

NADIELAN DA SILVA LIMA

**CONSTRUÇÃO, INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETROS PARA A
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

**Recife
2012**

NADIELAN DA SILVA LIMA

Engenheiro Agrônomo

**CONSTRUÇÃO, INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETROS PARA A
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração: Engenharia de água e solo.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro

Co-orientador: Prof. Dr. João Audifax C. Albuquerque Filho

Recife

2012

Ficha Catalográfica

L732c Lima, Nadielan da Silva
Construção, instalação e calibração de lisímetros para a
determinação da evapotranspiração de referência / Nadielan da
Silva Lima. -- Recife, 2012.
61 f.: il.

Orientador (a): Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de
Tecnologia Rural, Recife, 2012.

Referências.

1. Lisimetria 2. Coeficiente de calibração 3. Sensor de
pressão hidrostática I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima,
Orientadora II. Título

CDD 630

NADIELAN DA SILVA LIMA

**CONSTRUÇÃO, INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETROS PARA A
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Dissertação defendida e aprovada em 29 de fevereiro de 2012 pela banca examinadora:

Profª. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
(Orientadora)

Prof. Dr. João Audifax C. Albuquerque Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE
(Co-Orientador)

Prof. Dr. Ênio Farias França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof. Dr. Abelardo A. A. Montenegro
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Luís Fernando de Souza Magno Campeche
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

DEDICO

Aos meus pais Eli e Nadeje,

Por todo amor, dedicação e segurança em cuidar de mim, não importando o momento e as circunstâncias, agradeço a Deus por serem meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus por ser meu amigo fiel e que nunca desampara aqueles que nele esperam a Ele seja dada a honra, a glória e a minha eterna gratidão.

A minha família que sempre esteve orando por mim, nos anos em que estive ausente, louvo a Deus por vossas vidas.

A minha namorada e futura esposa Kaline Cavalcante Vasconcelos pela paciência e compreensão por esses anos de ausência, mas sempre que estivemos juntos transformou pequenos instantes em grandes momentos.

A minha orientadora, Professora Suzana Maria Gico Lima Montenegro, pela competência em administrar o seu tempo, me fornecendo, sempre que precisei condições para o meu crescimento profissional.

Ao meu co-orientador, professor João Audifax C. Albuquerque Filho, pela paciência e grande lucidez em suas colocações e orientações na elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade oferecida para realização do curso.

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE, representada na pessoa do Professor Mário Monteiro Rolim, pelo auxílio financeiro a este trabalho.

Ao professor Ênio Farias França e Silva, vice-coordenador, que esteve sempre presente em minha luta diária com as atividades de campo, e que nas vezes que busquei ajuda foi gentil em me atender.

Ao ilustríssimo professor Luís Fernando de Souza Magno Campeche, pela grande contribuição prestada a este trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo, bem com a FINEP/ REHISA pela colaboração financeira no desenvolvimento deste trabalho, junto ao Professor Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.

Ao pós-doutorando, Pedro Robinson Fernandes de Medeiros pelas orientações prestadas na instalação do sensor eletrônico.

A doutoranda Leidjane Maria Maciel de Oliveira, que foi sempre muito amigável e prestativa em me passar informações imprescindíveis sobre lisimetria de pesagem e Albert Einstein pelo incentivo e ajuda.

A Usina São José por ceder a área para a coleta do solo dos lisímetros, na pessoa do nosso colega Sinval Peixoto (escovado).

Ao Lulinha, funcionário mais conhecido do Departamento de tecnologia Rural, pelo acolhimento e camaradagem.

Aos colegas em especial: Tony, Daniel, Max, Mara, Joel e Karina que foram fundamentais em ajudar nas atividades de campo, nas análises de solo e na confecção dos desenhos.

Ao grande Capitão (Luciano), que não mediu esforços em me ajudar com os serviços técnicos do experimento.

Aos colegas de curso: Welington (irmão), Paulo (Judas), Celestino (África), Moacir (Ciência), Hugo, Robertson, Zezito (Piauí), Alexandre, Gledson (predador), Igor (Petroleiro), Irenilson, Francismar, Rafael, Junior, Betinho, Eduardo, Júlio, Rogério Matheus, Sonivagno (deputado), Aloísio, Gian (gaúcho), Adriana, Thaís, Uilka, Patrícia, Janice, Taciana, Raquela, Val, Mércia, Bianca, Andréia, Rochele e Jéssika.

E finalmente a todos que não citei por motivo de esquecimento, mas que contribuíram direta ou indiretamente para o êxito deste trabalho.

Muito Obrigado!

“Eu plantei, Apolo regou; mas Deus deu o crescimento. Por isso, nem o que planta é alguma coisa, nem o que rega, mas Deus, que dá o crescimento.”

RESUMO

CONSTRUÇÃO, INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE LISÍMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Dentre os métodos diretos empregados na estimativa da evapotranspiração os lisímetros são os mais utilizados, pois além de permitirem a sua determinação direta, servem de instrumento de calibração e validação de métodos indiretos. O presente trabalho descreve os procedimentos de construção, instalação e calibração de dois lisímetros em área experimental na região do litoral do estado de Pernambuco, com clima tropical. Foram construídos dois lisímetros, o primeiro de drenagem e o segundo de pesagem hidráulica em uma área com grama Batatais (*Paspalum notatum*) de 252 m². Ambos os lisímetros, são compostos de um tanque interno em fibra de vidro tipo caixa d'água com borda circular possuindo área de 1,32 m² e volume de 1 m³, sendo plantada na sua superfície a mesma grama da área circundante. Este tanque é inserido em outro, escavado no solo e com paredes de concreto e alvenaria. Os lisímetros possuem um sistema de drenagem de maneira que a água é coletada por diferença de nível. O sistema de pesagem consiste de três travessieiros hidráulicos construídos com segmentos de mangueira flexível de borracha de butil-nylon de 100 mm de diâmetro, preenchidos com água e ligados entre si por tubos de nylon flexíveis, terminando no sistema de leitura composto por coluna de mercúrio e por sensor de pressão hidrostática que automatiza o sistema. A calibração do lisímetro de pesagem consistiu na adição e retirada de massas padrão, equivalente a 1 mm de lâmina de água, em sequências de tempo iguais. Este procedimento foi realizado na parte central e nos quatro quadrantes do lisímetro. A relação entre o acréscimo e decréscimo das massas padrão e a leitura registrada tanto no manômetro quanto no sensor, foram altamente lineares (R^2 de 0,999) em todos os quadrantes e centro do lisímetro de pesagem. O erro médio posicional no manômetro e no sensor de pressão foi de 1,73 e 0,70 %. Isso reflete em alta estabilidade das leituras mesmo em situações de possíveis inclinações laterais. A precisão do lisímetro de pesagem foi de 0,135 mm de ETo registrado pelo manômetro e de até 0,061 mm de ETo registrado no sensor de pressão, indicando que o sensor de pressão hidrostática foi mais sensível as variações de massas do lisímetro. Em ambos os instrumentos de medição, foi observado erros de histerese, sendo esses erros maiores no manômetro comparado ao sensor.

Palavras chave: Lisimetria, coeficiente de calibração, Sensor de pressão hidrostática

ABSTRACT

CONSTRUCTION, INSTALLATION AND CALIBRATION FOR THE DETERMINATION OF LYSIMETERS EVAPOTRANSPIRATION REFERENCE

Among the direct methods employed for estimating evapotranspiration lysimeters are the most used, as well as allow its direct determination, serve as instrument calibration and validation of indirect methods. This paper describes the procedures for construction, installation and calibration of two lysimeters in the experimental area in the coastal region of Pernambuco state, with tropical climate. Two lysimeters were built, the first drain and the second hydraulic weighing in an area with grass Batatais (*Paspalum notatum*) of 252 m². Lysimeter both, consist of an internal tank-type glass fiber with a water tank having circular edge area of 1.32 m² and a volume of 1 m³, being planted on the surface of the same program of the surrounding area. This tank is inserted into another, dug in the ground and walls of concrete and masonry. Lysimeters have a drainage system so that the water is collected by the difference in level. The weighing system consists of three hydraulic pillows constructed with segments of flexible hose of butyl rubber nylon 100 mm in diameter, filled with water and interconnected by flexible tubes made of nylon, ending in the reading system comprising the mercury column and hydrostatic pressure sensor system that automates. The calibration of the weighing lysimeter consisted in the addition and removal of standard mass equivalent to 1 mm layer of water at the same time sequences. This procedure was performed in the center and four quadrants of the lysimeter. The relationship between the increase and decrease of the standard masses and the reading recorded in both the gauge and the sensor, were highly linear ($R^2 0.999$) in all quadrants and the center of the weighing lysimeter. The average positional error in the manometer and the pressure sensor was 1.73 and 0.70 %. This reflects high stability of readings even in situations of possible side slopes. The accuracy of the weighing lysimeter was 0.135 mm ETo registered by pressure gauge and up to 0.061 mm ETo recorded pressure sensor indicating that the hydrostatic pressure sensor is more sensitive to variations of masses of the lysimeter. In both measuring instruments, were observed hysteresis errors, these errors are larger compared to the gauge sensor.

Keywords: Lysimeters, calibration coefficient, hydrostatic pressure sensor

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Croqui da estação agrometeorológica da UFRPE e respectivos locais de instalação dos lisímetros.....	27
Figura 3.2. Perfil de escavação do solo até 60 cm (A) e separação das camadas em ordem de retirada (B).....	29
Figura 3.3. Fases de preenchimento do lisímetro com solo em ordem de retirada (A e B) e plantio e desenvolvimento da grama Batatais (C e D).....	30
Figura 3.4. Corte transversal do lisímetro de drenagem com detalhe de seus componentes.....	31
Figura 3.5. Fases de construção do lisímetro de drenagem e detalhe das camadas de grama, solo e sistema de drenagem.....	32
Figura 3.6. Sistema de drenagem no fundo do lisímetro (A), saída de drenagem à casa de coleta (B), orifícios de captação da água na tubulação (C) e manta geotêxtil de poliéster e piezômetro (D).....	33
Figura 3.7. Corte transversal do lisímetro de pesagem hidráulica com seus componentes.....	34
Figura 3.8. Vista externa do lisímetro interligado ao túnel de acesso através da placa de concreto (A); Vista interior do túnel de acesso aos drenos dos lisímetros (B) e ao sistema de pesagem hidráulica (C).....	35
Figura 3.9. Mangueira tipo spirafat com os perfis metálicos em “U” (A) e presilha de vedação nas extremidades das células de cargas (B) e (C).....	36
Figura 3.10. Mangueiras em nylon para transmissão do fluido entre os travesseiros hidráulicos (A), joelho de saída tipo engate rápido (B), tê tipo engate rápido (C) e sistema de controle geral de fluxo com sensor de pressão acoplado (D).....	37
Figura 3.11. Detalhe do sistema de pesagem hidráulica com o estrado triangular sob as três bases de concreto.....	38

Figura 3.12. Sistemas de leituras do lisímetro de pesagem hidráulica: Manômetro com pistão de mercúrio (A), régua inclinada 30° (B), detalhe do sensor de pressão hidrostática (C) e sensor conectado ao datalogger.....	39
Figura 3.13. Detalhes do ensaio de calibração no setor central e nos quadrantes pela adição e retirada de massas padrão.....	42
Figura 4.1. Variação de pressões nos travessieiros hidráulicos, em consequência das extrações sucessivas de volumes constantes de 100 mL de água.....	46
Figura 4.2. Curvas de calibração entre leituras observadas no manômetro e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.....	48
Figura 4.3. Curvas de calibração entre leituras observadas no sensor de pressão e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.....	49
Figura 4.4. Relação entre as leituras do sensor de pressão e do manômetro de mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão, para o setor central do lisímetro.....	51
Figura 4.5. Histerese apresentada pela variação de massa de carregamento e descarregamento no manômetro e sensor de pressão durante a calibração, para o setor central do lisímetro.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Caracterização física das respectivas camadas de solo dos lisímetros.....	28
Tabela 4.1. Resumo dos coeficientes de calibração (k), ajustados para os dois ciclos de variação de massa, e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Lisímetros	18
2.2. Classificação dos lisímetros.....	19
2.2.1. Lisímetros tipo pesáveis.....	19
2.2.2. Lisímetros tipo não pesáveis	22
2.3. Projetos de construção de lisímetros.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. Características da área experimental.....	26
3.1.1. Geografia e clima	26
3.1.2. Dimensões.....	26
3.1.3. Instrumentação	28
3.2. Características do solo dos lisímetros.....	28
3.3. Construção dos lisímetros	29
3.3.1. Lisímetro de drenagem	30
3.3.2. Lisímetro de pesagem	34
3.4. Determinação do volume ideal do fluido no sistema de pesagem.....	39
3.5. Determinação da umidade do solo do lisímetro	40
3.6. Ensaios de calibração no lisímetro de pesagem.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Considerações sobre a construção dos lisímetros	44
4.2. Volume ideal do fluido no sistema de pesagem	45
4.3. Coeficiente de calibração, precisão e histerese.....	47
5. CONCLUSÕES	54

6. RECOMENDAÇÕES	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos termos do balanço hídrico do solo é sem dúvida uma importante ferramenta para se avaliar o potencial hídrico tanto para fins agrícolas como para planejamento hidrológico de bacias experimentais. No manejo da irrigação a principal componente é a evapotranspiração, pois representa o conteúdo de água perdida para a atmosfera e que deve ser reposta de forma a garantir o desenvolvimento adequado das culturas. Já na agricultura de sequeiro o conhecimento da demanda evapotranspirativa é necessário para se planejar o ano agrícola, com fins de estabelecimento de calendário de plantio e estudo de avaliação de necessidade de irrigação suplementar.

Esta suplementação hídrica é realizada fazendo-se o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da cultura, o qual tem, na evapotranspiração e na precipitação pluviométrica, seus principais componentes (BERNARDO, 1995). Bernardo et al. (2007) relatam que a evapotranspiração de referência pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos diretos os que utilizam lisímetros, parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo e método de entrada e saída de água.

Os dados referentes às necessidades hídricas dos cultivos utilizados na elaboração e manejo dos projetos de irrigação no Nordeste do Brasil são, em sua maioria, baseados nos métodos indiretos, os quais se utilizam de modelos matemáticos empíricos e Tanque Classe “A”, para quantificar a irrigação das culturas. Entretanto, esses modelos foram desenvolvidos em regiões cujas condições agroclimáticas são geralmente diferentes da nossa região, o que gera um problema, pela utilização generalizada desses modelos sem que haja uma confirmação local de sua validade. Para isso, faz-se necessário, a comparação dos valores empíricos obtidos pelos modelos, com os dados de evapotranspiração medidos diretamente por meio de lisímetros.

Os lisímetros são os principais equipamentos de medição direta da evapotranspiração que promovem leituras de forma mais precisa. Isso se explica pelo controle mais rigoroso e adequado das condições do sistema solo-água-planta. Entretanto seu custo elevado tem dificultado sua utilização em larga escala, ficando restrito apenas a instituições de pesquisas, tendo sua utilização justificada na calibração regional de métodos indiretos, citado por (MENDONÇA et al. 2003).

Segundo Aboukhaled et al. (1982), os lisímetros são tanques preenchidos com solo, localizados no campo, de forma a assemelhar-se as condições ambientais, vegetados ou não, cuja finalidade é quantificar a evapotranspiração de uma cultura em crescimento, de uma

cobertura vegetativa de referência ou a evaporação de um solo. Eles são, essencialmente, contêineres que isolam hidrológicamente um volume de solo-ar-água do solo circundante. Este isolamento característico se limita apenas os lados e a base do reservatório solo-ar-água, enquanto sua superfície deve ser tão representativa quanto possível da área ao redor não modificada. Quanto ao tipo, Silva (1996) relata que os lisímetros usualmente são agrupados em pesáveis (lisímetros de pesagem de forma continuada ou intermitente, onde a variação de massa é determinada por um mecanismo de pesagem) e não pesáveis (lisímetro de drenagem e de lençol freático em nível constante).

