



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**CURSO DE MESTRADO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

**RAIMUNDO ALÍPIO DE OLIVEIRA LEÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE SENSOR DE  
UMIDADE DO SOLO E APLICAÇÃO EM SENSORES TIPO TENSÍMETRO  
ELETRÔNICO E RESISTÊNCIA ELÉTRICA.**

**FORTALEZA-CEARÁ**

**2004**

**RAIMUNDO ALÍPIO DE OLIVEIRA LEÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE SENSOR DE UMIDADE DO SOLO E APLICAÇÃO EM SENSORES TIPO TENSÍOMETRO ELETRÔNICO E RESISTÊNCIA ELÉTRICA.**

**Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Mestrado em Irrigação e Drenagem, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Agronomia – Irrigação e Drenagem.**

**Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph. D.**

**FORTALEZA-CEARÁ  
2004**

L478d

Leão, Raimundo Alípio de Oliveira

Desenvolvimento de dispositivo para calibração de sensor de umidade do solo e aplicação em sensores tipo tensiômetro eletrônico e resistência elétrica/Raimundo Alípio de Oliveira Leão. – Fortaleza, 2004

72 f.

Orientador: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Agrícola.

1. Tecnologia de sensores. 2. Automação da irrigação. 3. Sistemas de aquisição de dados.

CDD 631.587

RAIMUNDO ALÍPIO DE OLIVEIRA LEÃO

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA CALIBRAÇÃO DE SENSOR DE  
UMIDADE DO SOLO E APLICAÇÃO EM SENSORES TIPO TENSIÔMETRO  
ELETRÔNICO E RESISTÊNCIA ELÉTRICA.

Dissertação submetida à Coordenação do  
Curso de Mestrado em Irrigação e Drenagem,  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial par a obtenção do grau de  
mestre em Agronomia – Irrigação e Drenagem.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará

---

Fábio Rodrigues de Miranda, Ph.D. (Conselheiro)  
Embrapa – Agroindústria Tropical

---

Prof. Renato Sílvio da Frota Ribeiro, Ph.D. (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará

A minha querida esposa Eldenice;

A meus queridos filhos Pedro Levi e Maria Alice;

A meus queridos pais Leônia e João Eudes e

A meus queridos irmãos Águeda, Hugo, Marta e Fernando

## AGRADECIMENTOS

Além da dedicação e força de vontade, para se concluir um curso de pós-graduação é necessário haver relações fortes de profissionalismo e companheirismo no ambiente de trabalho. Neste sentido, eu não poderia deixar de agradecer ao Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira, cuja capacidade de orientação não se restringiu apenas ao âmbito acadêmico, ensinando-me a persistir e a não superestimar os obstáculos.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, pelo auxílio financeiro, na forma de bolsa de formação acadêmica e pelo seu importante papel no fomento à pesquisa e na qualificação de pessoal para o meu querido Estado do Ceará.

A todos professores e funcionários do Curso de Mestrado em Irrigação e Drenagem (CMID), cujo relacionamento me abriu os horizontes técnico-científicos, segundo a especialidade de cada um e, especialmente, pela convivência mais próxima, aos Professores Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro, Dr. Raimundo Nonato Távora Costa, Dra. Eunice Maia de Andrade, Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra, Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda, Dr. Moisés Custódio Saraiva Leão, Dr. Francisco de Souza, Dr. Paulo Teodoro de Castro, Dr. Fábio Rodrigues de Miranda, pesquisador da EMBRAPA/CNPAT e, ainda ao Ms. Severo C. Lima, do Departamento Nacional de Obras contra a Seca – DNOCS.

Aos colegas do Curso de Mestrado em Irrigação e Drenagem (CMID) pela relação de amizade que nos fez caminhar juntos em busca do aprendizado; ao Josenias, funcionário exemplar da Coordenação do CMID e que jamais deixou de atender a quem quer que de seus préstimos necessite e ainda ao colega do Laboratório de Hidráulica e amigo, Dr. Almiro Tavares Medeiros.

Aos colegas e amigos do Grupo de Pesquisa coordenado pelo Prof. Adunias pela colaboração direta no experimento objeto deste trabalho: Firmino, Paulo, Silvana, Ilda, Fábio Chaffin, Marcus Meireles, Daniele e Tadeu.

Pelo incentivo aos Profs. João Moreira Batista e José Omar Pereira.

Pelo incentivo, confiança, sensibilidade e solidariedade às Profas. Zenilda Vieira Bruno, da Faculdade de Medicina/UFC e Sônia Maria Pinheiro de Oliveira, do Departamento de Zootecnia da Universidade Federal do Ceará.

Aos que, injustamente, esqueci de mencionar, expresso os meus agradecimentos e pedido de perdão.

Ao Pai, ao Filho e ao Espírito Santo, pela minha vida e pela de todos os supracitados, todo o Louvor e Glória, por todos os séculos, amém!

A água não deve ser desperdiçada, nem poluída, nem envenenada. De maneira geral, sua utilização deve ser feita com consciência e discernimento para que não se chegue a uma situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas atualmente disponíveis.

Organização das Nações Unidas – Declaração Universal dos Direitos da água.

## RESUMO

Um dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo (DCSUS) foi desenvolvido. Para o controle da umidade do solo foram instalados um sistema de sucção tipo funil de placa porosa e um sistema de pressão tipo câmara de pressão. Foi construída uma estrutura de ferro de 3,0 m de altura, no topo da qual, uma balança de braços conteve, em uma das extremidades, a coluna de solo horizontal com os sensores de umidade a serem calibrados e, na outra, uma célula de carga com capacidade nominal de 490,33 N, para obtenção da variação do peso da coluna decorrente da perda de umidade. Os dados dos sensores de umidade, da célula de carga e de um sensor de temperatura foram coletados em tempo real, no período de 15/01 a 27/05/2004, a uma frequência de 3 Hz, por um sistema de aquisição de dados, cujo conversor analógico digital possuía canais de 12 bits. Os dados foram armazenados diariamente em um arquivo de texto para posterior processamento. Foi realizada a calibração do dispositivo para determinação de sua sensibilidade. Realizou-se o monitoramento da umidade do solo através dos registros da célula de carga; da tensão da água do solo, através de cinco sensores tipo tensiômetros eletrônicos e da resistência elétrica do solo, através de três sensores de matriz granular (Watermark). Os dados da temperatura ambiente foram coletados pelo sensor de temperatura FM51. Foram analisadas as saídas obtidas na célula de carga e nos sensores de umidade do solo quanto à variação da temperatura ao longo do dia. O DCSUS apresentou sensibilidade para variação de umidade correspondente à perda de 13,33 mL de água. A célula de carga utilizada apresentou sensibilidade à temperatura ambiente ao longo do dia, com erro em torno de 0,25%. Nas condições experimentais estabelecidas, os sensores Watermark não apresentaram erro devido à temperatura ambiente. Os tensiômetros apresentaram erro devido à variação da temperatura acima de 3,5% quando em potenciais mátricos mais elevados (-3,87 kPa) e acima de 5,5 % quando em potenciais mátricos mais baixos (-44,50 e -51,00 kPa). O DCSUS desenvolvido foi eficaz quanto à determinação da umidade do solo, com sensibilidade à variação de  $4,244.10^{-4} \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ .

**Termos para indexação:** Tecnologia de sensores; Automação da irrigação; Sistemas de aquisição de dados.

## ABSTRACT

An apparatus for soil moisture calibration was developed and built (DCSUS). The moisture was controlled indirectly by controlling the soil water matrix potential using both a porous plate funnel and a pressure chamber system. A 3.0 m high tower was built in steel and a scale installed on its top. The scale components were an I-beam articulated in its center by a set of bearings and bushings and a shaft. The beam was welded in its middle point to the shaft and a horizontal soil column with undisturbed soil contained by an acrylic cylinder installed on one of its ends, and a 50 N capacity load cell on the other end. The following sensors were installed: a granular matrix sensor (Watermark), an electronic tensiometer sensor, air temperature sensors and soil temperature sensors. Moisture sensor readings, as well as from the load cell and temperature sensor were taken in real time at a 3 Hz frequency from 01/15 to 05/27/2004. The data acquisition system was made of a 12-bit analog/digital converter, an AMD188 microcontroller and an RS232 interface. Data was stored daily and applied to obtain the parameters of calibrations, sensitivity and the effect of temperature on the system. The apparatus resulted in sensitivity to moisture change of 13,33 mL of water. The load cell displayed some sensitivity to daily temperature variation, with an error of 0,25%. The Watermark sensors were not affected by air temperature variation, but displayed sensitivity to variation on the supplied voltage. The electronic tensiometers, however, were more sensitive to temperature with errors of 3.5% for higher matric potentials (-3.82 to -3.92 kPa) and 5.5% for lower matric potentials (-44.5 to -51 kPa). The DCSUS showed to be efficient in monitoring variations soil moisture, displaying a minimum reading  $4.244\text{E-}4 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ .

**Index terms:** Technology of sensors; Automation of irrigation; Data acquisition system.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1. Determinação da umidade do solo.....	13
2.2. Sensores de umidade do solo .....	14
2.3. Tensiômetros.....	16
2.4. Sensores tipo resistência elétrica .....	19
2.5. Célula de carga.....	21
2.6. Erros dos sensores.....	22
3. MATERIAIS E METODOLOGIA.....	23
3.1. Construção e calibração do Dispositivo para Calibração de Sensores de Umidade do solo .....	23
3.2. Sistema de aquisição de dados.....	24
3.3. Célula de carga.....	26
3.4. Circuitos eletrônicos para interfaceamento entre a célula de carga e o conversor analógico digital .....	29
3.5. Coluna de solo .....	30
3.6. Funil de placa porosa .....	32
3.7. Câmara de pressão de Richards .....	34
3.8. Sensores tipo tensiômetros eletrônicos .....	35
3.9. Sensores tipo resistência elétrica .....	37
3.10. Sensor de temperatura.....	40
3.11. Condução do experimento .....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. Simulação do circuito eletrônico do Dispositivo para Calibração de Sensores de umidade do solo .....	42
4.2. Acompanhamento da perda de umidade com base na célula de carga .....	45
4.3. Acompanhamento da perda de umidade com base nos tensiômetros eletrônicos.....	48
4.4. Acompanhamento da perda de umidade com base nos sensores Watermark.....	53
4.5. Efeitos da temperatura na célula de carga .....	55
4.6. Efeitos da temperatura nos sensores Watermark .....	57
4.7. Efeitos da temperatura nos tensiômetros eletrônicos.....	59
5. CONCLUSÕES .....	62
5.1. Recomendações .....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
ANEXO 1 – Programa para coleta e armazenamento de dados .....	68
ANEXO 2 – Programa para gerar a média dos dados no minuto .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

Quando o economista Thomas Malthus afirmou que a humanidade passaria fome devido ao fato do aumento populacional ocorrer em progressão geométrica enquanto o da produção de alimentos, em progressão aritmética, jamais imaginou o quanto o avanço da tecnologia mudaria este destino calamitoso. A fome que há no mundo, longe de se dever à escassez de alimentos, é motivada pela má distribuição da renda mundial. No Brasil, um dos países com péssima distribuição de renda, o atual governo adotou, como “slogan” de campanha eleitoral, o Programa Fome Zero, a partir do qual nenhum brasileiro deixaria de ter três refeições diárias.

A fome, devido à escassez de alimento, poderá vir, novamente, a ameaçar a população mundial, contudo, dominada a tecnologia da produção de alimentos, a causa será a escassez de recursos para a mesma como, por exemplo, a água. Embora seja um recurso cuja renovação é garantida pelo ciclo hidrológico, a crescente demanda de água pode torná-la um recurso escasso, uma vez que a taxa de renovação permanece constante. Esta possibilidade tem sido o problema para o qual, tanto os gerenciadores dos recursos hídricos, quanto os pesquisadores de diversas áreas do conhecimento científico, vêm buscando, nos últimos anos, a solução. É, também, devido a esta possibilidade que, no campo da irrigação, as clássicas perguntas sobre quando e quanto irrigar nunca estiveram tão em voga quanto agora.

Para a programação eficiente da irrigação são necessários conhecimentos acerca da cultura, como por exemplo, as necessidades hídricas da mesma nos diferentes estágios de crescimento; do clima, no tocante aos fatores meteorológicos que governam o deslocamento da água para a atmosfera, pelos fenômenos da evaporação e da evapotranspiração e do solo, principalmente nas suas características físicas, que comandam a capacidade de armazenamento da água, bem como da retenção da mesma nas zonas radiculares. De posse destes conhecimentos, pode-se estimar quando e quanto irrigar com uma boa chance de acerto. Contudo, com o monitoramento da umidade do solo pode-se ter a certeza de que a irrigação está sendo levada a cabo sem aplicação d'água em excesso ou deficitária.

Para a decisão do momento certo de se iniciar uma irrigação ou de terminá-la são necessários métodos que possibilitem determinar a umidade do solo no momento em que a medição está sendo realizada. Nesse caso, os métodos indiretos, os quais não medem a umidade do solo, mas aquelas características do solo a ela relacionada, como o potencial matricial, a resistência elétrica, a constante dielétrica, a capacidade de atenuação de nêutrons,

dentre outras, têm se destacado frente aos métodos diretos. Estas características do solo são medidas por diversos sensores segundo o método empregado. Por determinarem a umidade do solo de forma indireta, estes sensores necessitam de calibração, em relação à umidade do solo. Conforme o tipo de sensor e a sua sensibilidade aos fatores ambientais, bem como a variabilidade espacial da característica medida no solo, pode haver a necessidade de várias calibrações, como por exemplo, para diferentes tipos de solo, para variação de temperatura, diferentes profundidades, etc.

Além da programação da irrigação, os avanços na informática e no desenvolvimento de sensores de fácil conexão a computadores e “data loggers”, têm contribuído bastante na automação total da irrigação, a qual se constitui, até o presente momento, na forma mais eficiente de se aplicar água às plantas. Com a automação, os controladores desenvolvidos são capazes de acionar ou de desligar os sistemas de irrigação a partir dos dados enviados continuamente por sensores como os de umidade do solo. Um sistema automatizado de irrigação, quando bem programado e instalado, garantirá a umidade necessária às culturas em cada estágio de desenvolvimento em que se encontrem, evitando a queda no rendimento da cultura devido ao estresse hídrico, quer por escassez, quer por excesso.

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de desenvolver e testar um dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo (DCSUS), mediante a inserção de sensores tipo tensiômetro eletrônico e de matriz granular (Watermark) em uma coluna de solo, sujeita a sistemas de sucção e pressão para retirada da umidade do solo de forma controlada, com determinação da umidade a partir da variação da massa da coluna de solo registrada por uma célula de carga.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Determinação da umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo é uma das técnicas mais utilizada para manejo da irrigação o qual visa à determinação de quando e quanto irrigar. A determinação da umidade do solo é essencial para estudos de movimento e disponibilidade d'água no solo, erosão, manejo da irrigação e muitos outros problemas (Bernardo, 1989). A umidade do solo é extremamente variável com o tempo, aumentando com a chuva ou com a irrigação e diminuindo com a drenagem ou com a evapotranspiração (Reichardt, 1987). As propriedades do solo, as práticas culturais e de manejo do solo, a quantidade e intensidade de aplicação de água e o estágio de desenvolvimento das culturas também são fatores que afetam a umidade do solo (Paltineanu e Starr, 1997).

Os extremos da variação da umidade do solo são mencionados por Reichardt (1987) como sendo o da umidade do solo seco em estufa, a 105 °C e a do solo saturado ou umidade de saturação, quando todo o espaço poroso está tomado por água. Para a prática da irrigação, onde se faz necessária a determinação da disponibilidade de água do solo, outros níveis de umidade devem ser determinados, quais sejam os da umidade da capacidade de campo e umidade do ponto de murcha permanente (Bernardo, 1989; Reichardt, 1987; Lima, 1999 e Miranda e Pires, 2001). Em Libardi (1999) se lê a definição de umidade medida como sendo a umidade de uma amostra de solo no momento em que foi obtida no campo; a umidade residual como sendo a umidade de uma amostra muito seca ou seca ao ar e a umidade efetiva como a diferença entre a umidade medida e a umidade residual.

Na determinação da umidade do solo podem ser utilizados vários métodos, os quais são classificados em diretos e indiretos, conforme forneçam diretamente ou através de estimativas a umidade do solo. Os principais métodos diretos de determinação da umidade do solo são o método padrão de estufa (Reichardt, 1987; Bernardo, 1989; Brandelik e Hübner, 1996; Libardi, 1999; Miranda & Pires, 2001 e Coelho, 2003) e o método das pesagens (Bernardo, 1989 e Miranda & Pires, 2001).

A umidade do solo pode ser determinada diretamente com base no peso (umidade gravimétrica) ou com base no volume (umidade volumétrica). A umidade gravimétrica é a relação entre a massa da água contida em uma amostra de solo e a massa seca desta amostra de solo. Para se determinar a umidade volumétrica, determina-se a relação entre o volume de água contida em uma amostra indeformada de solo e o volume total desta amostra. Quando

não especificada a umidade, assume-se que seja a gravimétrica uma vez que, segundo Gardner (1986) apud Libardi (1999), a determinação da umidade envolve, antes, o valor à base de massa. Libardi (1999) apresenta a clássica dedução do modo prático de se chegar à umidade volumétrica, através da multiplicação da umidade gravimétrica pela densidade global do solo amostrado.

Os métodos indiretos mais utilizados são o da resistência elétrica, o da constante dielétrica, o da sonda de nêutrons ou moderação de nêutrons, o da atenuação da radiação gama, o da tensiometria, (Bernardo, 1989; Brandelik e Hübner, 1997; Paltineanu e Starr, 1997; Yoder et al, 1998, Libardi, 1999; Miranda e Pires, 2001 e Coelho, 2003).

Segundo Brandelik e Hübner (1996), todos os métodos disponíveis apresentam alguma desvantagem que os afasta do ideal. Coelho (2003) afirma que o melhor método dependerá dos objetivos desejados, da disponibilidade, da precisão e de outros fatores que possam indicá-lo.

## **2.2. Sensores de umidade do solo**

Os sensores são dispositivos utilizados para detectar estímulos ou sinais de natureza física como pressão, umidade, luminosidade, etc., bem como quantificá-los. Quando estes estímulos são convertidos em uma grandeza elétrica como tensão, corrente, etc., tornando possível a comunicação com sistemas de aquisição de dados, então os sensores são também denominados transdutores (HOROWITZ e HILL, 1989). Diversos sensores podem ser usados na determinação da umidade do solo conforme o método utilizado.

A moderação de nêutrons é um método de determinação da umidade do solo bastante preciso, consistindo em colocar-se no interior do solo, à profundidade na qual se deseja obter a umidade, uma sonda com uma fonte emissora de nêutrons rápidos, através de um tubo de acesso. Os nêutrons emitidos penetram no solo e perdem energia ao chocarem-se contra os núcleos de outros átomos de massa similar, tais como os do átomo de hidrogênio da molécula da água da solução do solo, formando, na circunvizinhança da sonda, uma certa quantidade de nêutrons atenuados, os quais são captados por um detector. Cada nêutron captado gera um pulso elétrico que, através de cabos, é conduzido ao medidor onde a leitura da sonda é registrada. Segundo Kanemasu et al (1983), a sonda de nêutrons é capaz de determinar a umidade em um volume de solo relativamente grande e permite que a amostragem seja repetida, no entanto são caras e requerem mão-de-obra especializada.

Contudo, para Andrade et al. (2001), o método apresenta-se relativamente barato e de fácil manejo, inclusive com a vantagem adicional de poder ser conectado a registradores, possibilitando leituras contínuas no campo. Miranda e Pires (2001) ressaltam a limitação do uso do método próximo à superfície do solo.

O desenvolvimento dos sensores tipo capacitivos partiu da premissa de que a constante dielétrica da água é relativamente alta, se comparada com a do solo seco (WERKHOVEN, 1991), resultando em uma variação considerável da constante dielétrica do solo à medida que a sua umidade é alterada (YODER et al., 1998). Desta forma, inserindo-se um sensor tipo capacitivo no solo, o material que separa as placas do sensor entrará em equilíbrio hidráulico com o solo, modificando sua constituição e, conseqüentemente, sua constante dielétrica. Como a capacitância de um determinado capacitor é diretamente proporcional à constante dielétrica do material que separa suas placas, então é também proporcional à umidade deste material o qual, por sua vez, está hidraulicamente equilibrado com o solo. As placas podem ser inseridas diretamente no solo, fazendo do mesmo o material que as separa, medindo-se então, diretamente, a capacitância de um capacitor cuja constante dielétrica a ela associada é a do próprio solo na umidade em que se encontra.

