:1.5:80),taab09(1,1:1.5:80),'.',...
45 30*(1:1.5:80),taab10(1,1:1.5:80),'.');
46 title('Temperatura Ambiente x Tempo - Ensaio 1');
47 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
48 %legend('47,60g','47,53g','46,78g','45,78g','44,75g',...
49 %'43,83g','42,81g','41,76g','40,78g','40,07g');
50 legend('24,43%','24,21%','21,77%','18,53%','15,19%',...
51 %'12,20%','8,89%','5,48%','2,30%','0,00%');
52 grid;

```

53

%-----

I.3 VariaveisGhtE1.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %
8 % Ensaio 1
9 % Para Tempos de 3, 10, 20, 30 e 40 minutos:
10 % - Cria variaveis Ght
11 % - Plota Grafico Ght x Umidade no Bloco Sensor
12 % - Plota Grafico Ght x Grau de Saturação no Bloco Sensor
13 % - Calcula Umidade e Grau de Saturação do Bloco Sensor
14 %
15 % Cria variaveis para Ght em de 3, 10, 20, 30 e 40 minutos:
16 g180=[ght01(60),ght02(60),ght03(60),...
17     ght04(60),ght05(60),ght06(60),ght07(60),ght08(60),...
18     ght09(60),ght10(60)];
19 g600=[ght01(200),ght02(200),ght03(200 ),...
20     ght04(200),ght05(200),ght06(200),ght07(200),ght08(200),...
21     ght09(200),ght10(200)];
22 g1200=[ght01(400),ght02(400),ght03(400),...
23     ght04(400),ght05(400),ght06(400),ght07(400),ght08(400),...
24     ght09(400),ght10(400)];
25 g1800=[ght01(600),ght02(600),ght03(600),...
26     ght04(600),ght05(600),ght06(600),ght07(600),ght08(600),...
27     ght09(600),ght10(600)];
28 g2400=[ght01(800),ght02(800),ght03(800),...
29     ght04(800),ght05(800),ght06(800),ght07(800),ght08(800),...
30     ght09(800),ght10(800)];
31 %
32 % Calcula Umidade e Grau de Saturação a partir do peso do bloco sensor:
33
34 Pm1=[47.60,47.53,46.78,45.78,44.75,43.83, 42.81,41.76,40.78, 40.07];
35 Ume1=100*((Pm1'-40.07)/(40.07-8.726-0.527));
36 Sae1=100*((Pm1'-40.07)/(47.60-40.07));
37 %
38 % Plota Graficos:
39
40 figure(12);
41 plot(Ume1,g180,'b.',Ume1,g600,'g.',Ume1,g1200,'r.',...
42     Ume1,g1800,'m.',Ume1,g2400,'k.');
43 title('Ght do Sensor x Umidade');
44 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
45 legend('180s','600s','1200s','1800s','2400s');
46 grid;
47
48 figure(13);
49 plot(Sae1,g180,'b.',Sae1,g600,'g.',Sae1,g1200,'r.',...
50     Sae1,g1800,'m.',Sae1,g2400,'k.');
51 title('Ght do Sensor x Grau de Saturação');
52 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / (msat-msec) (%)');
53 legend('180s','600s','1200s','1800s','2400s');
54 grid;
55
56 figure(14);
57 plot(Ume1,g180,'.b');
58 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 1');

```

```

59 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
60 legend('180s');
61 grid;
62
63 figure(15);
64 plot(Ume1,g1200,'r');
65 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 1');
66 ylabel('Ght do Sensor (mW/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
67 legend('1200s');
68 grid;
69
70 figure(16);
71 plot(Sae1,g180,'b.');
72 title('Ght do Sensor x Grau de Saturação');
73 ylabel('Ght do Sensor (mW/°C)'); xlabel('(umid-msec) / (msat-msec) (%)');
74 legend('180s');
75
76 figure(17);
77 plot(Sae1,g1200,'r.');
78 title('Ght do Sensor x Grau de Saturação');
79 ylabel('Ght do Sensor (mW/°C)'); xlabel('(umid-msec) / (msat-msec) (%)');
80 legend('1200s');
81 %-----

```

I.4 AjustesGhtE1.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 1
9 % Plota os graficos de Ght x Umidade e de Ght x Grau de Saturação
10 % Ajusta a polinomios do 4º grau os valores de Ght x Umidade e de
11 % Ght x Grau de Saturação
12 %-----
13 Umc=Ume1
14 pa180=polyfit(Umc,g180',4);
15 xu=0:0.1:max(Umc);
16 YAa180=polyval(pa180,xu);
17
18 pa600=polyfit(Umc,g600',4);
19 xu=0:0.1:max(Umc);
20 YAa600=polyval(pa600,xu);
21
22 pa1200=polyfit(Umc,g1200',4);
23 xu=0:0.1:max(Umc);
24 YAa1200=polyval(pa1200,xu);
25
26 pa1800=polyfit(Umc,g1800',4);
27 xu=0:0.1:max(Umc);
28 YAa1800=polyval(pa1800,xu);
29
30 pa2400=polyfit(Umc,g2400',4);
31 xu=0:0.1:max(Umc);
32 YAa2400=polyval(pa2400,xu);
33
34 figure(17);
35 plot(Umc,g180,'b.', xu,YAa180,'b',...
36 Umc,g600,'g.', xu,YAa600,'g',...
37 Umc,g1200,'r.', xu,YAa1200,'r',...
38 Umc,g1800,'m.', xu,YAa1800,'m',...

```

```

39         Umc,g2400,'k.',xu,YAa2400,'k');
40
41     grid;
42     title('Ght do Sensor x Umidade');
43     ylabel('Ght do Sensor (W/°C)');
44     xlabel('mumid-msec / msec (%)');
45     legend('180s','180s','600s','600s','1200s','1200s',...
46           '1800s','1800s','2400s','2400s');
47
48     Umc=Sae1
49     pa180=polyfit(Umc,g180',4);
50     xu=0:0.1:max(Umc);
51     YAa180=polyval(pa180,xu);
52
53     pa600=polyfit(Umc,g600',4);
54     xu=0:0.1:max(Umc);
55     YAa600=polyval(pa600,xu);
56
57     pa1200=polyfit(Umc,g1200',4);
58     xu=0:0.1:max(Umc);
59     YAa1200=polyval(pa1200,xu);
60
61     pa1800=polyfit(Umc,g1800',4);
62     xu=0:0.1:max(Umc);
63     YAa1800=polyval(pa1800,xu);
64
65     pa2400=polyfit(Umc,g2400',4);
66     xu=0:0.1:max(Umc);
67     YAa2400=polyval(pa2400,xu);
68
69     figure(18);
70     plot(Umc,g180,'b.', xu,YAa180,'b',...
71           Umc,g600,'g.', xu,YAa600,'g',...
72           Umc,g1200,'r.',xu,YAa1200,'r',...
73           Umc,g1800,'m.',xu,YAa1800,'m',...
74           Umc,g2400,'k.',xu,YAa2400,'k');
75
76     grid;
77     title('Ght do Sensor x Grau de Saturação');
78     ylabel('Ght do Sensor (W/°C)');
79     xlabel('mumid-msec / (msat-msec) (%)');
80     legend('180s','180s','600s','600s','1200s','1200s',...
81           '1800s','1800s','2400s','2400s');
82 %-----

```

I.5 CalculaGthE2.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 2
9 % Calcula Ght x Tempo
10 % Plota Graficos Ght x Tempo
11 % Plota Graficos Temperatura no Bloco Sensor x Tempo
12 %-----
13 % Importa dados dos arquivos de medição e cria variaveis para calculo
14 % de Ght e Temperatura no Bloco Sensor, e plotagem dos graficos:
15 load t1708va.txt;vgs01=t1708va;vgas01=abs(vgs01(:,3));tgms01=vgs01(:,4);
16 % 7,23%;25°C;40