Na literatura, existe um grande número de trabalhos envolvendo tamanhos, formas e tipos diferentes de construção de lisímetros, cada qual com a sua adaptação local de solo, cultura, condições climáticas, disponibilidade de material, tecnologia e os custos envolvidos para sua construção (CAMPECHE, 2002). Segundo o mesmo autor, esses equipamentos quando bem desenhados, calibrados e manejados medem precisamente e representativamente a evapotranspiração das culturas.

A calibração é um dos principais procedimentos antes do funcionamento de lisímetros de pesagem em campo, esta é realizada pela adição e retirada de pesos previamente conhecidos e tem por finalidade estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga e a massa do sistema, verificando assim a linearidade e histerese da célula de carga, devendo ser preferencialmente calibrados *in situ*, nas mesmas condições climáticas do seu funcionamento (CAMPECHE, 2002).

Baseado no exposto, este trabalho teve como objetivo a construção e instalação de um lisímetro de drenagem e um lisímetro de pesagem hidráulica, bem como a sua calibração e testes de funcionamento de um sensor eletrônico de pressão hidrostática, para a automação das leituras da evapotranspiração de referência em área experimental do Litoral de Pernambuco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Lisímetros

Os lisímetros são tanques preenchidos com solo, localizados no campo, de forma a assemelhar-se às condições ambientais, vegetados ou não, cuja finalidade é quantificar a evapotranspiração de uma cultura em crescimento, de uma cobertura vegetativa de referência ou a evaporação de um solo. Eles são, essencialmente, contêineres que isolam hidrológicamente um volume de solo-ar-água do solo circundante. Este isolamento característico se limita apenas os lados e a base do reservatório solo-ar-água, enquanto sua superfície deve ser tão representativa quanto possível da área ao redor não modificada (ABOUKHALED et al., 1982).

Sentelhas (2001) descreve os lisímetros como estruturas especiais em que um volume de solo vegetado é devidamente isolado, a fim de que todas as entradas e saídas de água desse sistema sejam controladas. O mesmo autor afirma que, para obter medidas precisas da evapotranspiração, a vegetação no interior do lisímetro deve apresentar as mesmas condições (altura e área foliar semelhante) da área de contorno. Silva (2000) define lisímetro como sendo uma caixa impermeável, a qual possui um determinado volume de solo, que permite conhecer detalhadamente alguns termos do balanço hídrico deste volume amostral. Para Medeiros (2002) os lisímetros compõem-se de grandes “containers”, localizados em campo e preenchidos com solo, representando desta forma o ambiente local, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento ou de uma cobertura vegetal de referência ou ainda da evaporação de um solo nu.

Segundo Aboukhaled et al. (1982) o termo lisímetro é originário do francês “*Lises*” que significa perdas, logo associamos esses equipamentos a medida das perdas de água, ou qualquer outro fluido que se deseja quantificar. Por volta de 1688, estudos iniciais com lisímetros começaram na França, especificamente em Rungis, próximo a Paris. Entretanto esses estudos, em sua maioria, relacionavam-se com a percolação da água, sem que houvesse interesse na medição do escoamento superficial, armazenamento da água no solo e principalmente da evapotranspiração (FREITAS, 1994). Posteriormente, em meados de 1900, esses equipamentos passaram por um processo de modificações técnicas, então foram desenvolvidos especificamente para a determinação da evapotranspiração, os quais passaram a ser chamados de evapotranspirômetros (SILVA, 2000).

Estes dispositivos permitem determinar a evapotranspiração desde períodos quinzenais e semanais, com lisímetros de drenagem a diários ou mesmo horários, mediante os lisímetros de pesagem. Segundo Howell et al. (1985) a medição da variação de peso de um bloco de solo isolado (lisímetro de pesagem) é considerada um dos métodos de pesquisa mais práticos e precisos para se determinar diretamente a evapotranspiração das culturas, podendo ser utilizada para períodos de tempo menores que um dia.

O primeiro aparelho lisimétrico desenvolvido com o objetivo de quantificar a evapotranspiração foi do tipo de nível freático constante. Primeiramente na Alemanha no ano de 1906 e logo depois nos Estados Unidos em 1923, foram desenvolvidos lisímetros de pesagem, que pesavam blocos de solo e avaliavam as variações no armazenamento de água (FREITAS, 1994). No Brasil, só a partir da década de 1950 é que foram introduzidos os primeiros lisímetros. Camargo (1962) utilizou lisímetros para medir a evapotranspiração potencial em São Paulo. Bertoni & Barreto (1966) utilizaram um lisímetro de pesagem para a determinação dos elementos hidrológicos em três tipos de solo, sob diferentes coberturas, também no Estado de São Paulo. No mesmo ano, foi instalado, na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, um lisímetro de flutuação (SILVA, 2000).

2.2. Classificação dos lisímetros

De acordo com Stone & Silveira (1995), os lisímetros são divididos de acordo com a forma pela qual é medida a variação no armazenamento da água em seu interior, em lisímetros pesáveis e não pesáveis. Os lisímetros do tipo não pesável determinam a evapotranspiração, para um determinado período, apenas por subtração da água de drenagem coletada do total adicionado por irrigação e possíveis precipitações pluviométricas. Já os lisímetros do tipo pesagem permitem que mudanças de peso no reservatório lisimétrico, devido às entradas e saídas de água, possam medir diretamente a evapotranspiração. Dylla & Cox (1973) relatam que embora os lisímetros do tipo não pesáveis sejam mais simples nos aspectos construtivos e econômicos, os lisímetros pesáveis quantificam a evapotranspiração mais precisamente e em períodos de tempo menores.

2.2.1. Lisímetros tipo pesáveis

Os lisímetros tipo pesáveis são classificados de acordo com o princípio de pesagem a eles aplicado (ABOUKHALED et al., 1982), que são:

Lisímetros de Flutuação
Lisímetros de Pesagem Mecânica
Lisímetros de Pesagem Eletrônica
Lisímetros de Pesagem Hidráulica

Os lisímetros flutuantes funcionam baseados no Princípio de Arquimedes, em que um tanque flutua dentro de outro tanque preenchido com um líquido específico com densidade conhecida (H_2O ou $ZnCl_2$), sendo mais aconselhável a utilização de fluidos com maiores densidades (SILVA, 2000). Aboukhaled et al. (1982), comentam que os erros associados a esse tipo de lisímetro são devido a temperatura, pois provocam mudanças no peso específico da solução, evaporação e expansão térmica, e aos ventos que podem provocar oscilações, movimentos laterais e até derramamentos. Um lisímetro desse tipo foi instalado em área do posto agrometeorológico da ESALQ – USP, entretanto devido a dificuldades operacionais, foi retirado (PEREIRA et al., 1997)

O mecanismo de funcionamento do lisímetro de pesagem mecânica é através de balanças portáteis, balanças de plataforma móveis ou ainda guindastes, para lisímetros de grande porte, e são pesados periodicamente. A sensibilidade destes equipamentos de pesagem pode chegar a valores de até 0,03 mm de evapotranspiração, entretanto a construção e instalação destes tipos de lisímetros é em geral complicada e possui valor de capital alto, sendo então utilizados, principalmente, por instituições de pesquisa. (ABOUKHALED et al., 1982).

Os lisímetros de pesagem eletrônica são equipamentos que se utilizam de células de carga eletrônica para registrar em sinais de variação de peso no interior do tanque lisimétrico. Black et al. (1968) comentam que embora este tipo de equipamento passam alcançar precisões altamente significativas (0,25 a 0,02 mm) de evapotranspiração, as células eletrônicas são sensíveis a flutuações e quedas de temperaturas, necessitando assim de calibrações periódicas, além de também serem sensíveis a ventos mais intensos (ABOUKHALED et al., 1982). Atualmente, muitos trabalhos utilizando lisímetros de pesagem com células de carga eletrônica vão ganhando importância, devido à popularização da microeletrônica, que automatiza as medidas lisimétricas, facilitando o registro dos dados de evapotranspiração, e neste cenário o Brasil surge como referência no desenvolvimento de pesquisas dessa natureza (PEREIRA et al., 1997). Campeche (2002) construiu três lisímetros com células de carga eletrônica, para a determinação da evapotranspiração da cultura da Lima

Ácida 'TAHITI' (*Citrus latifolia* Tan.) em Piracicaba, São Paulo. Na Região de Seropédica - RJ, Cruz (2005) instalou e calibrou um lisímetro de pesagem eletrônica para se determinar a evapotranspiração de uma cultura de referência.

Os lisímetros de pesagem hidráulica tem seu princípio de funcionamento associado a células de carga hidráulica ou travesseiros hidráulicos, em que o peso total do reservatório interno do lisímetro é distribuído sobre estes, gerando variações de pressão no fluido dessas células, em consequência das adições de água (chuvas e irrigações) e das perdas (drenagem profunda e evapotranspiração) (FREITAS, 1994). Os registros dessas variações são obtidos através de um manômetro devidamente calibrado, que geralmente utiliza o mercúrio como fluido manométrico, devido a sua alta densidade, isto faz com que facilite as leituras pelo abaixamento da altura da coluna de mercúrio.

O desenvolvimento de lisímetros de pesagem hidráulica teve início no Havai em pesquisas realizadas por Miller & Ekern, ambas em 1958 (BLACK et al., 1968). Miller utilizou colchões preenchidos com água, como células de pressão, por baixo de uma parcela de solo não isolada hidrológicamente, e mediu as pressões por meio de um manômetro. Ekern também em 1958, isolou uma parcela de solo através de um tanque de retenção de 1 m³, onde este foi assentado sobre dois travesseiros hidráulicos confeccionados com câmara de ar de pneu de automóvel, parcialmente inflados com água.

Rodrigues (1987) foi o pioneiro no Brasil no desenvolvimento de um lisímetro de pesagem hidráulica para estudo de evapotranspiração de uma cultura de referência (ET_o) em Parnamirim, Pernambuco e fez comparações com as leituras de evaporação do tanque Classe A, o qual obteve os primeiros dados de coeficiente do tanque (K_c) por esta metodologia no país. Outras pesquisas com lisímetros similares foram desenvolvidas, juntamente com a Universidade Federal Rural de Pernambuco, em Serra Talhada, por Freitas (1994) quando ali construiu um lisímetro por sensor de pesagem hidráulica; em Petrolina, por Costa (1999) em que foi desenvolvido um lisímetro de pesagem hidráulica com arranjo de pistão de mercúrio, com capacidade de 2,26 m³ de solo, área superficial de 1,79 m² e uma precisão de 0,29 mm; por Silva (2000) o qual fez aplicação de lisimetria de pesagem hidráulica e comparou com medidas estimadas por variáveis climatológicas no semi-árido Pernambucano e Silva et al. (2003) também em Petrolina; em Recife, por Santos et al. (2003); em Pesqueira, por Santos (2004) e Santos et al. (2005); em Vitória de Santo Antão com Oliveira et al. (2006) e Oliveira (2007).

Silva (2005) desenvolveu na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, em Piracicaba – SP, construiu quatro lisímetros de pesagem hidráulica, utilizando-se caixa de polietileno com capacidade para 0,5 m³ de solo. Estes foram desenvolvidos com o intuito de determinar a evapotranspiração e os coeficientes da cultura do maracujazeiro.

2.2.2 lisímetros tipo não pesáveis

Lisímetros deste tipo medem a evapotranspiração através do balanço hídrico de um determinado volume de solo isolado hidrológicamente, e é obtida pela seguinte expressão:

$$ET = P + I - D \quad (1)$$

Em que:

ET = Evapotranspiração (mm);

P = Precipitação (mm);

I = Irrigação (mm);

D = Drenagem (mm).

Os lisímetros de drenagem são os principais representantes desta classe de aparelhos lisimétricos, estes por sua vez funcionam razoavelmente apenas em períodos longos de observações (7 a 10 dias). Essa falta de precisão nos resultados obtidos desses equipamentos, em períodos curtos de avaliações, se deve principalmente a redistribuição da água no perfil do solo que acontece de forma lenta. Desta maneira, para se alcançar uma boa precisão desses equipamentos, deveríamos realizar avaliações estacionais ou anuais (PEREIRA et al., 1997).

No Brasil existem vários conjuntos desse tipo de lisímetros, variando apenas as dimensões e formas. Camargo (1962) utilizou um conjunto de lisímetros de drenagem com material de cimento amianto para a determinação da evapotranspiração potencial mensal de uma área gramada, em três locais do Estado de São Paulo. Albuquerque Filho (2006) construiu em área experimental uma bateria de 40 lisímetros de drenagem (uma matriz 8 x 5), constituída de caixas de Cimento Reforçado com Fio Sintético troncônicas, com capacidade de 1000 litros e área superficial de 1,49 m² para a determinação da evapotranspiração e do coeficiente de cultura do coentro e da salsa.

2.3. Projetos de construção de lisímetros

Gangopadhyaya et al. (1966) foram pioneiros em apresentar ampla revisão sobre técnicas e equipamentos utilizados na medida da evapotranspiração. Posteriormente, Aboukhaled et al. (1982) e Allen et al. (1991) apresentaram também extensa revisão de diversos tipos de lisímetros, onde especificaram alguns critérios para escolha do tipo de lisímetro, como a sensibilidade adequada, a forma de enchimento do tanque com solo, tamanho do tanque do lisímetro, o tipo de registro de dados e o tipo de drenagem.

Conforme Aboukhaled et al. (1982), dentre os principais fatores que influenciam nas medições da evapotranspiração nos lisímetros, além dos já citados, destacam-se as suas dimensões, o regime de umidade do solo no interior do mesmo, a espessura das paredes e a altura de suas bordas. Howell et al. (1985) afirmam que, para minimizar os efeitos das paredes do lisímetro sobre a evapotranspiração medida, essas devem ser construídas com a menor espessura possível e deve-se reduzir ao máximo a abertura existente entre as paredes interna e externa. Brutsaert (1982) também enfatiza os cuidados com a descontinuidade da superfície na borda do lisímetro, a abertura entre a parede do tanque e a estrutura de proteção e a vegetação similar dentro e fora do lisímetro.

A recomendação feita por Aboukhaled et al. (1982) é que a menor área superficial do lisímetro destinados a avaliações da evapotranspiração potencial seja de 2,00 m². Entretanto, Campeche (2002) ressalta que lisímetros de área menor que 2,00 m² estão sendo muito utilizados hoje em dia em pesquisas de evapotranspiração, pois além de serem mais facilmente construídos, os custos também são menores. Por outro lado, Dugas & Bland (1989) em estudo comparativo entre lisímetros de diferentes áreas superficiais, mostraram que não houve diferença estatística nos valores da evapotranspiração medida por lisímetros considerados pequenos (0,18 e 0,75 m²) e lisímetros maiores (3,00 m²). Como exemplos temos os lisímetros construídos por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Silva (2005) e Oliveira (2007) com suas respectivas áreas de 1,25; 1,79; 1,79; 1,04 e 1,52 m², apresentando bons resultados.

De acordo com Dugas & Bland (1989) os problemas associados à lisímetros de pequena área superficial são os seguintes:

- Avaliação de um menor número de plantas, aumentando a possibilidade de diferenças no crescimento da cultura dentro e fora do lisímetro;
- Aumento dos efeitos advectivos de pequena escala;

- Aumento do fluxo de calor nas paredes sobre o regime térmico do lisímetro, podendo modificar a evapotranspiração.

A sensibilidade que esses equipamentos requerem é função do tipo de dados de evapotranspiração que se deseja obter, como em pesquisas relacionadas com aspectos fisiológicos da cultura, valores em escala horária são necessários assim como precisões elevadas (0,01 mm). No planejamento e no manejo da irrigação não são necessários lisímetros de alta precisão nem valores horários. Neste caso avaliações diárias ou semanais da evapotranspiração na ordem de milímetros são suficientes (ABOUKHALED et al., 1982). De acordo com Howell (2004) e Allen et al. (2011), a qualidade das medidas de evapotranspiração depende em grande parte da resolução do sistema de pesagem, da faixa de medição do mesmo, da existência ou não de contrapesos e da relação área/volume do lisímetro.