Segundo Phene et al (1971), devido ao fato do ar ser um bom isolante térmico quando comparado com a água e a água ser substituída pelo ar no processo de secagem do solo, as películas remanescentes de água afinam-se, aumentando o trajeto para a condução do calor e, conseqüentemente, requerendo um maior gradiente de temperatura para dissipar determinada quantidade de calor. A umidade de um material poroso pode, então, ser medida inserindo-se uma fonte de calor em um ponto central, no interior do bloco e medindo-se o aumento da temperatura neste ponto. Segundo Yoder et al. (1998), a dissipação de calor em um meio poroso depende de sua condutividade térmica. Em SOWACS (2004) está descrito o funcionamento de um sensor de umidade com base na dissipação de calor: a temperatura em um bloco poroso é medida antes e depois da aplicação de um pequeno pulso de calor. O fluxo total de calor a partir do ponto aquecido pelo pulso é, na maior parte, proporcional ao conteúdo de água contido no interior do material poroso. Isto significa que um material úmido aquecer-se-á mais lentamente do que um seco. Este aumento de temperatura (ou o resfriamento) é medido com um termistor de precisão na extremidade do sensor e calibrado com o conteúdo de água do meio poroso.

A técnica do TDR consiste em se medir o tempo de percurso que um pulso eletromagnético leva para percorrer um caminho estabelecido por uma sonda, o qual está relacionado com a constante dielétrica do meio onde a sonda está inserida (FELLNER-

FELDEGG, 1969 apud MIRANDA e PIRES, 2001). Uma onda eletromagnética é produzida e transportada por um cabo coaxial, até o sensor TDR, um conjunto de hastes metálicas de comprimento conhecido. Parte da onda é refletida ao chegar no início do sensor e a outra parte propaga-se através do mesmo, indo refletir-se ao chegar ao final do sensor, quando, então, é medido tempo entre a primeira e a última reflexão (JOAQUIM JÚNIOR, 2003). Miranda e Pires (2001) explicam que a grande diferença entre a constante dielétrica da água e a dos outros materiais componentes do solo é responsável pela diferença de velocidade de propagação de uma onda de energia em hastes paralelas inseridas no solo. Uma vez que a constante dielétrica é maior no solo úmido; o tempo de propagação da onda ao longo das hastes do sensor, que é diretamente proporcional à constante dielétrica, será tanto maior quanto mais úmido estiver o solo.

Segundo Yoder et al. (1998) o desenvolvimento de sensores de umidade do solo tem seguido critérios como redução da mão de obra de operação, não necessidade de amostragem destrutiva do solo e facilidade de conexão com sistemas eletrônicos de medidas e gravação de dados, citando os tensiômetros, sondas de nêutrons, sensores tipo resistência elétrica, sensores da capacitância do solo, sensores de dissipação de calor e os sensores tipo TDR como os que mais satisfazem estes critérios.

### **2.3. Tensiômetros**

Os sensores utilizados no método da tensiometria, os tensiômetros, medem a umidade do solo, indiretamente, através da tensão de retenção da água do solo. Olitta (1976) considera uma vantagem do tensiômetro, em relação a outros métodos, a possibilidade de determinação do estado de energia da água do solo. O tensiômetro é um instrumento composto por um tubo de 1/2" de diâmetro e comprimento variável conforme a profundidade da camada do solo que se deseja alcançar. Em um dos extremos do tubo é colocado um sensor de tensão e na outra extremidade, uma cápsula porosa, de cerâmica, cujos poros, segundo Reichardt (1987), após saturados, não permitem esvaziamento com sucção menor ou igual a 1 atm. O interior do tensiômetro é preenchido com água. Segundo Coelho (2003), o princípio de funcionamento do tensiômetro desenvolvido por Gardner e colaboradores em 1922 é baseado na formação do equilíbrio entre a água no seu interior e na circunvizinhança da cápsula porosa. À medida que o solo seca, a água sai do interior do tensiômetro, através da cápsula porosa, até que ocorra o equilíbrio entre as partes internas e externas da cápsula. Uma vez que

a parte superior, onde está o sensor de tensão, é hermeticamente fechada, passa a ocorrer uma pressão negativa no interior do tensiômetro, a qual é tanto maior quanto mais seco estiver o solo. Coelho (2003) cita ainda outros tipos de tensiômetros quais sejam o de câmara de ar, o eletrônico com transdutor e o de mercúrio com leitura automática.

Muitos estudos têm sido realizados ao longo do tempo, os quais apontam as vantagens e desvantagens do método e indicam a sua melhor aplicabilidade. A principal desvantagem dos tensiômetros, além da necessidade constante de manutenção, é o fato da capacidade de leitura dos mesmos não ultrapassar 0,75 atm (76 kPa), razão pela qual ele cobre apenas uma parte da “água útil do solo”, sendo 40% e 70%, nos solos argilosos e arenosos, respectivamente. Tal desvantagem já fora mencionada por Richards (1942), embora o autor também mencione a grande utilidade dos tensiômetros em estudos do movimento da água no solo, comprovada em campos experimentais e nos estudos e controle da umidade do solo ligados à irrigação, comprovada pela sua utilização, ao longo de todo o ano, nas irrigações comerciais de algumas culturas. Os tensiômetros podem ser usados para elaboração de um calendário de irrigação desde que a tensão da água do solo esteja baixa, isto é, dentro da faixa de umidade que não cause estresse hídrico às plantas (SMAJSTRLA e PITTS, 1997). Yoder et al. (1998) menciona que a utilização dos tensiômetros na determinação da tensão da água do solo é limitada a um máximo de 85 kPa. Lima (1999), buscando um melhor controle do manejo da água ao nível de propriedade, utilizando o tensiômetro para determinação da lâmina d'água e frequência de aplicação, conclui pela recomendação dos tensiômetros no monitoramento da irrigação, pelo controle da umidade dentro da faixa ótima das culturas. Coelho (2003) menciona a ampla utilização do tensiômetro no monitoramento da tensão da água no solo, mesmo que na faixa de 0 a 0,8 atm (0 a 81,06 kPa).

Wiedenfeld (2004), avaliando quatro diferentes métodos de determinação da quantidade de água a aplicar (evaporação no tanque, evapotranspiração, tensiômetros automáticos e tensiômetros manuais), juntamente com três diferentes frequências de aplicação para irrigação sub-superficial em cana-de-açúcar, encontrou efetividade nos quatro métodos, com prescrições similares de lâmina d'água a aplicar, não obstante tenha afirmado que os tensiômetros manuais apresentaram os resultados mais precisos nas condições de campo e os tensiômetros automáticos não foram muito confiáveis.

Alguns fatores podem afetar as medidas dos tensiômetros de modo que a leitura realizada em um determinado momento pode não estar de acordo com a realidade. Coelho (2003) cita estes fatores como sendo o tempo de resposta, a temperatura e erros dos transdutores.

O tempo resposta de um tensiômetro, segundo Richards (1949 apud KLUTE e GARDNER, 1962), é dado por  $1/KS$ , onde  $K$  é a condutância da cápsula e  $S$  a sensibilidade do medidor, dada pela variação na pressão por unidade de volume transferido do ou para o tensiômetro. Os autores afirmam que o tempo de resposta dos tensiômetros é diferente de zero porque há a necessidade de que um volume de água atravesse os poros da cápsula para que seja registrada uma mudança de pressão no interior do tensiômetro.

O tempo que um tensiômetro leva para entrar em equilíbrio com o potencial do solo, a partir do momento de sua instalação ou da fluxagem, não depende somente das características do tensiômetro, mas também das propriedades do solo que governam o movimento da água. Desta forma, sendo a condutância da cápsula porosa muito menor do que a condutividade hidráulica do solo e, ainda mais, sendo a sensibilidade do tensiômetro muito maior do que o gradiente de potencial hídrico do solo, então, o tempo de resposta do instrumento será tão curto quanto o tempo de resposta de um tensiômetro em solo saturado (TOWNER, 1980).

Olitta (1976) aponta o surgimento de bolhas de ar no sistema quando próximo a 0,8 atm (81,06 kPa) como responsáveis por atraso na resposta do aparelho e recomenda a utilização de água livre de ar. Porém, aponta ainda como responsáveis pelo atraso na medida dos tensiômetros, as baixas condutividade do solo e condutância da cápsula do tensiômetro e o contato inadequado entre a cápsula e o solo.

Hendrickx, Nieber e Siccama (1994) avaliaram três diferentes tamanhos de cápsulas porosas e concluíram que os tensiômetros com cápsulas porosas maiores forneceram menores médias de medidas de tensão da água do solo, o que atribuíram dever-se ao fato de que atingiam mais rapidamente o equilíbrio com a real tensão da água no solo. Isto é os tensiômetros confeccionados com cápsulas de tamanhos maiores possuem menor tempo de resposta.

Watson e Jackson (1967) afirmam que, teoricamente, ocorrem dois efeitos sobre a pressão registrada nos transdutores de pressão utilizados em tensiômetros, sendo que os dois em sentido oposto. Em suma, afirmaram que com o aumento da temperatura ambiente ocorre, em um primeiro momento, a expansão do tubo do tensiômetro e o conseqüente aumento do espaço interno, levando ao registro de potencial mátrico menor do que o real. Por outro lado, a expansão do fluido do tensiômetro devido ao seu aquecimento, em conseqüência do aumento da temperatura ambiente, sendo tanto maior quanto maior for a condutividade térmica do tubo do tensiômetro, acarreta em superestimativa no registro do potencial mátrico.

Visando a avaliar o efeito das condições ambientais na leitura dos tensiômetros eletrônicos cujos transdutores de pressão possuíam compensação para temperatura, Nyhan e Drennon (1990) instalaram um tensiômetro abrigado e o outro ao ar livre, ambos sob a mesma tensão e observaram que os dados coletados no primeiro apresentaram variação de somente 0,1 kPa, quando comparados a tensiômetros comuns, enquanto no segundo, apresentaram variação de 0,1 a 0,3 kPa, sendo que medidas de tensão menor ocorriam à noite e aumentavam à medida que se aproximava do meio dia, tornando a diminuir com a chegada da noite, retomando o ciclo no dia seguinte.

Coelho (2003) encontrou erros na leitura dos tensiômetros devido às flutuações diárias de temperatura e observou que os mesmos ocorrem com maior intensidade quando os solos estão em condições de potencial mátrico mais baixos, recomendando o uso de sensores de temperatura para correção dos erros, principalmente se as leituras forem realizadas nos horários do dia em que a temperatura apresenta-se mais elevada.

Nyhan e Drennon (1990) afirmam ser 0,14 V um erro típico em transdutores de pressão diferencial em curvas de calibração tensão-pressão para transdutores com saída de 4 V. Os autores utilizaram um transdutor de pressão com medidor de vácuo tipo diferencial, no qual a pressão é sentida por um diafragma que se flexiona conforme a pressão ambiental e a mudança de temperatura.

#### **2.4. Sensores tipo resistência elétrica**

O método da resistência elétrica baseia-se no princípio de que quanto mais úmido estiver um bloco poroso, menor a resistência do mesmo à passagem de corrente elétrica. A medida da resistência é obtida através de dois eletrodos concêntricos inseridos no bloco poroso. Quando o bloco entra em contato com o solo, a água da solução do solo desloca-se para o seu interior, buscando o equilíbrio. Segundo Coelho (2003), a resistência obtida no bloco poroso é feita de forma indireta, aplicando-se a lei de Ohm e uma ponte de Wheatstone.

Abraham et al. (2000) testaram cinco tipos de meio poroso (o próprio solo, areia lavada, nylon, esponja e gesso) quanto à uniformidade da relação umidade do solo-resistência elétrica em quatro repetições, visando à seleção para o estabelecimento de um sistema automatizado de irrigação por gotejamento. Miranda (2003) menciona que os sensores tipo resistência elétrica podem ser de gesso, nylon, fibra de vidro ou outros materiais, embora os mais usados são os de blocos de gesso e de matriz granular (GMS).

Com relação ao uso dos blocos de gesso, Phene et al. (1975) citam vários problemas que são encontrados freqüentemente tais como: o efeito da salinidade na condutividade elétrica, independente da umidade do solo; a dissolução do gesso, tornando o bloco instável; uma resistência ao contato entre o corpo poroso e o solo, podendo restringir a troca de água entre os mesmos e, finalmente, um efeito de histerese em relação ao potencial hídrico do solo o qual pode levar a erros de interpretação, dependendo se o solo está em processo de molhamento ou de secagem. Eldredge et al. (1993) afirmam que os blocos de gesso dissolvem-se lentamente com o tempo, levando à perda do contato firme com os poros do solo e, conseqüentemente a medidas inconsistentes da umidade do solo. Os autores ainda afirmam que o GMS, comercializado pela Irrometer Co., Riverside, CA como sensor Watermark, apresenta uma tecnologia capaz de reduzir os problemas de solubilidade apresentados pelos blocos de gesso, não obstante os mesmos contenham em sua constituição o gesso, mas que, em pequena quantidade, na camada mais interna, entre os eletrodos, encontra-se protegido no interior da matriz granular formada por materiais, a maioria deles, não solúveis na solução do solo.

Segundo Yoder et al. (1998), a amplitude de determinação da umidade do solo pelo bloco de gesso corresponde às umidades que conferem ao solo tensões entre 10 e 1500 kPa. Yoder et al. (1998), a respeito do sensor Watermark, menciona que o mesmo é constituído por uma matriz porosa, envolta em uma membrana sintética, para diminuir o efeito dos sais da solução do solo e segundo o seu fabricante tem amplitude em relação à tensão do solo de 0 a 2000 kPa.

Miranda (2003) cita algumas particularidades em relação aos sensores tipo resistência elétrica como a não necessidade de manutenção periódica dos sensores, o que seria uma grande vantagem, principalmente para sua utilização em sistemas de irrigação automatizados; a necessidade de um fator de correção para maior precisão da resposta destes sensores, visto que é afetada pela temperatura e a necessidade de calibração, individualmente, de cada bloco, quando o sensor for o de bloco de gesso, uma vez que a relação entre a resistência do sensor e o potencial mátrico do solo varia não somente de bloco para bloco, mas, também no mesmo bloco, ao longo do tempo.

Os sensores tipo resistência elétrica submetidos a corrente contínua podem adquirir “polarização” a qual consiste na migração dos cátions e dos ânions da solução do solo para os eletrodos de carga oposta, gerando resultados distorcidos e deterioração dos sensores, justificando a utilização dos mesmos em corrente alternada para monitoramento da umidade do solo. A polarização dos eletrodos foi encontrada nos testes dos sensores em Abraham et al.

(2000) razão pela qual eles sugeriram que após a aplicação de fertilizantes químicos e mesmo com o tempo os sensores devem ser calibrados. A menos que as leituras sejam realizadas instantaneamente, os sensores não poderão ser usados em corrente contínua (MIRANDA, 2003).

## 2.5. Célula de carga

As células de carga são os dispositivos transdutores de força ou peso. Elas consistem de uma estrutura metálica projetada para sofrer deformação dentro de limites de força ou peso pré-determinados. Aderidos à estrutura metálica encontram-se os “strain gages” ou extensômetros de resistência elétrica, ou, simplesmente, extensômetros, os quais possuem tamanho que variam de 1/64 de polegadas a várias polegadas. Segundo Horowitz e Hill (1989), os extensômetros medem a deformação a que está submetido um arranjo de quatro extensômetros dispostos segundo uma ponte de Wheatstone, na qual uma corrente contínua é introduzida através de dois terminais e a diferença de potencial é lida em outros dois terminais. A tensão de saída típica é na ordem de 2 mV por V de tensão aplicada, para toda a escala de deformação com precisão de 1 a 0,1%. Os autores ainda alertam para o efeito da temperatura sobre os elementos da ponte, os quais apresentam sensibilidade à temperatura, limitando a performance dos extensômetros.

Com os baixos custos de produção de células de cargas obtidos atualmente e a facilidade de conexão com os sistemas de aquisição de dados, tornou-se viável a construção de lisímetros de pesagem com boa precisão, fácil montagem e baixo custo. Miranda, Yoder e Souza (1999), realizaram a instalação e calibração de um lisímetro de pesagem, do tipo caixa metálica, sobre balança eletrônica de precisão equipada com célula de carga, no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, no Estado do Ceará. Este lisímetro mostrou-se sensível às variações lâmina d'água de 0,18 mm. Campeche (2002) teve como um dos principais objetivos a construção, calibração e operação de lisímetros de pesagem, baseado em célula de carga, para monitorar o consumo de água por árvores *in situ* em pomar.

## 2.6. Erros dos sensores

Antes de explicar acerca de erros dos sensores faz-se necessário definir alguns termos como precisão e exatidão dos sensores. Camargo e Sentelhas (1997) definem precisão como o grau de dispersão dos dados obtidos, em relação à média e exatidão como o afastamento dos valores estimados, em relação aos observados. Portanto, um sensor será preciso quando, ao medir, várias vezes, um determinado parâmetro, com um mesmo valor real, a sua saída apresentar valores medidos muito próximos, em torno da média destes valores medidos; sendo ainda exato quando esta média dos valores medidos estiver próxima do valor real.

Os sensores podem apresentar erros de medição, isto é, podem registrar um valor diferente do valor real. Pereira (2002) afirma que devido ao fato de o valor verdadeiro da medida ser, normalmente, desconhecido, o erro de uma leitura é a diferença entre a leitura e a média de várias leituras, deixando claro que a precisão do sensor é que define o erro de leitura.

Os erros dos sensores são classificados em a) erros de inserção, quando no ato de inserção do sensor no sistema, o parâmetro a ser medido é alterado; b) erros de aplicação são os causados pelo operador e ocorrem, por exemplo, quando o sensor é colocado em um local diferente do desejado; c) erros de característica são os erros inerentes ao próprio sensor, consistindo na diferença entre a curva de calibração do sensor a qual é especificada pelo fabricante e a curva real do sensor; d) Erros de dinâmica são relativos às respostas dos sensores sob condições de mudança rápida do parâmetro que está sendo medido, ocorre quando o tempo de resposta dos sensores não acompanha a taxa de mudança do fenômeno que está sendo medido; e) Erros ambientais são os erros decorrentes dos fatores do ambiente no qual o sensor está sendo utilizado como temperatura, vibração, umidade, dentre outros (THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND, 2004).

### 3. MATERIAIS E METODOLOGIA

#### 3.1. Construção e calibração do Dispositivo para Calibração de Sensores de Umidade do Solo (DCSUS).

No Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, foi construída uma torre de aço 1020, de 3,7 m de altura, em cujo topo, dois perfis em “I”, do mesmo material, em forma de cruz, formaram uma balança de braços (Figura 1), unidas por um conjunto composto por eixo, mancais e rolamentos, no ponto central dos perfis (1). A altura da estrutura foi concebida no intuito de proporcionar uma adaptação do funil de placa porosa, com possibilidade de tensão de sucção até 24,5 kPa (2,5 mca). Em um dos braços da balança foi colocada uma bandeja, suspensa por cabos de aço, para sustentar o tubo de acrílico (3) com o solo no qual foram inseridos os sensores de umidade do solo a serem calibrados. No outro braço da balança foi utilizada uma célula de carga para a obtenção do peso correspondente à umidade contida na coluna de solo. Um contra-peso (2) foi colocado no mesmo braço da estrutura de ferro de modo que a capacidade nominal da célula de carga não fosse ultrapassada.

Em condição de equilíbrio, o somatório dos momentos em torno do eixo dos mancais deve igualar-se a zero ( $\sum M_o = 0$ ). Considerando contra-peso ( $W_1$ ) e solo úmido ( $W_2$ ) as cargas atuantes nos dois lados da balança e  $L_1$  e  $L_2$  as distâncias em relação ao ponto central do perfil superior, então  $W_1L_1 = W_2L_2$ . Para garantir um melhor equilíbrio da estrutura de ferro,  $L_1$  e  $L_2$  foram feitos iguais ( $L_1 = L_2 = 0,60$  m). Foi estipulada como condição inicial para a coleta de dados o solo saturado. Com o solo saturado adicionou-se o contra-peso do outro lado da balança, de modo que a diferença de carga entre os dois braços ficasse em 40 kg.