```

```
17 load t1708va2.txt;vgs02=t1708va2;vgas02=abs(vgs02(:,3));tgms02=vgs02(:,4);  
18 % 7,23%;35°C;40  
19 load t1708va3.txt;vgs03=t1708va3;vgas03=abs(vgs03(:,3));tgms03=vgs03(:,4);  
20 % 7,23%;35°C;10  
21 load t1908va.txt;vgs04=t1908va;vgas04=abs(vgs04(:,3));tgms04=vgs04(:,4);  
22 %10,28%;25°C;40  
23 load t1908va2.txt;vgs05=t1908va2;vgas05=abs(vgs05(:,3));tgms05=vgs05(:,4);  
24 %10,28%;25°C;10  
25 load t1908va3.txt;vgs06=t1908va3;vgas06=abs(vgs06(:,3));tgms06=vgs06(:,4);  
26 %10,28%;35°C;40  
27 load t1908va4.txt;vgs07=t1908va4;vgas07=abs(vgs07(:,3));tgms07=vgs07(:,4);  
28 %10,28%;35°C;40  
29 load t2008va.txt;vgs08=t2008va;vgas08=abs(vgs08(:,3));tgms08=vgs08(:,4);  
30 %13,00%;25°C;40  
31 load t2008va2.txt;vgs09=t2008va2;vgas09=abs(vgs09(:,3));tgms09=vgs09(:,4);  
32 %13,00%;25°C;10  
33 load t2408va.txt;vgs10=t2408va;vgas10=abs(vgs10(:,3));tgms10=vgs10(:,4);  
34 %19,28%;25°C;40  
35 load t2408va2.txt;vgs11=t2408va2;vgas11=abs(vgs11(:,3));tgms11=vgs11(:,4);  
36 %19,28%;25°C;10  
37 load t2408va3.txt;vgs12=t2408va3;vgas12=abs(vgs12(:,3));tgms12=vgs12(:,4);  
38 %19,28%;35°C;40  
39 load t2408va4.txt;vgs13=t2408va4;vgas13=abs(vgs13(:,3));tgms13=vgs13(:,4);  
40 %19,28%;35°C;10  
41 load t2608va.txt;vgs14=t2608va;vgas14=abs(vgs14(:,3));tgms14=vgs14(:,4);  
42 %26,15%;25°C;40  
43 load t2608va2.txt;vgs15=t2608va2;vgas15=abs(vgs15(:,3));tgms15=vgs15(:,4);  
44 %26,15%;25°C;10  
45 load t2608va3.txt;vgs16=t2608va3;vgas16=abs(vgs16(:,3));tgms16=vgs16(:,4);  
46 %26,15%;35°C;40  
47 load t2608va4.txt;vgs17=t2608va4;vgas17=abs(vgs17(:,3));tgms17=vgs17(:,4);  
48 %26,15%;35°C;10  
49 load t2708va.txt;vgs18=t2708va;vgas18=abs(vgs18(:,3));tgms18=vgs18(:,4);  
50 %26,15%;25°C;40  
51 load t2708va2.txt;vgs19=t2708va2;vgas19=abs(vgs19(:,3));tgms19=vgs19(:,4);  
52 %26,15%;25°C;10  
53 load t3108va.txt;vgs20=t3108va;vgas20=abs(vgs20(:,3));tgms20=vgs20(:,4);  
54 %30,62%;25°C;40  
55 load t3108va2.txt;vgs21=t3108va2;vgas21=abs(vgs21(:,3));tgms21=vgs21(:,4);  
56 %30,62%;25°C;10  
57 load t3108va3.txt;vgs22=t3108va3;vgas22=abs(vgs22(:,3));tgms22=vgs22(:,4);  
58 %30,62%;35°C;40  
59 load t3108va4.txt;vgs23=t3108va4;vgas23=abs(vgs23(:,3));tgms23=vgs23(:,4);  
60 %30,62%;35°C;10  
61 load t0109va.txt;vgs24=t0109va;vgas24=abs(vgs24(:,3));tgms24=vgs24(:,4);  
62 %18,69%;25°C;40  
63 load t0109va2.txt;vgs25=t0109va2;vgas25=abs(vgs25(:,3));tgms25=vgs25(:,4);  
64 %18,69%;25°C;40  
65 load t0109va3.txt;vgs26=t0109va3;vgas26=abs(vgs26(:,3));tgms26=vgs26(:,4);  
66 %18,69%;35°C;40  
67 load t0109va4.txt;vgs27=t0109va4;vgas27=abs(vgs27(:,3));tgms27=vgs27(:,4);  
68 %18,69%;35°C;10  
69 load t0209va.txt;vgs28=t0209va;vgas28=abs(vgs28(:,3));tgms28=vgs28(:,4);  
70 %13,51%;25°C;40  
71 load t0209va2.txt;vgs29=t0209va2;vgas29=abs(vgs29(:,3));tgms29=vgs29(:,4);  
72 %13,51%;25°C;40  
73 load t0209va3.txt;vgs30=t0209va3;vgas30=abs(vgs30(:,3));tgms30=vgs30(:,4);  
74 %13,51%;35°C;40  
75 load t0209va4.txt;vgs31=t0209va4;vgas31=abs(vgs31(:,3));tgms31=vgs31(:,4);  
76 %13,51%;35°C;10  
77 load t0609va.txt;vgs32=t0609va;vgas32=abs(vgs32(:,3));tgms32=vgs32(:,4);  
78 %34,26%;25°C;40  
79 load t0609va2.txt;vgs33=t0609va2;vgas33=abs(vgs33(:,3));tgms33=vgs33(:,4);  
80 %34,26%;25°C;10  
81 load t0609va3.txt;vgs34=t0609va3;vgas34=abs(vgs34(:,3));tgms34=vgs34(:,4);
```

```
82 %34,26%;35°C;40
83 load t0609va4.txt;vgs35=t0609va4;vgas35=abs(vgs35(:,3));tgms35=vgs35(:,4);
84 %34,26%;35°C;10
85 load t0909va.txt;vgs36=t0909va;vgas36=abs(vgs36(:,3));tgms36=vgs36(:,4);
86 %23,14%;25°C;40
87 load t0909va2.txt;vgs37=t0909va2;vgas37=abs(vgs37(:,3));tgms37=vgs37(:,4);
88 %23,14%;25°C;10
89 load t0909va3.txt;vgs38=t0909va3;vgas38=abs(vgs38(:,3));tgms38=vgs38(:,4);
90 %23,14%;35°C;40
91 load t0909va4.txt;vgs39=t0909va4;vgas39=abs(vgs39(:,3));tgms39=vgs39(:,4);
92 %23,14%;35°C;10
93 load t1309va.txt;vgs40=t1309va;vgas40=abs(vgs40(:,3));tgms40=vgs40(:,4);
94 %37,44%;25°C;40
95 load t1309va2.txt;vgs41=t1309va2;vgas41=abs(vgs41(:,3));tgms41=vgs41(:,4);
96 %37,44%;25°C;10
97 load t1309va3.txt;vgs42=t1309va3;vgas42=abs(vgs42(:,3));tgms42=vgs42(:,4);
98 %37,44%;35°C;40
99 load t1309va4.txt;vgs43=t1309va4;vgas43=abs(vgs43(:,3));tgms43=vgs43(:,4);
100 %37,44%;35°C;10
101
102 % primeiras medidas em 30,62%
103 load t3008va.txt;vgs44=t3008va;vgas44=abs(vgs44(:,3));tgms44=vgs44(:,4);
104 %30,62%;25°C;40
105 load t3008va2.txt;vgs45=t3008va2;vgas45=abs(vgs45(:,3));tgms45=vgs45(:,4);
106 %30,62%;25°C;10
107 load t3008va3.txt;vgs46=t3008va3;vgas46=abs(vgs46(:,3));tgms46=vgs46(:,4);
108 %30,62%;35°C;40
109 load t3008va4.txt;vgs47=t3008va4;vgas47=abs(vgs47(:,3));tgms47=vgs47(:,4);
110 %30,62%;35°C;10
111
112 % tomadas outras medidas para avaliacao dos dados:
113 load t2309va.txt;vgs48=t2309va;vgas48=abs(vgs48(:,3));tgms48=vgs48(:,4);
114 %29,77%;25°C;40
115 load t2309va.txt;vgs49=t2309va;vgas49=abs(vgs49(:,3));tgms49=vgs49(:,4);
116 %29,77%;25°C;10
117 load t2309va3.txt;vgs50=t2309va3;vgas50=abs(vgs50(:,3));tgms50=vgs50(:,4);
118 %29,77%;35°C;40
119 load t2309va4.txt;vgs51=t2309va4;vgas51=abs(vgs51(:,3));tgms51=vgs51(:,4);
120 %29,77%;35°C;10
121
122 Calcula Ght e Temperatura no Bloco:
123
124 for n=1:800;
125
126 tgs01(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms01(n)))-273.15;
127 ghts01(n)=(vgas01(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs01(n)));
128
129 tgs02(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms02(n)))-273.15;
130 ghts02(n)=(vgas02(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs02(n)));
131
132 tgs04(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms04(n)))-273.15;
133 ghts04(n)=(vgas04(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs04(n)));
134
135 tgs06(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms06(n)))-273.15;
136 ghts06(n)=(vgas06(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs06(n)));
137
138 tgs07(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms07(n)))-273.15;
139 ghts07(n)=(vgas07(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs07(n)));
140
141 tgs08(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms08(n)))-273.15;
142 ghts08(n)=(vgas08(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs08(n)));
143
144 tgs10(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms10(n)))-273.15;
145 ghts10(n)=(vgas10(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs10(n)));
146
```

```
147 tgs12(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms12(n)))-273.15;
148 ghts12(n)=(vgas12(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs12(n)));
149
150 tgs14(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms14(n)))-273.15;
151 ghts14(n)=(vgas14(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs14(n)));
152
153 tgs16(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms16(n)))-273.15;
154 ghts16(n)=(vgas16(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs16(n)));
155
156 tgs18(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms18(n)))-273.15;
157 ghts18(n)=(vgas18(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs18(n)));
158
159 tgs20(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms20(n)))-273.15;
160 ghts20(n)=(vgas20(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs20(n)));
161
162 tgs22(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms22(n)))-273.15;
163 ghts22(n)=(vgas22(n)^2)/(262.66*(72.36-tgs22(n)));
164
165 tgs24(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms24(n)))-273.15;
166 ghts24(n)=(vgas24(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs24(n)));
167
168 tgs25(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms25(n)))-273.15;
169 ghts25(n)=(vgas25(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs25(n)));
170
171 tgs26(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms26(n)))-273.15;
172 ghts26(n)=(vgas26(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs26(n)));
173
174 tgs28(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms28(n)))-273.15;
175 ghts28(n)=(vgas28(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs28(n)));
176
177 tgs30(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms30(n)))-273.15;
178 ghts30(n)=(vgas30(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs30(n)));
179
180 tgs32(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms32(n)))-273.15;
181 ghts32(n)=(vgas32(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs32(n)));
182
183 tgs34(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms34(n)))-273.15;
184 ghts34(n)=(vgas34(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs34(n)));
185
186 tgs36(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms36(n)))-273.15;
187 ghts36(n)=(vgas36(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs36(n)));
188
189 tgs38(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms38(n)))-273.15;
190 ghts38(n)=(vgas38(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs38(n)));
191
192 tgs40(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms40(n)))-273.15;
193 ghts40(n)=(vgas40(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs40(n)));
194
195 tgs42(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms42(n)))-273.15;
196 ghts42(n)=(vgas42(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs42(n)));
197
198 tgs44(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms44(n)))-273.15;
199 ghts44(n)=(vgas44(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs44(n)));
200
201 tgs46(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms46(n)))-273.15;
202 ghts46(n)=(vgas46(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs46(n)));
203
204 tgs48(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms48(n)))-273.15;
205 ghts48(n)=(vgas48(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs48(n)));
206
207 tgs50(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms50(n)))-273.15;
208 ghts50(n)=(vgas50(n)^2)/(262.66*(72.32-tgs50(n)));
209
210 end;
211
```

```
212 for n=1:200;
213
214 tgs03(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms03(n)))-273.16;
215 ghts03(n)=(vgas03(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs03(n)));
216
217 tgs05(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms05(n)))-273.16;
218 ghts05(n)=(vgas05(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs05(n)));
219
220 tgs09(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms09(n)))-273.16;
221 ghts09(n)=(vgas09(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs09(n)));
222
223 tgs11(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms11(n)))-273.16;
224 ghts11(n)=(vgas11(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs11(n)));
225
226 tgs13(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms13(n)))-273.16;
227 ghts13(n)=(vgas13(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs13(n)));
228
229 tgs15(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms15(n)))-273.16;
230 ghts15(n)=(vgas15(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs15(n)));
231
232 tgs17(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms17(n)))-273.16;
233 ghts17(n)=(vgas17(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs17(n)));
234
235 tgs19(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms19(n)))-273.16;
236 ghts19(n)=(vgas19(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs19(n)));
237
238 tgs21(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms21(n)))-273.16;
239 ghts21(n)=(vgas21(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs21(n)));
240
241 tgs23(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms23(n)))-273.16;
242 ghts23(n)=(vgas23(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs23(n)));
243
244 tgs27(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms27(n)))-273.16;
245 ghts27(n)=(vgas27(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs27(n)));
246
247 tgs29(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms29(n)))-273.16;
248 ghts29(n)=(vgas29(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs29(n)));
249
250 tgs31(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms31(n)))-273.16;
251 ghts31(n)=(vgas31(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs31(n)));
252
253 tgs33(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms33(n)))-273.16;
254 ghts33(n)=(vgas33(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs33(n)));
255
256 tgs35(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms35(n)))-273.16;
257 ghts35(n)=(vgas35(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs35(n)));
258
259 tgs37(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms37(n)))-273.16;
260 ghts37(n)=(vgas37(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs37(n)));
261
262 tgs39(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms39(n)))-273.16;
263 ghts39(n)=(vgas39(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs39(n)));
264
265 tgs41(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms41(n)))-273.16;
266 ghts41(n)=(vgas41(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs41(n)));
267
268 tgs43(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms43(n)))-273.16;
269 ghts43(n)=(vgas43(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs43(n)));
270
271 tgs45(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms45(n)))-273.16;
272 ghts45(n)=(vgas45(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs45(n)));
273
274 tgs47(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms47(n)))-273.16;
275 ghts47(n)=(vgas47(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs47(n)));
276
```

```
277 tgs49(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms49(n)))-273.16;
278 ghts49(n)=(vgas49(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs49(n)));
279
280 tgs51(n)=3988/(3988/298.16-log(3000)+log(tgms51(n)))-273.16;
281 ghts51(n)=(vgas51(n)^2)/(262.56*(72.339-tgs51(n)));
282 end;
283
284 Plota Graficos de Ght x Tempo
285
286 figure(4001);
287 plot (3*(1:800),ghts01(1,1:800),... % 7,10%,25°C
288     3*(1:800),ghts04(1,1:800),... % 9,82%,25°C
289     3*(1:800),ghts08(1,1:800),... %12,65%,25°C
290     3*(1:800),ghts28(1,1:800),... %13,23%,25°C
291     3*(1:800),ghts24(1,1:800),... %18,17%,25°C
292     3*(1:800),ghts36(1,1:800),... %22,57%,25°C
293     3*(1:800),ghts20(1,1:800),... %27,48%,25°C
294     3*(1:800),ghts44(1,1:800),... %30,57%,25°C
295     3*(1:800),ghts32(1,1:800),... %33,22%,25°C
296     3*(1:800),ghts40(1,1:800)); %36,54%,25°C
297
298 title('Ght do Sensor x Tempo - Ensaio 2 - 25°C');
299 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Ght do Sensor (W/°C)');
300 legend('7,10%', '9,82%', '12,65%', '13,23%', '18,17%', '22,57%', ...
301     '27,48%', '30,57%', '33,32%', '36,54%');
302 grid;
303
304 figure(4002)
305 plot (3*(1:800),ghts02(1,1:800),... % 6,95%,35°C
306     3*(1:800),ghts06(1,1:800),... % 9,48%,35°C
307     3*(1:800),ghts30(1,1:800),... %12,69%,35°C
308     3*(1:800),ghts26(1,1:800),... %17,55%,35°C
309     3*(1:800),ghts38(1,1:800),... %21,55%,35°C
310     3*(1:800),ghts22(1,1:800),... %25,95%,35°C
311     3*(1:800),ghts46(1,1:800),... %28,06%,35°C
312     3*(1:800),ghts34(1,1:800),... %32,04%,35°C
313     3*(1:800),ghts42(1,1:800)); %34,74%,35°C
314
315
316 title('Ght do Sensor x Tempo - Ensaio 2 - 35°C');
317 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Ght do Sensor (W/°C)');
318 legend('6,95%', '9,48%', '12,69%', '17,55%', '21,55%', ...
319     '25,95%', '28,06%', '32,04%', '34,74%');
320 grid;
321
322 figure(4003);
323 plot(3*(1:800),tgs01(1,1:800),...
324     3*(1:800),tgs04(1,1:800),...
325     3*(1:800),tgs08(1,1:800),...
326     3*(1:800),tgs28(1,1:800),...
327     3*(1:800),tgs24(1,1:800),...
328     3*(1:800),tgs36(1,1:800),...
329     3*(1:800),tgs20(1,1:800),...
330     3*(1:10:800),tgs44(1,1:10:800),'.',...
331     3*(1:10:800),tgs32(1,1:10:800),'.',...
332     3*(1:10:800),tgs40(1,1:10:800),'.');
333 title('Temperatura Bloco Sensor x Tempo - Ensaio 2 - 25°C');
334 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
335 legend('7,10%', '9,82%', '12,65%', '13,23%', '18,17%', '22,57%', ...
336     '27,48%', '30,57%', '33,32%', '36,54%');
337 grid;
338
339 figure(4004);
340 plot(3*(1:800),tgs02(1,1:800),...
341     3*(1:800),tgs06(1,1:800),...
```

```

342      3*(1:800),tgs30(1,1:800),...
343      3*(1:800),tgs26(1,1:800),...
344      3*(1:800),tgs38(1,1:800),...
345      3*(1:800),tgs22(1,1:800),...
346      3*(1:800),tgs46(1,1:800),...
347      3*(1:10:800),tgs34(1,1:10:800),'.',...
348      3*(1:10:800),tgs42(1,1:10:800),'.');
349
350 title('Temperatura Bloco Sensor x Tempo - Ensaio 2 - 35°C');
351 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
352 legend('6,95%','9,48%','12,69%','17,55%','21,55%',...
353     '25,95%','28,06%','32,04%','34,74%');
354 grid;
355