Os custos relacionados à construção e operação dos equipamentos mecânicos ou eletrônicos podem ser restritivos (MIRANDA et al., 1999). Os lisímetros hidráulicos embora menos precisos que os de pesagem mecânica e eletrônica, oferecem precisão satisfatória. Silva (2000) relata que os custos desses equipamentos são bem mais acessíveis. A resolução dos lisímetros de pesagem hidráulica varia de 0,025 mm naqueles destinados aos estudos de fisiologia vegetal, a 1,00 mm nos aplicados na obtenção diária da ETo (Aboukhaled et al., 1982). É importante salientar que os lisímetros devem ser preenchidos com solo, mantendo a mesma sequência de horizontes do solo original. SILVA (2003) comenta que, os lisímetros quando bem instalados, possibilitam medidas precisas da ET, principalmente quando os mesmos são preenchidos corretamente, pois desta forma, o perfil de solo no seu interior assemelha o máximo possível das camadas de solo da área externa. Machado & Mattos (2001) ressaltam que os lisímetros são peças fundamentais na determinação da evapotranspiração, pois, além de permitirem a sua determinação direta, servem de instrumento de calibração para os métodos empíricos.

Pesquisas realizadas por Tanner & Swan em 1963 constataram que travesseiros hidráulicos confeccionados com segmentos de borracha comum, apresentavam problemas com desgaste do material, fato este, que os levaram a modificar para tubos de butil-nylon, com 30 cm de diâmetro, fechados nas extremidades e conectados a um único manômetro (FREITAS, 1994). Broemen (1964) também conclui que travesseiros hidráulicos confeccionados com qualquer tipo borracha não garantem uma área de contato constante,

condição primordial para o correto funcionamento do equipamento e sugere que se utilizem tubos de butil-nylon na confecção dos travesseiros.

Em Wisconsin, Estados Unidos, Black et al. (1968) construíram dois lisímetros hidráulicos de 35 m³, um retangular e outro circular, ambos com células de carga confeccionadas em tubos de butil-nylon, onde as pressões do fluido eram medidas por um sensor de pressão de 0,02 mm de resolução. Estes ensaios demonstrou que o lisímetro com área circular apresentou dados mais estáveis e precisos que os obtidos no lisímetro de área retangular.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características da área experimental

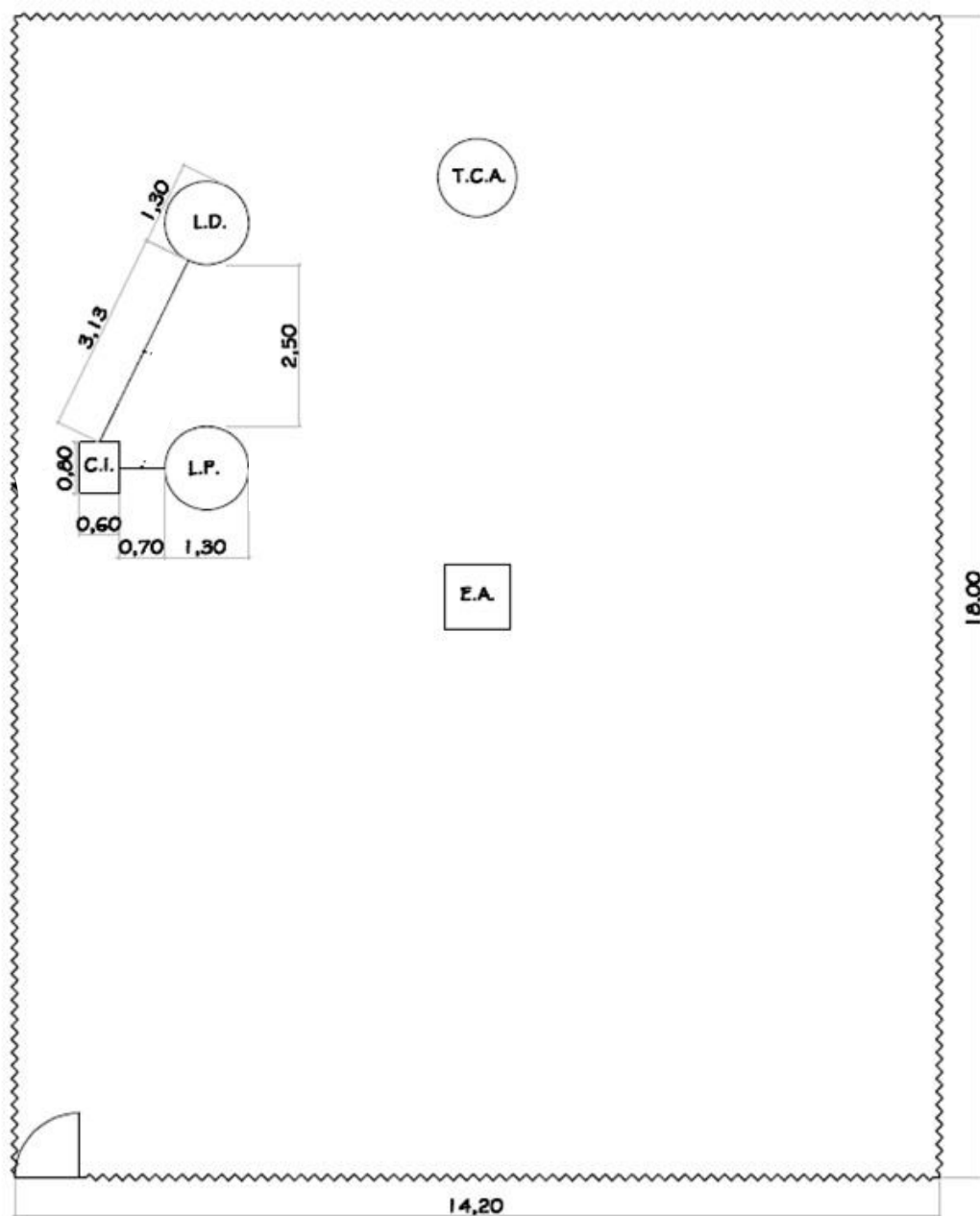
3.1.1. Geografia e clima

O trabalho foi conduzido na Estação Experimental de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura, pertencente ao Campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE em Recife – PE. As coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum), são 8°01'05" de latitude sul e 34°56'48" de longitude oeste, e altitude de 6,4m.

O clima de acordo com a classificação de Koppen é As, Megatérmico tropical (tropical úmido), com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C e com precipitações de outono e inverno (BRASIL, 1992). As médias anuais de umidade relativa de 79,8%, Precipitação de 2417 mm, temperatura 25,5 °C (INMET, 2009).

3.1.2. Dimensões e padronização da área

A área experimental possui área retangular (18 x 14,2 m) que resulta numa área de 255,6 m², em que é totalmente coberta com grama Batatais (*Paspalum notatum*), obedecendo as condições padrão estabelecidas pelo boletim da FAO-56. Sendo assim, a grama foi mantida livre de doença, bem-fertilizada, mantida sob condições de umidade do solo ideal e mantida na altura padrão de 10 cm de altura (ALLEN et al., 1998). A Figura 3.1 ilustra o croqui da estação agrometeorológica pertencente a Estação Experimental de Agricultura Irrigada Prof. Ronaldo Freire de Moura - UFRPE, como a disposição do lisímetro de drenagem e do lisímetro de pesagem, da estação meteorológica automática e do tanque Classe A.



T.C.A. TANQUE CLASSE "A"
 E.A. ESTAÇÃO AUTOMÁTICA
 C.I. CAIXA DE INSPEÇÃO
 L.P. LISÍMETRO DE PESAGEM
 L.D. LISÍMETRO DE DRENAGEM

Figura 3.1. Croqui da estação agrometeorológica da UFRPE e respectivos locais de instalação dos lisímetros.

3.1.3. Instrumentação

A coleta dos elementos meteorológicos do local foi realizada na estação meteorológica automatizada, provida de sensores e acessórios necessários para determinação da evapotranspiração de referência pela equação de Penman-Monteith. Foi utilizado o microprocessador de dados tipo datalogger da Campbell Scientific (modelo CR1000/CFM100/OS100) da própria estação para registro dos dados de resposta do sensor de pressão hidrostática (modelo MPX5100GP – Motorola) do sistema de leitura do lisímetro de pesagem hidráulica, com o objetivo de automatizar as leituras das células de carga hidráulica.

3.2. Características do solo dos lisímetros

Como o material de solo da área foi resultante de aterro proveniente de mata para a construção da estação agrometeorológica, o qual foi destocado e nivelado, retirando com isso a primeira camada de solo nativo e assim perdendo as características estruturais de solo que represente as condições de balanço hídrico real da região de estudo. Neste caso, foi trazido um solo oriundo da Usina São José, Engenho Burro Velho, lote 1330, Igarassu, Pernambuco. Para caracterização do solo foram coletadas amostras a 20, 40 e 60 cm de profundidade, logo após foi homogeneizado, seco ao ar e peneirado em malha de 4,0 mm. O solo foi classificado como Espodossolo Ferrihumilúvico Órtico dúrico, Arênico, fase relevo plano, de acordo com a Embrapa (1999). As características físicas do solo estão descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Caracterização física das respectivas camadas de solo dos lisímetros.

Amostras - camadas (cm)	Granulometria (%)			Densidade (g cm ³)	
	Areia	Silte	Argila	Global	Partícula
0 – 20	93,73	4,26	2,01	1,65	2,53
20 – 40	95,03	3,46	1,50	1,63	2,53
40 – 60	94,60	4,39	1,00	1,68	2,57

A composição granulométrica foi determinada pelo método do densímetro, sendo esta com peneiramento da fração areia e leitura do silte + argila em 24 h, segundo Almeida (2008). Utilizou-se solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 h a 50 rpm. A densidade do solo foi obtida pelo

método da proveta, compreendendo a secagem a 105°C e pesagem do solo acondicionado e compactado em proveta de 100 ml e a densidade das partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. Os dois métodos citados foram realizados seguindo a metodologia da Embrapa (1997).

3.3. Construção dos lisímetros

Foram construídos dois lisímetros, um de drenagem e o segundo de pesagem hidráulica. Para a construção dos lisímetros foi necessário o transporte do solo do município de Iguarassu-PE ao local do experimento em Recife-PE. Assim, no local de coleta, foi realizada a separação das camadas escavando-se, manualmente, o solo em três camadas de 20 cm, até profundidade igual a 60 cm. Como a profundidade da caixa dos lisímetros é de 80 cm, os 20 cm restantes foi preenchido com brita nº 1 que compõe o sistema de drenagem. As camadas de solo foram separadas em ordem de retirada, acomodadas em lonas plásticas e identificadas (Figura 3.2). Em cada camada eram coletadas amostras de solo para caracterização física. Essa metodologia foi a mesma utilizada por Silva (2005) e Oliveira (2007) e tem como objetivo manter ao máximo possível as condições e características iniciais do solo dentro do lisímetro, já que este é do tipo não-monolítico, resultando assim, em um processo mais demorado para reconstituição da densidade original.

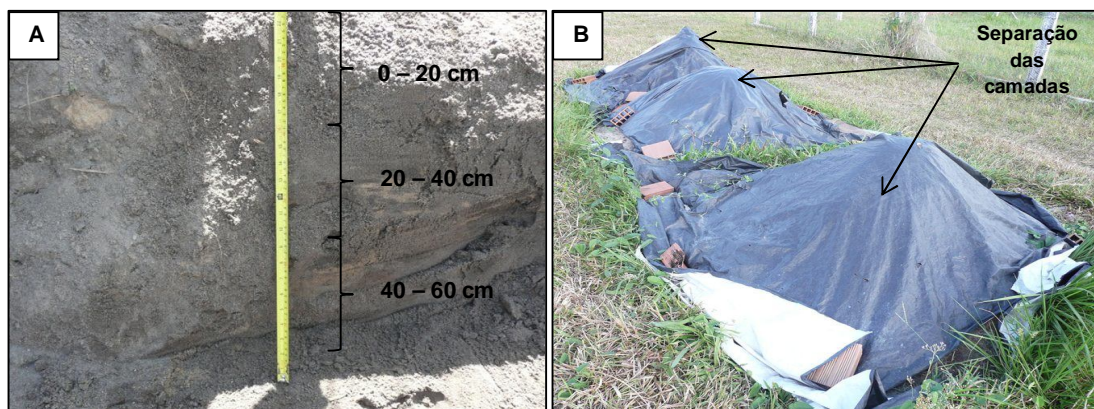


Figura 3.2. Perfil de escavação do solo até 60 cm (A) e separação das camadas em ordem de retirada (B).

O preenchimento das caixas foi feito colocando-se as camadas de solo na ordem inversa de sua retirada. Para cada camada completada, o solo recebeu uma leve compactação para promover uma maior acomodação deste solo dentro das caixas, lembrando

que tal procedimento foi feito com o solo seco, evitando assim uma compactação maior das camadas de solo (Figura 3.3). Devidamente acomodado o solo no interior dos lisímetros, foi plantada a grama Batatais (*Paspalum notatum*), que é a superfície de referência para a quantificação da ETo, sendo plantada em toda a superfície do solo da Estação Agrometeorológica.



Figura 3.3. Fases de preenchimento do lisímetro com solo em ordem de retirada (A e B) e plantio e desenvolvimento da grama Batatais (C e D).

3.3.1 Lisímetro de drenagem

O lisímetro de drenagem é do tipo drenagem livre e é composto dos seguintes componentes: (i) Reservatório externo; (ii) Reservatório interno e (iii) Sistema de drenagem (Figura 3.4).

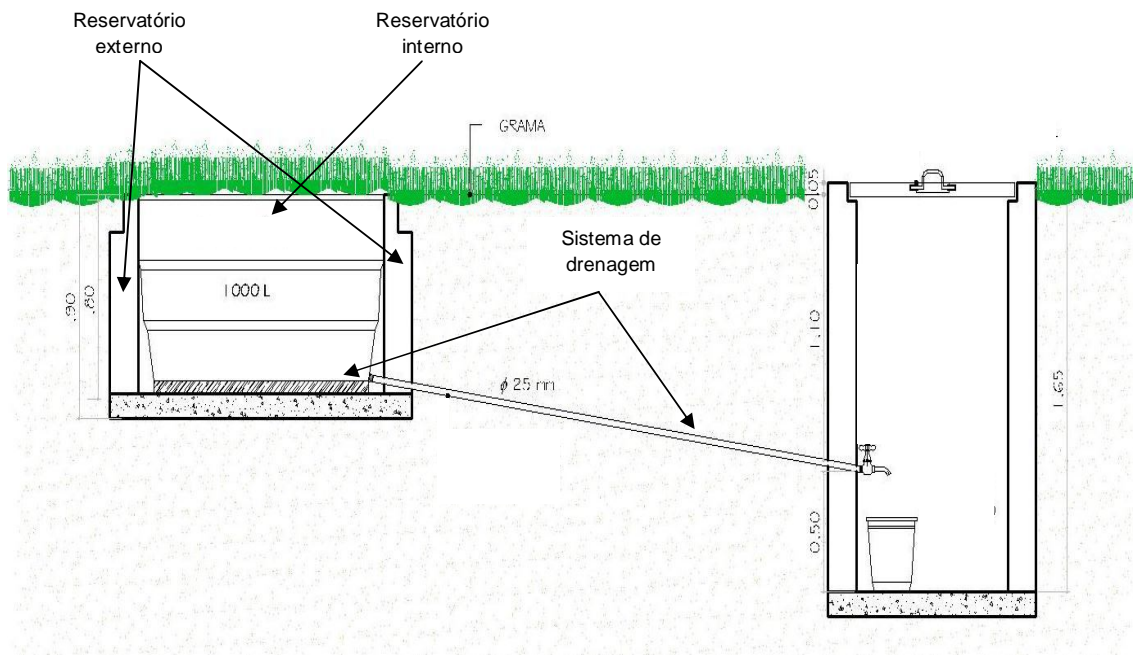


Figura 3.4. Corte transversal do lisímetro de drenagem com detalhe de seus componentes.