Compondo o calibrador constou ainda uma adaptação do funil de placa porosa e outra da câmara de pressão de Richards, os quais possibilitaram tensões de 4,9; 9,8; 14,7; 19,6; 29,4; 39,2; 49,1; 58,9; e 78,5 kPa, além de um sistema de aquisição de dados.

Para a confecção da placa de circuitos eletrônicos utilizada no interfaceamento da célula de carga com o sistema de aquisição de dados foi realizada uma simulação com o software PSpice a qual possibilitou a determinação dos componentes passivos da placa. Nesta placa, foi projetado e implementado um amplificador instrumental para a diferença de

potencial elétrico na saída da célula de carga, visando à comunicação com o sistema de aquisição de dados, bem como a diminuir o efeito de ruídos sobre a saída da célula de carga.

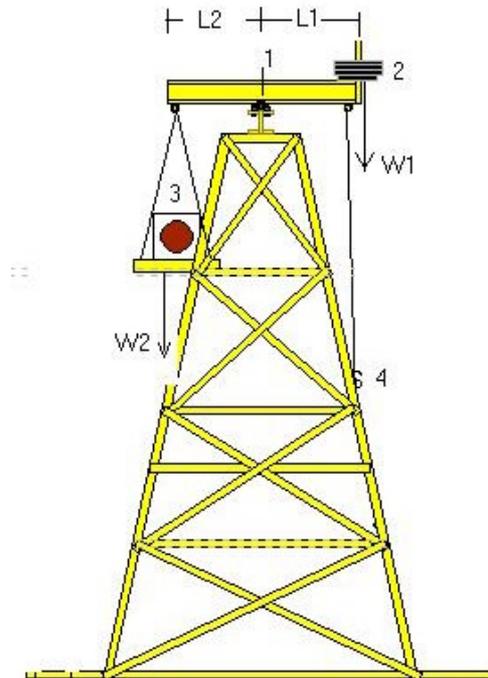


FIGURA 1 – Desenho esquemático da estrutura de ferro com os principais componentes e forças atuantes. 1 – sistema de eixos, mancais e rolamentos, 2 – contrapeso, 3 – tubo de acrílico para acondicionamento da coluna de solo, 4 – célula de carga, L1 e L2 distâncias em relação ao ponto central do perfil superior, W1 e W2 – forças atuantes.

Calibrou-se o dispositivo, adicionando-se massas conhecidas (variável independente), em torno de 50 g, até à capacidade nominal da célula de carga (50,0 kg) e a resposta da célula de carga obtida, em mV, foi obtida através de um multímetro de bancada (variável dependente). Os dados obtidos foram submetidos ao software Origin 7.5 para obtenção da curva de calibração da balança através da análise de regressão.

### 3.2. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados foi composto por uma placa modelo TD40 da empresa TERN (<http://www.tern.com/td40.htm>), com um conversor analógico-digital (CAD)

de 12 bits e 11 canais; um microcontrolador (AMD 188) e finalmente um micro-computador (Figura 2).



FIGURA 2 – Sistema de aquisição de dados

Os sinais emitidos pelos sensores de umidade e de temperatura, bem como os da célula de carga, foram recebidos pelo CAD e, após a conversão, enviados ao microcontrolador que, programado em linguagem C++, enviou-os ao micro-computador, através de uma porta serial, para exibição, em tempo real, dos valores na base decimal (contadores). Com o CAD de 12 bits em cada canal da placa de aquisição de dados, obtem-se número máximo de 4096 contadores (0 – 4095), conferindo uma precisão nas medidas de 1,22 mV/contador, considerando que o sinal de tensão máximo na entrada do mesmo foi de 5000 mV. Os dados brutos foram apresentados no monitor em tempo real para controle visual por parte do operador e registro das ocorrências. Os dados foram coletados a uma frequência de 3 Hz e gravados em arquivo de texto para processamento posterior. Foram utilizados 10 canais do CAD, sendo 5 para os tensiômetros, 3 para os Watermarks, 1 para um sensor de temperatura e 1 para a célula de carga.

### 3.3. Célula de carga

A célula de carga é um transdutor de medição de força. Consiste em uma estrutura rígida na qual estão aderidos os sensores denominados “strain gage”. Quando submetida a uma determinada carga, embora não perceptível, a deformação na estrutura da célula de carga, é transmitida aos sensores, fazendo com que se modifique a resistência à passagem de corrente elétrica através dos mesmos. Os sensores estão dispostos segundo uma ponte de Wheatstone, fazendo com que a tensão de saída da célula de carga varie conforme a carga a que está submetida.

A ponte de Wheatstone é um circuito composto por quatro resistores cuja principal função é determinar, com precisão, uma resistência desconhecida. A figura 3 é a representação esquemática de um circuito tipo ponte de Wheatstone a qual representa a disposição dos “strain gages” na célula de carga. A saída da célula de carga é, pois, a diferença de potencial, em volts, entre os nós B e D, representada por  $V_g$ ; as resistências  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  são os extensores da célula de carga, os quais sofrem deformação conforme a carga à qual a célula está submetida (MEASUREMENT, 2004).

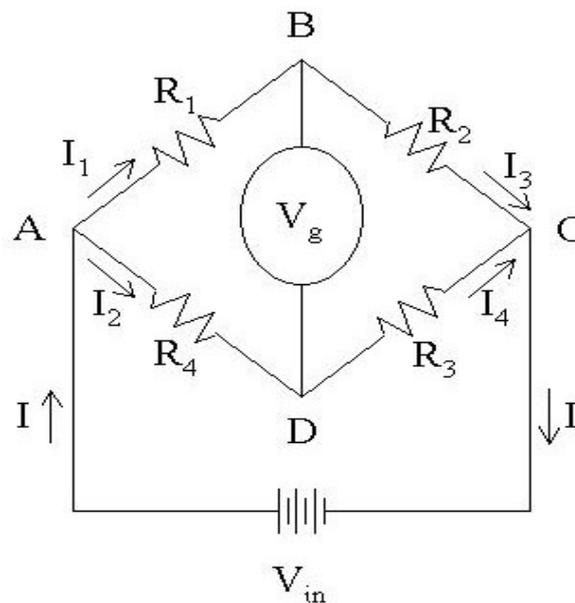


FIGURA 3 – Representação esquemática de uma ponte de Wheatstone.

Observando a Figura 3, e considerando a Lei de Ohm, tem-se que:

$$V_g = V_{AB} - V_{AD} = I_1 R_1 - I_2 R_4 \quad (1)$$

e também que:

$$V_{ABC} = I_1 (R_1 + R_2) \quad (2)$$

e

$$V_{ADC} = I_2(R_4 + R_3) \quad (3)$$

então, substituindo-se as equações (2) e (3) na equação (1), tem-se:

$$V_g = \left( \frac{V_{ABC}}{R_1 + R_2} \right) R_1 - \left( \frac{V_{ADC}}{R_4 + R_3} \right) R_4 \quad (4)$$

como  $V_{ABC} = V_{ADC} = V_{in}$ , então:

$$V_g = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} V_{in} \quad (5)$$

Utilizou-se uma célula de carga da ALFA Instrumentos (figura 4) cujas principais especificações técnicas, segundo ALFA (2003), são:

- Capacidade nominal: 50 kg;
- Material: Alumínio anodizado;
- Sensibilidade: 2 mV/V, +/- 10%;
- Erro combinado: < 0,03%;
- Creep<sup>1</sup> à capac. Nominal: < 0,03% da saída nominal, em 20 min. e < 0,05 % em 8 hs.
- Zero inicial: +/- 1;
- Temperatura de trabalho: 0 a +50 °C;
- Erro excentricidade: OMIL > 5000 div.;
- Efeito da temperatura: No zero: < 30 ppm/°C da saída nominal - na calibração: < 10 ppm/°C da saída nominal;
- Máxima capacidade: 150%;
- Sobrecarga de ruptura: 300%;
- Excitação VCC ou VCA: Máxima de 15 V e recomendada de 10 V;
- Resistência elétrica entrada/saída: 405 +/- 10 ohms/350 +/- 1 ohms;
- Resistência de isolamento (50 VCC máx): > 5000 Mohms;
- Deflexão máxima à capac. Nominal: < 0,5 mm;
- Grau de proteção: IP65.

---

<sup>1</sup> Creep é um tipo de erro na medida de uma célula de carga, em função do tempo, quando a mesma é submetida a uma determinada carga constante e todas as demais condições ambientais e variáveis são mantidas constantes. É expresso em termos de percentagem da carga à qual está submetida por um período específico de tempo. Na célula de carga acima especificada, a variação na medida da célula de carga é de 0,03 % em um período de tempo de 20 minutos e 0,05% em 8 horas.

A célula de carga foi alimentada por uma tensão de alimentação de 10 V, garantindo, segundo as suas especificações, que quando submetida a uma carga correspondente à sua capacidade nominal, isto é, 50 kg, a resposta da célula de carga será a tensão máxima de saída ( $V_{MAX}$ ) correspondente a 20 mV, uma vez que é obtida pela equação abaixo:



FIGURA 4 – Célula de carga utilizada no calibrador

$$V_{MAX} = V_s \cdot \text{Sens} \quad (6)$$

Onde:  $V_{MAX\_CC}$  = Tensão máxima de saída da célula de carga (mV);

$V_s$  = Tensão de excitação da célula de carga (10 V);

Sens = Sensibilidade da célula de carga (2,0 mV/V).

Por outro lado, no zero inicial, quando a célula de carga não está submetida a esforço algum, o sinal de saída da mesma será a tensão mínima  $V_{MIN.} = 1\text{mV}$ , segundo o fabricante (ALFA, 2003).

Como visto acima, com a sensibilidade de 2mV/V obtém-se um sinal de 0 a 20 mV na saída da célula de carga, quando a mesma é excitada a uma tensão constante de 10 V e submetida à esforços de tração de 0 a 50 kg, respectivamente. Necessitou-se, desta forma, amplificar o sinal de tensão de saída da célula de carga, garantindo menor interferência de ruídos no sinal, bem como maior amplitude de resposta. A maior amplitude de resposta da célula de carga foi obtido através de um amplificador instrumental, constante do circuito

eletrônico confeccionado para o interfaceamento da célula de carga com o sistema de aquisição de dados.

### 3.4. Circuitos eletrônicos para interfaceamento entre a célula de carga e o CAD

Foi projetada e implementada uma placa de circuito impresso, com um circuito eletrônico alimentado por uma fonte de 12 VDC (com entrada de 220 VAC e saída de 12 VDC). A placa de circuito impresso contém um regulador de tensão 7810 que fornece diferença de potencial estabilizada de 10 VDC, à célula de carga e ao circuito do amplificador instrumental existente na mesma (figura 5).



FIGURA 5. Placa de circuito impresso com os componentes (HOROWITZ e HILL, 1998).

Um amplificador instrumental foi projetado e implementado para a amplificar a tensão de saída da célula de carga, visando ao interfaceamento com sistemas de aquisição de dados, bem como a diminuir o efeito de ruídos sobre a saída da célula de carga. A figura 6 apresenta o circuito padrão do amplificador instrumental utilizado.

A equação deste amplificador instrumental é dada por:

$$V_{\text{out\_AMP}} = G(V_2 - V_1) \quad (7)$$

Onde:  $V_{\text{out\_AMP}}$  - Tensão de saída do amplificador instrumental (V);

$G$  - Ganho obtido no amplificador instrumental (adimensional);

$V_2$  - Maior tensão de entrada no circuito integrado do amplificador instrumental (V);

$V_1$  - Menor tensão de entrada no circuito integrado do amplificador instrumental (V).

A equação do ganho é dada por:

$$G = \frac{R_4}{R_3} \left[ 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right] \quad (8)$$

Onde: G - Ganho obtido no amplificador instrumental (adimensional);

$R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$  - Resistências utilizadas no amplificador instrumental (ohms).

Este amplificador instrumental é utilizado em aplicações que requerem ganhos acima de 100 (HOROWITZ e HILL 1989) e foi projetado e implementado com o circuito integrado LM324, utilizando-se três dos quatro amplificadores operacionais nele contidos.

Foi utilizado o software PSpice para avaliar os parâmetros de calibração de ganho e saída do amplificador instrumental, bem como determinar o valor dos componentes passivos do circuito.

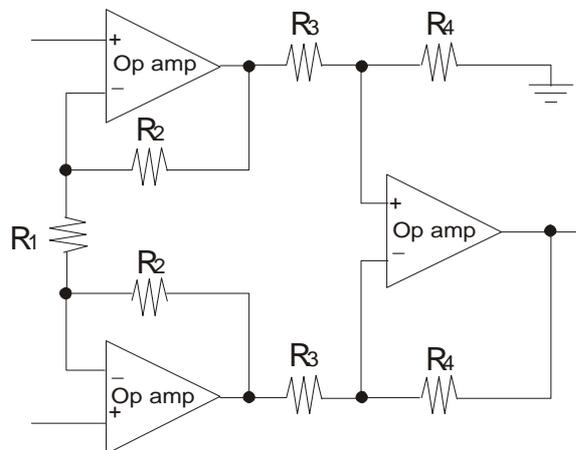


FIGURA 6. Amplificador instrumental.

### 3.5. Coluna de solo

Para a inserção dos sensores de umidade a serem calibrados, foi utilizado um solo Podzólico-Vermelho-Amarelo, equivalente eutrófico, da área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola, o qual apresentou textura franco-argilo-arenosa. Foi feita uma trincheira para a retirada de uma coluna horizontal, indeformada, do solo, de modo que o centro da mesma correspondeu à profundidade de

0,15 m. O solo foi acondicionado em um tubo de acrílico de 0,20 m de diâmetro interno e 1,00 m de comprimento.

O tubo de acrílico contou com cinco entradas, para sensores tipo tensiômetros, dispostas na parede do tubo, no sentido longitudinal, distantes entre si de 0,16 m e, do lado oposto, cinco saídas nas quais foram adaptados funis de placa porosa. Duas tampas de acrílico fecharam o tubo. Para a adaptação da câmara de pressão de Richards à coluna de solo, colocou-se uma tomada de pressão em cada tampa de acrílico, induzindo que a entrada de ar proveniente do compressor se desse das extremidades para o centro da coluna de solo. A Figura 7 apresenta a coluna de solo no cilindro de acrílico.



FIGURA 7 – Coluna de solo no tubo de acrílico, antes da inserção dos sensores de umidade do solo e de temperatura.

O solo ainda apresentou as seguintes características físicas: Densidade do solo ( $\rho$ ) –  $1,66 \text{ g.cm}^{-3}$ , Porosidade do solo ( $\alpha$ ) – 37,20%. Com estas características, ao se promover o encharcamento da coluna de solo obtêm-se  $11.686,72 \text{ cm}^3$  de água, portanto o peso de 11,6 kg de água. Esperou-se obter na célula de carga uma variação menor do que 11,6 kg, uma vez que o solo foi submetido à tensão máxima de 78,48 kPa (8 mca) e apenas a água retida a tensões abaixo de 78,48 kPa foi extraída da coluna de solo.

### 3.6. Funil de placa porosa

Visando à obtenção de tensões menores, correspondentes a 4,9; 9,8; 14,7; 19,6 kPa, devido à dificuldade de obtenção das mesmas através da câmara de pressão de Richards com o sistema de pressão disponível no Laboratório de Hidráulica, foi desenvolvida uma adaptação do funil de placa porosa. Foram confeccionados, em acrílico, cinco funis para extração da água, através de placas porosas fabricadas pela TETA Irrigação Ltda. A Figura 8 apresenta as saídas em forma de funil as quais foram acopladas ao tubo de acrílico proporcionando a obtenção das tensões menores no solo.

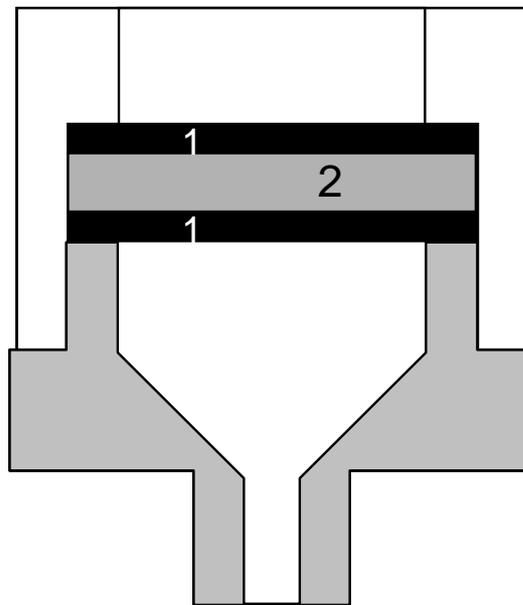


FIGURA 8 – Desenho esquemático do funil de acrílico com placa porosa para drenagem da água retida na coluna de solo a diferentes potenciais mátricos. 1 – borracha para vedação e 2 – placa porosa.

Foram realizados testes de pressão de borbulhamento e de condutância em 18 placas porosas, no intuito de selecionar as 5 mais semelhantes para compor os funis de placa porosa. Ambos os testes foram realizados de maneira similar aos realizados por Coelho (2002), para cápsulas porosas, utilizando equipamentos do Laboratório de Hidráulica, desenvolvidos por Lima (1999).

Todas as placas foram imersas em água por 24 horas para saturação. Tanto no teste de pressão de borbulhamento quanto no teste de condutância, cada placa porosa foi

testada individualmente. No primeiro teste, cada placa saturada foi colocada no interior do funil, como mostrado na Figura 8. Foi utilizado um tubo flexível, com uma das extremidades no sistema compressor de ar e a outra no funil que permaneceu submerso em água. A placa porosa foi submetida ao ar comprimido, a pressões crescentes de 0,5 kPa, até que se iniciasse a passagem de ar através de seus poros, quando então era registrada a pressão de borbulhamento de cada placa. No teste de condutância utilizou-se o método da carga decrescente. Um tubo de plástico flexível e transparente, contendo água em seu interior, um funil com a placa porosa, conforme apresentado na Figura 8, em uma das extremidades e o sistema de compressão de ar na outra, foi utilizado no teste. A água no interior do tubo foi pressionada, através do sistema compressor de ar, fazendo a água atravessar a placa porosa. A condutância foi determinada pela seguinte equação:

$$C = \frac{a \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

Onde: C - condutância ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );

a - área da seção transversal do tubo de plástico ( $\text{cm}^2$ );

$H_1$  e  $H_2$  - potencial hidráulico na cápsula nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , respectivamente (cm.c.a.);

$t_2 - t_1$  - intervalo de tempo (s), que o nível de água no tubo de plástico leva para mudar de  $H_1$  para  $H_2$ .

Para garantir as tensões na coluna de solo, utilizou-se um tubo de PVC azul, com 3,5 m de comprimento e com saídas laterais, dispostas longitudinalmente, separadas de 0,5 m, colocado verticalmente, como uma adaptação do sistema de funil de placa porosa. Um tubo de borracha flexível fez a comunicação entre os funis da coluna de acrílico e o tubo de PVC (Figura 9). O tubo de PVC permitiu sucção no solo até 19,6 kPa (2,0 mca). Após abertura de uma determinada saída, esperou-se até que não houvesse mais drenagem através da mesma, para, então, promover-se a abertura da próxima saída, imediatamente abaixo. A espera pelo término da drenagem garantiu que a umidade remanescente, na coluna de solo, fosse aquela retida a uma tensão superior à tensão estabelecida pela diferença de nível entre a última saída aberta no tubo de PVC e as placas porosas do tubo de acrílico.

À medida que a água do solo foi drenada, os dados dos sensores de umidade do solo, juntamente com os dados da célula de carga, eram enviados ao sistema de aquisição de dados.