```

I.6 VariaveisGhtE2.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 2
9 % Para Tempos de 3, 10, 30 e 40 minutos:
10 % - Cria variaveis Ght
11 % - Plota Grafico Ght x Umidade do Solo nas temperaturas de 25°C e 35°C
12 %-----
13 %Todos Ght em 25 e 35°C em 600s:
14 gts600=[ghts01(200),ghts02(200),ghts03(200),...
15     ghts04(200),ghts05(200),ghts06(200),ghts07(200),...
16     ghts08(200)ghts09(200),...
17     ghts10(200),ghts11(200),ghts12(200),ghts13(200),...
18     ghts14(200),ghts15(200),ghts16(200),ghts17(200),...
19     ghts18(200),ghts19(200),...
20     ghts20(200),ghts21(200),ghts22(200),ghts23(200),...
21     ghts24(280),ghts25(200)ghts26(200),ghts27(200),...
22     ghts28(200),ghts29(200),ghts30(200),ghts31(200),...
23     ghts32(200),ghts33(200),ghts34(200),ghts35(200),...
24     ghts36(200),ghts37(200)ghts38(200),ghts39(200),...
25     ghts40(200),ghts41(200),ghts42(200),ghts43(200),...
26     ghts44(200),ghts45(200),ghts46(200),ghts47(200),...
27     ghts48(200),ghts49(200),ghts50(200),ghts51(200)];
28
29 %Todos Ght em 25 e 35°C media em 600s:
30 gsc600=[mean(ghts01(185:200)),mean(ghts02(185:200)),mean(ghts03(185:200)),...
31     mean(ghts04(185:200)),mean(ghts05(185:200)),...
32     mean(ghts06(185:200)),mean(ghts07(185:200)),...
33     mean(ghts08(185:200)),mean(ghts09(185:200)),...
34     mean(ghts10(185:200)),mean(ghts11(185:200)),...
35     mean(ghts12(185:200)),mean(ghts13(185:200)),...
36     mean(ghts14(185:200)),mean(ghts15(185:200)),...
37     mean(ghts16(185:200)),mean(ghts17(185:200)),...
38     mean(ghts18(185:200)),mean(ghts19(185:200)),...
39     mean(ghts20(185:200)),mean(ghts21(185:200)),...
40     mean(ghts22(185:200)),mean(ghts23(185:200)),...
41     mean(ghts24(201:201)),mean(ghts25(185:200)),...
42     mean(ghts26(185:200)),mean(ghts27(185:200)),...
43     mean(ghts28(185:200)),mean(ghts29(185:200)),...
44     mean(ghts30(185:200)),mean(ghts31(185:200)),...

```

```

45     mean(ghts32(185:200)),mean(ghts33(185:200)),...
46     mean(ghts34(185:200)),mean(ghts35(185:200)),...
47     mean(ghts36(185:200)),mean(ghts37(185:200)),...
48     mean(ghts38(185:200)),mean(ghts39(185:200)),...
49     mean(ghts40(185:200)),mean(ghts41(185:200)),...
50     mean(ghts42(185:200)),mean(ghts43(185:200)),...
51     mean(ghts44(185:200)),mean(ghts45(185:200)),...
52     mean(ghts46(185:200)),mean(ghts47(185:200)),...
53     mean(ghts48(185:200)),mean(ghts49(185:200)),...
54     mean(ghts50(185:200)),mean(ghts51(185:200))];
55
56 %Todos Ght em 25°C media em 180s:
57 i=55:65;
58 gsca180=[mean(ghts01(i)),mean(ghts04(i)),mean(ghts08(i)),...
59     mean(ghts10(i)),mean(ghts14(i)),mean(ghts20(i)),mean(ghts24(i)),...
60     mean(ghts28(i)),mean(ghts32(i)),...
61     mean(ghts36(i)),mean(ghts40(i)),mean(ghts44(i)),mean(ghts18(i)),...
62     mean(ghts48(i))];
63
64 %Todos Ght em 25°C media em 1800s:
65 k=585:600;
66 gsca1800=[mean(ghts01(k)),mean(ghts04(k)),mean(ghts08(k)),...
67     mean(ghts10(k)),mean(ghts14(k)),mean(ghts20(k)),mean(ghts24(k)),...
68     mean(ghts28(k)),mean(ghts32(k)),...
69     mean(ghts36(k)),mean(ghts40(k)),mean(ghts44(k)),mean(ghts18(k)),...
70     mean(ghts48(k))];
71
72 %Todos Ght em 25°C media em 2400s:
73 j=785:800;
74 gsca2400=[mean(ghts01(j)),mean(ghts04(j)),mean(ghts08(j)),...
75     mean(ghts10(j)),mean(ghts14(j)),mean(ghts20(j)),...
76     mean(ghts24(786:786)),mean(ghts28(j)),mean(ghts32(j)),...
77     mean(ghts36(j)),mean(ghts40(j)),mean(ghts44(j)),mean(ghts18(j)),...
78     mean(ghts48(j))];
79
80
81 %Todos Ght em 35°C media em 2400s:
82 gscb2400=[mean(ghts02(j)),mean(ghts06(j)),mean(ghts12(j)),...
83     mean(ghts16(j)),mean(ghts22(j)),mean(ghts26(j)),...
84     mean(ghts30(j)),mean(ghts34(j)),mean(ghts38(j)),mean(ghts42(j)),...
85     mean(ghts46(j)),mean(ghts50(j))];
86
87 %Todos Ght em 35°C media em 1800s:
88 gscb1800=[mean(ghts02(k)),mean(ghts06(k)),mean(ghts12(k)),...
89     mean(ghts16(k)),mean(ghts22(k)),mean(ghts26(k)),...
90     mean(ghts30(k)),mean(ghts34(k)),mean(ghts38(k)),mean(ghts42(k)),...
91     mean(ghts46(k)),mean(ghts50(k))];
92
93
94 %Todos Ght em 35°C media em 180s:
95 gscb180=[mean(ghts02(i)),mean(ghts06(i)),mean(ghts12(i)),...
96     mean(ghts16(i)),mean(ghts22(i)),mean(ghts26(i)),...
97     mean(ghts30(i)),mean(ghts34(i)),mean(ghts38(i)),mean(ghts42(i)),...
98     mean(ghts46(i)),mean(ghts50(i))];
99
100 % Umidade sem correção para todas as medições:
101 ums1=[7.23;7.23;7.23;...
102     10.04;10.04;10.04;10.04;...
103     13.00;13.00;...
104     19.28;19.28;19.28;19.28;...
105     26.15;26.15;26.15;26.15;26.15;26.15;...
106     30.62;30.62;30.62;30.62;30.62;...
107     18.69;18.69;18.69;18.69;18.69;...
108     13.51;13.51;13.51;13.51;13.51;...
109     34.26;34.26;34.26;34.26;34.26;...

```