O reservatório externo do lisímetro tem como finalidade a contenção do solo em redor do lisímetro, protegendo assim o reservatório interno contendo o solo. Este reservatório foi construído com paredes de 10 cm de espessura em alvenaria de tijolo (8 furos), diâmetro de 160 cm e altura de 80 cm. A base foi compactada e concretada e em seguida nivelada, permitindo com isso, estabilidade ao reservatório interno e evitando escoamento superficial, evento este que alteraria a veracidade das leituras lisimétricas, aumentando o erro experimental. Até 70 cm de altura a espessura das paredes foi de 10 cm, a partir dos 10 cm restantes, obteve-se espessura de 5 cm, o que possibilita que não ocorram interferências com entrada de calor sensível e assim ocorrer interferências nas leituras de evapotranspiração. Esta bordadura também é importante para que seja mantida a relação área superficial bordadura menor que 10%, como afirma Aboukhaled et al. (1982). Dessa maneira favorecerá também que o gramado fique o mais uniforme possível, não deixando espaços na cultura dentro e fora do lisímetro, como mostrado na Figura 3.5.

O reservatório interno é constituído de uma caixa cônica em fibra de vidro, com diâmetro superior de 130 cm; diâmetro inferior de 117 cm e altura de 80 cm; com capacidade volumétrica de aproximadamente 1m^3 e área superficial de $1,32732\text{ m}^2$ (Figura 3.5). A escolha desse material foi devido à facilidade de manuseio e resistência a intempéries,

além de ser de baixo custo, entretanto oferece pouca resistência mecânica, necessitando ser apoiado em superfície firme.

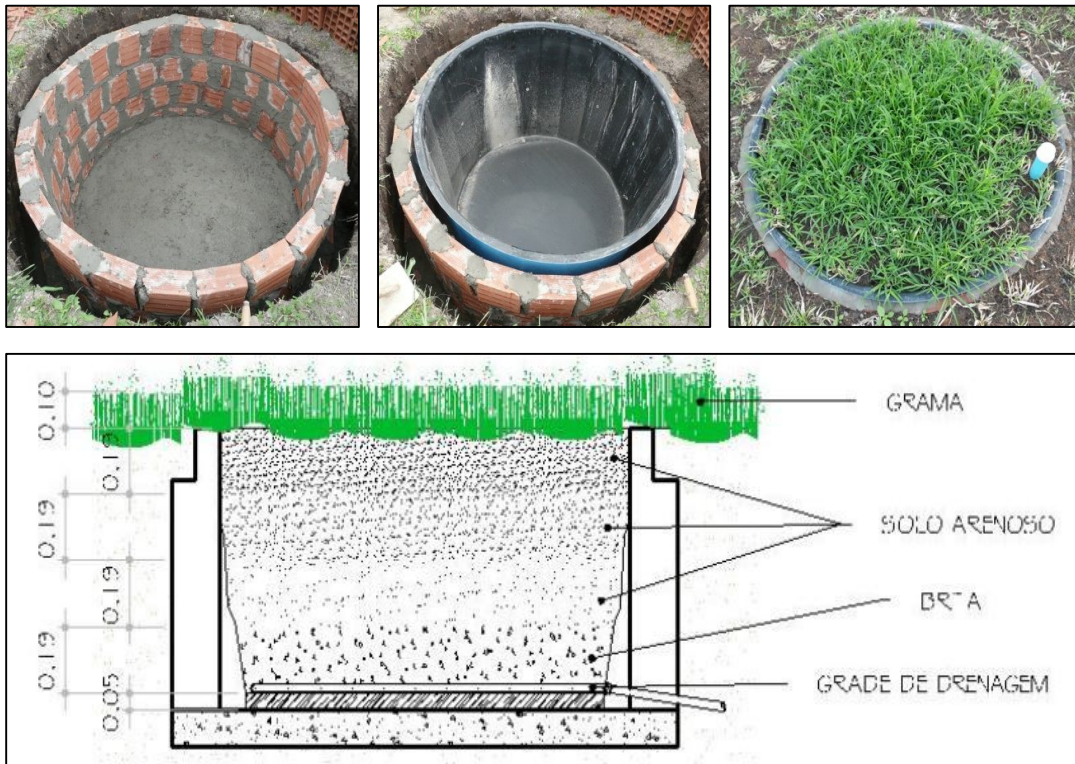


Figura 3.5. Fases de construção do lisímetro de drenagem e detalhe das camadas de grama, solo e sistema de drenagem.

O sistema de drenagem dos lisímetros é do tipo gravitacional, para permitir que chuvas ou irrigação que excederem a capacidade de retenção de água do solo, seja drenada. O sistema é composto de um segmento de tubo de PVC de 25 mm de diâmetro colocado no fundo da caixa do lisímetro, dispostos ao longo da lateral, conectados com quatro joelhos, um em cada extremidade, formando uma malha retangular com seis têes, e sete tubos perfurados que abastecem uma única saída que conduz a água até a casa de coleta. A vedação na saída do reservatório foi feita com um adaptador soldável tipo flanges livres para caixa d'água, diâmetro de 25 mm x $\frac{3}{4}$ ", cuja vedação foi reforçada com cola à base de resina epóxi evitando assim possíveis vazamentos.

Seguindo a metodologia de Oliveira (2007), a ordem do sistema de drenagem livre no fundo do tanque foi a seguinte: 5 cm de brita tipo cascalhinho, a tubulação em PVC de 25 mm de diâmetro, em forma de retângulo e perfurada na parte superior e lateral com orifícios espaçados de 5 cm, outra camada de brita de 15 cm e manta geotêxtil de poliéster

(Figura 3.6). A principal função desta manta é impedir que o solo da caixa prejudicasse a drenagem, entupindo os orifícios das tubulações de drenagem. Esta montagem tem o objetivo de facilitar a drenagem de água dentro do sistema. Conectada aos tubos de drenagem do interior da caixa, existe uma tubulação com diâmetro de 25 mm, que interliga o sistema de drenagem da caixa à casa de coleta ou túnel de inspeção e medição do efluente que será coletado em balde de 15 litros. Foi colocado, ainda, um piezômetro no interior do lisímetro com o intuito de verificar o nível freático, auxiliando assim na manutenção do funcionamento adequado do sistema de drenagem conforme a Figura 3.6.

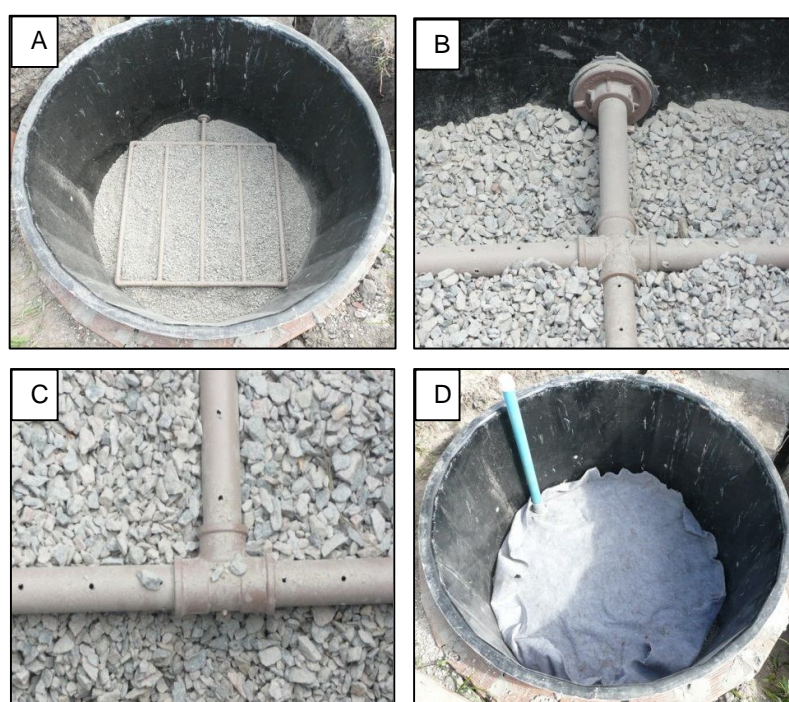


Figura 3.6. Sistema de drenagem no fundo do lisímetro (A), saída de drenagem à casa de coleta (B), orifícios de captação da água na tubulação (C) e manta geotêxtil de poliéster e piezômetro (D).

O líquido drenado do lisímetro é conduzido por gravidade, pela diferença de nível, em uma tubulação em PVC soldável de 25 mm de diâmetro até o túnel de inspeção em alvenaria com tijolos de oito furos. Este possui forma retangular de 80 x 60 cm na entrada e profundidade de 150 cm. O mesmo possui uma entrada a 80 cm que permite acesso aos drenos proveniente dos lisímetros.

3.3.2. Lisímetro de pesagem

O lisímetro de pesagem hidráulica é composto dos mesmos componentes do lisímetro de drenagem, com acréscimo dos seguintes: (iv) Sistema de pesagem hidráulica; (v) Sistema transmissor de pressão e (vi) Sistema de leitura (Figura 3.7).

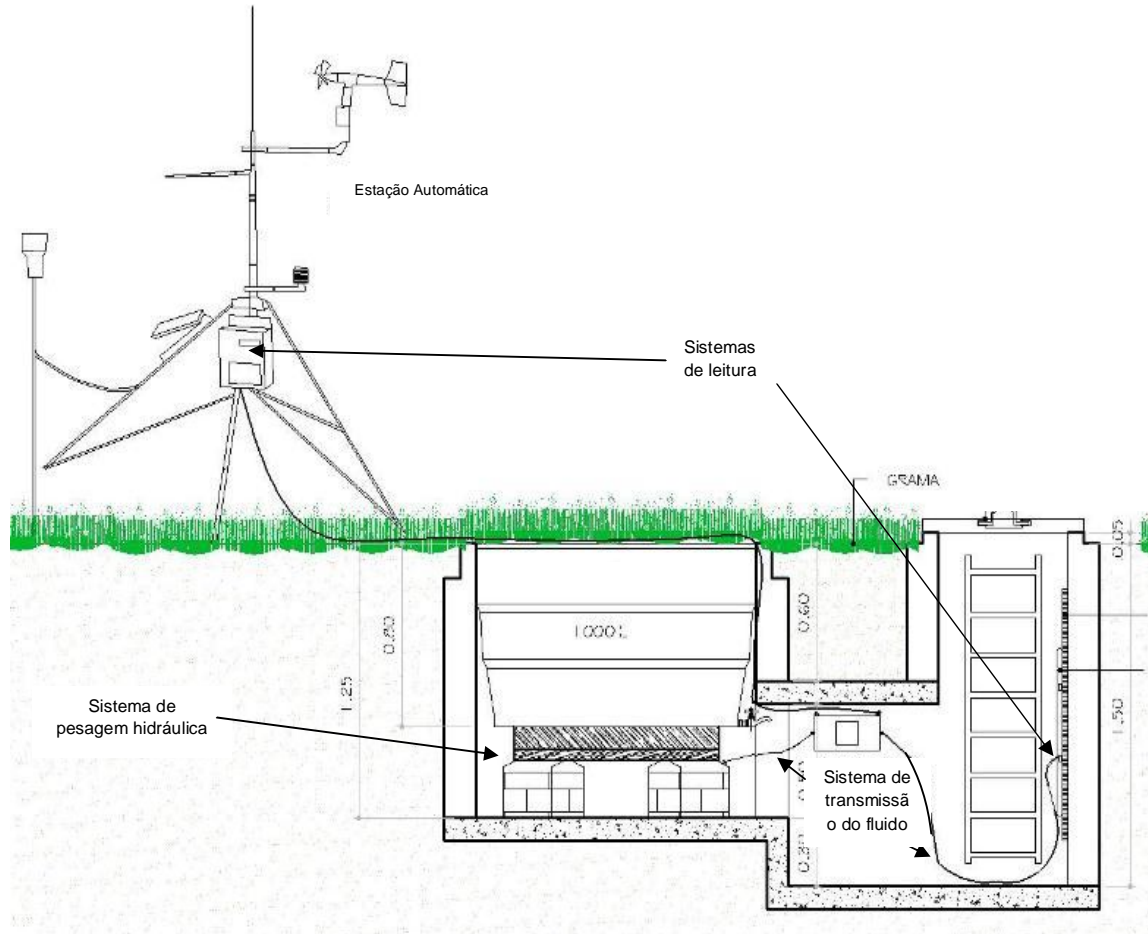


Figura 3.7. Vista lateral do lisímetro de pesagem hidráulica com seus componentes.

O reservatório externo do lisímetro de pesagem foi construído com paredes em alvenaria de tijolo (oito furos), diâmetro de 160 cm e altura de 125 cm. Esta profundidade do reservatório externo leva em consideração toda a estrutura do sistema de pesagem, na qual o reservatório interno (fibra de vidro) está apoiado. Em uma das laterais foi construído uma laje de concreto armado de 100 x 80 cm, na profundidade de 60 cm, com o objetivo de suporte do túnel de acesso ao sistema de pesagem hidráulica e a coleta da água drenada dos lisímetros (Figura 3.8). Até 110 cm de altura, a espessura do reservatório externo foi de 10 cm e os 15 cm restantes, obteve espessura de 5 cm, favorecendo que o gramado fique o mais uniforme possível, não deixando espaços na cultura dentro e fora do lisímetro. O reservatório interno do

lisímetro de pesagem possui dimensões e material semelhantes ao reservatório do lisímetro de drenagem, assim como o sistema de drenagem.

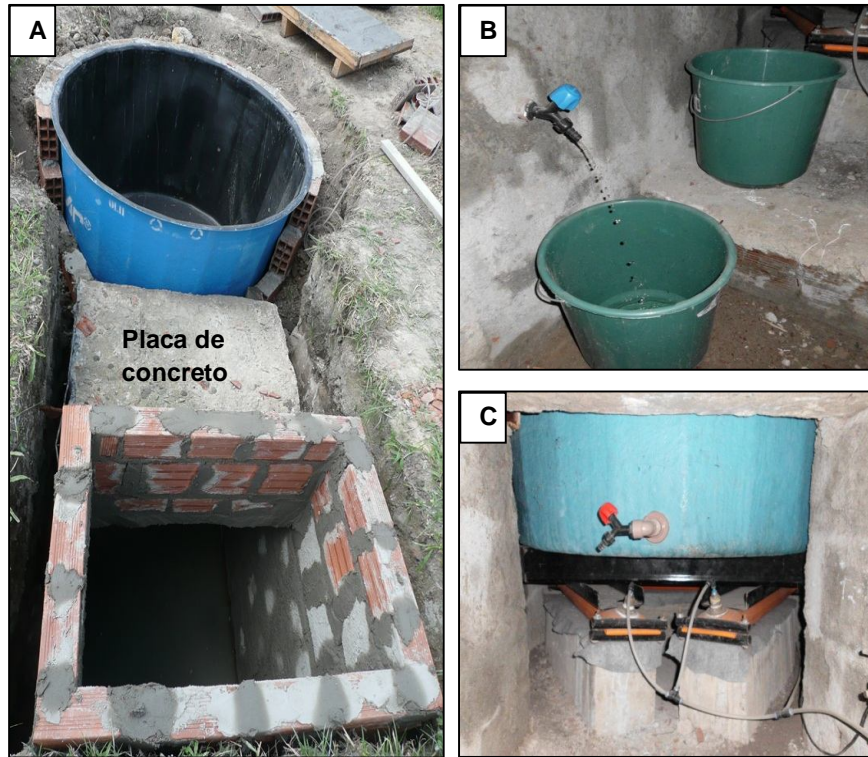


Figura 3.8. Vista externa do lisímetro interligado ao túnel de acesso através da placa de concreto (A); Vista interior do túnel de acesso aos drenos dos lisímetros (B) e ao sistema de pesagem hidráulica (C).

O sistema de pesagem é do tipo pesagem com células de carga hidráulica e é composto por três mangueiras fabricada com butil-propileno reforçado com tecido de nylon (Spirafat SDRL(S) marca Kanaflex 4”), com 95 cm de comprimento cada, fechadas nas extremidades através de pressão por seis presilhas, duas por mangueira. As presilhas são de tubo de ferro galvanizado de $\frac{3}{4}$ ” x 22 cm de comprimento, os tubos de ferro foram furados em seu diâmetro nas duas extremidade para a colocação dos parafusos de 9 mm com porcas e arruelas galvanizadas que serviram para a vedação das extremidades das mangueiras dobradas (Figura 3.9).