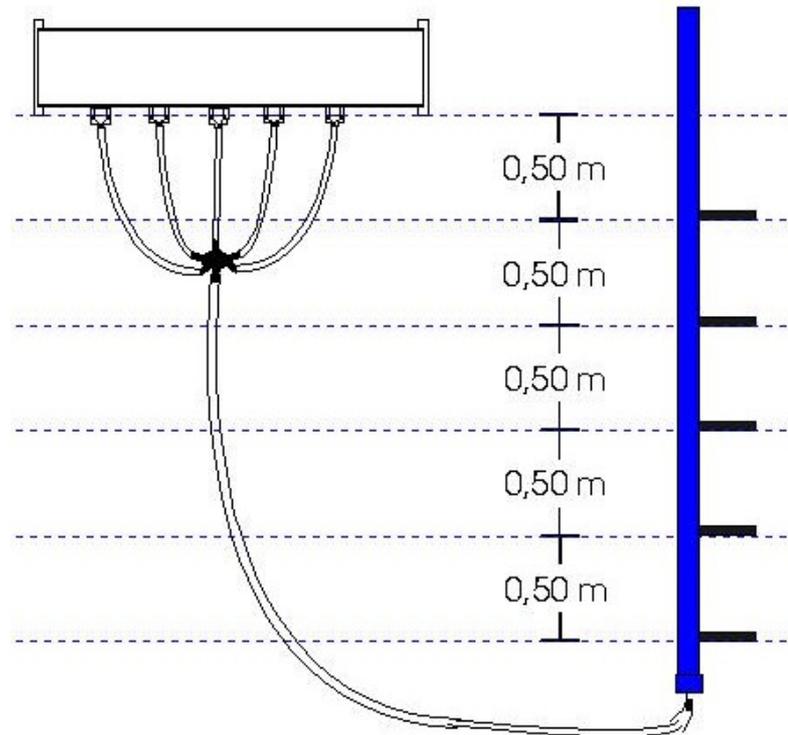


FIGURA 9 – Desenho esquemático da adaptação do funil de Haines.

### 3.7. Câmara de pressão de Richards

Para promover as tensões mais elevadas na coluna de solo, desligou-se o esquema do funil de placa porosa e passou-se a utilizar o compressor de ar (Figura 10). Aplicou-se ar comprimido no interior do tubo de acrílico, com pressões controladas, até a estabilização da saída da célula de carga, observada no monitor do computador, em forma de contadores, quando, então, desligou-se o compressor e fez-se a leitura dos sensores de umidade por 24 horas, para observação do comportamento das leituras, ao longo do dia e obter-se a umidade retida no solo com tensão é equivalente, em módulo, à pressão aplicada. Após um dia de leitura dos sensores, pelo sistema de aquisição de dados, ligou-se novamente o compressor de ar, a fim de promover maior pressão na coluna de solo. As pressões estabelecidas no solo pela câmara de pressão de Richards foram de 29,4; 39,2; 49,0; 58,8; e 78,4 kPa.

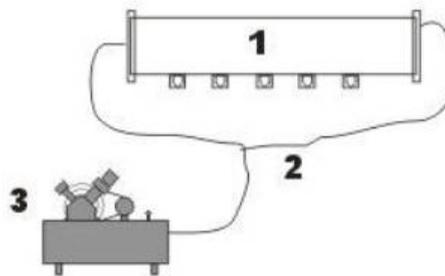


FIGURA 10 – Representação esquemática da câmara de pressão de Richards: 1 – Tubo de acrílico para acondicionamento da coluna de solo; 2 – mangueira flexível para o ar comprimido e 3 – compressor de ar.

### 3.8. Sensores tipo tensiômetros eletrônicos

Os tensiômetros eletrônicos utilizados foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (COELHO, 2003), contendo um tubo de PVC de ½”, com uma cápsula porosa em uma extremidade e na outra extremidade um circuito eletrônico com o sensor de pressão e o de temperatura (Figura 11). O sensor de temperatura foi utilizado para que se pudesse realizar a correção do erro na medida de tensão devido à variação da temperatura ao longo do dia.

O sensor de pressão utilizado no tensiômetro foi o Motorola MPX, um transdutor de pressão, com dois terminais sujeitos a pressões diferentes, cuja resposta é uma tensão elétrica, proporcional ao diferencial de pressão positivo ( $\Delta P > 0$ ) entre dois terminais.

Através da figura 12, deduz-se que as pressões atuantes nos terminais do sensor de pressão são dadas pelas equações seguintes:

$$P1 = Patm \quad (10)$$

e

$$P2 = Patm - \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h \cdot \text{sen}63^\circ - \psi_m \quad (11)$$

Onde: P1 - Pressão atuante no terminal do sensor de pressão voltado para a atmosfera (Pa);

P2 - Pressão atuante no terminal do sensor de pressão voltado para o interior do tensiômetro (Pa);

$P_{atm}$  - pressão atmosférica (Pa);

$\rho_{H_2O}$  - densidade da água ( $kg.m^{-3}$ );

$g$  - aceleração da gravidade ( $m.s^{-2}$ );

$h$  - distância do sensor de pressão ao centro da cápsula porosa do tensiômetro (m);

$\psi_m$  - potencial mátrico do solo (kPa).

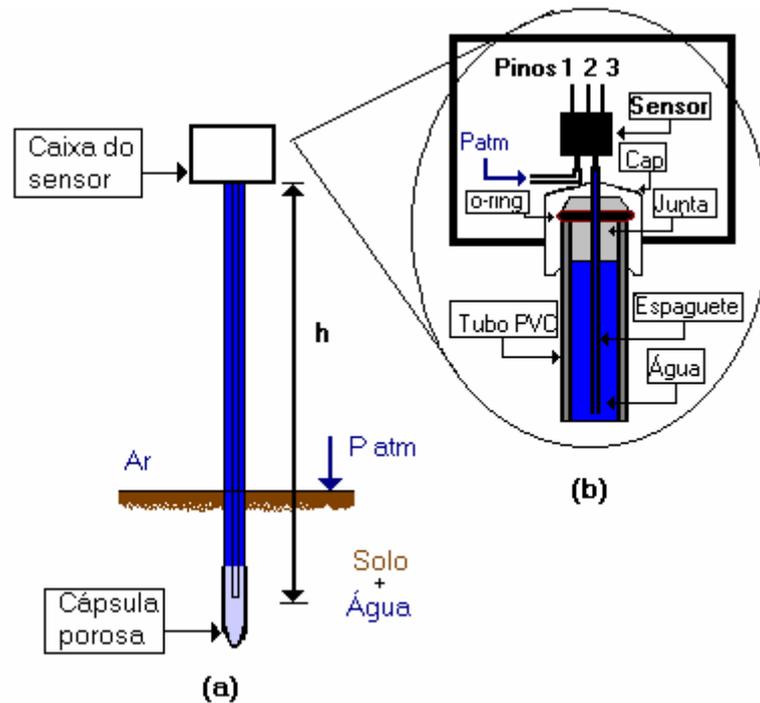


FIGURA 11 – Desenho esquemático de tensiômetro eletrônico desenvolvido em Coelho (2003) e utilizado para aplicação no dispositivo de calibração. Figura obtida de Coelho (2003).

Sendo o sensor de pressão Motorola MPX um transdutor de pressão diferencial, o terminal de pressão voltado para o interior do tensiômetro deve estar sempre submetido a uma pressão inferior à pressão atmosférica, a qual o outro terminal está submetido. Assim sendo, colocou-se no tensiômetro, entre a cápsula porosa e o sensor de pressão, um registro de corte rápido, o qual foi fechado sempre que a coluna de solo esteve submetida ao sistema de pressão, evitando que a pressão fosse transmitida ao terminal voltado para o interior do tensiômetro.

A Figura 12 é um desenho esquemático onde consta, além da disposição dos sensores de umidade na coluna de solo, um detalhe do registro de corte rápido.

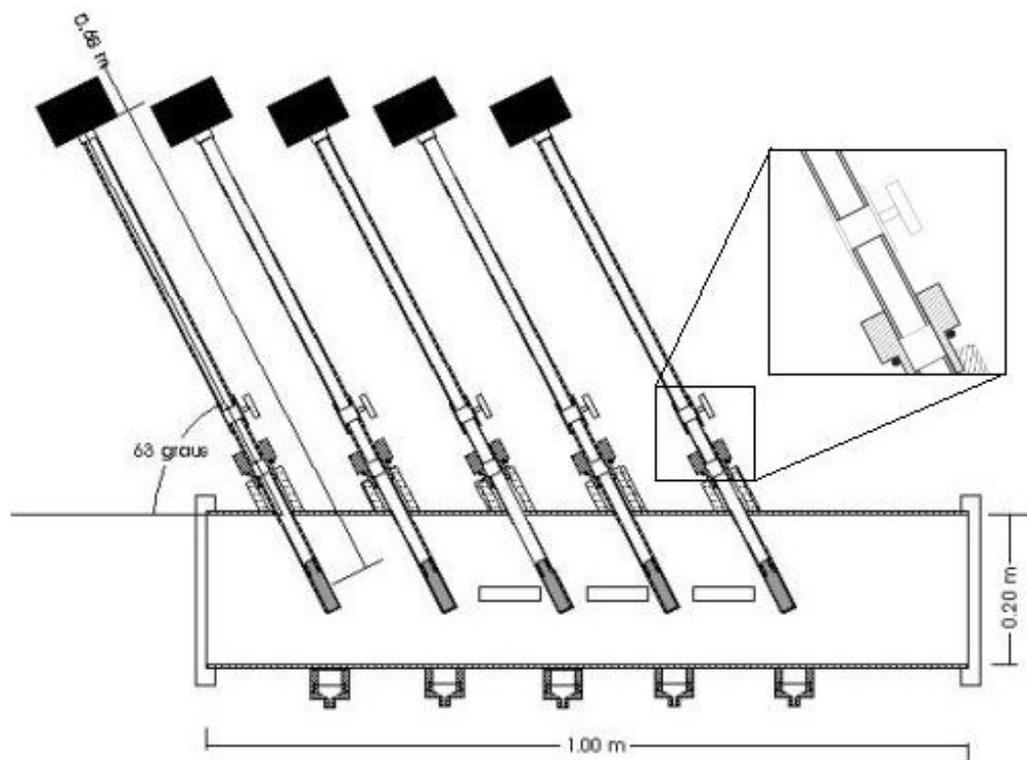


FIGURA 12 – Desenho esquemático da disposição dos sensores de umidade no tubo de acrílico, com detalhamento do registro de fecho rápido.

### 3.9. Sensores tipo resistência elétrica

Patenteados em 1985 e fabricados desde 1989 pela IRROMETER Company Inc. de Riverside, Califórnia (IRROMETER, 2003), os sensores Watermark foram os sensores de umidade do solo do tipo resistência elétrica utilizados no calibrador.

De acordo com o fabricante, o sensor Watermark consiste de dois eletrodos concêntricos, inseridos em uma matriz de material especial, a qual é envolta e mantida no lugar por um chapa de aço inoxidável. O material da matriz foi selecionado para refletir ao máximo a mudança da resistência elétrica dentro da faixa correspondente à do crescimento das culturas. Quando em operação, esta matriz está, constantemente, absorvendo ou perdendo a umidade para o solo. À medida em que o solo seca, a umidade do sensor é reduzida e a resistência elétrica entre os dois eletrodos aumenta.

Segundo HR PRODUCTS (2004), as principais características destes sensores são as seguintes:

- Dois eletrodos concêntricos inseridos em uma matriz porosa envolvida por um envelope inoxidável. A matriz porosa garante proteção contra os níveis de salinidade do solo;
- Não é afetado por temperaturas frias, podendo ser mantido no solo durante o inverno;
- Podem ser utilizados na automação de sistemas de irrigação;
- Funciona em amplitude de 0 a 200 centibars;
- Sensor tipo resistência elétrica com resistência de 500 a 30.000 ohms e
- Tensão de excitação de 5 V em corrente alternada.

A colocação dos três sensores foi realizada de modo que permanecessem alinhados no centro do tubo e distanciados entre si de 0,16 cm. Um trado foi utilizado para abrir passagem no solo para a entrada dos sensores. Uma marcação no trado indicou o quanto o trado deveria penetrar no solo para que o sensor fosse colocado no local desejado. Após a colocação do sensor, o espaço foi preenchido com solo e uma nova tradagem foi realizada para a inserção do próximo sensor. Ver detalhes na Figura 13.



FIGURA 13 – Detalhe da inserção do sensor Watermark na coluna de solo.

Ao serem usados com um dispositivo de aquisição de dados, a tensão de excitação dos sensores Watermark é de 5 VAC, com frequência de 100-120 Hz. A saída do sensor varia de 500 a 30000 ohms de resistência elétrica, equivalendo a 0-200 centibars (0-200 kPa) de tensão do solo (não linear) (HR PRODUCTS, 2004). A Figura 14 é um diagrama de blocos da

placa de circuito elétrico, a qual foi implementada e confeccionada para conexão dos sensores Watermark com o sistema de aquisição de dados.

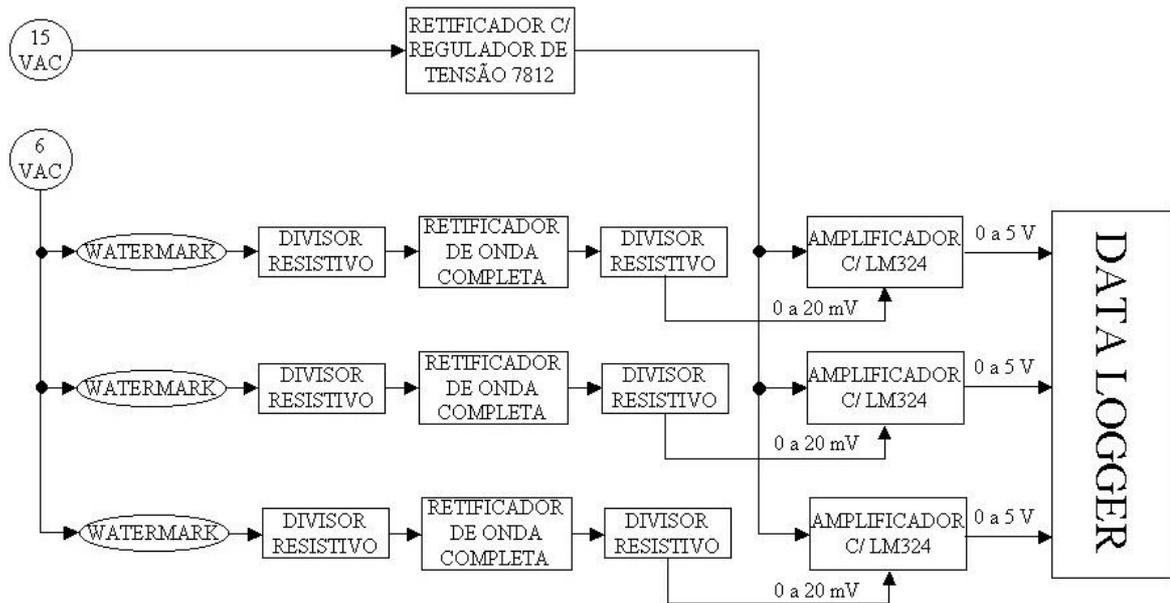


FIGURA 14 – Diagrama de blocos da placa de circuitos elétricos para interfaceamento dos sensores Watermark

A Figura 14 mostra que foi utilizada uma tensão elétrica de suprimento dos sensores Watermark de 6 VAC, uma vez que o uso contínuo dos sensores em corrente contínua causa o problema da polarização dos eletrodos (Abraham et al, 2000; Miranda, 2003). Os divisores resistivos de tensão foram utilizados para permitir o acoplamento do sinal de tensão dos sensores aos circuitos retificadores e amplificadores do mesmo. Nos primeiros divisores, o sinal de tensão é reduzido, mas ainda sai em corrente alternada. O retificador de onda completa foi utilizado para transformar a corrente alternada em corrente contínua. O segundo divisor de tensão foi utilizado para reduzir ainda mais a tensão, de modo que na sua saída a variação de tensão é de 0 a 20 mV, conforme o potencial mátrico do solo varie de 0 a -200 kPa. Esta tensão de saída de 0 a 20 mV foi submetida aos amplificadores instrumentais, para que faixa de tensão variasse de 0 a 5 V, que é a faixa de tensão utilizada nos CAD's. A tensão de suprimento dos amplificadores instrumentais foi de 12 V, provenientes de um retificador com regulador de tensão 7812.

Observa-se que a faixa de tensão que sai da placa de circuito de alimentação do Watermark é de 1,2 a 20,0 mV, a qual, após a passagem pelo amplificador, varia de 0,03 a 5,00 V. Ou seja, com o solo saturado e o potencial mátrico de 0 kPa, chegarão ao CAD 0,03

V, e sairão 25 contadores. No extremo oposto, de -200 kPa (-200 centibar), entrarão 5 V no CAD, e sairão 4095 contadores.

### 3.10. Sensor de temperatura

Foram coletados dados da temperatura ambiente através do sensor de temperatura FM 51, um transistor semicondutor de óxido metálico complementar - CMOS. Trata-se de um sensor de alta precisão o qual funciona com tensão de suprimento na faixa de 2,7 a 6,0 V. Quando operando na faixa de temperatura de -40 a 125° C, possui exatidão de 1 °C, sendo 0,5 °C na temperatura ambiente.

Segundo o fabricante do sensor de temperatura, a equação de calibração é:

$$\text{Temp} = \frac{(V_{\text{outst}} - 500)}{10} \quad (12)$$

onde: Temp = temperatura medida (°C);

$V_{\text{outst}}$  = Tensão de saída no sensor de temperatura (mV).

Com a amplitude do conversor analógico digital utilizado de 4096 contadores (0 a 4095) e com a amplitude de saída do sensor de temperatura de 0 a 5 V, obtêm-se uma variação de 0,1221 °C por contador, conforme demonstrado na equação 13:

$$V_{\text{outst}} = 1,221 \cdot C \quad (13)$$

logo,

$$\text{Temp} = 0,1221 \cdot C - 50 \quad (14)$$

onde: Temp = temperatura medida (°C);

C = Número de contadores (adimensional).

### 3.11. Condução do experimento

Após a implementação da bancada iniciaram-se as coletas dos dados. O período da coleta foi de 15/01 a 27/05/2004. Um programa em C++ (Anexo I) foi utilizado para coleta e armazenamento dos dados. No primeiro dia promoveu-se a entrada de água na coluna de solo, através de mangueiras flexíveis pelas aberturas para entrada de ar comprimido. Após saturado o solo foram adicionados os tensiômetros eletrônicos. Esperou-se até que houvesse a

estabilização na leitura da célula de carga e então promoveu-se a abertura da primeira saída do funil de placa porosa, garantindo uma tensão de 4,90 kPa (0,5 mca). Cada mudança na tensão foi efetuada somente após 24 horas, no mínimo, da estabilização da célula de carga. A maior tensão na qual a coluna de solo foi submetida foi de 78,45 kPa (8 mca).

Os dados, obtidos a uma frequência de 3 Hz, foram armazenados em forma de arquivo texto duas vezes por dia para posterior tratamento. Um programa em C<sup>++</sup> (Anexo I) foi utilizado para tratamento dos dados, calculando a média do minuto, reduzindo de 4320 para 1440 dados diários. Os dados foram analisados no software Origin 7.5.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Simulação do circuito eletrônico do Dispositivo para Calibração de Sensores de Umidade do Solo (DCSUS).

A simulação feita no software PSpice apresentou o resultado mostrado na Figura 15.

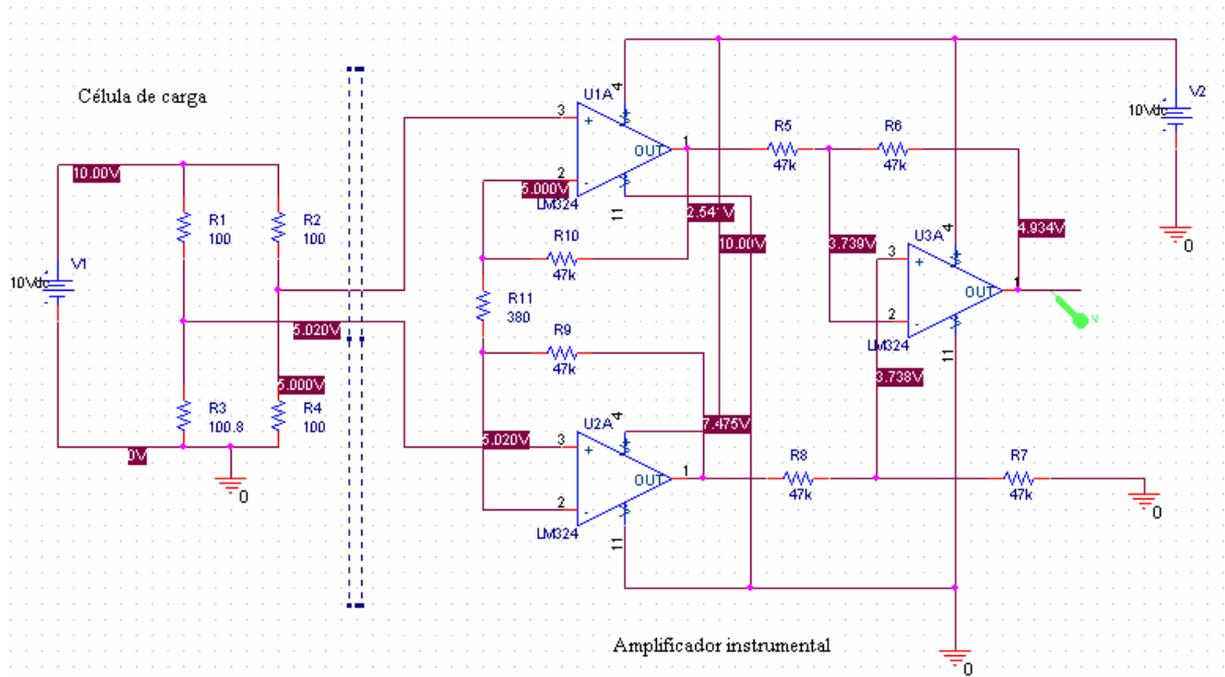


FIGURA 15 – Diagrama fornecido pelo software PSpice, contendo à esquerda da barra pontilhada o circuito representativo da célula de carga, em forma de ponte de Wheatstone e à direita, o circuito simulado do amplificador instrumental.