```

110      23.14;23.14;23.14;23.14;...
111      37.44;37.44;37.44;37.44;...
112      30.62;30.62;30.62;30.62;...
113      29.77;29.77;29.77;29.77];
114
115 % Umidade com correção para todas as medições:
116 umsc1=[7.10;6.95;6.95;...
117     9.82;9.82;9.48;9.48;...
118     12.65;12.65;...
119     18.61;18.61;18.10;18.10;...
120     25.70;25.70;24.08;24.08;23.62;23.62;...
121     27.48;27.48;25.95;25.95;...
122     18.17;18.17;17.55;17.55;...
123     13.23;13.23;12.69;12.69;...
124     33.32;33.32;32.04;32.04;...
125     22.57;22.57;21.55;21.55;...
126     36.54;36.54;34.74;34.74;...
127     30.57;30.57;28.06;28.06;...
128     28.78;28.78;27.20;27.20];
129
130 % Umidade sem correção para todos valores em 25°C, para todos os valores
131 % da 2ª medida:
132 ums25a=[ums1(1),ums1(4),ums1(8),ums1(10),ums1(14),ums1(20),...
133     ums1(24),ums1(28),ums1(32),ums1(36),ums1(40),ums1(44),ums1(48)];
134 ums25b=[ums1(5),ums1(9),ums1(11),ums1(15),ums1(21),ums1(25),...
135     ums1(29),ums1(33),ums1(37),ums1(41),ums1(45),ums1(49)];
136
137 % Umidade com correção para todos valores em 25°C, para todos os valores
138 % da 2ª medida:
139 umsc25a=[umsc1(1),umsc1(4),umsc1(8),umsc1(10),umsc1(14),umsc1(20),...
140     umsc1(24),umsc1(28),umsc1(32),umsc1(36),umsc1(40),...
141     umsc1(44), umsc1(48)];
142 umsc25b=[umsc1(5),umsc1(9),umsc1(11),umsc1(15),umsc1(21),umsc1(25),...
143     umsc1(29),umsc1(33),umsc1(37),umsc1(41),umsc1(45),umsc1(49)];
144
145 % Ght em 600s para todos valores em 25°C, para todos os valores da
146 % 2ª medida:
147 gs25a600=[gs600(1),gs600(4),gs600(8),gs600(10),gs600(14),...
148     gs600(20),gs600(24),gs600(28),gs600(32),gs600(36),...
149     gs600(40),gs600(44),gs600(48)];
150 gs25b600=[gs600(5),gs600(9),gs600(11),gs600(15),gs600(21),...
151     gs600(25),gs600(29),gs600(33),gs600(37),gs600(41),...
152     gs600(45),gs600(49)];
153
154 % Ght media em 600s para todos valores em 25°C, para todos os valores
155 % da 2ª medida:
156 gsc25a600=[gsc600(1),gsc600(4),gsc600(8),gsc600(10),...
157     gsc600(14),gsc600(20),gsc600(24),gsc600(28),...
158     gsc600(32),gsc600(36),gsc600(40),gsc600(44),gsc600(48)];
159 gsc25b600=[gsc600(5),gsc600(9),gsc600(11),gsc600(15),...
160     gsc600(21),gsc600(25),gsc600(29),gsc600(33),...
161     gsc600(37),gsc600(41),gsc600(45),gsc600(49)];
162
163 % Umidade sem correção para todos valores em 35°C, para todos os valores
164 % da 2ª medida:
165 ums35a=[ums1(2),ums1(6),ums1(12),ums1(16),ums1(22),ums1(26),...
166     ums1(30),ums1(34),ums1(38),ums1(42),ums1(46),ums1(50)];
167 ums35b=[ums1(3),ums1(7),ums1(13),ums1(17),ums1(23),ums1(27),...
168     ums1(31),ums1(35),ums1(39),ums1(43),ums1(47),ums1(51)];
169
170 % Umidade com correção para todos valores em 35°C, para todos os valores
171 % da 2ª medida:
172 umsc35a=[umsc1(2),umsc1(6),umsc1(12),umsc1(16),umsc1(22),...
173     umsc1(26),umsc1(30),umsc1(34),umsc1(38),umsc1(42),...
174     umsc1(46),umsc1(50)];

```

```

175 umsc35b=[umsc1(3),umsc1(7),umsc1(13),umsc1(17),umsc1(23),...
176     umsc1(27),umsc1(31),umsc1(35),umsc1(39),umsc1(43),umsc1(47),...
177     umsc1(51)];
178
179
180 % Ght para em 600s todos valores em 35°C, para todos os valores da
181 % 2ª medida:
182 gs35a600=[gs600(2),gs600(6),gs600(12),gs600(16),gs600(22),...
183     gs600(26),gs600(30),gs600(34),gs600(38),gs600(42),...
184     gs600(46),gs600(50)];
185 gs35b600=[gs600(3),gs600(7),gs600(13),gs600(17),gs600(23),...
186     gs600(27),gs600(31),gs600(35),gs600(39),gs600(43),...
187     gs600(47),gs600(51)];
188
189 % Ght media em 600s para todos valores em 35°C, para todos os
190 % valores da 2ª medida:
191 gsc35a600=[gsc600(2),gsc600(6),gsc600(12),gsc600(16),...
192     gsc600(22),gsc600(26),gsc600(30),gsc600(34),...
193     gsc600(38),gsc600(42),gsc600(46),gsc600(50)];
194 gsc35b600=[gsc600(3),gsc600(7),gsc600(13),gsc600(17),...
195     gsc600(23),gsc600(27),gsc600(31),gsc600(35),...
196     gsc600(39),gsc600(43),gsc600(47),gsc600(51)];
197
198
199 % Ght media para todos valores em 25°C em 180s, exceto
200 % medidas 10, 14 e 18 com falha
201 gsc25a180b=[mean(ghts01(i)),mean(ghts04(i)),mean(ghts08(i)),...
202     mean(ghts20(i)),mean(ghts24(i)),...
203     mean(ghts28(i)),mean(ghts32(i)),...
204     mean(ghts36(i)),mean(ghts40(i)),mean(ghts44(i))];
205
206 % Ght media para todos valores em 25°C em 600s, exceto
207 % medidas 10, 14, 18 e 48 com falha
208 gsc25a600b=[gsc600(1),gsc600(4),gsc600(8),...
209     gsc600(20),gsc600(24),gsc600(28),...
210     gsc600(32),gsc600(36),gsc600(40),gsc600(44)];
211
212 % Ght media para todos valores em 25°C em 2400s, exceto
213 % medidas 10, 14, 18 e 48 com falha
214 gsc25a2400b=[mean(ghts01(j)),mean(ghts04(j)),mean(ghts08(j)),...
215     mean(ghts20(j)),mean(ghts24(786:786)),...
216     mean(ghts28(j)),mean(ghts32(j)),...
217     mean(ghts36(j)),mean(ghts40(j)),mean(ghts44(j))];
218
219 % Ght media para todos valores em 25°C em 1800s, exceto
220 % medidas 10, 14, 18 e 48 com falha
221 gsc25a1800b=[mean(ghts01(k)),mean(ghts04(k)),mean(ghts08(k)),...
222     mean(ghts20(k)),mean(ghts24(k)),...
223     mean(ghts28(k)),mean(ghts32(k)),...
224     mean(ghts36(k)),mean(ghts40(k)),mean(ghts44(k))];
225
226 % Umidade corrigida para todos valores em 25°C, exceto medidas
227 % 10, 14, 18 e 48 com falha
228 umsca25b=[umsc1(1),umsc1(4),umsc1(8),...
229     umsc1(20),umsc1(24),umsc1(28),...
230     umsc1(32),umsc1(36),umsc1(40),umsc1(44)];
231
232 figure(4101);
233 plot(umsca25b,gsc25a180b,'r.',umsca25b,gsc25a600b,'g.',...
234     umsca25b,gsc25a1800b,'k.',umsca25b,gsc25a2400b,'b.');
235 title(...);
236 'Ght Sensor4s x Umidade em 180s, 600s, 1800s e 2400s - Ensaio 2 - 25°C ');
237 ylabel('Ght Sensor4'); xlabel('(sumid-ssec)/ssec');
238 legend('180s','600s','1800s','2400s');
239 grid;

```

```

240
241
242 % Ght media para todos valores em 35°C em 180s, exceto
243 % medidas 12, 16 e 50 com falha
244 gsc35a180b=[mean(ghts02(i)),mean(ghts06(i)),mean(ghts22(i)),...
245 mean(ghts26(i)),mean(ghts30(i)),mean(ghts34(i)),...
246 mean(ghts38(i)),mean(ghts42(i)), mean(ghts46(i))];
247
248 % Ght media para todos valores em 35°C em 600s, exceto
249 % medidas 12, 16 e 50 com falha
250 gsc35a600b=[gsc600(2),gsc600(6),gsc600(22),gsc600(26),gsc600(30),...
251 gsc600(34),gsc600(38),gsc600(42),gsc600(46)];
252
253 % Ght media para todos valores em 35°C em 1800s exceto
254 % medidas 12, 16 e 50 com falha
255 gsc35a1800b=[mean(ghts02(k)),mean(ghts06(k)),mean(ghts22(k)),...
256 mean(ghts26(k)),mean(ghts30(k)),mean(ghts34(k)),...
257 mean(ghts38(k)),mean(ghts42(k)), mean(ghts46(k))];
258
259 % Ght media para todos valores em 35°C em 2400s exceto
260 % medidas 12, 16 e 50 com falha
261 gsc35a2400b=[mean(ghts02(j)),mean(ghts06(j)),mean(ghts22(j)),...
262 mean(ghts26(j)),mean(ghts30(j)),mean(ghts34(j)),...
263 mean(ghts38(j)),mean(ghts42(j)), mean(ghts46(j))];
264
265 % Umidade corrigida para todos valores em 35°C, exceto medidas
266 % 12, 16 e 50 com falha
267 umsca35b=[umsca1(2),umsca1(6),umsca1(22),umsca1(26),...
268 umsca1(30),umsca1(34),umsca1(38),umsca1(42),umsca1(46)];
269
270
271 figure(4102);
272 plot(umsca35b,gsc35a180b,'r.',umsca35b,gsc35a600b,'g',...
273 umsca35b,gsc35a1800b,'k.',umsca35b,gsc35a2400b,'b.');
274 title...
275 ' Ght Sensor x Umidade em 180s, 600s, 1800s e 2400s - Ensaio 2 - 35°C';
276 ylabel('Ght Sensor'); xlabel('(sumid-ssec)/ssec (%)');
277 legend('180s','600s','1800','2400s');
278 grid;
279

```

I.7 AjustesGhtE2.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETTRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 2
9 % Ajusta a polinomios do 4º grau os valores de Ght x Umidade
10 % Plota os graficos de Ght x Umidade
11 %-----
12 % a) Ajusta por polinomio do 4º grau os dados de Ght e umidade em 25°C.
13 % Retorna o polinomio do ajuste dentro da faixa variação
14 % de umidade:
15
16 Umcs25a=umsca25b;
17 pa180sa=polyfit(Umcs25a,gsc25a180b,4);
18 xu=6:0.1:max(Umcs25a);
19 YAa180sa=polyval(pa180sa,xu);