Na superfície superior das mangueiras foram acomodados, três perfis metálicos em forma de “U” com “alma” de 15 cm, abas de 5 cm, espessura de 3/16” e comprimento de

65 cm, sendo um perfil para cada mangueira, com o objetivo de distribuir o peso do lisímetro sobre a superfície dos colchões hidráulicos.

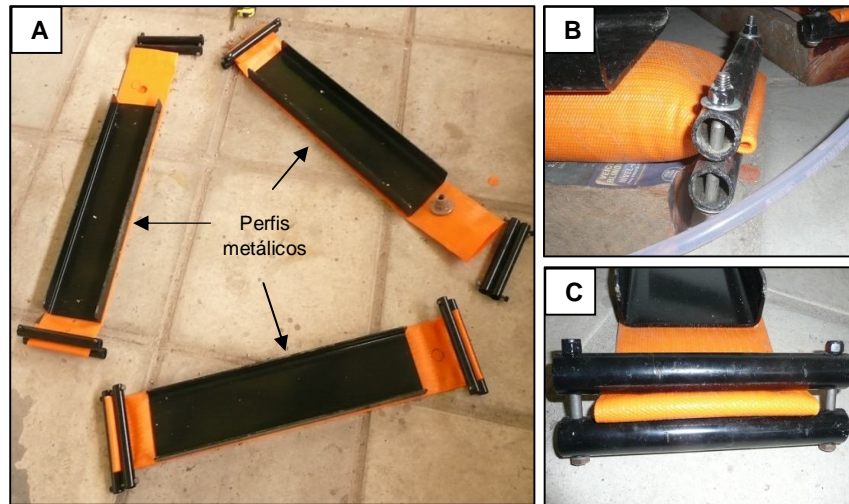


Figura 3.9. Mangueira tipo spirafat com os perfis metálicos em “U” (A) e presilha de vedação nas extremidades das células de cargas (B) e (C).

O sistema de transmissão de fluido foi inserido em uma única lateral de cada mangueira Spiraflat, através de adaptador tipo frange com rosca 1/2” em PVC. Este foi rosqueado e colado com adesivo para vedação de roscas. Em seguida foi rosqueado internamente por um conector em cobre de 1/2” do tipo “engate rápido” com saída reduzida para 5/16” de mangueira de nylon transparente de alta resistência e em seguida acoplada a um joelho 90° do tipo “engate rápido”, que conduz a mangueira ao tê, com mecanismo semelhante, que interliga as mangueiras vindas dos respectivos colchões hidráulicos ao sistema de controle geral do sistema de transmissão (Figura 3.10).

O sistema de controle geral é constituído de um painel em alumínio, chumbado na parede lateral do túnel de acesso. No painel estão inseridos: um sangradouro, caso necessite retirar água dos colchões hidráulicos; um registro geral de pressão, que controla todo o fluxo e tem como principal função o total fechamento do sistema; um tê que se situa logo após o registro geral e deriva o fluxo para os dois sistemas de leitura. Na saída vertical superior do tê de derivação foi inserido o sensor de pressão hidrostática (MPX5100GP – Motorola) e na saída horizontal lateral foi conectado outro registro que controla o fluxo de passagem para o manômetro com coluna de mercúrio (Figura 3.10).

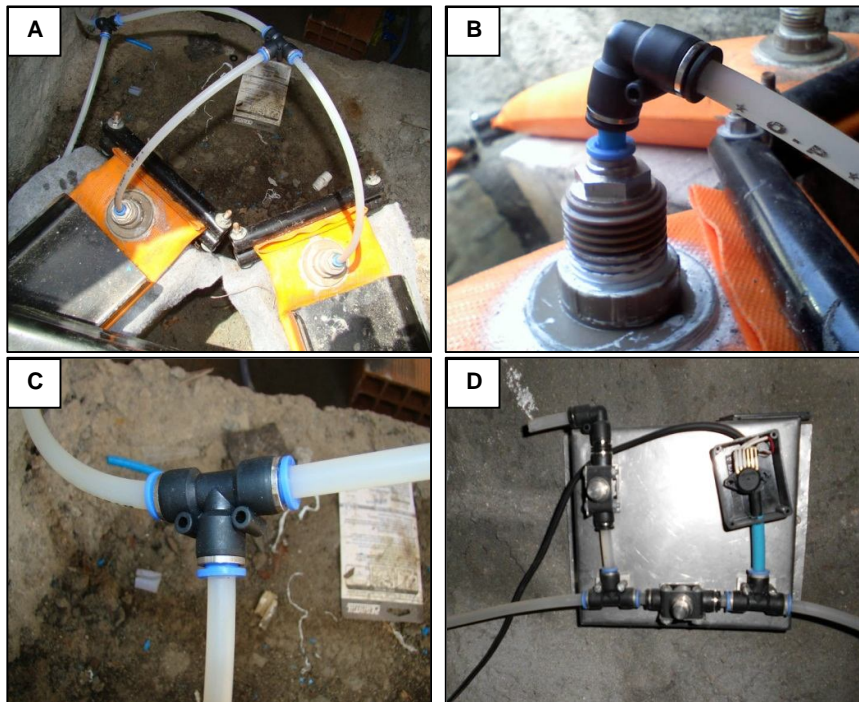


Figura 3.10. Mangueiras em nylon para transmissão do fluido entre os travessieiros hidráulicos (A), joelho de saída tipo engate rápido (B), tê tipo engate rápido (C) e sistema de controle geral de fluxo com sensor de pressão acoplado (D).

Para o apoio da caixa interna foi construído um estrado metálico em forma de triângulo equilátero, similar ao utilizado por Silva (2005) e Oliveira (2007). As dimensões do estrado são de 95 cm de comprimento, 10 cm de largura e espessura do perfil de 1/4"; círculo interno com diâmetro de 55 cm e espessura de 5/16". O estrado triangular foi colocado apoiado em cima dos três perfis metálicos, que por sua vez, transfere todo o peso e distribui nas células de carga hidráulicas (Figura 3.11). Na base do reservatório externo foram construídas três bases medindo (77 x 25 x 26) cm para apoio das células de carga hidráulicas. As bases foram construídas em concreto simples, niveladas e alinhadas em forma de triângulo equilátero, para fornecer estabilidade ao lisímetro e conseqüentemente leituras sem interferências. Essas bases permitem, principalmente, que as células de carga hidráulica trabalhem livremente sem que as presilhas tenham contato com o solo e as paredes, conforme Oliveira (2007).

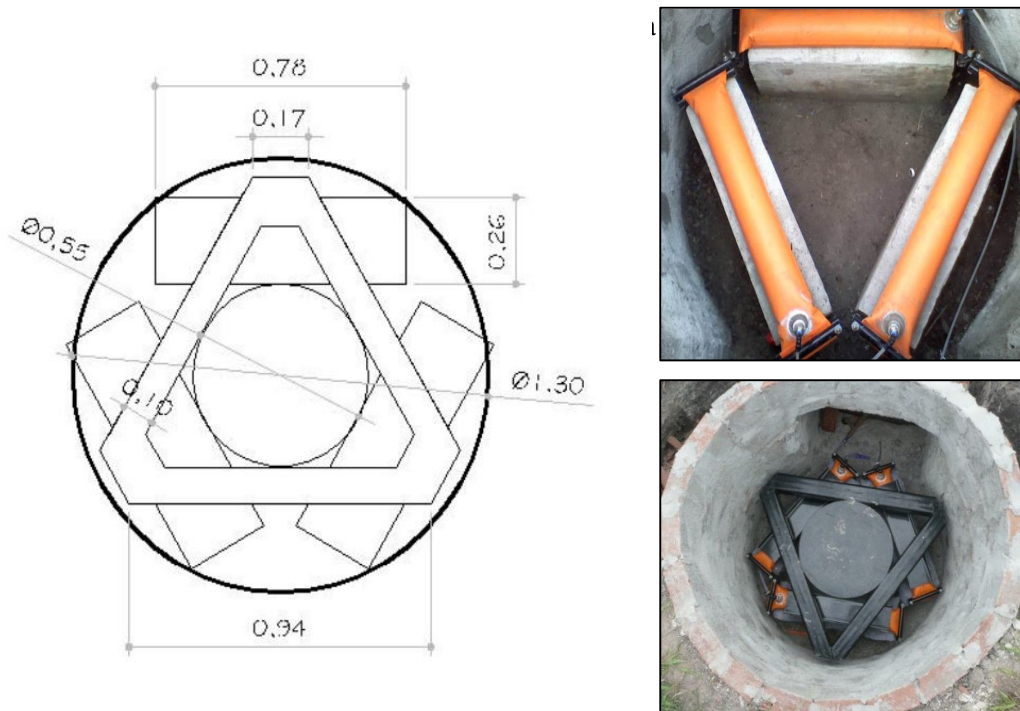


Figura 3.11. Detalhe do sistema de pesagem hidráulica com o estrado triangular sob as três bases de concreto.

O sistema de leitura do lisímetro de pesagem hidráulica é composto por dois sistemas independentes: (i) manômetro com pistão de mercúrio e (ii) sensor de pressão hidrostática (Figura 3.12). O manômetro de pistão de mercúrio consiste em dois recipientes cilíndricos de vidro medindo cada um 150 mm de comprimento, 25 mm de diâmetro interno, espessura de parede de 2 mm e fechados nas extremidades por caps de pvc de 32 mm, estes foram colados com o auxílio de cola a base de resina epóxi. No centro de cada cap foi inserido uma conexão em latão com saídas para mangueira de silicone com diâmetro interno de 2 mm, estas para livre circulação dos líquidos manométricos entre um cilindro e outro. O mecanismo de leitura do manômetro foi baseado em uma régua graduada em milímetros e inclinada 30°, este sistema permite um ganho de 0,5 mm em relação à régua na vertical, isto se deve ao $\text{sen } 30^\circ = 0,5$, sendo assim, uma lâmina de 1 mm na régua inclinada corresponde, na realidade, uma lâmina de 0,5 mm (OLIVEIRA, 2007). O sensor de pressão hidrostática foi o modelo MPX5100GP da Motorola, com sensibilidade de 0,01 mV e capacidade de leituras de até 10 m.c.a. Este foi acoplado ao duto final de comunicação das células de carga hidráulicas para registro automático de dados do potencial elétrico. As medições da resposta

eram armazenadas em um microprocessador eletrônico tipo datalogger, modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA), já situado na estação meteorológica, em que este armazenava os sinais do sensor de pressão hidrostática em mV.

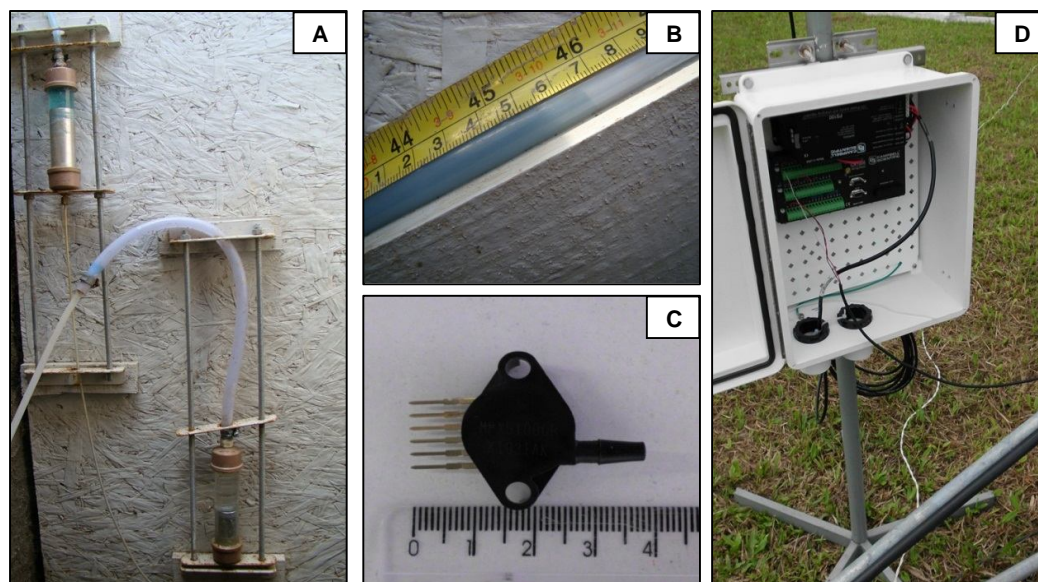


Figura 3.12. Sistemas de leituras do lisímetro de pesagem hidráulica: Manômetro com pistão de mercúrio (A), régua inclinada 30° (B), detalhe do sensor de pressão hidrostática (C) e sensor conectado ao datalogger (D).

3.4. Determinação do volume ideal do fluido no sistema de pesagem

Para a determinação do volume ideal de água no interior dos travesseiros foi necessário o enchimento dos travesseiros hidráulicos até a sua capacidade total. Entretanto antes disso, a água foi tratada com fervura e repouso por um período de 24 horas, com o intuito de eliminar as bolhas de ar no sistema, e em seguida foi acrescida de algicida (CuSO_4) na proporção de 0,50 g/L, para eliminação de possíveis proliferações de algas e outros microrganismos, concordando com Silva (2005) e Oliveira (2007) que adotaram os mesmos procedimentos. Depois de cheios, o conjunto de travesseiros atingiu um volume final de 20 litros de água, que logo foram fechados nas extremidades com as presilhas.

A determinação do volume ideal do fluido (água) deve ser realizada, pois a superfície de contato entre os travesseiros e a base tem que permanecer o mais constante possível (SILVA, 2000). Essa variação interfere na resposta da pressão transmitida ao sistema de leitura, e conseqüentemente, valores incorretos de pressão serão registrados. Assim, com

todo o sistema lisimétrico montado em campo e já preenchido com solo, foi retirado em sequências de um minuto volumes constante de 100 ml, sendo observada a variação das leituras de pressão até que as retiradas resultassem em registros de leituras proporcionais e estáveis, ou variações de pressões insignificantes (SILVA, 2000).

De posse dos dados de variação de pressão e do volume acumulado ou extraído, aplicou-se o método dos mínimos quadrados, onde se verificou melhor ajuste ao modelo polinomial de segunda ordem. Dessa forma o volume ideal do fluido é aquele correspondente ao ponto mínimo da equação polinomial encontrada na equação de regressão (equação 2):

$$\Delta L = a.V_{af}^2 + b.V_{af} + c \quad (2)$$

Em que:

ΔL é a variação de leitura (m);

V_{af} é o volume acumulado de fluido extraído (ml).

3.5. Determinação da umidade do solo do lisímetro

A umidade do solo do lisímetro foi determinada pelo método gravimétrico de Klar (1988) antes dos ensaios de calibração, coletando-se amostras deformadas nas três profundidades (de 0 a 20, de 20 a 40 e de 40 a 60 cm), onde as amostras foram acomodadas em latas de alumínio fechadas e levadas ao laboratório, lá foram pesadas (peso úmido) e colocadas em estufa a 105 °C durante 24 horas. Após este período, as amostras foram pesadas novamente (peso seco) e assim determinada a umidade na base de peso para o solo do lisímetro durante as calibrações. A umidade na capacidade de campo foi procedida seguindo-se a mesma metodologia adotada para a umidade real. A capacidade de campo (C_c) foi determinada saturando-se o solo até que a drenagem profunda iniciou no dreno da caixa lisimétrica, logo após cobriu-se a superfície do solo com uma lona plástica, com o intuito de evitar a evaporação superficial, forçando a água exclusivamente a drenar, e quando a drenagem tornou-se desprezível, o que ocorreu em 2 dias, foi obtido a umidade do solo na capacidade de campo, metodologia sugerida por Klar (1988).