A parte à esquerda da barra pontilhada representa a célula de carga, onde os “strain gages” (resistores) foram selecionados de modo a fornecer a máxima tensão de saída da célula de carga utilizada (20 mV). A parte à direita da barra pontilhada representa o amplificador instrumental. Os resistores e um “trimmed” (resistor ajustável) foram selecionados de modo que a saída no amplificador instrumental fornecesse um valor de tensão máxima, próximo a 5 V, visando ao interfaceamento com o sistema de aquisição de dados. O resistor ajustável, cuja resistência máxima é de 1 k $\Omega$ , possibilitou um ajuste fino da tensão de saída para valor muito próximo de 5 V, mais precisamente, 4,934 V.

O resultado da simulação no PSpice sugere que quando a célula de carga for submetida à sua carga nominal, 50 kg, quando a tensão de saída na célula de carga corresponde a 0,02 V, a tensão de saída amplificada será de 4,934 V, isto é, ocorre um ganho de 246,7 no amplificador instrumental. Com a simulação obteve-se para o amplificador operacional o valor do resistor ajustável (R11) de 380  $\Omega$  e para as demais resistências o valor de 47 k $\Omega$ . Na posição de R11 foi utilizado um “trimmed” (resistor ajustável).

A Figura 16 contém o diagrama de dispersão, juntamente com a reta ajustada dos dados obtidos no teste de calibração do DCSUS, tendo como variável dependente o peso, em kgf, a que o dispositivo fora submetido e, como variável independente, a saída do dispositivo em V.

Observa-se, através desta figura, que, até o peso de 1 kgf, a curva não apresenta o comportamento linear observado após o mesmo. Tal fato sugere que o dispositivo terá uma faixa de aplicação que deverá ir de 1 kgf, limite inferior definido pelo “offset” ou peso inicial a partir do qual o dispositivo começa a apresentar linearidade na resposta, a 50 kgf, limite superior definido pela capacidade nominal da célula de carga utilizada.

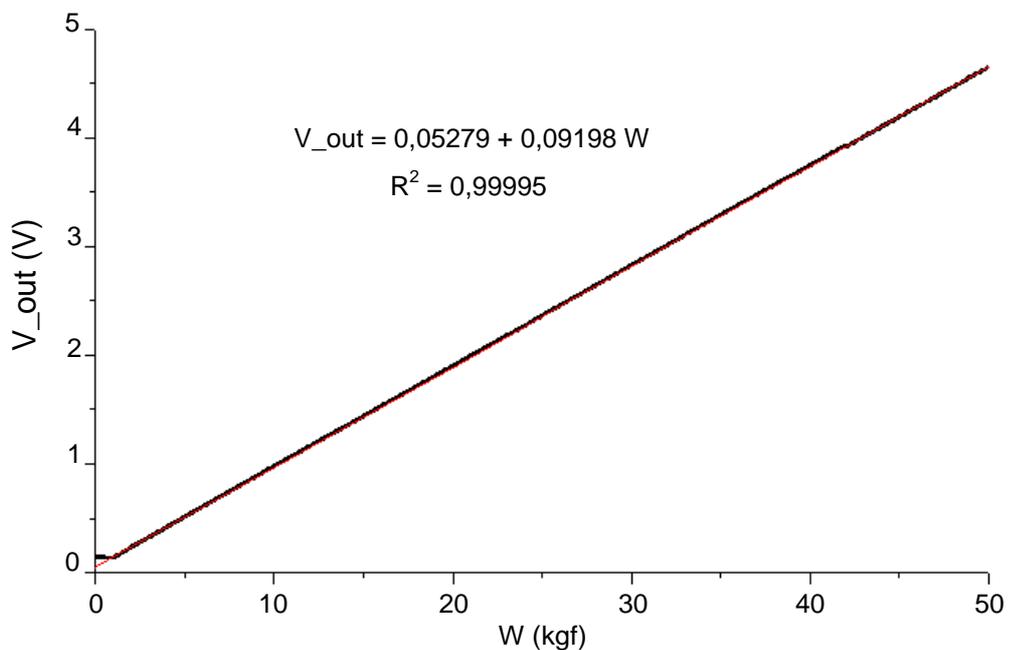


FIGURA 16 – Dispersão dos dados da calibração do dispositivo, mostrando a relação entre as diferentes cargas aplicadas ao dispositivo a tensão de saída do dispositivo.

O teste F realizado no software Origin 7.5 validou a hipótese alternativa de que a regressão é significativa ao nível de significância superior a 99,9 %. No teste dos coeficientes, os mesmos foram validados ao nível de significância superior a 99,9%. O coeficiente de regressão apresentado foi 0,99995. A regressão linear apresentou a seguinte equação de calibração para a balança:

$$V_{\text{out}_{\text{DCSUS}}} = 9,379 \cdot 10^{-3} \cdot W + 5,279 \cdot 10^{-2} \quad (15)$$

Onde:  $V_{\text{out}_{\text{DCSUS}}}$  = tensão de saída do DCSUS [V];

$W$  = peso a que o dispositivo foi submetido [N].

Segundo a equação de calibração, a tensão máxima de saída do dispositivo, registrada quando o mesmo está submetido ao peso máximo de 490,33 N é de 4,652 V. Em um conversor analógico digital (CAD) de 12 bits, isto é, com uma faixa na saída de 0 a 4095 contadores para uma variação de 0 a 5 V de tensão de entrada, obtêm-se, para 4,652 V de entrada, uma saída de 3810 contadores. Este número de contadores será apresentado quando a diferença entre os dois lados do dispositivo de calibração for correspondente a 490,33 N. Em resumo, a função que correlaciona a tensão de entrada no CAD e o número de contadores é dada por:

$$\text{Count} = V_{\text{in}_{\text{CAD}}} \cdot 819 \quad (16)$$

Onde: Count = valor do contador na saída do CAD (adimensional);

$V_{\text{in}_{\text{CAD}}}$  = tensão de entrada no CAD (V).

Considerando que são as mesmas as tensões de entrada no CAD e de saída do dispositivo, então, substituindo-se a equação 15 na equação 16, obtêm-se a seguinte relação entre contadores e peso a que o dispositivo é submetido:

$$\text{Count} = 7,6817 \cdot W + 43,236 \quad (17)$$

ou

$$W = 0,1302 \cdot \text{Count} - 5,6284 \quad (18)$$

Onde: Count = valor do contador na saída do CAD (adimensional);

$W$  = diferença de peso entre os dois lados da balança (N).

O coeficiente angular da equação 17 indica uma variação de 7,6817 contadores a cada variação de peso na balança de 1 N, ou seja, 1 contador corresponde à variação de 0,13018 N (0,0133 kgf) de peso, isto corresponde à massa de 13,3 g de água. Considerando o

peso específico da água a 30°C ( $0,9955\text{kg.L}^{-1}$ ), a sensibilidade do dispositivo de calibração é de 13,36 mL de água, com este sistema de aquisição de dados.

#### 4.2. Acompanhamento da perda de umidade com base na célula de carga

Plotando-se os dados de saída de célula de carga com o tempo, em minutos, durante todo o período experimental (19/01 a 27/05/2004 – 130 dias), observou-se a queda nos valores de saída da célula de carga com a perda de água pela coluna de solo. Este comportamento está registrado na Figura 16, obtida no software Origin 7.5.

Observa-se, na Figura 17, que em algumas ocasiões aparecem dados discrepantes os quais não foram considerados na análise, mas são explicados por alguns eventos ocorridos durante o experimento, como a calafetagem de vazamentos que apareceram no tubo de acrílico, a partir da pressão de 29,42 kPa (3 atm), a fluxagem de tensiômetros nos dias 12 e 27/04 e 04 e 05/05, bem como o engate da mangueira de pressão no dia 17/02. Após alguns destes eventos, observa-se na dispersão dos dados que os valores de contadores passam a um patamar mais alto do que o anterior, significando que o sistema foi alterado. Para a realização da análise dos dados foi realizada uma compensação, visando à correção destas alterações.

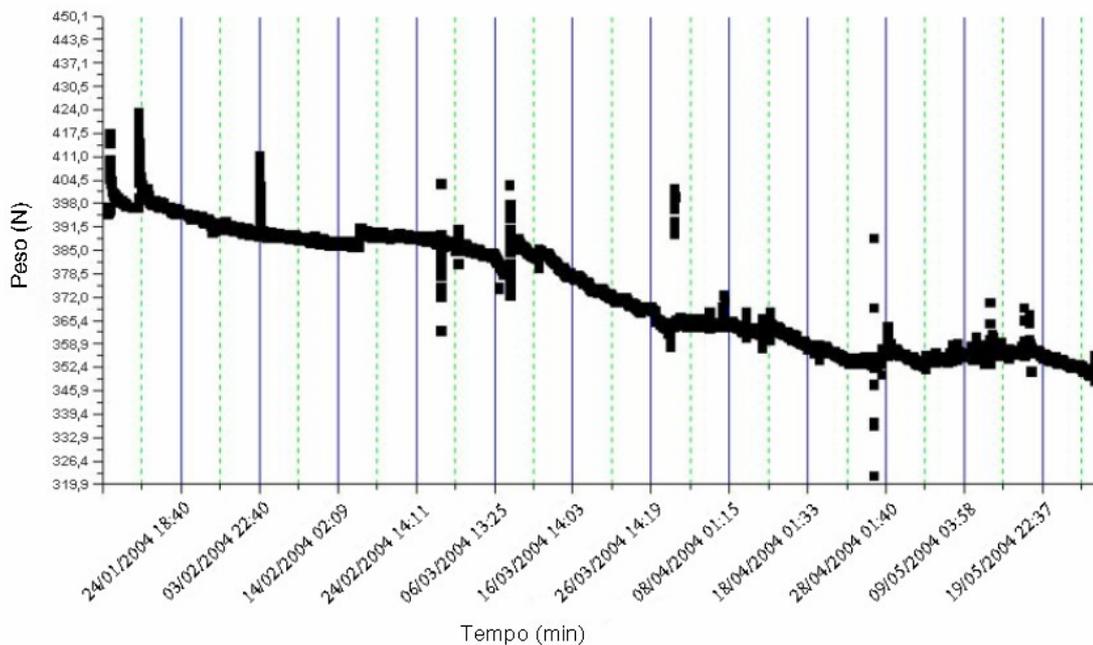


FIGURA 17 – Dispersão dos dados de saída da célula de carga (N) versus tempo (minutos) durante todo o período experimental.

A coluna de solo foi submetida ao potencial mátrico de -4,9; -9,8; -14,7 e -19,6 kPa (-0,5; -1,0; -1,5 e -2,0 mca), por sucção, nos dias 22/01, 27/01, 05/02, 13/02 e, através do sistema de pressão, aos potenciais mátricos de -29,4 kPa (-3 mca) no dia 28/02; -39,2 kPa (-4 mca) no dia 19/04; -49 kPa (-5 mca) no dia 21/04; -58,8 kPa (-6 mca) no dia 27/04 e finalmente -78,5 kPa (-8 mca) no dia 17/05.

Para relacionar a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) com o valor de saída da célula de carga (Count), partiu-se da própria definição de umidade volumétrica expressa pela seguinte equação:

$$\theta = \frac{V_{H_2O}}{V_s} \quad (19)$$

Onde:  $\theta$  = umidade do solo com base no volume ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );

$V_{H_2O}$  = volume de água na amostra de solo ( $\text{cm}^3$ );

$V_s$  = volume da amostra de solo ( $\text{cm}^3$ ).

No início do experimento, a porosidade total ( $\alpha = 37,2\%$ ) do volume de solo foi ocupado com água. Assim, o esforço sobre a célula de carga, correspondeu ao peso da água ( $W_{H_2O}$ ), adicionada a um peso de valor desconhecido ( $W_d$ ), equivalente à diferença de peso entre os dois lados da balança, sem o elemento água. Isto pode ser representado, substituindo os pesos pelas massas correspondentes, na seguinte equação:

$$m_d = m_w - m_{H_2O} \quad (20)$$

Com o valor da  $\alpha$  mencionado acima e o volume de solo de  $31415,93 \text{ cm}^3$ , obteve-se  $V_{H_2O}$  no solo saturado correspondente a  $11686,726 \text{ cm}^3$ , o qual equivale a  $11634,14 \text{ g}$  de  $m_{H_2O}$ , considerando a densidade da água a  $30^\circ \text{ C}$  ( $0,9955 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). Substituindo-se, na Equação 20, o valor da  $m_{H_2O}$  e o valor de  $m_w$  com o solo saturado (Count = 3091), da equação 18, convertido para massa, encontrou-se  $m_d$  igual a  $28824,6246$ . Encontrado o valor de  $m_d$ , pode-se expressar a equação 20, em função da  $m_{H_2O}$  e, ainda, substituir o valor de  $m_w$  (equação 18), para se obter o valor de  $m_{H_2O}$  em função de contadores:

$$m_{H_2O} = 13,2749 \cdot \text{Count} - 29398,5784 \quad (21)$$

Multiplicando-se  $m_{H_2O}$ , da equação 21, pela densidade da água a  $30^\circ \text{ C}$ , tem-se o volume de água, em função de contadores, dado pela equação 22 abaixo:

$$V_{H_2O} = 13,3349 \cdot \text{Count} - 29531,47 \quad (22)$$

Finalmente, substituindo-se  $V_s$  e  $V_{H_2O}$  da equação 22 na equação 19, tem-se a  $\theta$  e função de contadores registrados pela célula de carga:

$$\theta = 4,2446 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Count} - 9,402 \cdot 10^{-1} \quad (23)$$

Durante o período experimental,  $\theta$  variou de 0,372 a 0,17  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  enquanto o  $\psi_m$  variou entre 0 a -78,4 kPa. A Figura 18 apresenta a curva de retenção do solo, com  $\theta$  obtida pela equação 22 e o potencial mátrico pelos sistemas de sucção e pressão.

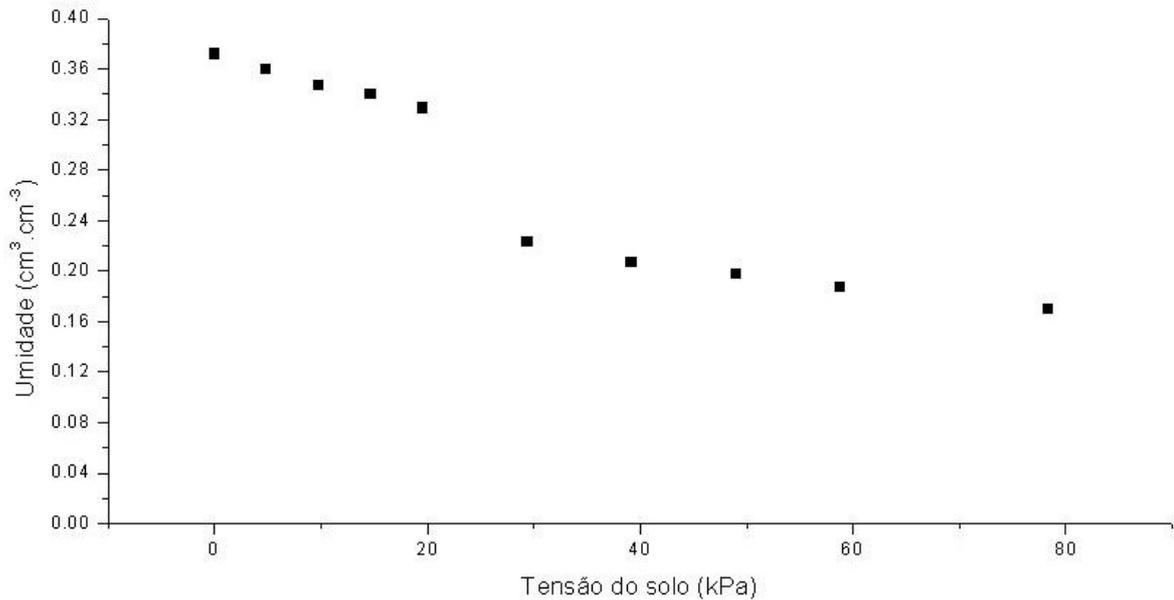


FIGURA 18 – Curva característica da coluna de solo com potenciais dos sistemas de sucção e pressão.

Os valores de umidade e potencial mátrico foram submetidos ao software SWRC 3.0 (DOURADO-NETO, 2001) para ajuste da curva de retenção pelo modelo de van Genuchten (1980). O resultado está na Figura 19. Conforme a Tabela 1, o ajuste da curva foi obtido com 99,8% de confiança.

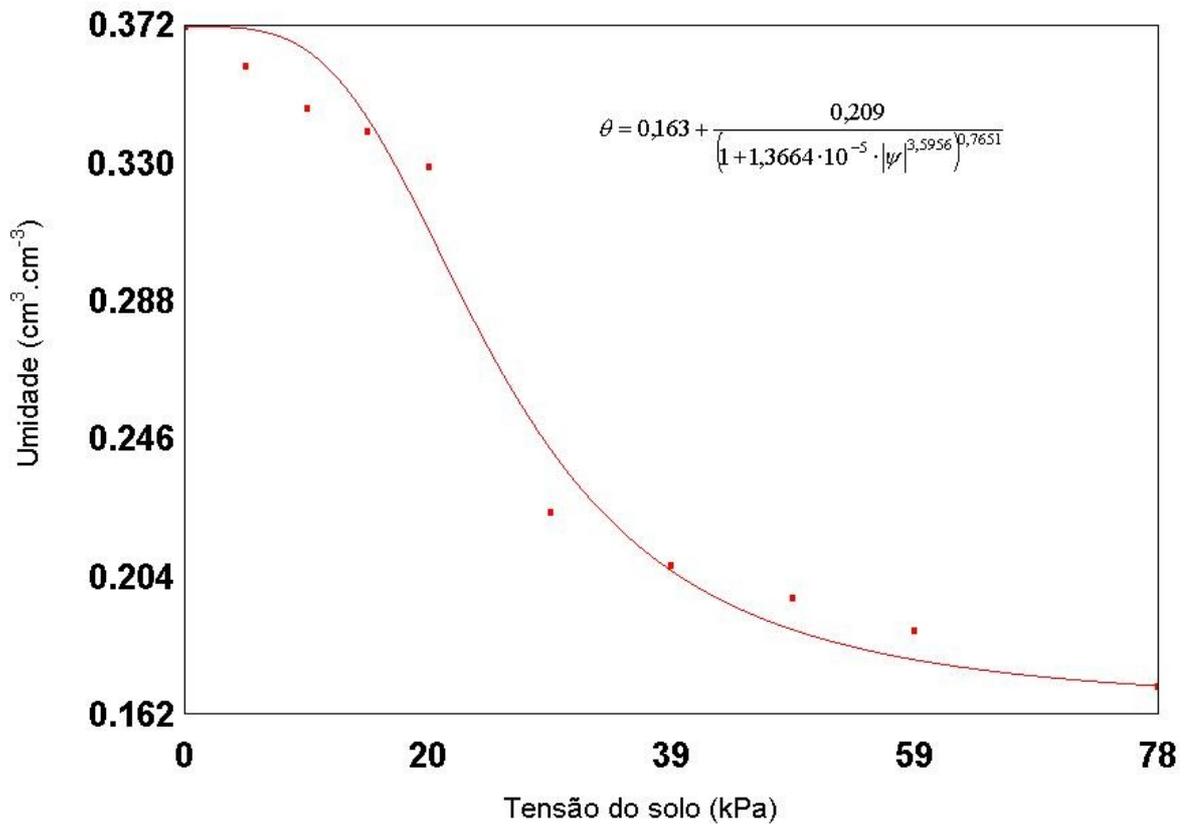


FIGURA 19 – Ajuste dos dados da célula de carga pelo modelo de van Genuchten (1980).