```

```
20
21 pa600sa=polyfit(Umcs25a,gsc25a600b,4);
22 xu=6:0.1:max(Umcs25a);
23 YAa600sa=polyval(pa600sa,xu);
24
25 pa1800sa=polyfit(Umcs25a,gsc25a1800b,4);
26 xu=6:0.1:max(Umcs25a);
27 YAa1800sa=polyval(pa1800sa,xu);
28
29 pa2400sa=polyfit(Umcs25a,gsc25a2400b,4);
30 xu=6:0.1:max(Umcs25a);
31 YAa2400sa=polyval(pa2400sa,xu);
32
33
34 % b) Ajusta por polinomio do 4º grau os dados de Ght e umidade em 35°C.
35 % Retorna o polinomio do ajuste dentro da faixa variação de umidade:
36
37 Umcs35a=umsca35b;
38 pa180sb=polyfit(Umcs35a,gsc35a180b,4);
39 xub=6:0.1:max(Umcs35a);
40 YAa180sb=polyval(pa180sb,xub);
41
42 pa600sb=polyfit(Umcs35a,gsc35a600b,4);
43 xub=6:0.1:max(Umcs35a);
44 YAa600sb=polyval(pa600sb,xub);
45
46 pa1800sb=polyfit(Umcs35a,gsc35a1800b,4);
47 xub=6:0.1:max(Umcs35a);
48 YAa1800sb=polyval(pa1800sb,xub);
49
50 pa2400sb=polyfit(Umcs35a,gsc35a2400b,4);
51 xub=6:0.1:max(Umcs35a);
52 YAa2400sb=polyval(pa2400sb,xub);
53
54 xub=6:0.1:max(Umcs35a);
55
56 % c) Plota os graficos
57
58 figure(4201);
59 plot(Umcs25a,gsc25a180b,'r.', xu,YAa180sa,'r',...
60 Umcs25a,gsc25a600b,'g.',xu,YAa600sa,'g',...
61 Umcs25a,gsc25a1800b,'k.',xu,YAa1800sa,'k',...
62 Umcs25a,gsc25a2400b,'b.',xu,YAa2400sa,'b');
63
64 grid;
65 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 25°C ');
66 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
67 legend('180s','180s','600s','600s','1800s','1800s','2400s','2400s');
68
69 figure(4202);
70 plot(Umcs35a,gsc35a180b,'r.', xub,YAa180sb,'r',...
71 Umcs35a,gsc35a600b,'g.',xub,YAa600sb,'g',...
72 Umcs35a,gsc35a1800b,'k.',xub,YAa1800sb,'k',...
73 Umcs35a,gsc35a2400b,'b.',xub,YAa2400sb,'b');
74
75 grid;
76 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 35°C ');
77 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
78 legend('180s','180s','600s','600s','1800s','1800s','2400s','2400s');
79
80 figure(4203);
81 plot(Umcs25a,gsc25a180b,'b.', xu,YAa180sa,'b',...
82 Umcs35a,gsc35a180b,'g.',xub,YAa180sb,'g');
83 grid;
84 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 25°C e 35°C');
```

```
85 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
86 legend('180s 25°C', '180s 25°C', '180s 35°C', '180s 35°C');
87
88 figure(4204);
89 plot(Umc25a,gsc25a600b,'b.', xu,YAa600sa,'b',...
90       Umcs35a,gsc35a600b,'g.',xub,YAa600sb,'g');
91 grid;
92 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 25°C e 35°C');
93 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
94 legend('600s 25°C', '600s 25°C', '600s 35°C', '600s 35°C');
95
96 figure(4205);
97 plot(Umc25a,gsc25a1800b,'b.', xu,YAa1800sa,'b',...
98       Umcs35a,gsc35a1800b,'g.',xub,YAa1800sb,'g');
99 grid;
100 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 25°C e 35°C');
101 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
102 legend('1800s 25°C', '1800s 25°C', '1800s 35°C', '1800s 35°C');
103
104 figure(4206);
105 plot(Umc25a,gsc25a2400b,'b.', xu,YAa2400sa,'b',...
106       Umcs35a,gsc35a2400b,'g.',xub,YAa2400sb,'g');
107 grid;
108 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 25°C e 35°C');
109 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
110 legend('2400s 25°C', '2400s 25°C', '2400s 35°C', '2400s 35°C');
111
112 figure(4207);
113 plot(Umc25a,gsc25a180b,'b.');//, xu,YAa180sa,'b');
114 grid;
115 title('Ght do Sensor x Umidade 180s - Ensaio 2 - 25°C');
116 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
117 legend('180s');
118
119 figure(4208);
120 plot(Umc35a,gsc35a180b,'g.');
121 grid;
122 title('Ght do Sensor x Umidade 180s - Ensaio 2 - 35°C');
123 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
124 legend('180s');
125
126 figure(4209);
127 plot(Umc25a,gsc25a1800b,'b.');
128 grid;
129 title('Ght do Sensor x Umidade 1800s - Ensaio 2 - 25°C');
130 ylabel('Ght do Sensor (mW/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
131 legend('1800s');
132
133 figure(4210);
134 plot(Umc35a,gsc35a1800b,'g.');
135 grid;
136 title('Ght do Sensor x Umidade 1800s - Ensaio 2 - 35°C');
137 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(umid-msec) / msec (%)');
138 legend('1800s');
139
140 YAa180saA=polyval(pa180sa,xub);
141 YAa600saA=polyval(pa600sa,xub);
142 YAa1800saA=polyval(pa1800sa,xub);
143 YAa2400saA=polyval(pa2400sa,xub);
144
145 figure(4211);
146 plot(xub,YAa180sb-YAa180saA,'b',xub,YAa600sb-YAa600saA,'r',...
147           xub,YAa1800sb-YAa1800saA,'g',...
148           xub,YAa2400sb-YAa2400saA,'k',30,.0005);
```

```

150    grid;
151    title('Diferença Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 2 - 25°C e 35°C ');
152    ylabel('Diferença Ght do Sensor (W/°C)');
153    xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
154    legend('180s','600s','1800s','2400s');
155
156    figure(4212);
157    plot(xu,YAa180sa,'r',xu,YAa600sa,'g',xu,YAa1800sa,'k',...
158        xus,YAa180sas,'r:',xus,YAa600sas,'g:',xus,YAa1800sas,'k:');
159    title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaios 2 e 3 - 25°C');
160    ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
161    legend('180s Ensaio 2', '600s Ensaio 2', '1800s Ensaio 2',...
162        '180s Ensaio 3', '600s Ensaio 3', '1800s Ensaio 3');
163    grid;
164
165    figure(4213);
166    plot(xub,YAa180sb,'r',xub,YAa600sb,'g',xub,YAa1800sb,'k',...
167        xubs,YAa180sbs,'r:',xubs,YAa600sbs,'g:',xubs,YAa1800sbs,'k:');
168    title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaios 2 e 3 - 35°C');
169    ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
170    legend('180s Ensaio 2', '600s Ensaio 2', '1800s Ensaio 2',...
171        '180s Ensaio 3', '600s Ensaio 3', '1800s Ensaio 3');
172    grid;

```

I.8 PlotaTempAE2.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETTRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 2
9 % Plota os graficos de Temperatura Ambiente x Tempo
10 %-----
11 clear all;
12 load t1708tam.txt;
13 load t1908tam.txt;
14 load t2008tam.txt;
15 load t3108tam.txt;
16 load t0109tam.txt;
17 load t0209tam.txt;
18 load t0609tam.txt;
19 load t0909tam.txt;
20 load t1309tam.txt;
21 load t3008tam.txt;
22
23 taa01=t1708tam; taab01=taa01(:,1)';
24 taa02=t1908tam; taab02=taa02(:,1)';
25 taa03=t2008tam; taab03=taa03(:,1)';
26 taa04=t3108tam; taab04=taa04(:,1)';
27 taa05=t0109tam; taab05=taa05(:,1)';
28 taa06=t0209tam; taab06=taa06(:,1)';
29 taa07=t0609tam; taab07=taa07(:,1)';
30 taa08=t0909tam; taab08=taa08(:,1)';
31 taa09=t1309tam; taab09=taa09(:,1)';
32 taa10=t3008tam; taab10=taa10(:,1)';
33
34 figure(4201);
35 %plot(30*(1:80),taab01(1,1:80),...

```