3.6. Ensaio de calibração no lisímetro de pesagem

Antecedente a calibração, procedeu-se a confecção dos pesos ou massas padrão a serem utilizadas na calibração, como lâmina evapotranspirada. Desta forma, a relação foi feita levando em consideração a área superficial do lisímetro, e assim obter massas padrão equivalente a um milímetro de lâmina, como mostrado a seguir:

- Área superficial do tanque de grama = $(\pi \times D^2) / 4 \Rightarrow (3,1416 \times (130)^2) / 4 = 13.273,26 \text{ cm}^2$;
- Volume de água = área x lâmina = $13.273,26 \text{ cm}^2 \times 0,10 \text{ cm} = 1.327,32 \text{ cm}^3$;

Assim, para densidade da água de 1 g cm^{-3} , tem-se que:

1 mm de ETo \Rightarrow 1,32732 L de água ou 1.327,32 g de água ou 1,32732 kg de água.

O processo de calibração foi dividido em duas etapas. A primeira etapa ocorreu no centro do lisímetro, em que foram adicionados e retirados 50 sacos de brita nº 1, hermeticamente fechados com 1,3273 kg, representando 1,0 mm de lâmina evapotranspirada, totalizando um acréscimo 66,36 kg ou 50 mm de equivalente de água e a cada adição e retirada das massas esperou-se 1 minuto para estabilização do sistema de leitura.

Na segunda etapa ocorreu o mesmo procedimento, só que a superfície do lisímetro foi dividida em quatro quadrantes, onde foram adicionadas e retiradas as 25 massas padrão de 1,3273 kg totalizando um acréscimo de 33,18 kg ou 25 mm de lâmina, em que nessa segunda etapa não foi possível adicionar os 50 sacos, devido ao espaço diminuído dos quadrantes, por isso foi reduzido pela metade as massas padrão. Esta última etapa foi realizada com o intuito de verificar a estabilidade do equipamento com a determinação do erro médio posicional em relação ao centro, conforme Figura 3.13. Desta forma foram obtidos 50 pares de pontos no setor central e 25 pares de pontos em cada quadrante para confecção da equação de calibração através da regressão linear simples e correlação permitindo-se avaliar a linearidade, precisão e histerese do equipamento.

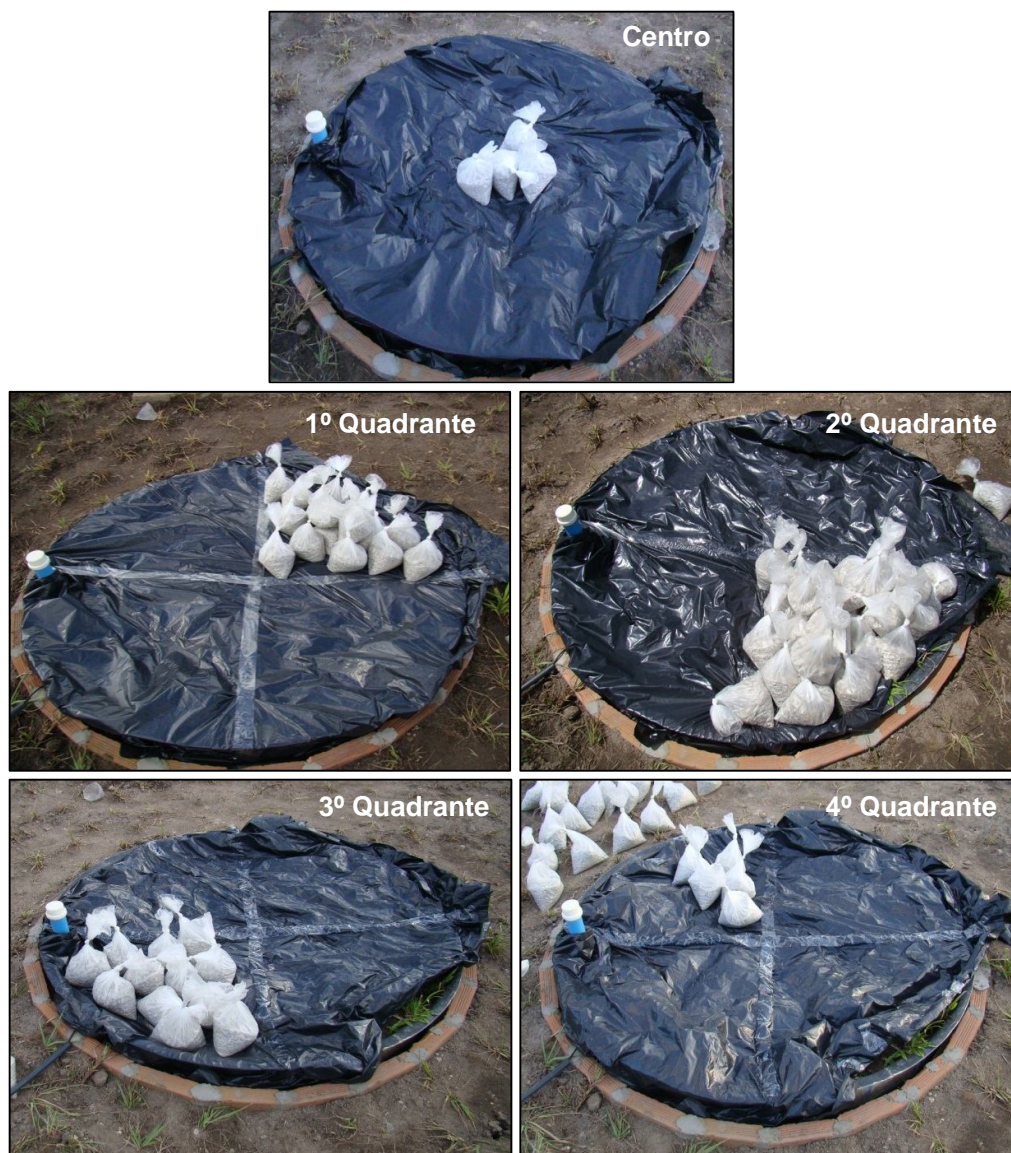


Figura 3.13. Detalhes do ensaio de calibração no setor central e nos quadrantes pela adição e retirada de massas padrão.

Os ensaios de calibração foram realizados nos dias 6 e 7 de fevereiro de 2012 de acordo com a metodologia apresentada por Campeche (2002). Conforme indica Faria et al. (2006) os ensaios de calibração foram procedidos em campo, e para se evitar a variação de massa do sistema devido à evaporação da água do solo, o lisímetro foi coberto com lona plástica. Inicialmente foram registrados os dados em milímetros e milivoltagem de ambos os sistemas de leituras sem as massas padrão, ou seja, teoricamente descarregado. Campeche et al. (2002) recomendam que os lisímetros de pesagem devem ser calibrados de preferência no

local de sua instalação, pois este obedece as mesmas condições ambiente, através da adição e retirada de massas conhecidas (Figura 3.13).

Os dados coletados nos ensaios de calibração foram analisados estatisticamente, através de regressão linear utilizando as planilhas eletrônicas do software Microsoft Office Excel 2010®, para gerar os gráficos de dispersão, com o intuito de verificar o melhor ajuste linear dos valores de carregamento e descarregamento do lisímetro, expresso pelo coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão.

O coeficiente de calibração (k) foi determinado pelo coeficiente angular da equação da reta de regressão do carregamento e descarregamento das massas padrão, em todos os quadrantes e centro do lisímetro, sendo que o coeficiente de calibração a ser utilizado para a determinação da evapotranspiração é o da parte central do lisímetro. A reta de regressão foi forçada na origem, resultando na anulação do coeficiente linear.

Foi avaliada ainda a histerese, que é um erro associado aos lisímetros de pesagem que podem ser avaliados mediante os ensaios de calibração. Esta se refere à diferença entre o sinal que é obtido pelo sistema de pesagem para um mesmo valor de massa, porém durante procedimentos distintos, neste caso o carregamento e o descarregamento. Sendo assim, após a calibração do lisímetro determinou-se a histerese por meio da equação 4:

$$H = M_C - M_D \quad (3)$$

Sendo:

H a histerese (kg);

M_C a massa determinada no carregamento (kg); e

M_D a massa determinada no descarregamento (kg).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Considerações sobre a construção dos lisímetros

Inúmeros são os relatos relacionados a projetos de construção de lisímetros, onde se têm abordado vários critérios que são imprescindíveis para um funcionamento satisfatório desses equipamentos em diversas situações e finalidades. Primeiramente, destaca-se que a área da superfície dos dois lisímetros instalados (drenagem e pesagem) foi de 1,32 m², discordando da recomendação de Aboukhaled et al. (1982) de que seja no mínimo de 2 m² esta área. Entretanto, Campeche (2002) comenta que lisímetros com menores áreas que a recomendada por este autor vem sendo muito utilizados, principalmente em pesquisas, pois facilitam a construção e diminuem os custos. Como exemplo têm-se os lisímetros construídos e monitorados por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santiago (2002), Silva (2005) e Oliveira (2007) com áreas respectivas de 1,25; 1,79; 1,79; 0,92; 1,04 e 1,52 m² e que resultaram em bons resultados operacionais. Dugas & Bland (1989) em estudo comparativo entre lisímetros de diferentes áreas superficiais, mostraram que não houve diferença estatística nos valores da evapotranspiração medida por lisímetros considerados pequenos (0,18 e 0,75 m²) e lisímetros maiores (3,00 m²).

Outro fator que se teve cuidado para não exceder os limites toleráveis foi a relação área de borda área superficial dos lisímetros. A área de borda corresponde ao espaço sem solo e sem vegetação, situado entre o lisímetro e a área circundante, ou seja, é a área que compreende a espessura das paredes do reservatório interno e do reservatório externo e o espaço vazio entre eles. Aboukhaled et al. (1982) comentam que este espaço sem solo e grama pode alterar as leituras lisimétricas, pelos efeitos de advecção, que provoca um superaquecimento na parede do lisímetro. Sediya (1996) recomenda que essa relação não exceda 10%. Assim a espessura da parede dos reservatórios externos na superfície do solo foi de 0,05 m e o espaço vazio entre as paredes foi de 0,02 m, que somados forneceram uma espessura de borda de 0,07 m, lembrando que a espessura da parede da caixa interna é desprezível. O raio de bordadura correspondeu a 0,66 m $[(1,32+0,07+0,07)/2]$ e o perímetro a 4,14 m $(2 \times 3,14 \times 0,66)$, resultando em uma área de borda de 0,29 m² $(4,14 \times 0,07)$ e conseqüentemente na relação entre a área de borda e a área superficial de 0,21 $(0,29 / 1,32)$. Esse resultado foi próximo às relações encontradas por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004), Silva (2005) e Oliveira (2007) de 0,38; 0,48; 0,48; 0,20 e 0,10, respectivamente.

O sistema de drenagem tanto do lisímetro de drenagem quanto do lisímetro de pesagem funcionou corretamente, fato este comprovado na determinação da capacidade de campo em que se adicionou água até atingir a capacidade de armazenamento do solo, e foi observado que após 110 litros aproximadamente, ocorreu o início da drenagem em ambos os lisímetros. Resultado semelhante foi verificado por Oliveira (2007) em que após aplicação de 98 litros foi que se iniciou a drenagem para fora dos drenos.

O princípio construtivo do lisímetro de pesagem disposto em forma de triângulo equilátero garantiu uma distribuição equilibrada das forças causadas pelas pressões do solo e das lâminas de água no interior do lisímetro. Este sistema foi similar ao desenvolvido por Silva (2005) e Oliveira et al. (2006).

O custo de construção dos lisímetros foi de R\$ 600,00 para o lisímetro de drenagem e de R\$ 4.400,00, aproximadamente para o lisímetro de pesagem hidráulica, sem contar com o valor do aparelho de aquisição de dados (datalogger), este último foi semelhante aos custos de construção de Oliveira (2007) que foi de R\$ 4.500,00 e acima dos custos de Santos (2004) que foi de R\$ 2.800,00. Lembrando que os custos envolveu mão-de-obra, plantio da grama, tanto nos lisímetros como em parte da área adjacente, materiais de alvenaria e tubulações, mercúrio para o registro das leituras no manômetro, acessórios auxiliares e custos casuais. Esse valor confere ao equipamento uma relação custo/benefício vantajosa em relação aos equipamentos eletromecânicos.

4.2. Volume ideal do fluido no sistema de pesagem

Inicialmente, o conjunto dos três travesseiros, interligados hidráulicamente, obtinha um volume de 20 litros. Com retiradas sucessivas de 100 mL, foi acumulado um volume de 4,5 litros, volume este que foi conseguido após a estabilização da coluna manométrica. Os travesseiros hidráulicos ficaram então com um volume final de 15,5 litros, este volume corresponde ao volume ideal detectável pelas variações mínimas da coluna manométrica. O conjunto de pontos obtidos pela variação de pressão em relação ao volume acumulado se ajustou bem ao modelo polinomial de 2ª ordem, demonstrado pelo elevado valor do coeficiente de determinação (R^2) de 0,9968 (Figura 4.1).

A variação de pressão registrada na coluna de mercúrio do manômetro apresentou uma tendência de leituras constantes, com o decréscimo de volumes iguais de 100 mL a partir do volume acumulado de 4000 mL, isso pode ser observado na figura 4.1. Esse fenômeno se deve ao aumento da área de contato entre os travesseiros hidráulicos e os perfis

metálicos fato este que contribuiu para as variações das leituras diminuírem, pois a pressão é inversamente proporcional à área de contato da base. Sendo assim a pressão do conjunto lisimétrico decresceu de 13,5 a 8,2 m.c.a, apresentando uma variação de pressão equivalente a 5,3 m.c.a. Este resultado corrobora com os de Silva (2000) que reduziu a pressão nos travesseiros hidráulicos com decréscimos sucessivos de 50 ml de água.

Segundo Silva (2000), volumes de fluido inadequado no interior dos travesseiros, não permitem uma área de contato constante. Isso interfere nas respostas da pressão que são transmitidas ao sistema de leitura. Kruse e Neale (1989) reforçam a discussão dizendo que nunca haverá uma superfície de contato constante para um dado volume de fluido nos travesseiros e recomendam que se procure um conteúdo para o qual a variação da superfície de contato seja mínima.

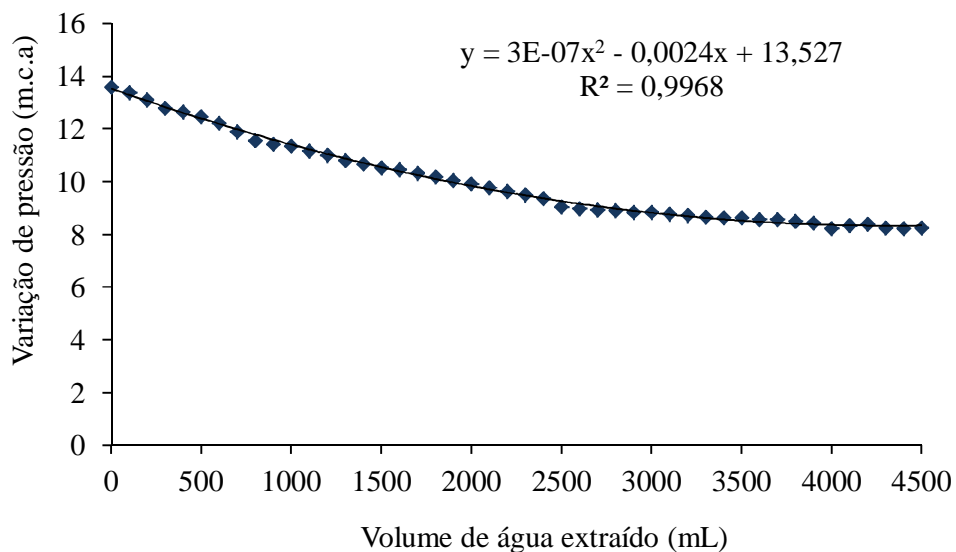


Figura 4.1. Variação de pressões nos travesseiros hidráulicos, em consequência das extrações sucessivas de volumes constantes de 100 mL de água.