Tabela 1 – Análise de variância do ajuste dos dados de potencial mátrico, aplicado pelos sistemas de sucção e pressão, e umidade do solo, determinado pela célula de carga, pelo modelo de van Genuchten (1980).

Fonte de Variação	Variação	GL	Variância	F	$\alpha$ (%)
Explicado pela Regressão	0,0667	2	0,033355	167,7844	0,0020
Inexplicado (Erro)	0,0014	7	0,000199		
Total	0,0611	9			

#### 4.3. Acompanhamento da perda de umidade com base nos tensiômetros eletrônicos.

Seguindo a metodologia adotada por Coelho (2003) para a determinação do potencial matricial do solo utilizando o tensiômetro eletrônico, tem-se:

$$\Delta P = P1 - P2 \quad (24)$$

Onde:  $\Delta P$  = diferencial de pressão entre os dois terminais do sensor de pressão [kPa];

$P_1$  = pressão atuante no terminal voltado para a pressão atmosférica [kPa];

$P_2$  = pressão atuante no terminal voltado para o interior do tensiômetro [kPa].

substituindo-se  $P_1$  e  $P_2$  das equações 10 e 11 na equação 24 e ainda conforme a figura 12, tem-se:

$$\Delta P = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h \cdot \text{sen}\alpha \cdot 10^{-3} + \psi_m \quad (25)$$

onde:  $\rho_{H_2O}$  - massa específica da água (995,5 kg.m<sup>-3</sup> a 30°C);

$h$  - altura do tubo de PVC do tensiômetro (0,68 m);

$g$  - aceleração da gravidade (9,81 m.s<sup>-2</sup>);

$\alpha$  - ângulo de inclinação do tensiômetro em relação ao tubo de acrílico (63°);

$10^{-3}$  – fator de correção de unidades de Pa para kPa;

$\psi_m$  - potencial mátrico do solo (kPa).

Substituindo-se os valores dos termos da equação 25, tem-se que:

$$\Delta P = 5,917 + \psi_m \text{ (kPa)} \quad (26)$$

ou

$$\psi_m = \Delta P - 5,917 \text{ (kPa)} \quad (27)$$

Segundo o MOTOROLA, INC (1997), a equação de calibração do sensor de pressão é:

$$V_{\text{out\_SP}} = V_{\text{S\_SP}} (0,009 \cdot \Delta P + 0,04) \quad (28)$$

Onde:  $V_{\text{out\_SP}}$  = tensão registrada na saída do sensor (V);

$V_{\text{S\_SP}}$  = tensão de suprimento do sensor de pressão (V);

$\Delta P$  = diferença de pressão entre os dois terminais do sensor (kPa).

Conforme dados do fabricante, o terminal deve ser excitado com uma tensão típica  $V_s = 5$  VDC. No entanto, através de multímetro, encontrou-se que a tensão de excitação foi de 4,98 V.

Então, substituindo-se o valor de  $V_s$ , tem-se:

$$V_{\text{out\_SP}} = 0,0448 \cdot \Delta P + 0,1992 \quad (29)$$

ou

$$\Delta P = 22,31 \cdot V_{\text{out\_SP}} - 4,44 \quad (30)$$

Logo, quando o sensor estiver submetido à mínima diferença de pressão ( $\Delta P = 0$  kPa), estará fornecendo um sinal de saída correspondente à tensão na diferença mínima de pressão

( $V_{\text{out\_min\_SP}} = 0,199 \text{ V}$ ) e o potencial mátrico será  $-5,917 \text{ kPa}$ . Por outro lado, quando a diferença de pressão entre os dois terminais for máxima ( $\Delta P = 100 \text{ kPa}$ ), haverá um sinal de saída do sensor correspondente à tensão na diferença máxima de pressão ( $V_{\text{out\_max\_SP}} = 4,68 \text{ V}$ ) e o potencial mátrico será  $-94,08 \text{ kPa}$ . Com o conversor analógico digital utilizado, há uma faixa de 0 a 4095 contadores para representar a faixa de 0 a 5 V de tensão de saída do sensor de pressão, chegando-se à equação de tensão de saída do sensor de pressão em função do número de contadores dada por:

$$V_{\text{out\_SP}} = 1,221 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Count}_{\text{SP}} \quad (31)$$

Onde:  $V_{\text{out\_SP}}$  - tensão registrada na saída do sensor [V];

$\text{Count}_{\text{SP}}$  - número de contadores.

Substituindo-se o valor de  $V_{\text{out\_SP}}$  da equação 31 na equação 30, tem-se o valor de  $\Delta P$  em função de contadores:

$$\Delta P = 2,724 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Count}_{\text{SP}} - 4,44 \quad (32)$$

Substituindo-se, ainda, o valor de  $\Delta P$  da equação 32 na equação 27, encontra-se o potencial mátrico em função do número de contadores:

$$\psi_{\text{m}} = 2,724 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Count}_{\text{SP}} - 10,357 \quad (33)$$

A Equação 33 indica uma resolução na medição de  $0,02724 \text{ kPa/Contador}$ .

Devido à influência da variação da temperatura diurna nas medidas dos tensiômetros (Watson e Jackson, 1967; Nyhan e Drennon, 1990 e Coelho, 2003), utilizou-se a moda dos contadores mais altos registrados nas últimas 24 horas antes da mudança de sucção ou pressão na coluna de solo, garantindo que os dados tomados fossem os dos horários do dia com temperatura mais baixa. Assim sendo, foram coletados os dados dos dias 21 e 26/01; 04, 12, e 27/02; 18, 20 e 27/04, 16 e 26/05 para sucções de 0; 4,9; 9,8; 14,7; 19,6 e pressões de 29,4; 39,2; 49; 58,8 e 78,5 kPa, respectivamente. Após determinada a moda e substituída na equação 32, determinou-se o potencial mátrico para cada tensiômetro (Fig. 20).

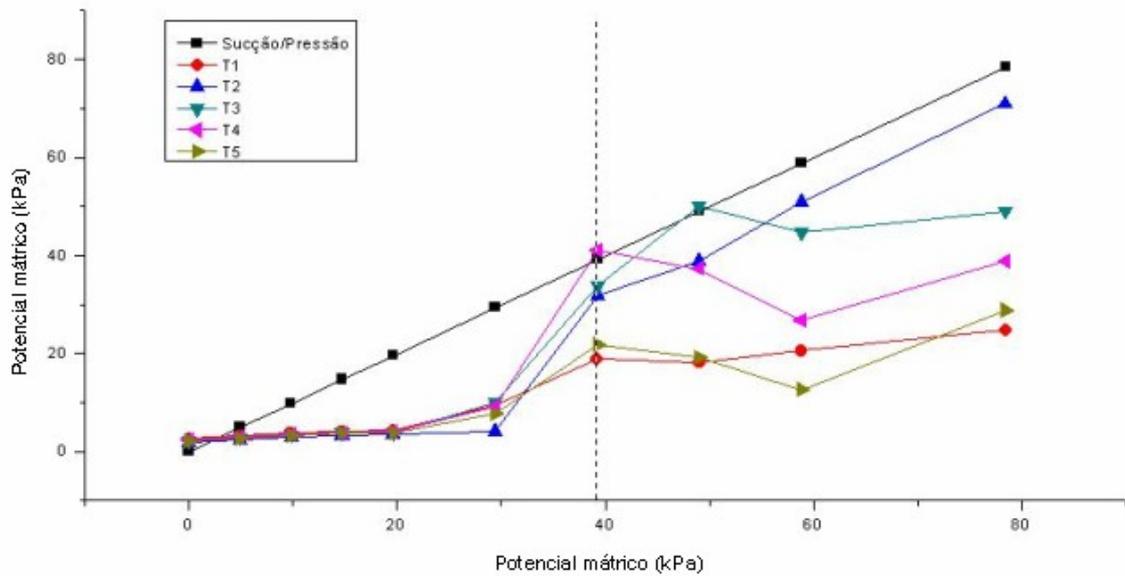


FIGURA 20 – Dispersão dos potenciais fornecidos pelos tensiômetros (eixo-Y) contra os potenciais submetidos pelos sistemas de sucção e pressão (eixo-X).

A linha pontilhada vertical na figura 20 indica a mudança do sistema de sucção para pressão. Observa-se que os potenciais impostos pelo sistema de sucção não foram registrados pelos tensiômetros, permanecendo constante, indicando falha no sistema de sucção, provavelmente devido ao tempo para drenagem do solo, pois a constância das respostas dos tensiômetros não foi verificada no lado esquerdo da linha pontilhada. Em relação à pressão de 29,4 kPa. Para a mudança de potencial de -39,2 para -49 kPa, os tensiômetros 2, 3 e 4 responderam de forma similar, embora não acusando o potencial mátrico imposto pelo sistema de compressão. Para a mudança de potencial de -58,8 para -78,5 kPa somente o tensiômetro 2 respondeu de acordo com o aumento da pressão aplicada à coluna de solo, embora não com a mesma intensidade de resposta, provavelmente devido a vazamentos ocorridos na coluna de solo quando submetido ao sistema de pressão.

Constatada a ineficiência dos sistemas de sucção e pressão, optou-se pela determinação da curva de retenção, tendo como base, para o potencial mátrico, os dados médios dos tensiômetros que responderam de modo coerente com as mudanças da tensão do solo impostas, quais sejam: -3,19; -2,90; -3,42; -3,82; -3,92 e -9,57; obtidas dos tensiômetros T1, T2, T3, T4 e T5; -29,61; obtida dos tensiômetros T2, T3 e T4; -44,54; obtida dos tensiômetros T2 e T3 e -50,96 e -71,17 kPa, obtidas do tensiômetro T2. Os resultados estão apresentados na Figura 21.

Os dados de potencial mátrico e umidade foram ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), através do software SWRC 3.0 para determinação da curva de retenção, encontrando a função mostrada na figura 22, com 99,85 % de confiança (Tabela 2).

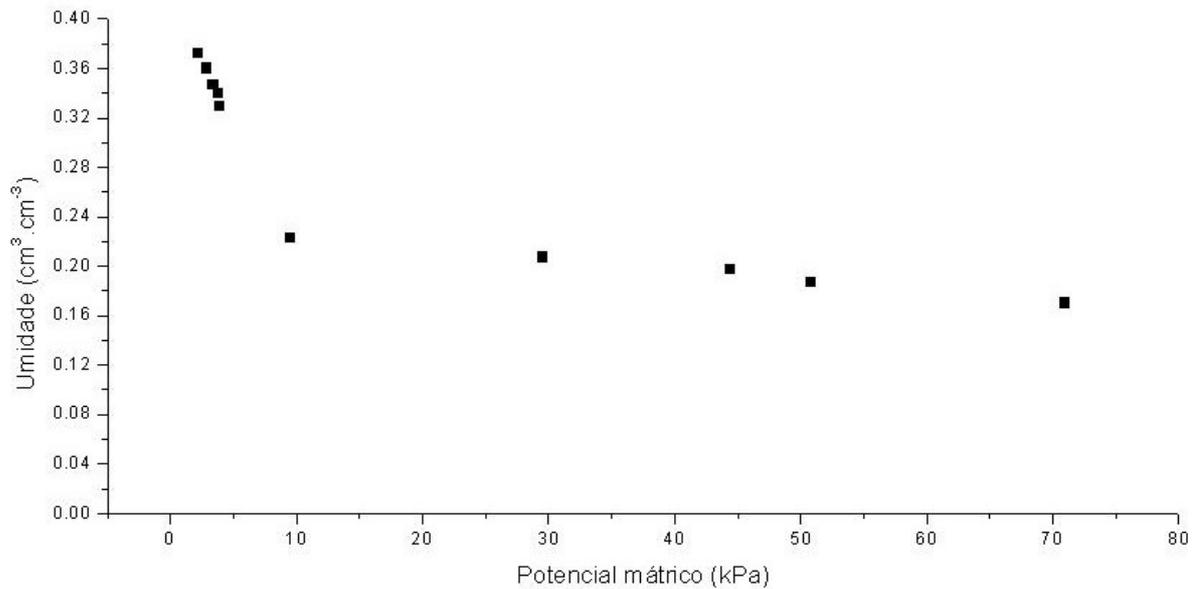


FIGURA 21 – Curva característica da coluna de solo com potenciais dos tensiômetros.

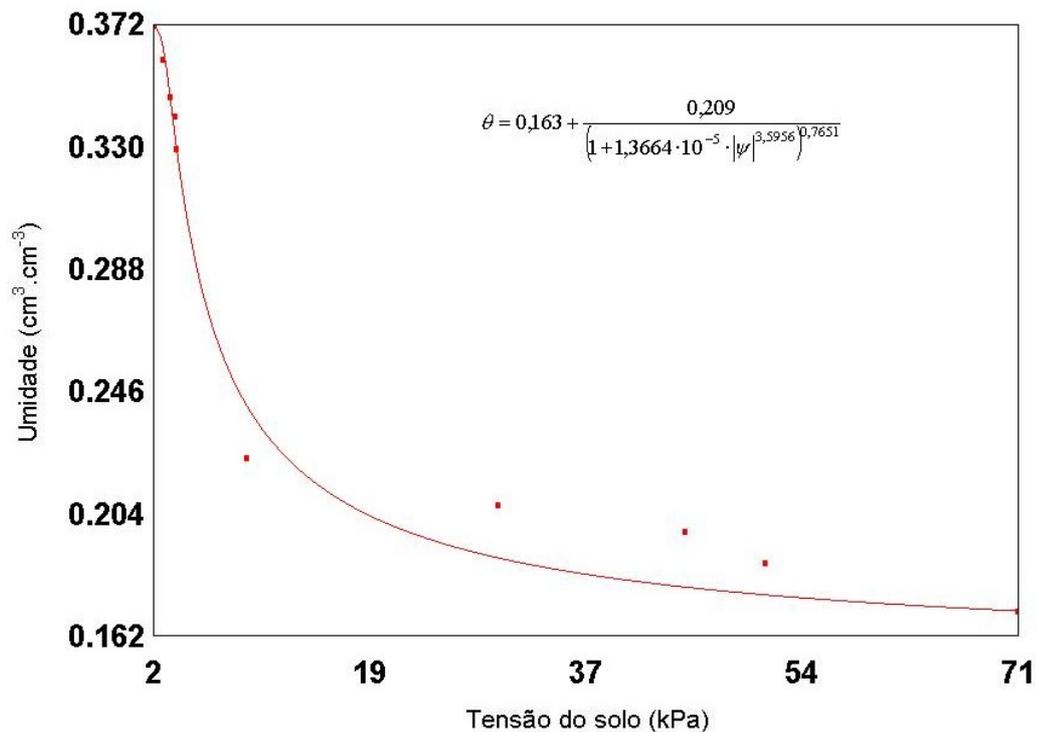


FIGURA 22 – Ajuste dos dados dos tensiômetros pelo modelo de van Genuchten.

Tabela 2 – Análise de variância do ajuste dos valores médios de potencial mátrico, registrado pelos tensiômetros, e umidade do solo, determinado pela célula de carga, pelo modelo de van Genuchten (1980).

Fonte de Variação	Variação	GL	Variância	F	$\alpha$ (%)
Explicado pela Regressão	0,0674	2	0,033724	198,2062	0,0015
Inexplicado (Erro)	0,0012	7	0,000170		
Total	0,0613	9			

#### 4.4. Acompanhamento da perda da umidade com base nos sensores Watermark

A Figura 23 mostra o comportamento dos sensores Watermark durante todo o período experimental, mostrando a resposta dos sensores em kPa, a medida que o tempo passou. Há, ainda, uma indicação de quando do potencial a que a coluna de solo foi submetida.

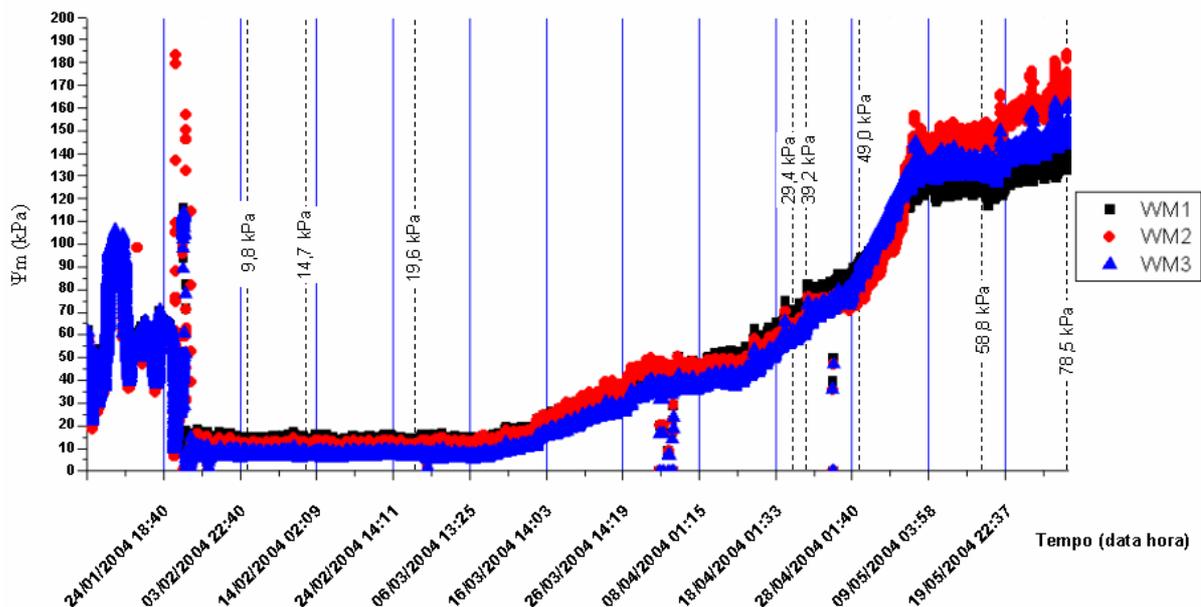


FIGURA 23 – Dispersão dos dados de saída dos sensores Watermark.

A placa para condicionamento do sinal de saída dos sensores foi implementada para fornecer uma amplitude de tensão de 0 a 5 V, quando o potencial mátrico do solo variasse da 0 a 200 kPa, contudo, conforme observado no gráfico da Figura 23, as respostas

dos sensores apresentaram valores em torno de duas vezes acima do que o que os sensores estava medindo realmente. Isto indica que há necessidade de um melhor condicionamento do sinal, inclusive através da adoção de uma fonte independente para alimentação dos sensores e da placa de circuito dos sensores.

Observa-se que até o dia 29/01 os registros dos sensores Watermark oscilaram bastante. Isto ocorreu devido a falhas no circuito elétrico dos mesmos, fazendo-se necessários alguns ajustes. Devido a estas falhas, os dados destes sensores foram considerados a partir fevereiro, sendo a primeira medida tomada no dia 04/02, e, portanto, considerado os potenciais mátricos de -9,8; -14,7; -19,6; -29,4; -39,2; -49,0; -58,8 e -78,5 kPa. Os registros apresentados até o dia 06/03 apresentam-se quase horizontais, semelhante ao ocorrido com os tensiômetros. Isto reforça que o sistema de sucção construído para o calibrador não funcionou a contento, talvez devido ao pouco tempo em que a coluna de solo ficou submetida a este sistema. No período compreendido entre os dias 06/03 e 30/03 observa-se ainda o comportamento linear, mas com uma maior inclinação da curva, acusando uma variação do potencial do solo mais acentuada, quando a coluna de solo passou a ser submetido ao sistema de pressão, indicando novamente que o calibrador funcionou bem na fase em que funcionou como câmara de pressão e que, de fato, toda a água retida até à tensão a que esteve submetida foi expulsa da coluna de solo. A relação toma uma conformação curvilínea para os dados a partir de 30/03 quando dos potenciais variaram de -29,4 a -78,5 kPa.