```
36      %30*(1:80),taab02(1,1:80),...
37      %30*(1:80),taab03(1,1:80),...
38      %30*(1:80),taab06(1,1:80),...
39      %30*(1:80),taab05(1,1:80));
40      %30*(1:80),taab08(1,1:80),...
41      %30*(1:80),taab04(1,1:80),...
42      %30*(1:80),taab10(1,1:80),'..',...
43      %30*(1:80),taab07(1,1:80),...
44      %30*(1:80),taab09(1,1:80));
45
46 %separando para apresentacao do grafico;;
47 plot(30*(1:80),taab01(1,1:80),...
48      30*(1:80),taab06(1,1:80),...
49      30*(1:80),taab08(1,1:80),...
50      30*(1:80),taab04(1,1:80),...
51      30*(1:80),taab07(1,1:80),...
52      30*(1:80),taab09(1,1:80));
53 title('Temperatura Solo x Tempo - Ensaio 2 - 25°C ');
54 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
55 %legend('7,10%', '9,82%', '12,65%', '13,23%', '18,17%',...
56 %        '22,57%', '27,48%', '30,57%', '33,32%',...
57 %        '36,54%');
58 legend('7,10%','13,23%','22,57%','27,48%','33,32%','36,54%');
59
60 grid;
61
62 load t1708ta2m.txt;
63 %load t1908ta3m.txt; medicao registrada com falha
64 %load t2008tam.txt; medicao apenas em 25°C
65 load t3108ta3m.txt;
66 load t0109ta3m.txt;
67 load t0209ta3m.txt;
68 load t0609ta3m.txt;
69 load t0909ta3m.txt;
70 load t1309ta3m.txt;
71 %load t3008ta3m.txt; Falta esta medicao no arquivo
72
73 taa01=t1708ta2m; taab01=taa01(:,1)';
74 %taa02=t1908ta3m; taab02=taa02(:,1)';
75 %taa03=t2008tam; taab03=taa03(:,1)';
76 taa04=t3108ta3m; taab04=taa04(:,1)';
77 taa05=t0109ta3m; taab05=taa05(:,1)';
78 taa06=t0209ta3m; taab06=taa06(:,1)';
79 taa07=t0609ta3m; taab07=taa07(:,1)';
80 taa08=t0909ta3m; taab08=taa08(:,1)';
81 taa09=t1309ta3m; taab09=taa09(:,1)';
82 %taa10=t3008tam; taab10=taa10(:,1)';
83
84 figure(4202);
85 %plot(30*(1:80),taab01(1,1:80),...
86 %      30*(1:80),taab06(1,1:80),...
87 %      30*(1:80),taab05(1,1:80),...
88 %      30*(1:80),taab08(1,1:80),...
89 %      30*(1:80),taab04(1,1:80),...
90 %      30*(1:80),taab07(1,1:80),...
91 %      30*(1:80),taab09(1,1:80));
92
93 %separando para apresentacao no grafico;;
94 plot(30*(1:80),taab01(1,1:80),...
95      30*(1:80),taab06(1,1:80),...
96      30*(1:80),taab08(1,1:80),...
97      30*(1:80),taab04(1,1:80),...
98      30*(1:80),taab07(1,1:80),...
99      30*(1:80),taab09(1,1:80));
```

```

101 title('Temperatura Solo x Tempo - Ensaio 2 - 35°C');
102 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
103 %legend('6,95%', '12,69%', '17,55%', '21,55%', '25,95%', '32,04%', ...
104     '%34,74%');
105 legend('6,95%', '12,69%', '21,55%', '25,95%', '32,04%', ...
106     '%34,74%');
107 grid;

```

I.9 *CalculaGhtE3.m*

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 3
9 % Calcula Ght x Tempo
10 % Plota Graficos Ght x Tempo
11 % Plota Graficos Temperatura no Bloco Sensor x Tempo
12 %-----
13 % Importa dados dos arquivos de medição e cria variaveis para calculo
14 % de Ght e Temperatura no Bloco Sensor, e plotagem dos graficos:
15
16 load t1312va.txt;vgs01s=t1312va;vgas01s=abs(vgs01s(:,3));
17 tgms01s=vgs01s(:,4); % 6,56%;25°C
18 load t1312va2.txt;vgs02s=t1312va2;vgas02s=abs(vgs02s(:,3));
19 tgms02s=vgs02s(:,4); % 6,56%;35°C
20 load t1512va.txt;vgs03s=t1512va;vgas03s=abs(vgs03s(:,3));
21 tgms03s=vgs03s(:,4); % 14,98%;25°C
22 load t1512va2.txt;vgs04s=t1512va2;vgas04s=abs(vgs04s(:,3));
23 tgms04s=vgs04s(:,4); % 14,98%;35°C
24 load t2212va.txt;vgs05s=t2212va;vgas05s=abs(vgs05s(:,3));
25 tgms05s=vgs05s(:,4); % 20,78%;25°C
26 load t2212va2.txt;vgs06s=t2212va2;vgas06s=abs(vgs06s(:,3));
27 tgms06s=vgs06s(:,4); % 20,78%;35°C
28 load t0501va.txt;vgs07s=t0501va;vgas07s=abs(vgs07s(:,3));
29 tgms07s=vgs07s(:,4); % 24,39%;25°C
30 load t0501va2.txt;vgs08s=t0501va2;vgas08s=abs(vgs08s(:,3));
31 tgms08s=vgs08s(:,4); % 24,39%;35°C
32 load t1001va.txt;vgs09s=t1001va;vgas09s=abs(vgs09s(:,3));
33 tgms09s=vgs09s(:,4); % 31,38%;25°C
34 load t1001va2.txt;vgs10s=t1001va2;vgas10s=abs(vgs10s(:,3));
35 tgms10s=vgs10s(:,4); % 31,38%;35°C
36 load t1201va.txt;vgs11s=t1201va;vgas11s=abs(vgs11s(:,3));
37 tgms11s=vgs11s(:,4); % 37,08%;25°C
38 load t1201va2.txt;vgs12s=t1201va2;vgas12s=abs(vgs12s(:,3));
39 tgms12s=vgs12s(:,4); % 37,08%;35°C
40 load t1701va.txt;vgs13s=t1701va;vgas13s=abs(vgs13s(:,3));
41 tgms13s=vgs13s(:,4); % 41,74%;25°C
42 load t1701va2.txt;vgs14s=t1701va2;vgas14s=abs(vgs14s(:,3));
43 tgms14s=vgs14s(:,4); % 41,74%;35°C
44 load t0903vaa.txt;vgs15s=t0903vaa;vgas15s=abs(vgs15s(:,3));
45 tgms15s=vgs15s(:,4); % 9,63%;25°C
46 load t0903va2.txt;vgs16s=t0903va2;vgas16s=abs(vgs16s(:,3));
47 tgms16s=vgs16s(:,4); % 9,63%;25°C
48
49 for n=1:600;
50 tgs01s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms01s(n)))-273.15;

```

```

52 ghts01s(n)=(vgas01s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs01s(n)));
53
54 tgs02s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms02s(n))-273.15;
55 ghts02s(n)=(vgas02s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs02s(n)));
56
57 tgs03s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms03s(n))-273.15;
58 ghts03s(n)=(vgas03s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs03s(n)));
59
60 tgs04s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms04s(n))-273.15;
61 ghts04s(n)=(vgas04s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs04s(n)));
62
63 tgs05s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms05s(n))-273.15;
64 ghts05s(n)=(vgas05s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs05s(n)));
65
66 tgs06s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms06s(n))-273.15;
67 ghts06s(n)=(vgas06s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs06s(n)));
68
69 tgs07s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms07s(n))-273.15;
70 ghts07s(n)=(vgas07s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs07s(n)));
71
72 tgs08s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms08s(n))-273.15;
73 ghts08s(n)=(vgas08s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs08s(n)));
74
75 tgs09s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms09s(n))-273.15;
76 ghts09s(n)=(vgas09s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs09s(n)));
77
78 tgs10s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms10s(n))-273.15;
79 ghts10s(n)=(vgas10s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs10s(n)));
80
81 tgs11s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms11s(n))-273.15;
82 ghts11s(n)=(vgas11s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs11s(n)));
83
84 tgs12s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms12s(n))-273.15;
85 ghts12s(n)=(vgas12s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs12s(n)));
86
87 tgs13s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms13s(n))-273.15;
88 ghts13s(n)=(vgas13s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs13s(n)));
89
90 tgs14s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms14s(n))-273.15;
91 ghts14s(n)=(vgas14s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs14s(n)));
92
93 tgs15s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms15s(n))-273.15;
94 ghts15s(n)=(vgas15s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs15s(n)));
95
96 tgs16s(n)=3988/(3988/298.15-log(3000)+log(tgms16s(n))-273.15;
97 ghts16s(n)=(vgas16s(n)^2) / (262.66*(72.32-tgs16s(n)));
98
99 end;
100
101
102 figure(40001);
103 plot(3*(1:600),ghts01s(1,1:600),... % 6,51%,25°C
104 3*(1:600),ghts15s(1,1:600),... % 9,57%,25°C
105 3*(1:600),ghts03s(1,1:600),... % 14,89%,25°C
106 3*(1:600),ghts05s(1,1:600),... % 20,55%,25°C
107 3*(1:600),ghts07s(1,1:600),... % 24,31%,25°C
108 3*(1:600),ghts09s(1,1:600),... % 31,11%,25°C
109 3*(1:600),ghts11s(1,1:600),... % 36,81%,25°C
110 3*(1:600),ghts13s(1,1:600),... % 41,35%,25°C
111 2000,0);
112 3
113 title('Ght Sensor x Tempo - Ensaio 3 - 25°C');
114 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Ght Sensor (W/°C)');
115 legend('6,51%', '9,57%', '14,89%', '20,55%', '24,31%', ...
116 '31,11%', '36,81%', '41,35%');

```

```

117 grid;
118
119 figure(40002)
120 plot (3*(1:600),ghts02s(1,1:600),... % 6,42%,35°C
121 3*(1:600),ghts16s(1,1:600),... % 9,52%,35°C
122 3*(1:600),ghts04s(1,1:600),... % 14,81%,35°C
123 3*(1:600),ghts06s(1,1:600),... % 20,47%,35°C
124 3*(1:600),ghts08s(1,1:600),... % 24,26%,35°C
125 3*(1:600),ghts10s(1,1:600),... % 31,02%,35°C
126 3*(1:600),ghts12s(1,1:600),... % 36,76%,35°C
127 3*(1:600),ghts14s(1,1:600),... % 41,30%,35°C
128 2000,0);
129
130 title('Ght Sensor x Tempo - Ensaio 3 - 35°C');
131 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Ght Sensor (W/°C)');
132 legend('6,42%', '9,52%', '14,81%', '20,47%', '24,39%',...
133 '31,02%', '36,76%', '41,30%');
134 grid;