Por outro lado, pela derivada primeira do modelo polinomial de 2ª ordem apresentada na equação 2, estimou-se o volume ideal de 4000 mL. Considerando que o conjunto dos três travesseiros foram preenchidos com 20 litros, no início de ensaio, assim o volume final ideal nos travesseiros era de $(20 - 4 = 16 \text{ L})$ 16 litros, conforme indicado pelo modelo.

Entretanto observando este e outros ensaios pôde-se perceber que a olho nu, tem-se certa dificuldade em detectar quando as variações de leituras se tornam constantes o

suficiente para caracterizar o volume ideal do fluido (calculado através da derivada 1º da regressão polinomial), resultando na superestimação deste volume, conforme também estabelecido por Silva (2005) e Oliveira (2007). No entanto, o volume ideal extraído no ensaio não interferiu na linearidade e precisão das leituras lisimétricas.

4.3. Coeficiente de calibração, precisão e histerese

Durante os ensaios de calibração, a umidade do solo era 92 % da umidade na capacidade de campo. Observa-se que nos ensaios de calibração a variação máxima de 50 mm de lâmina adicionada ou retirada excedeu a capacidade de campo em 34,16 mm de lâmina equivalente de água. Segundo Flumignan (2011) teoricamente, o trabalho de calibração ideal de qualquer lisímetro de pesagem deve ser com o solo apresentando umidade na condição de ponto de murcha permanente (PMP), para que o total de adições e retiradas de massas padrão possam representar a mesma massa da capacidade de armazenamento (CAD) do solo em estudado. Essa condição teórica permitiria trabalhar, durante o ensaio de calibração, na mesma faixa de uso das células de carga na situação em que os lisímetros serão utilizados durante o monitoramento da evapotranspiração da cultura, ou seja, entre PMP e a capacidade de campo (CC). Entretanto, na prática esta condição de umidade é muito difícil de alcançar, sendo realizados os ensaios de calibração com o solo em qualquer condição de umidade, preferencialmente mais seco.

De acordo com Gommola (2000), considerando-se que as células de carga são fabricadas para variar linearmente o seu sinal com a massa a qual é submetida, assume-se que a calibração realizada para uma determinada faixa seja válida para toda a faixa de trabalho da célula de carga.

Os resultados das calibrações com leituras no manômetro de mercúrio e no sensor de pressão são observados nas figuras 4.2 e 4.3, respectivamente. Podemos observar que tanto o manômetro como o sensor obteve comportamento linear, resultando em coeficientes de determinação (R^2) elevados de 0,999, tanto no centro como em todos os quadrantes, para carregamento e descarregamento de massas padrão, indicando que as respostas nos sistemas de leituras do lisímetro se ajustaram bem ao modelo de regressão linear. Esta linearidade dos dados verificada na calibração corrobora com a ideia que a área de contato dos travesseiros hidráulicos com os perfis metálicos (bases) permaneceu constante com a adição e retirada das massas padrão.

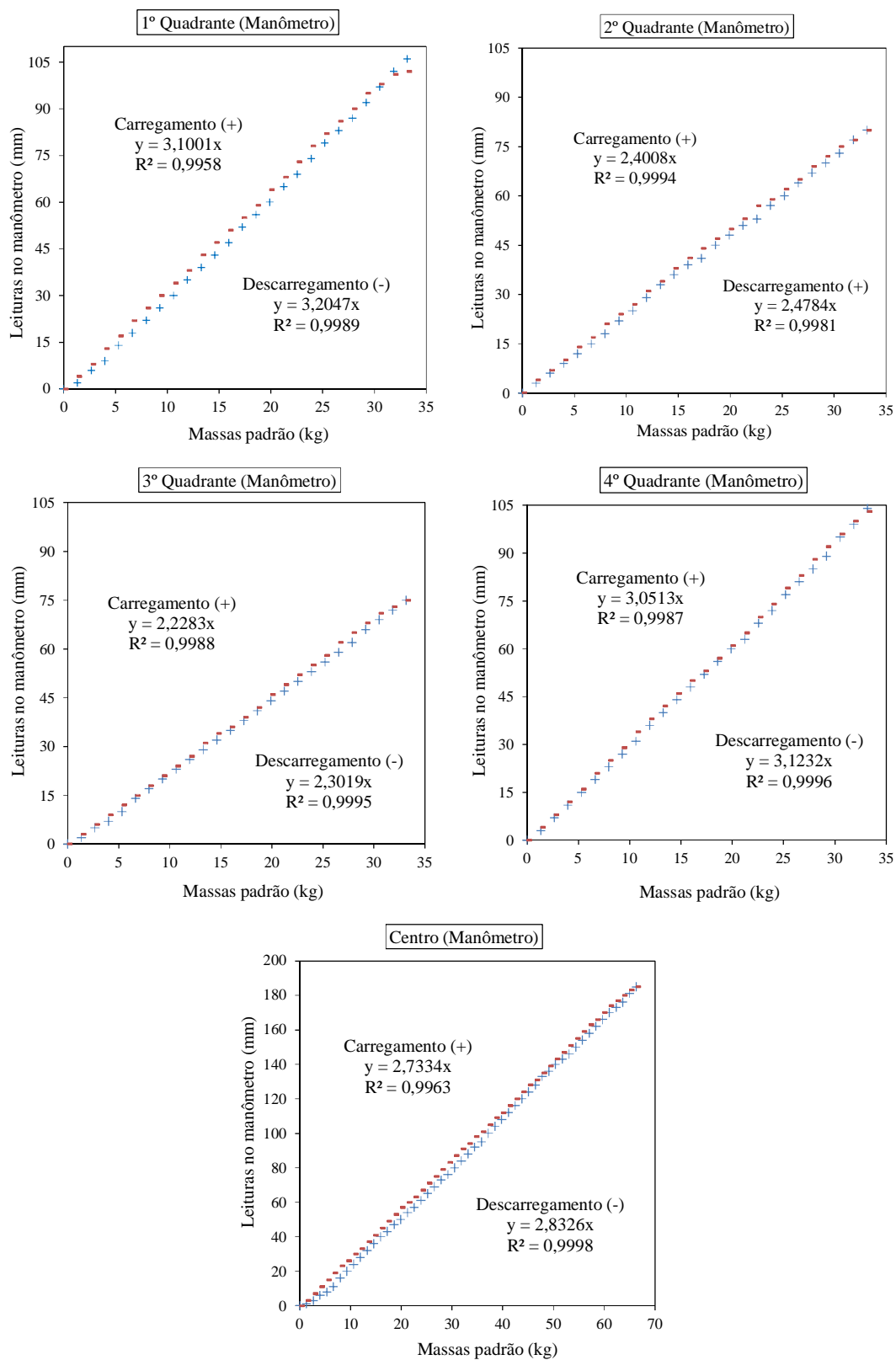


Figura 4.2. Curvas de calibração entre leituras observadas no manômetro e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.

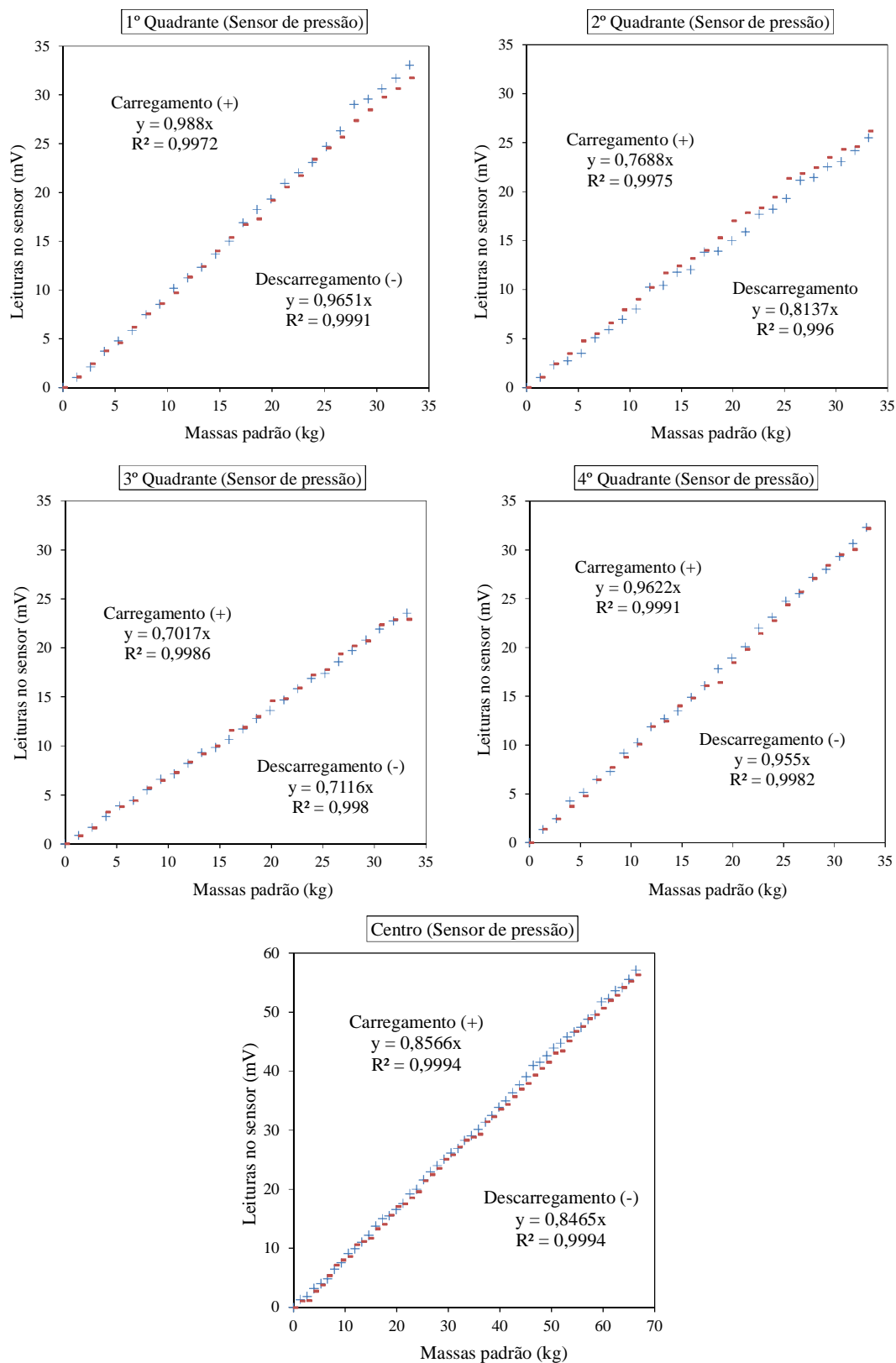


Figura 4.3. Curvas de calibração entre leituras observadas no sensor de pressão e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) nos quadrantes e centro do lisímetro.

Os coeficientes de calibração nos quadrantes e parte central do lisímetro, que foram obtidos pelo método de regressão linear corresponderam aos coeficientes angulares das retas para os ciclos de carregamento e descarregamento simultaneamente, variaram de 2,265 a 3,152 mm kg⁻¹ de leitura no sistema manométrico. Da mesma forma, para o sensor de pressão, o coeficiente de calibração variou de 0,706 a 0,976 mV kg⁻¹, conforme os resultados apresentados na Tabela 4.1. Na mesma tabela, o coeficiente de calibração do centro do lisímetro, para o sistema manométrico foi de 2,783 mm kg⁻¹ ou 0,359 kg mm⁻¹, ou ainda que a variação de 1 mm de leitura no manômetro corresponde a adição ou retirada de 0,359 litros de água. Para o sistema de leitura do sensor de pressão o coeficiente de calibração foi de 0,851 mV kg⁻¹ ou 1,174 kg mV⁻¹, ou seja, a cada mV de leitura no sensor de pressão é correspondente a 1,174 litros de água.

Tabela 4.1. Resumo dos coeficientes de calibração (k), ajustados para os dois ciclos de variação de massa, e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica.

Quadrantes do lisímetro	Coeficientes de calibração (k)	Coeficientes de calibração (k)
	(mm kg ⁻¹)	(mV kg ⁻¹)
	Manômetro	Sensor de pressão
1	3,152	0,976
2	2,439	0,791
3	2,265	0,706
4	3,087	0,958
Média dos quadrantes	2,735	0,857
Centro do lisímetro	2,783	0,851
Erro médio posicional	1,73 %	0,70 %

A estabilidade do lisímetro foi determinada pela média dos coeficientes de calibração dos quatro quadrantes comparada com o coeficiente do setor central do lisímetro, e foi verificado um erro médio posicional lido no manômetro e no sensor de pressão de 1,73 % e 0,70 %, respectivamente (Tabela 4.1). Este resultado indica que o lisímetro alcançou uma estabilidade melhor, e conseqüentemente leituras mais consistentes, que os lisímetros construídos por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004) e Oliveira (2007) com erro médio posicional de 4%; 3,52%; 2,11%; 3,93% e 2,31 %; respectivamente. Black et

al. (1968) citados por Silva et al. (2003), recomendam que o limite tolerável deve variar até 10 % de erro médio posicional, pois a inclinação do tanque possibilita também a desuniformidade do fluido nas câmaras hidráulicas e, conseqüentemente erros de leituras lisimétricas. Assim com o referido limite percentual de erro médio posicional esta possibilidade é diminuída.

Os resultados dos ensaios de calibração permitiram obter a relação entre os dados lidos no manômetro e no sensor de pressão, para o setor central do lisímetro de pesagem, conforme apresentado na figura 4.4. Na mesma figura, verifica-se que o modelo de regressão linear descreve adequadamente a relação entre a variação dos dados dos dois sistemas de leitura. Observa-se também que o elevado coeficiente de determinação ($R^2 > 0,99$) indica um comportamento altamente linear entre as variáveis estudadas. Silva (2005) encontrou coeficientes de determinação similares ao presente estudo e alta correlação, quando comparou diferentes sistemas de leituras, na ocasião foi comparada leituras no manômetro, em célula de carga e em um transdutor de pressão.

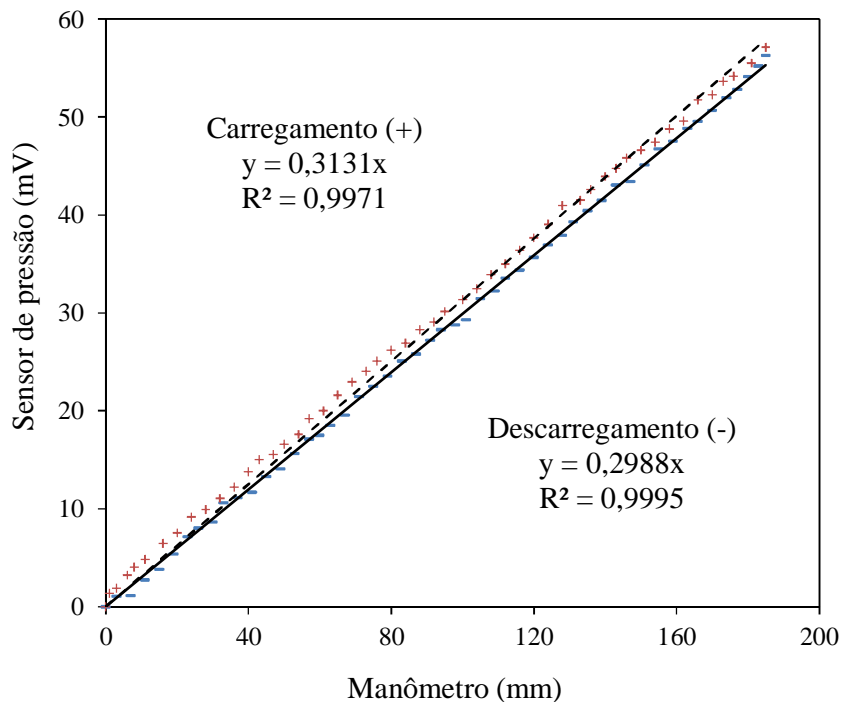


Figura 4.4. Relação entre as leituras do sensor de pressão e do manômetro de mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão, para o setor central do lisímetro.