Considerando então o período em que o solo esteve submetido ao sistema de pressão, os sensores Watermark apresentaram resposta linear até quando submetido a potenciais mátricos acima de -9,8 kPa e não linear abaixo deste valor. Este comportamento ratifica Eldredge et al (1993) quando afirmam que os sensores de matriz granular responderam a potenciais de -10 a -100 J.kg<sup>-1</sup>. Shock et al. (1998) verificaram experimentalmente quando relacionaram potencial mátrico com resistência dos sensores, que os mesmos encontraram uma variação linear para o intervalo de  $\psi_m > -10$  kPa, relação não linear para  $-10$  kPa  $> \psi_m > -75$  kPa. Miranda (2003) menciona que os sensores Watermark não produzem medidas confiáveis com potenciais mátricos acima de -10 kPa, justamente o ponto da Figura 23 a partir do qual os dados mudam do comportamento linear para o comportamento curvilíneo.

#### 4.5. Efeitos da temperatura na célula de carga

As Figuras 24 e 25 apresentam os dados de temperatura e da célula de carga nos períodos de 19 a 24/02/04 e de 19 a 24/04/04, respectivamente, na intenção de evidenciar o efeito da variação diurna de temperatura na célula de carga quando submetida a diferentes cargas. Nos referidos períodos, após o tratamento dos dados, tirando-se a média do minuto, obtiveram-se 7197 valores.

No período de 19 a 24/02/2004, a coluna de solo esteve submetida ao sistema de sucção a -3,82 kPa uma vez que esta sucção foi imposta no dia 12/02, enquanto no segundo período esteve submetida ao sistema de pressão a 29,6 kPa, imposta no dia 19/04, ambas em processo de secamento; a célula de carga apresentou o valor médio de 39,6 N no período entre 19 e 24/02/2004, com uma variação de 39,6 a 39,7 N (0,25%) para a média do percentil 10 de valores mais baixos e mais altos, respectivamente; no período de 19 a 24/04/2004, o valor médio registrado na célula de carga foi de 36,2 N, com variação de 36,1 a 36,4 N (0,83%) para a média do percentil 10 de valores mais baixos e mais altos, respectivamente.

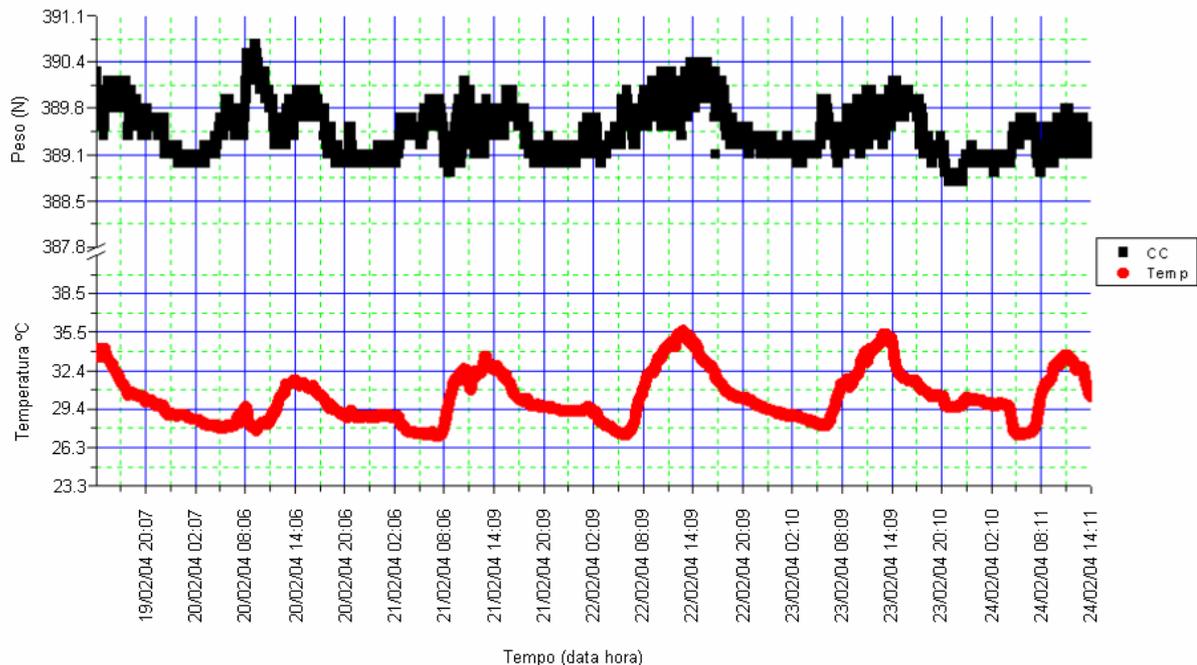


FIGURA 24 – Dados da célula de carga (CC) e da temperatura (Temp) no período de 19/02/04 14:11 h a 24/02/04 14:11 h.

Através da Figura 24, observa-se que, no período entre 19 e 24/02/2004, os picos máximos e mínimos de temperatura ocorreram próximo às 14:00 h e 6:00 h, respectivamente, e que os dados coletados na célula de carga apresentaram picos máximos e mínimos nos mesmos horários, indicando que a temperatura pode interferir na medida da célula de carga.

Pode-se extrair, ainda, uma diferença entre o comportamento dos dois sensores, no que diz respeito à inclinação da curva de acréscimo e decréscimo dos mesmos. Enquanto os acréscimos de temperatura ocorrem de forma mais rápida do que os decréscimos, o inverso ocorre nos registros da célula de carga, isto é, os acréscimos se verificam mais lentamente do que os decréscimos. Com isso há uma faixa de variação de temperatura na qual os registros da célula de carga permanecem constantes, ou seja, que o resfriamento da temperatura não provoca efeito na saída da célula de carga.

No dia 19/04 o solo foi submetido à pressão de 49 kPa. A Figura 25 mostra os dados de temperatura e da célula de carga no período de 19 a 24/04/2004, evidenciando a queda mais acentuada da umidade do solo devido à mudança de pressão ter ocorrido no início do período.

Observa-se que neste período, os dados da célula de carga não apresentaram os picos máximos coincidentes com os picos máximos do sensor de temperatura conforme a figura 24. No entanto, é evidente um maior decréscimo da célula de carga, com o decréscimo da temperatura. O fato de o acréscimo da temperatura não estar elevando também os dados da célula de carga é explicado pela variação mais acentuada da umidade, fazendo com que o efeito da elevação temperatura na célula de carga seja compensado pela perda de umidade, resultando em períodos de estabilização dos dados da célula de carga.

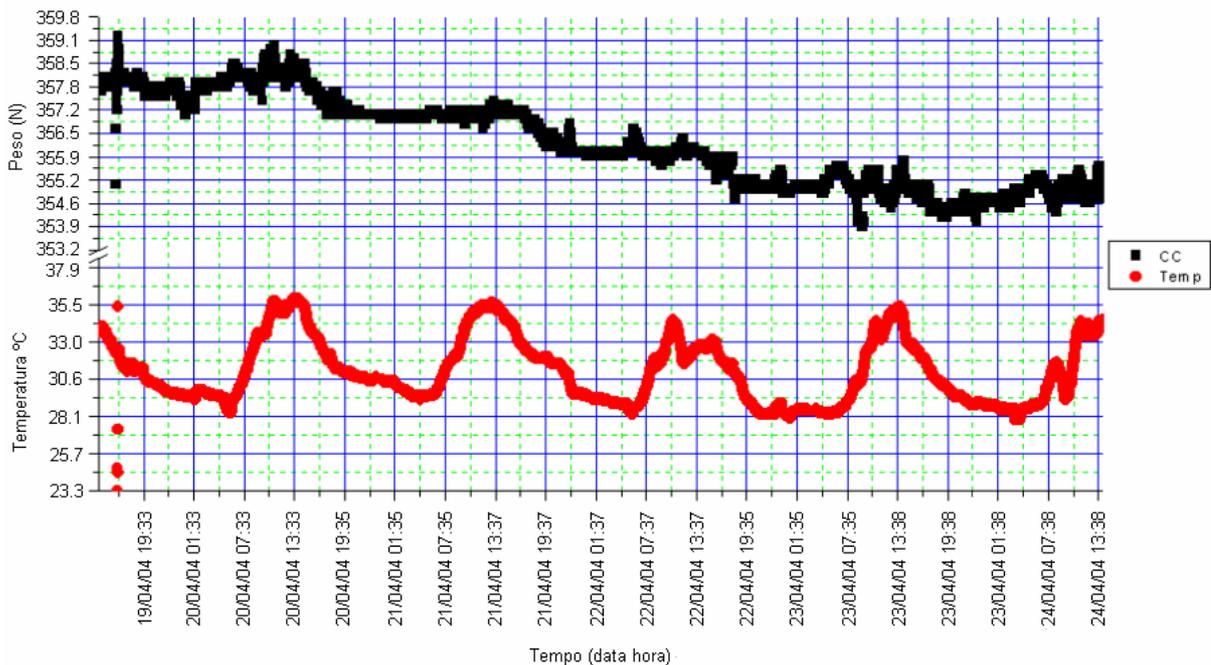


FIGURA 25 – Dados da célula de carga (CC) e da temperatura (Temp) no período de 19/04/04 14:11 h a 24/04/04 14:11 h.

A menor variação de umidade entre a média dos valores máximos e mínimos observada no período de 19 a 24/02/2004 (0,25 %) em relação ao período de 19 a 24/04/2004 (0,83 %) deveu-se tanto à menor variação do potencial mátrico que foi de -3,82 a -3,92 kPa e de -29,61 a -44,54 kPa, respectivamente, como também devido ao fato de que no dia 19/02/2004 havia 5 dias da mudança no sistema de sucção, enquanto no dia 19/04/2004 fora efetuada a mudança no sistema de pressão. O comportamento observado e, considerando que a célula de carga funciona com os extensômetros dispostos conforme uma ponte de Wheatstone ratifica a afirmação de que a ponte pode fornecer um sinal com diferença de 0,1 a 0,5% do real, somente devido ao aumento da temperatura decorrente da aplicação da excitação na ponte (HOROWITZ e HILL, 1989).

#### **4.6. Efeitos da temperatura nos sensores Watermark**

Devido à ineficiência dos sistemas de sucção e pressão, para a análise dos efeitos da temperatura nos sensores Watermark, optou-se pelo potencial mátrico apresentado pelos dados médios dos tensiômetros que responderam de modo coerente com as mudanças da tensão do solo impostas, quais sejam: -3,19; -2,90; -3,42; -3,82; -3,92 e -9,57; obtidas dos tensiômetros T1, T2, T3, T4 e T5; -29,61; obtida dos tensiômetros T2, T3 e T4; -44,54; obtida dos tensiômetros T2 e T3 e -50,96 e -71,17 kPa, obtidas do tensiômetro T2. Os resultados estão apresentados na Figura 20.

As figuras 26 e 27 apresentam os dados de temperatura e dos sensores Watermark nos períodos de 19 a 24/02/04 e de 19 a 24/04/04, respectivamente, na intenção de evidenciar o efeito da variação diurna de temperatura nos sensores quando submetidos a diferentes condições de resistência elétrica do solo.

Observa-se que, no período de 19 a 24/02/2004, quando o potencial mátrico do solo variou muito pouco, entre -3,82 e -3,92 kPa, os dados dos sensores WM1, WM2 e WM3 registraram aumento médio de 0,26, 0,33 e 0,43 % da resistência do solo à passagem de corrente elétrica, significando concordância com a variação da umidade do solo discutida para a célula de carga, no mesmo período, quando a coluna de solo sofreu pequena variação de umidade (0,25 %).

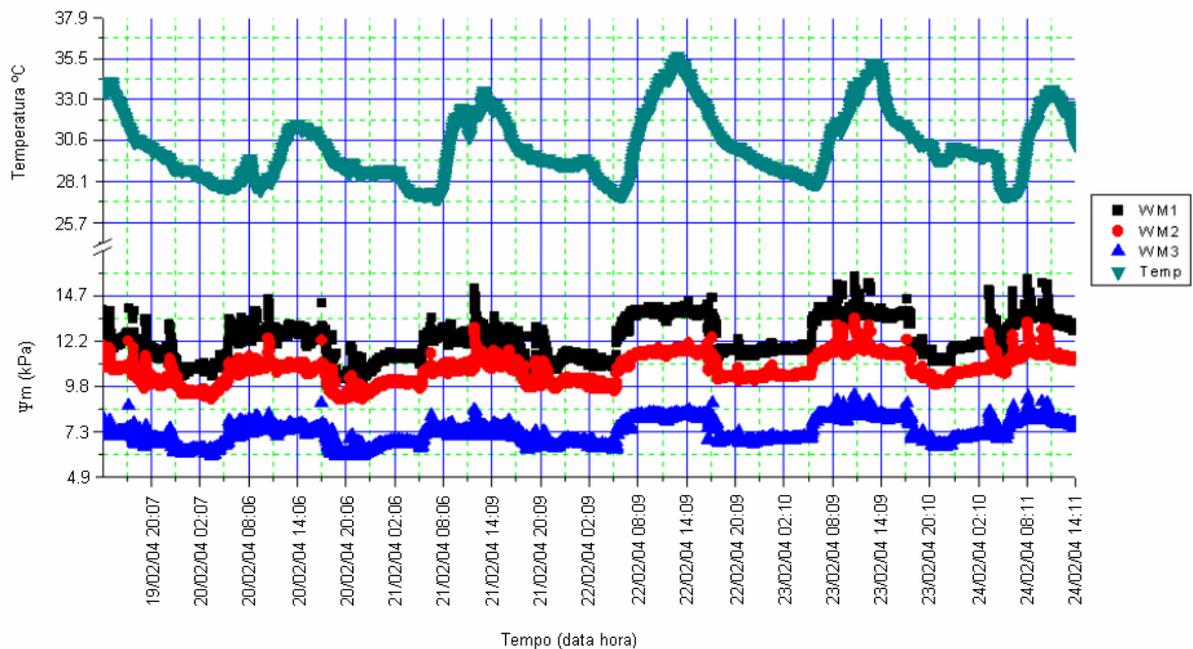
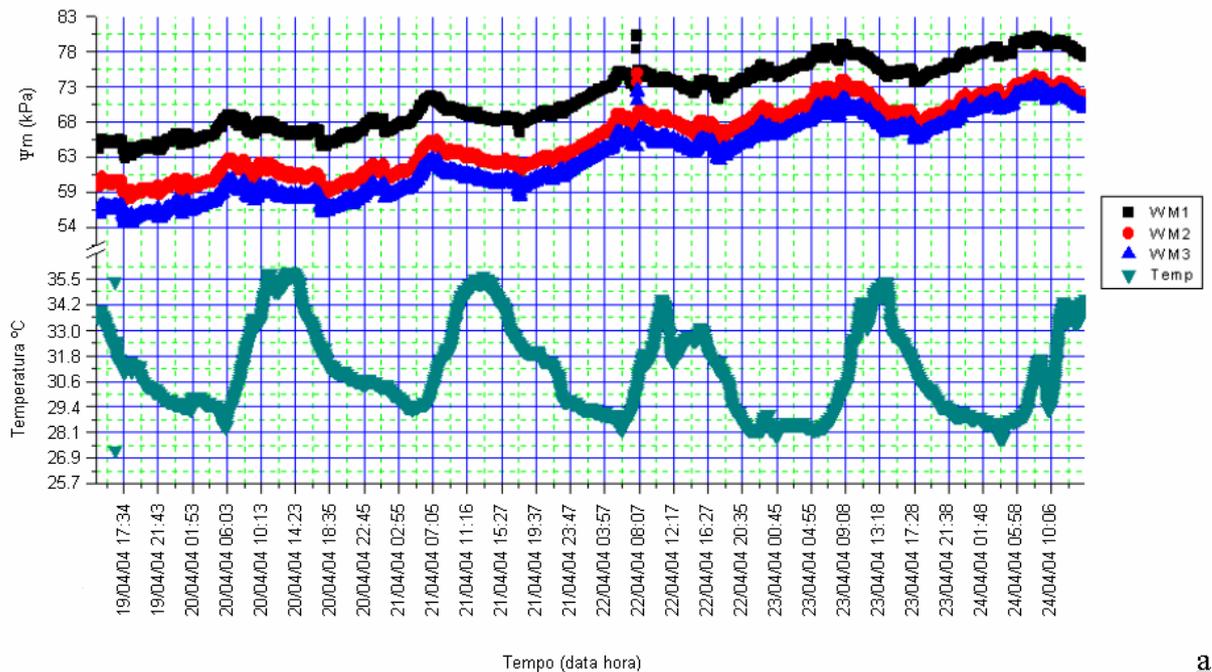


FIGURA 26 – Dados dos sensores Watermark (WM1, WM2 e WM3) e da temperatura (Temp) no período de 19/02/04 14:11 h a 24/02/04 14:11 h.

A Figura 26 mostra ainda que os sensores Watermark apresentaram dados que oscilaram em um período de 24 horas, sem que, no entanto, esta variação apresentasse comportamento que pudesse ser relacionado à temperatura, uma vez que mesmo tendo igual período de 24 horas de oscilação, os acréscimos e decréscimo de temperatura ocorreram de forma gradual, enquanto os sensores Watermark apresentaram um súbito aumento das suas medidas no período de 6:00 às 7:00 h, permanecendo constante, formando um platô com as medidas máximas, de 7:00 às 17:00, tornando a cair abruptamente de 17:00 às 18:00 h, estabelecendo novamente um platô, mas com as medidas mínimas no período de 18:00 às 6:00 h. Uma vez que o sensor de temperatura esteve medindo a temperatura ambiente e não a do solo, não pode haver uma correlação entre a temperatura e os sensores Watermark. Foram realizadas várias medidas da tensão na rede elétrica, bem como na fonte de eletricidade dos sensores Watermark e verificou-se que a tensão durante a noite esteve sempre mais alta do que durante o dia, tendo o comportamento inverso ao verificado nos sensores. Esta variação na saída dos sensores Watermark pode estar relacionada à variação na tensão da rede elétrica, sendo necessário, no entanto, um estudo mais aprofundado para determinar como esta influência ocorre.

A figura 27 apresenta os dados dos sensores Watermark no período de 19 a 24/04/2004, quando os valores de saída dos sensores WM1, WM2 e WM3 apresentaram variação média de 4,3; 4,4 e 4,9 %; respectivamente, acusando maior aumento de resistência

do solo com o tempo se comparado com aumento observado no gráfico da Figura 26. Isto também ocorre porque no dia 19/04/2004, a coluna de solo foi submetida à pressão de 49 kPa.



a

FIGURA 27 – Dados dos sensores Watermark (WM1, WM2 e WM3) e da temperatura (Temp) no período de 19/04/04 14:14 h a 24/04/04 14:14 h.

Com relação à variação diária da tensão elétrica na rede, observa-se que nos momentos em que ocorreu aumento de tensão na rede elétrica, foram observadas quedas bruscas na saída dos sensores, mas o aumento acentuado na resposta dos sensores devido à maior perda de umidade elimina a formação dos platôs ocorridos no período de 19 a 24/02/2004.

#### 4.7. Efeitos da temperatura nos tensiômetros eletrônicos.

Seguindo a mesma estratégia adotada para os outros sensores, as figuras 28 e 29 apresentam os dados de temperatura e dos tensiômetros eletrônicos T2 e T3, os quais apresentaram o melhor comportamento durante todo o período experimental, nos períodos de 19 a 24/02/04 e de 05 a 07/05/04, respectivamente, na intenção de evidenciar o efeito da variação diurna de temperatura nos tensiômetros, quando submetidos a diferentes tensões, -3,82 e -3,92 kPa e entre -44,5 e -51 kPa.

Através das figuras 28 e 29, observa-se que a resposta dos tensiômetros variou inversamente com a temperatura. Pode-se perceber que os picos máximos e mínimos de

temperatura ambiental coincidiram com os picos mínimos e máximos, respectivamente das leituras dos tensiômetros. Tal comportamento é condizente com a afirmativa de que o aumento da temperatura ambiente superestima o valor do potencial mátrico do solo (WATSON e JACKSON, 1967; NYHAN e DRENNON, 1990; e COELHO, 2003). No caso dos tensiômetros eletrônicos utilizados, o aumento da temperatura ambiente, aumentando a pressão no interior do tensiômetro, devido ao aquecimento do líquido contido no seu interior, diminuiu o diferencial de pressão responsável pela resposta do sensor de pressão.