```

I.10 VariaveisGhtE3.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTACAO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 3
9 % Para Tempos de 3, 10 e 30 minutos:
10 % - Cria variaveis Ght
11 % - Plota Grafico Ght x Umidade do Solo nas temperaturas de 25°C e 35°C
12 %-----
13 % Todos Ght em 25 e 35°C em 600s:
14 gs600s=[ghts01s(200),ghts02s(200),ghts03s(200),...
15 ghts04s(200),ghts05s(200),ghts06s(200),ghts07s(200),...
16 ghts08s(200),ghts09s(200),ghts10s(200),ghts11s(200),...
17 ghts13s(200),ghts14s(200),ghts15s(200),ghts16s(200)];
18
19 % Todos Ght em 25 e 35°C media em 600s:
20 gsc600s=[mean(ghts01s(185:200)),mean(ghts02s(185:200)),...
21 mean(ghts03s(185:200)),mean(ghts04s(185:200)),...
22 mean(ghts05s(185:200)),mean(ghts06s(185:200)),...
23 mean(ghts07s(185:200)),mean(ghts08s(185:200)),...
24 mean(ghts09s(185:200)),mean(ghts10s(185:200)),...
25 mean(ghts11s(185:200)),mean(ghts12s(185:200)),...
26 mean(ghts13s(185:200)),mean(ghts14s(185:200)),...
27 mean(ghts15s(185:200)),mean(ghts16s(185:200))];
28
29 % Todos Ght em 25°C media em 180s:
30 i=55:65;
31 gsc180s=[mean(ghts01s(i)),mean(ghts03s(i)),mean(ghts05s(i)),...
32 mean(ghts07s(i)),mean(ghts09s(i)),mean(ghts11s(i)),...
33 mean(ghts13s(i)),mean(ghts15s(i))];
34
35 % Todos Ght em 25°C media em 1800s:
36 k=585:600;
37 gsc1800s=[mean(ghts01s(k)),mean(ghts03s(k)),mean(ghts05s(k)),...
38 mean(ghts07s(k)),mean(ghts11s(k)),mean(ghts13s(k)),...
39 mean(ghts15s(k))];

```

```
40
41 % Todos Ght em 35°C media em 1800s:
42 gscb1800s=[mean(ghts02s(k)),mean(ghts04s(k)),mean(ghts06s(k)),...
43     mean(ghts08s(k)),mean(ghts10s(k)),mean(ghts12s(k)),...
44     mean(ghts14s(k)),...
45     mean(ghts15s(k))];
46
47 % Todos Ght em 35°C media em 180s:
48 gscb180s=[mean(ghts02s(i)),mean(ghts04s(i)),mean(ghts06s(i)),...
49     mean(ghts08s(i)),mean(ghts10s(i)),mean(ghts12s(i)),...
50     mean(ghts14s(i)),mean(ghts16s(i))];
51
52 % Umidade=[Umidade sem correção para medições, Umidade com correção
53 % para medições em 25°C, Umidade com correção para as medições em 35°C]:
54 du1=[6.56, 6.51, 6.42];
55 du2=[14.98, 14.89, 14.81];
56 du3=[20.78, 20.55, 20.47];
57 du4=[24.39, 24.31, 24.26];
58 du5=[31.38, 31.11, 31.02];
59 du6=[37.08, 36.81, 36.76];
60 du7=[41.74, 41.35, 41.30];
61 du8=[9.63, 9.57, 9.52];
62
63 % Ght media para todos valores em 25°C em 180s:
64 gsc25a180bs=[mean(ghts01s(i)),mean(ghts03s(i)),mean(ghts05s(i)),...
65     mean(ghts07s(i)),mean(ghts09s(i)),mean(ghts11s(i)),...
66     mean(ghts13s(i)),mean(ghts15s(i))];
67
68 % Ght media para todos valores em 25°C em 600s:
69 gsc25a600bs=[gsc600s(1),gsc600s(3),gsc600s(5),...
70     gsc600s(7),gsc600s(9),gsc600s(11),...
71     gsc600s(13),gsc600s(15)];
72
73 % Ght media para todos valores em 25°C em 1800s:
74 gsc25a1800bs=[mean(ghts01s(k)),mean(ghts03s(k)),mean(ghts05s(k)),...
75     mean(ghts07s(k)),mean(ghts09s(k)),...
76     mean(ghts11s(k)),mean(ghts13s(k)),mean(ghts15s(k))];
77
78 % Umidade corrigida para todos valores em 25°C:
79 umsca25bs=[du1(2),du2(2),du3(2),du4(2),du5(2),du6(2),du7(2),du8(2)];
80
81 figure(4101);
82 plot(umsca25bs,gsc25a180bs,'r.',umsca25bs,gsc25a600bs,'g.',...
83     umsca25bs,gsc25a1800bs,'k.');
84 title('Ght Sensor em 180s, 600s, 1800s - Ensaio 3 - 25°C');
85 ylabel('Ght Sensor'); xlabel('(sumid-ssec)/ssec');
86 legend('180s','600s','1800s');
87 grid;
88
89
90 % Ght media para todos valores em 35°C em 180s:
91 gsc35a180bs=[mean(ghts02s(i)),mean(ghts04s(i)),mean(ghts06s(i)),...
92     mean(ghts08s(i)),mean(ghts10s(i)),mean(ghts12s(i)),...
93     mean(ghts14s(i)),mean(ghts16s(i))];
94
95 % Ght media para todos valores em 35°C em 600s:
96 gsc35a600bs=[gsc600s(2),gsc600s(4),gsc600s(6),gsc600s(8),gsc600s(10),...
97     gsc600s(12),gsc600s(14),gsc600s(16)];
98
99 % Ght media para todos valores em 35°C em 1800s:
100 gsc35a1800bs=[mean(ghts02s(k)),mean(ghts04s(k)),mean(ghts06s(k)),...
101     mean(ghts08s(k)),mean(ghts10s(k)),mean(ghts12s(k)),...
102     mean(ghts14s(k)),mean(ghts16s(k))];
```

```

105 % Umidade corrigida para todos valores em 35°C:
106 umsca35bs=[du1(3),du2(3),du3(3),du4(3),du5(3),du6(3),du7(3),du8(3)];
107
108 figure(4102);
109 plot(umsca35bs,gsc35a180bs,'r.',umsca35bs,gsc35a600bs,'g.',...
110     umsca35bs,gsc35a1800bs,'k.');
111 title(' Ght Sensor em 180s, 600s, 1800s - Ensaio 3 - 35°C ');
112 ylabel('Ght Sensor'); xlabel('(sumid-ssec)/ssec (%)');
113 legend('180s','600s','1800');
114 grid;
115
116 utest=[umsca25bs];
117 gtest=[gsc25a180bs];
118 figure(4103);
119 plot(utest,gtest,'r.');
120 title(' Ght Sensor em 180s - Ensaio 3 - 25°C ');
121 ylabel('Ght Sensor'); xlabel('(sumid-ssec)/ssec (%)');
122 %legend('180s','600s','1800');
123 grid;
124
125 utest1=[umsca35bs];
126 gtest1=[gsc35a180bs];
127 figure(4104);
128 plot(utest1,gtest1,'r.');
129 title(' Ght Sensor em 180s - Ensaio 3 - 35°C ');
130 ylabel('Ght Sensor'); xlabel('(sumid-ssec)/ssec (%)');
131 %legend('180s','600s','1800');
132 grid;

```

I.11 AjustesGhtE3.m

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 3
9 % Ajusta a polinomios do 4º grau os valores de Ght x Umidade
10 % Plota os graficos de Ght x Umidade
11 %-----
12 % a) Ajusta por polinomio do 4º grau os dados de Ght e umidade em 25°C.
13 %     Retorna o polinomio do ajuste dentro da faixa variação de umidade:
14
15 Umcs25as=umsca25bs;
16 pa180sas=polyfit(Umcs25as,gsc25a180bs,4);
17 xus=6:0.1:max(Umcs25as);
18 YAa180sas=polyval(pa180sas,xus);
19
20 pa600sas=polyfit(Umcs25as,gsc25a600bs,4);
21 xus=6:0.1:max(Umcs25as);
22 YAa600sas=polyval(pa600sas,xus);
23
24 pa1800sas=polyfit(Umcs25as,gsc25a1800bs,4);
25 xus=6:0.1:max(Umcs25as);
26 YAa1800sas=polyval(pa1800sas,xus);
27
28
29 % b) Ajusta por polinomio do 4º grau os dados de Ght e umidade em 35°C.
30 %     Retorna o polinomio do ajuste dentro da faixa variação de umidade:
31
32 Umcs35as=umsca35bs;

```

```
33 pa180sbs=polyfit(Umc35as,gsc35a180bs,4);
34 xubs=6:0.1:max(Umc35as);
35 YAa180sbs=polyval(pa180sbs,xubs);
36
37 pa600sbs=polyfit(Umc35as,gsc35a600bs,4);
38 xubs=6:0.1:max(Umc35as);
39 YAa600sbs=polyval(pa600sbs,xubs);
40
41 pa1800sbs=polyfit(Umc35as,gsc35a1800bs,4);
42 xubs=6:0.1:max(Umc35as);
43 YAa1800sbs=polyval(pa1800sbs,xubs);
44
45
46 % c) Plota os graficos
47
48 figure(4201);
49 plot(Umc25as,gsc25a180bs,'r.', xus,YAa180sas,'r',...
50 Umc25as,gsc25a600bs,'g.',xus,YAa600sas,'g',...
51 Umc25as,gsc25a1800bs,'k.',xus,YAa1800sas,'k');
52
53 grid;
54 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 3 - 25°C');
55 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
56 legend('180s','180s','600s','600s','1800s','1800s');
57
58 figure(4202);
59 plot(Umc35as,gsc35a180bs,'r.', xubs,YAa180sbs,'r',...
60 Umc35as,gsc35a600bs,'g.',xubs,YAa600sbs,'g',...
61 Umc35as,gsc35a1800bs,'k.',xubs,YAa1800sbs,'k');
62
63 grid;
64 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 3 - 35°C');
65 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
66 legend('180s','180s','600s','600s','1800s','1800s');
67
68 figure(4203);
69 plot(Umc25as,gsc25a180bs,'b.', xus,YAa180sas,'b',...
70 Umc35as,gsc35a180bs,'g.',xubs,YAa180sbs,'g');
71 grid;
72 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 3 - 25°C e 35°C');
73 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
74 legend('180s 25°C','180s 25°C','180s 35°C','180s 35°C');
75
76 figure(4204);
77 plot(Umc25as,gsc25a600bs,'b.', xus,YAa600sas,'b',...
78 Umc35as,gsc35a600bs,'g.',xubs,YAa600sbs,'g');
79 grid;
80 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 3 - 25°C e 35°C');
81 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
82 legend('600s 25°C','600s 25°C','600s 35°C','600s 35°C');
83
84 figure(4205);
85 plot(Umc25as,gsc25a1800bs,'b.', xus,YAa1800sas,'b',...
86 Umc35as,gsc35a1800bs,'g.',xubs,YAa1800sbs,'g');
87 grid;
88 title('Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 3 - 25°C e 35°C');
89 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
90 legend('1800s 25°C','1800s 25°C','1800s 35°C','1800s 35°C');
91
92 figure(4207);
93 plot(Umc25as,gsc25a180bs,'b.');//, xu,YAa180sa,'b');
94 grid;
95 title('Ght do Sensor x Umidade 180s - Ensaio 3 - 25°C');
96 ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
97 legend('180s');
```

```

98
99     figure(4208);
100    plot(Umc35as,gsc35a180bs','g.');
101    grid;
102    title('Ght do Sensor x Umidade 180s - Ensaio 3 - 35°C');
103    ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
104    legend('180s');
105
106    figure(4209);
107    plot(Umc35as,gsc35a1800bs','b.');
108    grid;
109    title('Ght do Sensor x Umidade 1800s - Ensaio 3 - 25°C');
110    ylabel('Ght do Sensor (W/°C)'); xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
111    legend('1800s');
112
113    figure(4210);
114    plot(Umc35as,gsc35a1800bs','g.');
115    grid;
116    title('Ght do Sensor x Umidade 1800s - Ensaio 3 - 35°C');
117    ylabel('Ght do Sensor (W/°C)');
118    xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
119    legend('1800s');
120
121    YAa180saAs=polyval(pa180sas,xubs);
122    YAa600saAs=polyval(pa600sas,xubs);
123    YAa1800saAs=polyval(pa1800sas,xubs);
124
125    figure(4211);
126    plot(xubs,YAa180sbs-YAa180saAs,'b',xubs,YAa600sbs-YAa600saAs,'r',...
127        xubs,YAa1800sbs-YAa1800saAs,'g',30,.0005);
128    grid;
129    title('Diferença Ght do Sensor x Umidade - Ensaio 3 - 25 e 35°C');
130    ylabel('Diferença Ght do Sensor (W/°C)');
131    xlabel('(mumid-msec) / msec (%)');
132    legend('180s','600s','1800');

