

4 Técnicas de Monitoramento das Parcelas de Erosão

4.1. Introdução

O ciclo da água em taludes tem seu início com a precipitação pluvial, cuja chegada à superfície do solo é controlada pela vegetação através de processos de interceptação e redistribuição pelas folhas, copas, galhos, troncos e serrapilheira. Alcançada a capacidade de estocagem de água pela vegetação, parte das chuvas penetra através das copas (*throughfall*) e/ou flui pelos galhos, troncos e folhagem (*stemflow*) atingindo a superfície do solo ou a serrapilheira, que atuam tanto na estocagem de água como na sua redistribuição.

A água que chega ao solo fica retida, escoando superficialmente ou infiltrando também de acordo com o tipo de vegetação ou técnica de bioengenharia presente, podendo ser armazenada em uma biomanta, na zona de raízes ou ser removida durante a drenagem, evaporação ou absorção pelas plantas. A parte que escoou, por sua vez, tende a se concentrar e, dependendo da cobertura vegetal existente, ou do manejo, ganha mais ou menos energia, gerando processos erosivos.

A Figura 4-1 ilustra os diferentes aspectos hidrológicos da vegetação em taludes.

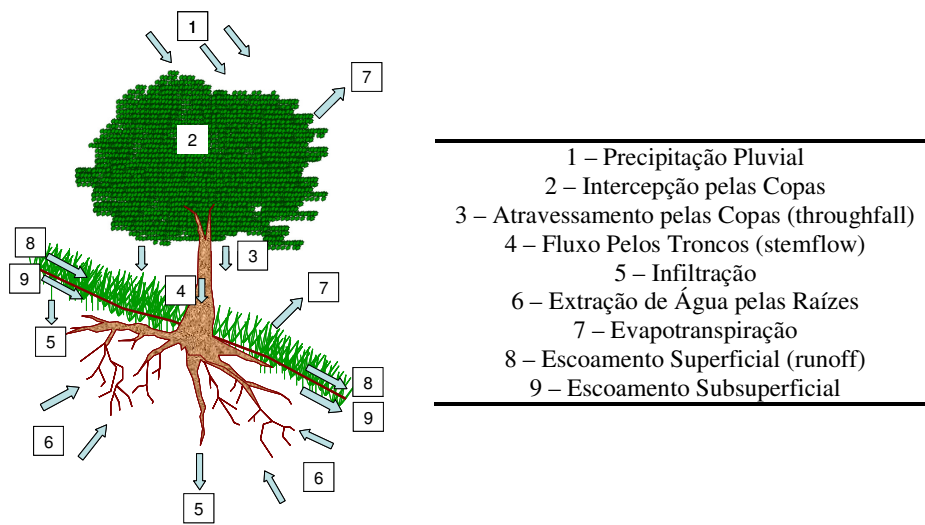


Figura 4-1 Aspectos hidrológicos da vegetação em taludes.

No que diz respeito ao ciclo da água no solo, a vegetação tem sido agrupada, junto ao solo e a atmosfera, sob um ponto de vista físico, dentro de um “*continuum*” unificado e dinâmico, no qual os processos de transferência são interdependentes como elos de uma cadeia (Hillel, 1998). Este sistema unificado tem sido chamado de sistema solo-planta-atmosfera (ou resumidamente SPAC). Gardner (1960), Cowan (1965) e Philip (1966) foram os primeiros reconhecer no sistema um fluxo de energia no sentido de diminuição de potencial total da água ao longo dos três componentes de forma interligada (Reichardt & Timm, 2004). O reconhecimento do sistema, de acordo com Hillel (1998, 2003) foi resultado do desenvolvimento isolado de campos de investigação específicos, como a mecânica dos solos não saturados, a fisiologia vegetal, a meteorologia, a agronomia e a hidrogeologia.

A fim de caracterizar o SPAC em termos físicos é necessário avaliar a energia potencial da água e suas modificações no tempo ao longo do curso percorrido no processo de evapotranspiração.

O regime de escoamento é diretamente proporcional ao gradiente de potencial e inversamente proporcional à resistência. A resistência oposta ao escoamento é em geral maior no solo que na planta, sendo maior ainda na transmissão das folhas para a atmosfera, onde a água muda seu estado de líquido para vapor e deve sair das folhas sob a ação de processo relativamente lento de difusão.