A resolução, ou seja, a precisão do instrumento de leitura em detectar a menor lâmina de água adicionada ou retirada. No caso do lisímetro é o menor valor de ETo registrado no manômetro ou no sensor de pressão. Primeiramente calculou-se o fator de conversão de mm de leitura manométrica para mm de ETo utilizado para o cálculo da Evapotranspiração de referência (ETo), resultando em 3,690 ($1,32732 / 0,359$), isto significa que cada milímetro de ETo corresponde a uma variação de leitura no manômetro de 3,69 mm. O fator de conversão de mV de leitura do sensor de pressão para mm de ETo foi de 1,14 ($1,32732 / 1,174$) significando que cada mm de ETo corresponde uma variação de leitura do sensor de 1,13 mV.

Portanto, o menor valor detectável na escala de leitura, para os dois sistemas de leituras, foi igual ao menor valor plotado, sendo 1 mm no manômetro e 0,07 mV no sensor de pressão. Vale ressaltar que a configuração do manômetro de leitura foi similar ao construído por Oliveira (2007) que utilizou uma inclinação de 30° na régua de medição, assim quando se registra leitura de 1 mm, na realidade é de 0,5 mm, facilitando as leituras para o observador. Sendo assim, a resolução foi estabelecida pela razão entre o menor valor de leitura e o fator de conversão, resultando em precisões de até 0,135 mm de ETo no manômetro e de até 0,061 mm de ETo no sensor de pressão. Esta resolução manométrica do lisímetro foi compatível com as precisões encontradas por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004) Silva (2005) e Oliveira (2007), respectivamente de 0,21; 0,29; 0,13; 0,10; 0,24 e 0,15 mm. É importante salientar que o sensor de pressão alcançou uma resolução semelhante aos lisímetro de pesagem com células de carga eletrônica construído por Campeche (2002) e Bomfim et al. (2004) que foram de 0,04 e 0,18 mm, respectivamente.

Foi observado na Figura 4.4, que tanto o manômetro como o sensor de pressão apresentaram desvios entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento, e que esses desvios indicaram a existência de histerese. Para as leituras realizadas no manômetro de mercúrio, as massas padrão determinadas no descarregamento foram, em média, 1,802 kg (1,357 mm) maiores que aquelas determinadas na etapa de carregamento, apresentado na Figura 4.5. Do mesmo modo, observando a mesma figura, podemos perceber que as leituras obtidas pelo sensor de pressão hidrostática apresentaram baixa histerese, sendo as massas de carregamento, em média, 0,408 kg (0,307 mm) maiores que aquelas determinadas no descarregamento. Este resultado do sensor de pressão corrobora com os observados por Flumignan (2011), em que este observou valores maiores dos desvios no sentido de carregamento para a célula de carga do lisímetro de pesagem.

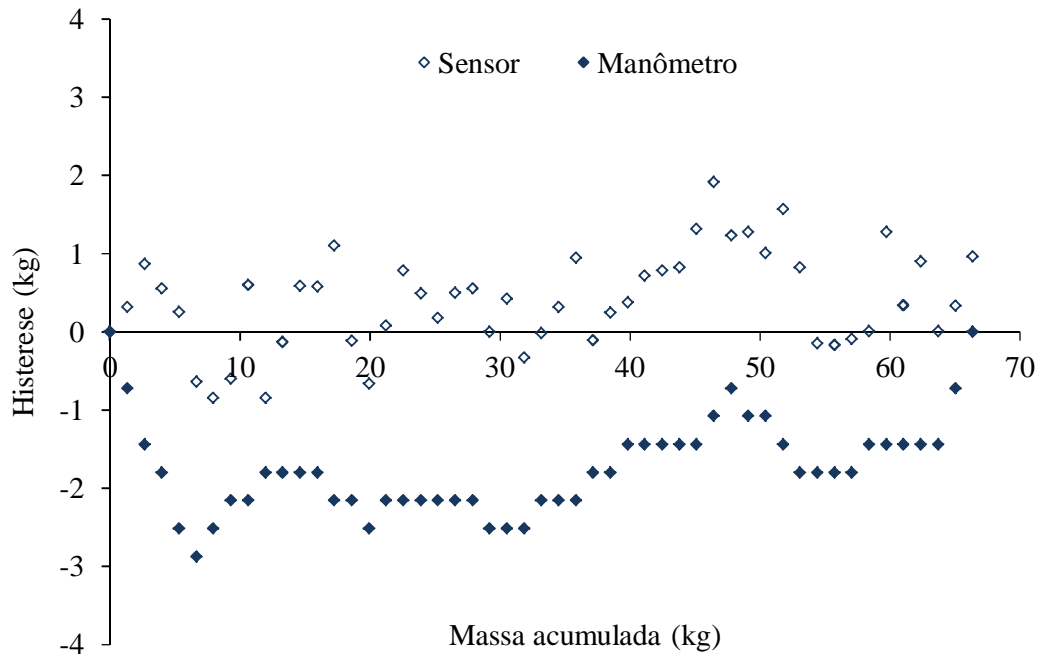


Figura 4.5. Histerese apresentada pela variação de massa de carregamento e descarregamento no manômetro e sensor de pressão durante a calibração, para o setor central do lisímetro.

Esses valores de histerese observados nos dois sistemas de leituras, principalmente no manômetro, pode está associado ao intervalo de leitura entre carregamento e descarregamento das massas padrão, que foi de 1 minuto. Este intervalo não foi suficiente para que os sistemas de leitura pudessem estabilizar totalmente e assim diminuir os erros de histerese. Neste caso sugere-se que as leituras sejam em intervalos de no mínimo 2 minutos, seguindo a metodologia adotada por Campeche (2002).

5. CONCLUSÕES

O volume ideal do fluido nos travesseiros hidráulicos foi de 16 litros. Este volume permitiu aumentar a área de contato e reduzir a pressão exercida sobre a coluna manométrica, possibilitando leituras confiáveis das variações de massas padrão no lisímetro.

As calibrações produziram respostas altamente lineares para todos os quadrantes e centro do lisímetro, sendo encontrados coeficientes de determinação de 0,999, tanto das leituras no manômetro quanto no sensor de pressão.

O coeficiente de calibração para os dados das leituras no manômetro foi de $2,783 \text{ mm kg}^{-1}$ e no sensor de pressão foi de $0,851 \text{ mV kg}^{-1}$.

O erro médio posicional no manômetro e no sensor de pressão foi de 1,73 e 0,70 %, respectivamente. Isso reflete em uma baixa tendência ao desequilíbrio das leituras por ocasião de inclinação lateral.

A precisão do lisímetro de pesagem foi de 0,135 mm de ETo registrado pelo manômetro e de até 0,061 mm de ETo registrado no sensor de pressão.

Em ambos os sistemas de leituras, foi observado erros de histerese, sendo esses erros maiores no manômetro comparado ao sensor de pressão.

6. RECOMENDAÇÕES

Na construção do tanque externo em alvenaria, sugere-se que o espaço entre este e a caixa interna seja entre 3 e 5 cm no máximo, esta medida permite que ambos não se toquem, nem extrapole a relação área de borda área superficial. Isso permitirá que possíveis declínios laterais não afetem as medidas.

Recomenda-se que a saída de drenagem livre seja na parte inferior central do lisímetro e não pela lateral, alteração esta que impossibilitará a retenção de água no fundo do tanque, garantindo que a água percolada seja totalmente drenada.

Na compra do material hidráulico, deve-se optar por marca certificada reconhecida no mercado, para que não ocorram acidentes com quebra e rachamento de peças.

Recomenda-se que no sistema de transmissão do fluido se utilize mangueiras de nylon rígida e não de plástico flexível, para que o sistema de leitura não sofra com oscilações causadas pela dilatação das mangueiras, que se expandem e contraem com a variação da temperatura e pressão. Foi verificado melhor estabilidade no lisímetro com as mangueiras de nylon rígida.

A automação das leituras através de sensores de pressão hidrostática, em lisímetros com mecanismo de pesagem hidráulica, é recomendável, pois este foi sensível em medir variações de pesos com melhor precisão que o manômetro de mercúrio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A; AFARO, A; SMITH, M. **Lysimeters - FAO Irrigation and Drainage**. paper 39. Rome, 68 p. 1982.

ALBUQUERQUE FILHO. J.A.C. **Eficiência do uso da água no cultivo do coentro e da salsa na presença de um polímero hidroabsorvente**. Campina Grande, Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 107 p. 2006.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. **Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy**. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 98, p. 899-920. 2011.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO. 300p. Irrigation and Drainage, n.56. 1998.

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R.G, HOWELL,T.A., PRUITT, W.O., WALTER, I.A., JENSEN, M.E. (ed.). **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. Proceedings of the International Symposium on Lysimetry**, New York: ASCE, p. 170-181. 1991.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. Piracicaba, SP, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 103p. 2008. (Tese de Doutorado).

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 596 p. 1989.

BERNARDO, S. 1995. **Manual de Irrigação**. 6.ed. Viçosa, UFV: Imp. Univ., 657p.

BERNARDO, S; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 625 p. 2007.

BERTONI, J. & BARRETO, G. B.O. **Ciclo hidrológico determinado por uma bateria de lisímetros**. 1º Congresso Pan-americano de Conservação do Solo. S. Paulo. Anais, p.65-73. 1966.

BLACK, T.A; THURTELL, G.W; TANNER, C.B. **Hidraulic load-cell lysimeters, construction, calibration and tests.** Soil Science Society American Proceedings, v. 32, p. 623-629. 1968.

BLOEMEN, G.W. **Hidraulic device for weighing large lysimeter.** Transactions of the ASAE, v.7, n.3, p.297-299. 1964.

BOMFIM, G.V.; AZEVEDO, B.M.;VIANA, T.V.A.; BORGES, R.L.M; OLIVEIRA, J.J.G. **Calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de utilização.** Revista Engenharia Agrônômica, v.35, número especial, outubro, 284 – 290 pp. 2004.

BRASIL. **Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional da Irrigação.** Departamento de Meteorologia. Normas Climatológicas 1961-1990. Brasília-DF: EMBRAPA, 84p. 1992.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications.** Dordrecht / Boston / Lancaster, D. Reidel Publishing Company, 299 p. 1982.

CAMARGO, A.P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo.** Bragantina, v.21, p.163-213. 1962.

CAMPECHE, L. F. S. M.; FOLEGATTI, M. V. X; NOVA, N. A. V.; FILHO, M. A. C.; PEREIRA, A. R. **Calibração e análise do desempenho de quatro lisímetros de pesagem baseados em células de carga.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31. Salvador. Anais... Salvador: 1 CD. 2002.

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.).** Tese (Doutorado) em Agronomia – Irrigação e Drenagem, ESALQ-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 67 p. 2002.

COSTA, M.S.V. **Determinação da evapotranspiração de referência por evapotranspirômetro de pesagem hidráulica com arranjo de pistão de mercúrio.** Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 81 p. 1999.

CRUZ, F.A. **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica - RJ.** 79 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2005.

DILLA, A.S; COX, L.M. **An economical hydraulic weighing evapotranspiration tank.** Transaction of the ASAE, St Joseph, v.16, n.2, p.294-295. 1973.

DUGAS, W.A. AND BLAND, W.L. **The accuracy of evaporation measurements from small lysimeters.** Agricultural and Forest Meteorology v.46, p.119-129. 1989.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro. 412p. 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2º ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, p. 212. 1997.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. **Construção e calibração de lisímetros de alta precisão.** Rev. Bras. de Eng^a. Agric. e Ambiental. V.10, n.1, p. 237-242. 2006.

FLUMIGNAN, D.L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.).** Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba. 200 p. 2011

FREITAS, J.A.G. **Evapotranspirômetro de pesagem por sensor de carga hidráulica: construção, calibração e testes.** Dissertação (Mestrado) em Agronomia. Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 122 p. 1994.

GANGOPADHYAYA, M. et al. **Measurement and estimation of evapotranspiration.** World Meteorological Organization, Geneva. 121 p. 1966. (WMO Tech. note no. 83 – no. 201, Tp 105).

GOMMOLA, G. **The application and installation of load cells.** Frankfurt: Zarbock. 178 p. 2000.

HOWELL, T.A.; McCORMICK, R.L.; PHENE, C.J. **Design and instalation of large weighing lysimeters.** Transactions of the ASAE. St. Joseph, v. 28, n. 117, p. 106-112. 1985.

HOWELL, T.A. **Lysimetry.** In: HILLEL, D. (Ed.). Encyclopedia of soils in the environment. Oxford: Elsevier. p. 379-386. 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **INMET-CLIMA**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima.php>> . Acesso em: 26 ago. 2009.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo. Nobel. 2ª Edição, 408 p. 1988.

KRUSE, E.G; NEALE, C.M.U. **Sources of Error in Hydraulic Weighing Lysimeter Measurements**. Transactions of the ASAE, St Joseph, v.32, n.1, p.81-96. 1989.

MACHADO, R.E. & MATTOS, A. **Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem**. Revista Brasileira de Agrometeorologia. Santa Maria, v.9, n.1, março, 147-151 p. 2001.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraibapa, CE**. Piracicaba, SP. 103p. 2002. Tese (Doutorado). Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA. E.F.; BERNARDO. S.; DIAS. G.P.; GRIPPA. S. (2003). **Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região norte fluminense. RJ**. Rev. Bras. Eng^a. Agríc. e Ambiental. v.7, n.2, p. 275-279.

MIRANDA, F.R; YODER, R.E; SOUSA, F. **Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, Campina Grande, v.3, n.1, 107-110 pp. 1999.

OLIVEIRA, L.M.M. **Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 111p. 2007. Dissertação de Mestrado.

OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G. L.; MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS; F.X.; SILVA, F.B. **Instalação e calibração de lisímetro de pesagem hidráulica na bacia experimental do riacho Gameleira - PE**. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 8, v. 2, Gravatá. Resumos, Gravatá: ABRH, p.195. 2006.

PEREIRA, A.R; VILLA NOVA, N.A; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(trans)piração**. Piracicaba: FEALQ, 183 p. 1997.

RODRIGUES, J.J.V. **Construção e testes preliminares de um evapotranspirômetro de célula de carga hidráulica.** In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Campinas, SBCS, 68 p. 1987.

SANTIAGO, F. S. **Efeito do Manejo da Irrigação na Salinidade e Umidade de um Neossolo Flúvico, com a Cultivar de Repolho Midori no Município de Pesqueira,** Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. UFRPE, Recife, p.01-84. 2002.

SANTOS, F.X. **Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diversos métodos no Agreste Pernambucano.** Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 74 p. 2004.

SANTOS, F.X.; MONTENEGRO, A.A.A.; RODRIGUES, J.J.V. **Instalação e calibração de mini-lisímetro de pesagem hidráulica** In Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, nov., Curitiba, 246 p. 2003.

SANTOS, F.X.; RODRIGUES, J.J.V.; MONTENEGRO, A.A.A. **Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica no Semi-árido Nordestino.** XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. julho, Canoas, rio Grande do Sul. 2005.

SEDIYAMA, G.C. **Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica.** Revista Brasileira Agrometeorologia. Santa Maria, v.4, n.1, maio, 1-12 p. 1996.

SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** In: MIRANDA, J.H. & PIRES, R.C.M. Irrigação – Série Engenharia Agrícola. Piracicaba, SP: FUNEP. 410 p. 2001.

SILVA, F. C. **Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência.** 70 p. 1996. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, K.C.M. **Avaliação do manejo da irrigação por microaspersão da cultura do repolho em região semi-árida.** Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife - Pernambuco, 84 p. 2003.

SILVA, T.J.A. **Aplicação de evapotranspirômetro de pesagem no estudo de relações entre a evapotranspiração de referência medida e estimada no semi-árido Nordestino.** Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 97 p. 2000.

SILVA, T.J.A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do Balanço de Radiação e lisimetria de pesagem hidráulica. Tese (Doutorado) em Agronomia. ESALQ- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo. 98 p. 2005.

SILVA, T.J.A.; MONTENEGRO, A.A.; RODRIGUES, J.J.V. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina - PE. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v.23, n.3, 511-520 p. 2003.

STONE, L. F; SILVEIRA, P. M. Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP. 49p. 1995. (Documentos, 55).