```

I.12 PlotaTempAE3

```

1 %-----
2 % UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
3 % DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
4 % DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
5 % ALUNO: Paulo Cesar de Souza Mendes
6 % ORIENTADOR: Dr. Amauri Oliveira
7 %-----
8 % Ensaio 3
9 % Plota os graficos de Temperatura Ambiente x Tempo
10 %-----
11 clear all;
12 load t1312tam.txt;
13 load t1512tam.txt;
14 load t2212tam.txt;
15 load t0501tam.txt;
16 load t1001tam.txt;
17 load t1201tam.txt;
18 load t1701tam.txt;
19 load t0903tam.txt;
20
21 taa01=t1312tam; taab01=taa01(:,1)';
22 taa02=t1512tam; taab02=taa02(:,1)';
23 taa03=t2212tam; taab03=taa03(:,1)';
24 taa04=t0501tam; taab04=taa04(:,1)';

```

```
25 taa05=t1001tam; taab05=taa05(:,1)';
26 taa06=t1201tam; taab06=taa06(:,1)';
27 taa07=t1701tam; taab07=taa07(:,1)';
28 taa08=t0903tam; taab08=taa08(:,1)';
29
30 figure(4201);
31 plot(30*(1:60),taab01(1,1:60),...
32     30*(1:60),taab08(1,1:60),...
33     30*(1:60),taab02(1,1:60),...
34     30*(1:60),taab03(1,1:60),...
35     30*(1:60),taab04(1,1:60),...
36     30*(1:60),taab05(1,1:60),...
37     30*(1:60),taab06(1,1:60),...
38     30*(1:1:60),taab07(1,1:1:60),'.');
39 title('Temperatura Solo x Tempo - Ensaio 3 - 25°C ');
40 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
41 %legend('6,51%', '9,57%', '14,89%', '20,55%', '24,31%',...
42     '%31,11%', '36,81%', '41,35%');
43 legend('6,51%', '9,57%', '14,89%', '20,55%', '24,31%',...
44     '31,11%', '36,81%', '41,35%');
45 grid;
46
47 load t1312tam2.txt;
48 load t1512tam2.txt;
49 load t2212tam2.txt;
50 load t0501tam2.txt;
51 load t1001tam2.txt;
52 load t1201tam2.txt;
53 load t1701tam2.txt;
54 load t0903tam2.txt;
55
56 taa01=t1312tam2; taab01=taa01(:,1)';
57 taa02=t1512tam2; taab02=taa02(:,1)';
58 taa03=t2212tam2; taab03=taa03(:,1)';
59 taa04=t0501tam2; taab04=taa04(:,1)';
60 taa05=t1001tam2; taab05=taa05(:,1)';
61 taa06=t1201tam2; taab06=taa06(:,1)';
62 taa07=t1701tam2; taab07=taa07(:,1)';
63 taa08=t0903tam2; taab08=taa08(:,1)';
64
65 figure(4202);
66 plot(30*(1:60),taab01(1,1:60),...
67     30*(1:60),taab08(1,1:60),...
68     30*(1:60),taab02(1,1:60),...
69     30*(1:60),taab03(1,1:60),...
70     30*(1:60),taab04(1,1:60),...
71     30*(1:60),taab05(1,1:60),...
72     30*(1:60),taab06(1,1:60),...
73     30*(1:1:60),taab07(1,1:1:60),'.');
74 title('Temperatura Solo x Tempo - Ensaio 3 - 35°C');
75 xlabel('Tempo (s)'), ylabel('Temperatura (°C)');
76 %legend('6,42%', '9,52%', '14,81%', '20,47%', '24,39%',...
77     '%31,02%', '36,76%', '41,30%');
78 legend('6,42%', '9,52%', '14,81%', '20,47%', '24,39%',...
79     '31,02%', '36,76%', '41,30%');
80 grid;
```

Anexo II

Caracterização Geotécnica dos Solos dos Ensaios 2 e 3

A caracterização geotécnica dos dois tipos de solo utilizados nos ensaios 2 e 3, chamados de solo A e solo B, foi efetuada pela equipe do laboratório de Geotecnia da UFBA, através de ensaios convencionais de caracterização, compreendendo granulometria por peneiramento e sedimentação e limites de consistência, acompanhado da determinação do peso específico dos sólidos, em conformidade com as normas técnicas da ABNT.

O solo A proveniente do Campo Experimental de Geotecnia da Escola Politécnica da UFBA, foi classificado pelo Sistema Unificado (USCS) como MH (silte de alta plasticidade). O solo B oriundo da Avenida Luis Eduardo Magalhães em Salvador, apresentou a mesma classificação, porém, esses materiais possuem percentagens bem próximas para a fração areia e distintas para as frações de silte e argila, respectivamente. Notando pela textura que o solo B é mais fino que o solo A. Em termos de valores de limite de liquidez (w_L) para os solos considerados observa-se sua proximidade, tendo o solo A, limite de liquidez igual a 65% e o solo B, 62%, entretanto, constatou-se diferença nos valores de índice de plasticidade (I_P), tendo o solo A, índice de plasticidade de 30% e o solo B, 17%, valores estes que indicam materiais altamente plásticos de acordo com a classificação do solo em função do índice de plasticidade. O solo A se manifestou com peso específico dos sólidos (γ_s) igual a 26,9 kN/m³ e o solo B com 28,1 kN/m³.

Com relação ao índice de atividade de Skempton (AC), que é um parâmetro que visa indicar a atividade mineralógica dos solos em função do índice de plasticidade e da quantidade de argila presente no solo, tem-se para os

solos A e B, respectivamente, $AC=0,81$ e $AC=1,13$, ambos classificados como solos de atividade normal, ou seja, $0,75 < AC < 1,25$, valores esses característicos de minerais do tipo 2:1, predominantemente do grupo das ilitas.

As curvas granulométricas desses solos são apresentadas na Figura II.1. Enquanto, a Tabela II.1 apresenta um resumo das frações constituintes.

A Carta de Plasticidade com o posicionamento dos solos estudados é mostrada na Figura II.2. Nota-se que o solo A situa-se próximo da Linha A que limita os materiais siltosos dos argilosos.

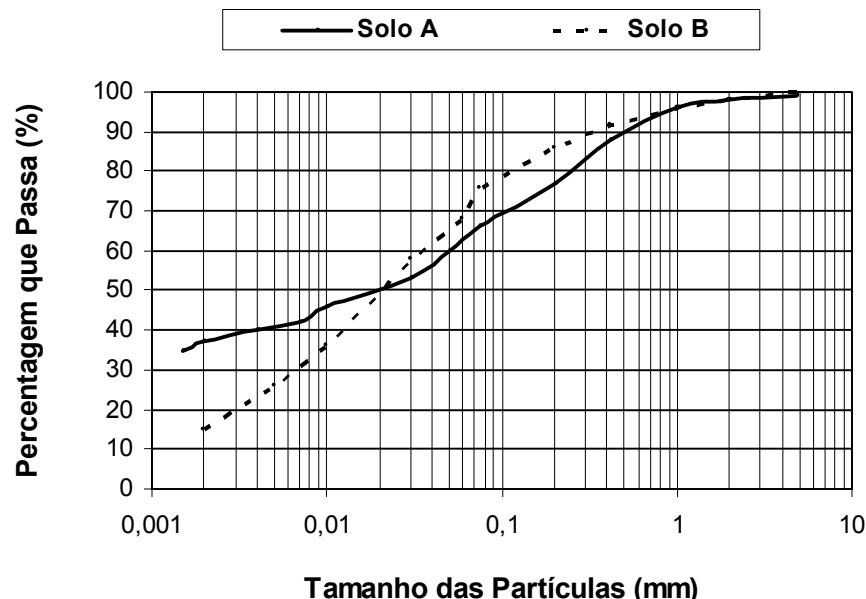


Figura II.1: Curvas Granulométricas

Tabela II.1: Frações constituintes dos solos

Fração	Solo A	Solo B
Pedregulho	2%	1%
Areia	35%	30%
Silte	26%	54%
Argila	37%	15%
#200	66%	76%

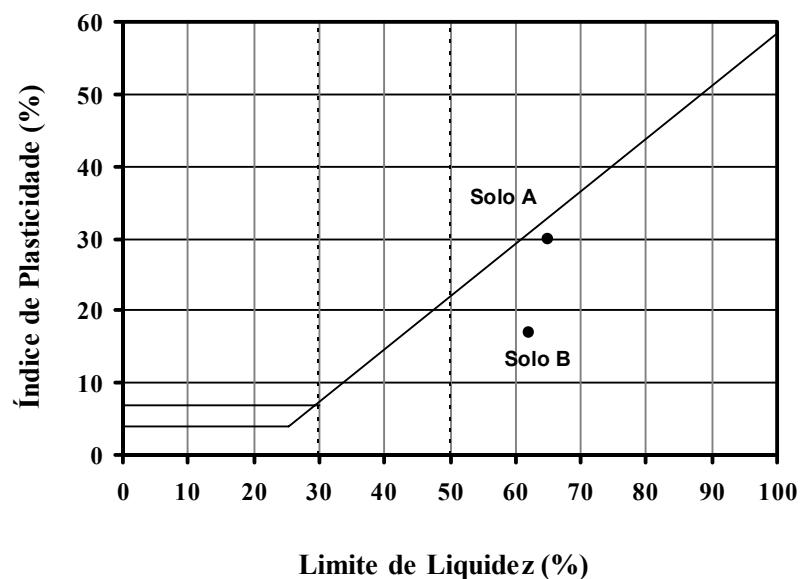


Figura II.2: Carta de Plasticidade