A diferença de potencial total entre solo e atmosfera pode atingir milhares de kilopascals, ocorrendo entre as folhas e a atmosfera as maiores diferenças de potencial global. A Figura 4-2 representa a distribuição dos potenciais da água no sistema SPAC.

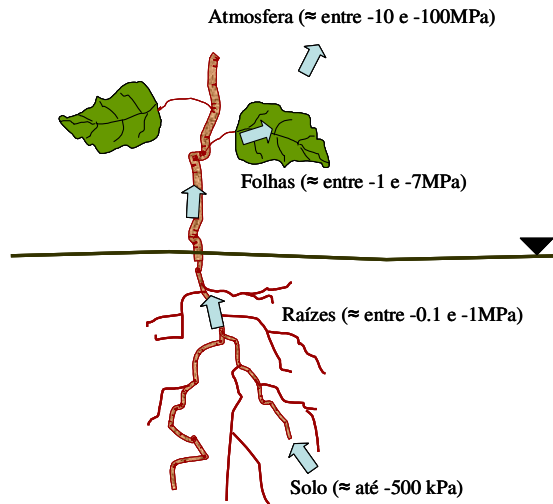


Figura 4-2 Distribuição dos potenciais da água no sistema SPAC.

Existem basicamente duas aproximações para investigação de processos físicos no âmbito do SPAC em seus diferentes compartimentos: balanço de água e balanço de energia. Assim como a Lei de Conservação de Massa permite-nos calcular o balanço de água, a Lei de Conservação de Energia pode ser aplicada para calcular o balanço de energia.

Os dois balanços não são independentes entre si, pois o destino da energia que atinge o solo é fortemente influenciado pelo conteúdo, pelo estado e pelo movimento da água, e vice-versa. O processo mais fortemente afetado é a evapotranspiração, pois é o principal consumidor no campo, tanto de energia quanto de água. Uma grande quantidade de calor latente é absorvida pela água que evapora do solo e da vegetação. Se tal quantidade puder ser medida, teremos a noção exata do regime de evapotranspiração sem que seja necessário medir diretamente o teor de umidade dos solos e os fluxos (Hillel, 1970).

Nos tópicos que se seguem, visando abranger os diferentes compartimentos hidrológicos do SPAC avaliados em campo no âmbito desta tese, são comentados aspectos da interpretação de dados de sistemas de monitoramento automatizado, importantes para o desenvolvimento de análises baseadas em balanços de água e energia.

4.1.1. Precipitação

A medição precisa da precipitação pluvial e o conhecimento de uma série histórica representativa são pré-requisitos no monitoramento hidrológico. Além

das normas utilizadas para instalação dos sensores (discutidas em detalhe mais adiante), em estudos envolvendo o monitoramento automatizado torna-se importante também uma investigação de séries históricas de estações meteorológicas das proximidades, visando entender o comportamento geral das precipitações locais. Além disso, a implantação de instrumentos como o pluviômetro tipo *Ville de Paris*, visando à calibração e posicionamento adequado de instrumentos automatizados, muitas vezes é considerada um pré-requisito para a validação de sistemas de campo recém instalados.

Neste sentido, cada local tem uma disponibilidade de dados que varia de acordo com o investimento específico realizado área. No caso da região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, os dados do Sistema de Alerta de Chuvas Intensas e de Deslizamentos em Encostas da Cidade do Rio de Janeiro fornecem valores de precipitação em intervalos de até 15 minutos. Criado em 1996 com o objetivo de emitir boletins de alerta à população, este Sistema utiliza informações de 32 estações pluviométricas automáticas instaladas no Município, sendo que todos os dados são disponibilizados via internet. Na Ilha do Governador, conforme já comentado, existe uma estação desta rede (Iate Club Guanabara), e além destes dados existe outra na estação automatizada na Ilha do Fundão (localizada no CENPES), também bastante próximo à Ilha do Governador. Com o objetivo de levantar os dados das séries históricas disponíveis no entorno da área de estudos foram analisados os dados destas duas estações, juntamente com os dados de monitoramentos no local e também em estação pluviométrica localizada no Morro do Radar, situado dentro da área patrimonial do Aeroporto Galeão.