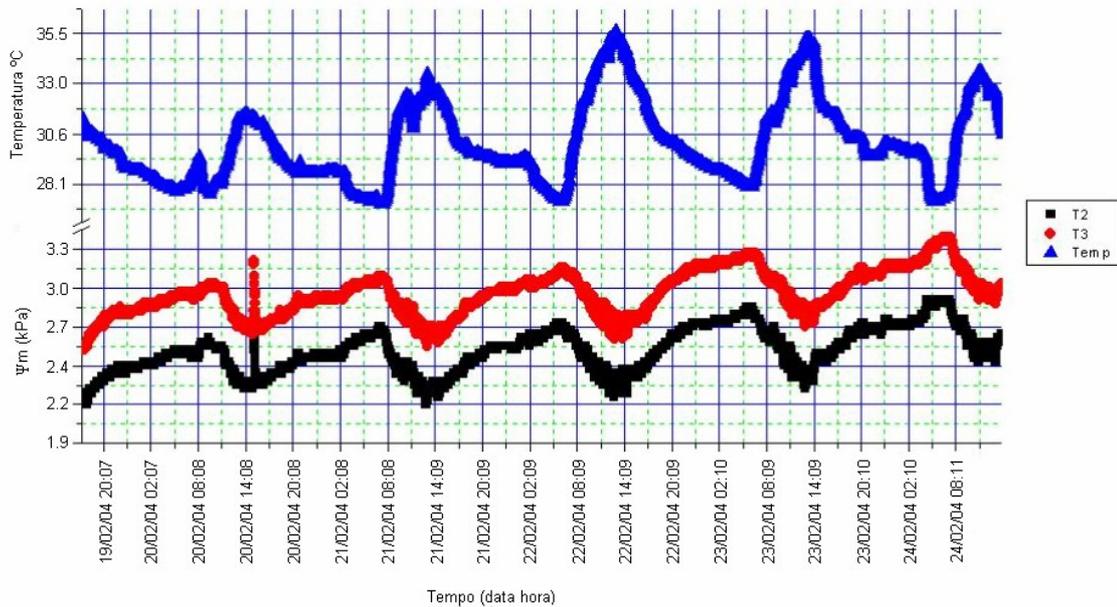


FIGURA 28 – Dados dos tensiômetros eletrônicos (T2 e T3) e da temperatura (Temp) no período de 19/02/04 14:00 h a 24/02/04 14:00 h.

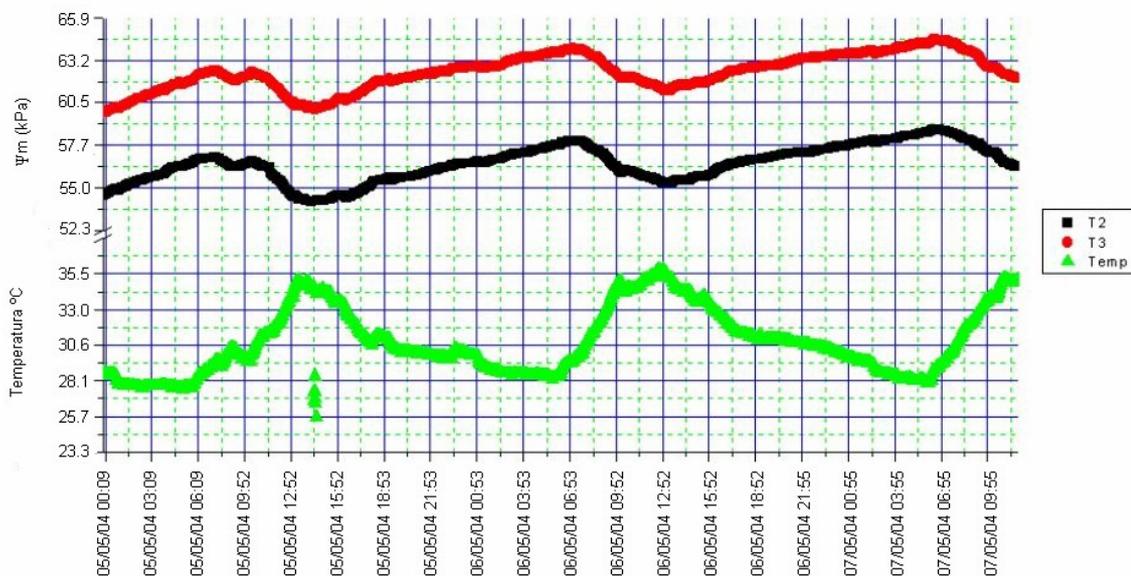


FIGURA 29 – Dados dos tensiômetros eletrônicos (T2 e T3) e da temperatura (Temp) no período de 05/05/04 00:00 h a 07/05/04 11:55 h.

A variação dos valores modais dos percentis 10 máximos e mínimos dos tensiômetros T2 e T3 no primeiro período (figura 28) foi de 3,7 e 3,8 %, respectivamente, para o segundo período (figura 29) esta variação foi de 5,5 e 5,6 %. Confirma-se o resultado apresentado por Coelho (2003) de que o erro no potencial mátrico, devido à variação da temperatura ao longo do dia, é maior quando o solo encontra-se em potenciais mais negativos.

## 5. CONCLUSÕES

1. A célula de carga e o conversor analógico digital de utilizados proporcionaram uma sensibilidade do dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo (DCSUS) da ordem de 13,33 mL de água, correspondente à variação de  $4,244.10^{-4} \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$  de umidade.
2. A célula de carga utilizada no DCSUS respondeu satisfatoriamente à variação da umidade do solo apresentando erro na ordem de 0,25 % em função da variação diurna de temperatura.
3. O DCSUS desenvolvido não apresentou desempenho satisfatório quando a tensão do solo foi controlada pelo sistema de sucção (funil de placa porosa) e o obteve quando pelo sistema de pressão.
4. A adaptação dos tensiômetros eletrônicos ao calibrador levou à determinação subestimada da tensão do solo por estes sensores (-9,57; -29,61; -44,54; -50,96 e -71,17 kPa).
5. Considerando os potenciais mátricos registrados nos tensiômetros, os sensores Watermark apresentaram variação linear com a variação do potencial mátrico até -9,57 kPa e umidade de  $0,365 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ . A variação foi não linear entre -9,57 e -71,17 kPa ( $0,365$  e  $0,172 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ).
6. Os tensiômetros responderam à variação diária da temperatura ambiental, proporcionando erro na medida do potencial mátrico do solo superior a 3,5%.
7. Os sensores Watermark não apresentaram comportamento indicativo de resposta à variação diária da temperatura ambiental nas condições (à sombra) em que o experimento foi conduzido.

## 5.1. RECOMENDAÇÕES

1. Devido ao grande volume de solo utilizado no calibrador, faz-se necessário desenvolver o um sistema mais eficiente de controle de tensões do solo inferiores a 30 kPa, através de sistema de pressão mais preciso ou por meio de um outro sistema de sucção. Inclusive possibilitando que a coluna de solo fique mais acessível.
2. Há necessidade de aperfeiçoamento da inserção dos tensiômetros no DCSUS, uma vez que apenas um dos tensiômetros funcionou corretamente até o final do experimento (potencial mátrico igual a  $-71,17$  kPa).
3. É possível que a utilização de uma fonte de alimentação independente para os sensores Watermark possibilite melhor condicionamento do sinal de saída dos mesmos.
4. A determinação da umidade pelo peso da amostra poderá ser determinada através de células de carga de compressão, melhorando a forma do dispositivo de calibração, pela utilização de um sistema de sucção que, diferente do utilizado (funil de Haines), não necessite que a amostra de solo esteja a uma cota tão elevada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAHAM, N.; HEMA, P. S.; SARITHA, E. K.; SUBRAMANNIAN, S. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. **Agricultural Water Management**, v. 45, n. 2, p. 145-157, 2000.
2. ALFA Instrumentos. **Células de carga – tração/compressão modelos SV20 / SV50 / SV100 / SV200**. Disponível em <[http://www.alfainstrumentos.com.br/port/celula\\_sv.htm](http://www.alfainstrumentos.com.br/port/celula_sv.htm)>. Acesso em 02/ago/2003.
3. ANDRADE, A. R. S.; JADOSKI, S. O.; GUERRA, H. C.; GUERRINI, I. A. Influência do tempo de contagem na determinação da densidade de nêutrons. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 5, n. 3, p. 411-415, 2001.
4. BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1989.
5. BRANDELIK A.; HÜBNER, C. Soil Moisture Determination – Accurate, Large and Deep. **Phys. Chem. Earth**, v. 21, n. 3, p. 157-160, 1996.
6. CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia** v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
7. CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, Calibração e Análise de Funcionamento de Lisímetros de Pesagem para Determinação da Evapotranspiração da Cultura da Lima Ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.)**. 2002. Tese (Doutor em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP.
8. COELHO, S. L. **Desenvolvimento de um Tensiômetro Eletrônico para o Monitoramento do Potencial da Água do Solo**. 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Agronomia, Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.

9. DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Water Retention Curve 3.0 beta**, USP-CIAGRI: 2001. Disponível em: <<http://www.ciagri.usp.br/%7Edourado/swrc.htm>>. Acesso em: 15/05/2004.
10. ELDREDGE, E. P., SHOCK, C. C., STIEBER, T. D. Calibration of granular matrix sensors for irrigation management. **Agronomy Journal**, v. 85, p. 1228-1238. 1993.
11. HENDRICKX, J. M. H.; NIEBER, J. L.; SICCAM, P. D. Effect of Tensiometer Cup Size on Field Soil Water Tension Variability. **Soil Science**, v. 58, p. 309-315. 1994.
12. HOROWITZ, P.; HILL, W. **The Art of Electronics**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 1989.
13. IRRMETER. **Irrrometer agriculture catalog**. Disponível em <<http://www.irrometer.com/agcat.htm>>. Acesso em 02/jun/2003.
14. KANEMASU, E. T.; STEINER, J. L.; BIERE, A. W.; WORMAN, F. D.; STONE, J. F. Irrigation in the great plains. **Agricultural Water Management**, v. 7, p. 157-178. 1983.
15. KLUTE, A.; GARDNER, W. R. Tensiometer response time. **Soil Science**, v. 93, p. 204-207, 1962.
16. LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no Solo**. 2. ed. Piracicaba-SP: P. L. Libardi, 1999, 497 p.
17. LIMA, S. C. **Monitoramento da Irrigação com Uso do Tensiômetro**. 1999. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Agronomia, Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.
18. MEASUREMENT specialists. **The load cell source**. Disponível em <<http://www.measurespec.com/tips/principles.htm>>. Acesso em: 02/ago/2004.
19. MIRANDA, F. R. **A distributed control system for priority-based site-specific irrigation**. 2003. Tese (Doutor em Engenharia de Biosistemas) – The University of Tennessee, UT, Estados Unidos.

20. MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUZA, F. Instalação e de um Lisímetro de Pesagem no Projeto de Irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 3, n. 1, p. 103-110, 1999.
21. MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação I**. Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p. (Série Engenharia Agrícola, 1)
22. NYHAN, J. W.; DRENNON, B. J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 54, Jan-Feb, p. 293-296, 1990.
23. OLITTA, F. A. Construção de tensiômetros para controle da irrigação. O Solo. Piracicaba. v. 68, n. 2, p. 16-20, 1955.
24. PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison-WI, v. 61, 1576-1585, nov-dec, 1997.
25. PEREIRA, F. J. S. **Construção de uma bancada de ensaio e avaliação de um sistema de mensuração da produtividade de grãos**. 2002. Dissertação (Mestre em Agronomia – Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP.
26. PHENE, C. J., HOFFMAN, G. J., RAWLINS, S. L. Measuring soil matric potential *in situ* by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v. 35, p. 27-33. 1975.
27. REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.
28. RICHARDS, L. A. 1942. Soil moisture tensiometer materials and construction. **Soil Sci. Soc. Am.** 53:241-248. NA.
29. SMAJSTRLA, A. G.; PITTS, D. J. **Tensiometer Service, Testing and Calibration**. Bulletin 319. Gainesville-FL: Institute of Food and Agricultural Sciences, Cooperative Extension Service – University of Florida, 1997.

30. SHOCK, C. C.; BARNUM, J. M., SEDDINGH, M. Calibration of Watermark soil moisture sensors for irrigation management. **Proceedings of the 1998 Annual Meeting of the Irrigation Association**. P. 139-146. 1998
31. SOWACS. **Heat Dissipation**. Disponível em <<http://www.sowacs.com/sensors/heatdiss.html>>. Acesso em: 18/jun/2004.
32. THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND. **An Introduction to Sensors and Terminology** Jul. 2004. Disponível em <<http://www.physics.uq.edu.au/notes/ph206/notes/sensors/sensors.html>> Acesso em: 29 jul. 2004.
33. TOWNER, G. D. Theory of time response of tensiometers. **J. Soil Sci.**, v. 31, n. 4, p. 607-621, 1980.
34. WATSON, K. K., JACKSON, R. D. Temperature effects in a tensiometer-pressures transducer system. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison-WI, v. 31, 156-160. 1967.
35. WERKHOVEN, C. Sensors for irrigation scheduling of cultures in the field. **Acta-Horticulturae**. In: International workshop on sensors in horticulture, I, 1991, Noordwijkerhout, Netherlands, 1992, n. 304, p. 259-264.
36. WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, Bushland-TX, v. 64. n. 2, p. 169-181, 2004
37. YODER, R. E.; JOHNSON, D. L.; WILKERSON, J. B.; YODER, D. C. Soil Water Sensor Performance. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph-MI, v. 14, n. 2, p. 121-133, 1998.

## ANEXO 1 – PROGRAMA PARA COLETA E ARMAZENAMENTO DOS DADOS.

```
//Programa para ler os canais do ADC e passar os dados de contagem
//para a porta serial E APRESENTAÇÃO NO LCD 16x4
/*****
    ae_lcd.c                                06-24-03
    Use PPI on A-Engine to drive 16x4 line LCD
    J6 I07-I00 = D7-D0
        I27=LCD I26=R/W I25=A0 I24=VLC I23=VCC I10=GND
    LCD configuration:
        Pin 3 = VLC disconnected to I24
        VLC via 10K to pin2=VCC and via 200 ohm to pin1=GND

*****/

#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include "ae.h"
#include "ser0.h"
#define PPICMD 0x103
#define PPI0 0x100
#define PPI1 0x101
#define PPI2 0x102
#define MAXISIZE 8192//4098//1024
#define MAXOSIZE 8192//4098//1024
unsigned char ser0_in_buf[MAXISIZE];
unsigned char ser0_out_buf[MAXOSIZE];
int isize,osize,i,ii,adat[11],adat0, adat1,adat2,adat3, adat4,adat5;
int adat6,adat7, adat8,adat9,adat10;
int temp1;
extern COM ser0_com;
unsigned char baud;
unsigned char
string0[5],string1[5],string2[5],string3[5],string4[5],string5[5];
unsigned char string6[5],string7[5],string8[5],string9[5],string10[5];
unsigned char time_now[14]={5,0,4,0,7,0,2,1,2,1,2,0,0};
TIM t1;
TIM* t0;
COM* c1;
unsigned char sa=0x2a;

void main(void)
{
    ae_init();
    pio_init(11, 1);
}
```

```

    t0 = &t1;
rtc_init(time_now);
    rtc_rd(t0);
    c1 = &ser0_com;
    baud = 11;//12;//9;
    isize=MAXISIZE;
    osize=MAXOSIZE;
    s0_init(baud,ser0_in_buf,isize,ser0_out_buf,osize,c1);
while(1)
{
    pio_init(11, 1);
    for(ii=0;ii<11;ii++)
        {
            adat[ii]=0;
            ae_ad12(ii);
            adat[ii]=ae_ad12(ii);
            delay_ms(50);
        }
    adat0=adat[0];
    itoa(adat0,string0,10);
    adat1=adat[1];
    itoa(adat1,string1,10);
    adat2=adat[2];
    itoa(adat2,string2,10);
    adat3=adat[3];
    itoa(adat3,string3,10);
    adat4=adat[4];
    itoa(adat4,string4,10);
    adat5=adat[5];
    itoa(adat5,string5,10);
    adat6=adat[6];
    itoa(adat6,string6,10);
    adat7=adat[7];
    itoa(adat7,string7,10);
    adat8=adat[8];
    itoa(adat8,string8,10);
    adat9=adat[9];
    itoa(adat9,string9,10);
    adat10=adat[10];
    itoa(adat10,string10,10);
    rtc_rd(t0);
    putser0( (t0->mon10)+0x30,c1);
    putser0( (t0->mon1)+0x30,c1);
    putser0( 0x20,c1);
    putser0( (t0->day10)+0x30,c1);
    putser0( (t0->day1)+0x30,c1);
    putser0( 0x20,c1);
    putser0( 0x20,c1);

```

```
    putser0( (t0->hour10)+0x30,c1);
    putser0( (t0->hour1)+0x30,c1);
    putser0( 0x20,c1);
    putser0( (t0->min10)+0x30,c1);
    putser0( (t0->min1)+0x30,c1);
    putser0( 0x20,c1);
    putser0( (t0->sec10)+0x30,c1);
    putser0( (t0->sec1)+0x30,c1);
    putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string0,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string1,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string2,c1);
    putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string3,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string4,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string5,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string6,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string7,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string8,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string9,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0(string10,c1);
putser0( 0x20,c1);
    putsers0("9999",c1);
putser1( 0x20,c1);
    putser0(0x0d,c1); // CR
}
}
```

## ANEXO 2 – PROGRAMA PARA GERAR A MÉDIA DOS DADOS NO MINUTO.

```

// Em 19/03/2004
#include <iostream.h>
#include <fstream.h>
#include <conio.h>
    ifstream infile;
    ofstream outfile;

void main()
{
    infile.open("c:\\np\\C0403040638a.dat");//C051204_0817a.txt");//C1.csv");//a032204.csv");
    outfile.open("c:\\np\\C0403040638a.out");
    char comma;
    unsigned int d,h,m,s,ds;
    int jjk;
    unsigned int s1=0, s2=0, flag1=9999;
    unsigned int adat[126], cum[126]={0}, cont[126]={0};
    float med[126]={0};
    unsigned int i=0,k=0,j=0;
    unsigned int p=1;
    unsigned int kk=0,kk2=0;
    unsigned int ddp=0;
    while (infile.get()!=EOF)
    {
        infile>>ds>>d;
        while ((d!=23) && (d!=23) && (d!=31) && (d!=12)) infile>>d;
        infile>>h;
            while ((h>23)) infile>>h;
        infile>>m;
        while ((m>59)) infile>>m;
        infile>>s;
        while ((s>59)) infile>>s;
        cout<<kk<<" "<<ds<<" "<<d<<" "<<h<<" "<<m<<" "<<s<<" ";

        s1=s;
        if ((s1==0)&&(s2==59))
        {
            outfile<<kk<<" "<<d<<" "<<h<<" "<<m<<" ";
            for (j=0;j<=10;j++)
            {
                med[j]=cum[j]/float(cont[j]);
                med[j]=int(med[j]);
                outfile<<med[j]<<" ";
                med[j]=0;
                cum[j]=0;
                cont[j]=0;
                p=1;
            }
        }
    }
}

```

```

        outfile<<endl;
        kk++;
    }
    long int jj=0;
    jjk=0;
    int pp2=0;

    do
    {
        infile>>jjk;
    }while((jjk<10)&& (infile.get()!=EOF)&& (char(jjk)!=EOF));
        adat[jj]=jjk;
        cout<<adat[jj]<<" ";
        cum[jj]+=adat[jj];
        cont[jj]++;
        jj++;

    do
    {
        infile>>jjk;//infile>>comma;
        adat[jj]=jjk;
        cout<<adat[jj]<<" ";
        cum[jj]+=adat[jj];
        cont[jj]++;
        jj++;
    }
    while (++pp2<11);//jjk!=9999);
    cout<<endl;
    if (jjk!=9999)
    {
        for (j=0;j<=10;j++)
        {
            cum[j]-=adat[j];
            cont[j]--;
        }
        do
        {
            infile>>flag1;
        }while (flag1!=9999);
    }
    s2=s;
    kk2++;
    cout<<kk2<<" ";
}
    cout<<" OK1";
infile.close();
outfile.close();
cout<<" OK";
getch();
}

```