4.1.2. Intercepção e Atravessamento

Os processos de intercepção e atravessamento podem ser tomados como ponto de partida para análises do SPAC. Tanto a parte aérea (copas arbóreas ou arbustivas) quanto à serrapilheira (cobertura morta dos solos) absorvem parte da energia das chuvas e previnem a compactação do solo por mecanismos de salpico (*rainsplash*). Da mesma forma, a vegetação e técnicas de manejo aumentam a rugosidade e permeabilidade dos terrenos favorecendo a infiltração e inibindo o escoamento superficial.

Os mecanismos hidrológicos de proteção do solo propiciados naturalmente pela serrapilheira (indiretamente pela vegetação) são considerados nos fundamentos de qualquer prática de manejo de solos, quer em âmbito agrícola, na engenharia geotécnica, na hidrologia de encosta ou na bioengenharia de solos. Sob o ponto de vista hidrológico, a serrapilheira pode ser considerada como um compartimento de estocagem de água, da mesma maneira que uma biomanta constitui um elemento que reproduz condições semelhantes, através de incorporações de cobertura morta, *mulching*. Sob o ponto de vista estrutural, entretanto, enquanto as biomantas são bastante uniformes, a serrapilheira existente em taludes pode ser dividida em zonas razoavelmente uniformes, pois o principal fator controlador é a inclinação.

O mecanismo de interceptação é bastante complexo e de difícil medição, o que ocorre porque o processo depende de diversos aspectos, como morfologia e densidade da cobertura vegetal, arquitetura do dossel, condições de umidade antecedente, intensidade e magnitude da precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade dos ventos. Apesar destas dificuldades, visando incluir o processo de atravessamento nas avaliações de monitoramento automatizado no talude, foram selecionados pluviômetros para medições acima e abaixo do dossel da vegetação. Para a realização das medições abaixo dos dosséis é necessária antes a geração de uma série de dados locais de precipitação pluvial acima do dossel, visando comparar os resultados obtidos com os diferentes pluviômetros utilizados nas condições locais.

4.1.3. Monitoramento da Água no Solo

O monitoramento da água no solo tem como objetivo a definição, para determinados períodos, de perfis de sucção ou umidade de campo. No estudo de técnicas de bioengenharia de taludes, o monitoramento da água no solo tem como finalidades principais avaliações de estabilidade, balanço hídrico e erosão de solos.

A sucção matricial é uma variável de grande importância para o monitoramento da disponibilidade de água para as plantas em estudos de balanço hídrico, bem como em estudos de estabilidade de taludes. A variável pode ser determinada direta ou indiretamente em campo a partir vários instrumentos, como

o tensiômetro, o bloco de gesso, sensores de condutividade térmica e sensores de matriz granular (GMS), sendo estes últimos discutidos com maior detalhe mais adiante.

O teor de umidade volumétrico dos solos (θ) por sua vez tem sido utilizado como parâmetro em aplicações com fins ambientais e agrícolas (Matsura, 2008; Jones *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2007), geomorfológicos e hidrológicos (Fernandes *et al.*, 2001), meteorológicos ou geotécnicos (Costa & Cintra, 2001; Silva *et al.*, 2002; Marinho & Vieira, 2005; Assis, 2008). No campo da engenharia geotécnica, aplicações recentes incluem estudos sobre coberturas finais e compactação de aterros, liquefação de areias, solos reforçados e estabilidade de taludes (Mendes 2008).

A relação existente entre a sucção matricial e o teor de umidade volumétrico dos solos, expressa pela curva característica de sucção, tem sido utilizada como um parâmetro para obter indiretamente estimativas de valores de campo de θ a partir de medidas diretas de Ψ e vice-versa. O entendimento do comportamento geral da curva característica, bem como suas relações com processos hidrológicos em campo, são questões atualmente de grande importância para o desenvolvimento da mecânica dos solos não saturados (Moncada, 2008). Os maiores desafios em relação ao monitoramento de campo referem-se a diferenças nas faixas de medição, resolução e precisão dos instrumentos, onde existe grande variabilidade de acordo com o princípio de funcionamento dos sensores e com os diferentes tipos de modelos.

Em determinado momento no campo os valores de Ψ e θ variam não só devido ao próprio comportamento da curva característica de sucção do solo, que apresenta histerese, mas também devido à sucção propiciada pela extração de água pelas raízes das plantas.

A relação existente em campo em determinado momento entre Ψ e θ pode ser resultado diversas etapas de umedecimento e secagem, num processo contínuo de difícil mapeamento, onde quantidades maiores de água são retidas durante os processos de secagem que a sorvida para a mesma sucção no processo de umedecimento, tudo isso condicionado ainda pela extração de água pelas raízes.

Com o objetivo de testar metodologias para investigação *in situ* do comportamento de solos não saturados, nesta tese instrumentos para a medição de Ψ e θ foram instalados acompanhando os mesmos pontos de monitoramento no

talude. Desta forma foi monitorado o desenvolvimento dos perfis de sucção e umidade ao longo do tempo, observando a relação expressa pela curva característica de sucção e confrontando estes dados com resultados experimentais de curvas obtidas em ensaios de laboratório e dados de ensaios de calibração das sondas de campo.

4.1.4. Escoamento Superficial

Tradicionalmente estudos sobre escoamento superficial e erosão dos solos têm se limitado a mensurações em intervalos diários, sendo dada ênfase, principalmente, à validação estatística dos experimentos. Um grande limitante deste método, que tem dificultado o entendimento dos mecanismos envolvidos, é o caráter imprevisível, pontual e efêmero da precipitação pluvial, fenômeno que o desencadeia.

Dentro desta problemática, estudos recentes têm se concentrado no desenvolvimento de sistemas automatizados para medição da erosão (van den Elsen *et al.*, 2003; Costa 2004; Peiling *et al.*, 2005; Jianghong & Tingwu, 2006; MCT/FINEP/CT-HIDRO, 2008). Estes métodos tendem a preencher uma grande lacuna, na medida em que possibilitam compatibilizar intervalos de coletas de dados com as demais medições automatizadas de campo, como o monitoramento da água no solo e parâmetros meteorológicos, onde existe grande avanço tecnológico.

Nesta tese foi desenvolvido um sistema automatizado para registro do volume de escoamento superficial, específico para parcela de erosão, através da instalados vertedores (tipo Calha Parshall) instrumentados com transmissores de nível ultra-sônicos. Dentre os desafios encontrados no desenvolvimento do sistema destacam-se dificuldades na aquisição de dados em intervalos de tempo reduzidos, alimentação do sistema, e autolimpeza com elevadas concentrações de sólidos no escoamento superficial.

4.1.5. Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo simultâneo de evaporação e transpiração de uma área vegetada. Dos diversos componentes do SPAC, discutidos até o momento, a evapotranspiração é o de mais difícil medição, além de ser

responsável por substanciais transferências de água, especialmente em regiões áridas (Hillel, 1970). Assim, observa-se a importância da inclusão deste parâmetro nas análises de dados de monitoramento hidrológico de campo.

A evaporação é o processo pelo qual a água líquida é convertida em vapor d'água (vaporização) e removida da superfície evaporante. Energia é requerida neste processo que pode ser proveniente de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento. Se a superfície evaporante é o solo, o grau de sombreamento do dossel da cultura e a quantidade de água disponível na superfície evaporante são os outros fatores que afetam o processo. Se o solo for capaz de suprir água rapidamente o bastante para satisfazer a demanda evaporativa, a evaporação do solo é determinada somente pelas condições meteorológicas. Se, por outro lado, o solo secar demais, num intervalo entre chuvas, o conteúdo de água na camada superior vai diminuindo e sua superfície seca (Couto & Sans, 2003).

A transpiração consiste na vaporização de água líquida contida nos tecidos das plantas e da remoção do vapor para a atmosfera. As culturas perdem sua água predominantemente nas superfícies das folhas (cutícula) através dos estômatos (Figura 4-3). Estes são pequenas aberturas nas folhas, através dos quais os gases e o vapor d'água passam. A água, juntamente com alguns nutrientes, é absorvida pelas raízes e transportada através da planta. A vaporização ocorre no interior da folha, nominalmente nos espaços intercelulares, e a troca de vapor com a atmosfera é controlada pela abertura estomatal. Praticamente toda a água absorvida é perdida pela transpiração e somente uma pequena fração é utilizada no interior da planta (FAO - Allen *et al.*, 1998).

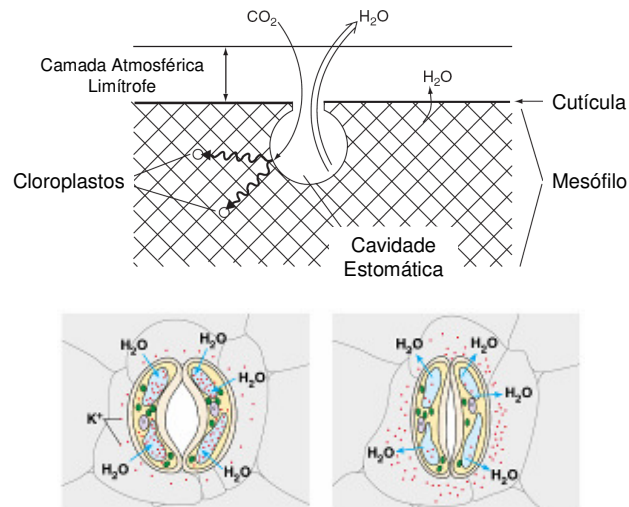


Figura 4-3 Representação esquemática dos estômatos, em corte (acima) e em planta, mostrando sua fisionomia quando aberto (abaixo à esquerda) ou fechado (abaixo à direita).

Evaporação e transpiração ocorrem juntas e não é fácil a distinção dos fenômenos. A evaporação de um solo é relacionada essencialmente à quantidade de radiação solar que incide em sua superfície. À medida que a vegetação vai se desenvolvendo e o dossel da cultura começa a sombrear o solo a este processo é reduzido. Quando a cultura ainda está pequena, muita água é perdida por evaporação, porém conforme a vegetação vai se desenvolvendo e cobrindo completamente o solo, a transpiração passa a se tornar o processo principal. A partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração é função de sua área foliar por superfície unitária de solo abaixo dela (Couto *et al.*, 2002).

Em estudos de evapotranspiração são considerados três tipos de parâmetros. Thornwaite e Holzman (1944) conceituaram a evapotranspiração potencial de uma cultura (ET_{pc}) como a perda de água de uma superfície completamente coberta por esta vegetação, sem restrições hídricas, em fase de desenvolvimento ativo e com extensão suficiente para minimizar o efeito-oásis. Define-se também Evapotranspiração real (ET_{rc}) como a evapotranspiração de uma determinada cultura sob condições normais, isto é, sem a obrigatoriedade do teor de umidade permanecer na capacidade de campo. Dessa forma, $ET_{rc} \leq ET_{pc}$.

Visando padronizar a evapotranspiração para uma região, em função de suas características climáticas, verificou-se a necessidade de definir a evapotranspiração potencial para uma cultura de referência (ET_0) que, segundo Doorenbos & Pruitt (1977), é definida como a quantidade de água perdida por

uma superfície de solo, coberta totalmente por uma vegetação hipotética com uma altura suposta de 0,12 m com $0,70 \text{ s m}^{-1}$ de resistência estomática e um albedo de 0,23. Nesse caso, a superfície de referência se aproxima a de uma extensiva superfície verde, sem restrições hídricas e com uma altura uniforme em ativo crescimento e completamente recobrando o solo (normalmente considera-se a grama).

A medição da evapotranspiração é bastante difícil, podendo ser feita por meio de métodos diretos ou indiretos. Os principais métodos diretos são: lisímetros¹, parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo e de entradas e saídas em grandes áreas.

Os métodos indiretos são divididos em dois grandes grupos: os evaporimétricos e aqueles que empregam equações. Os evaporímetros utilizados são basicamente de dois tipos: aqueles em que a superfície da água fica livremente exposta (tanques de evaporação) e aqueles em que a evaporação se dá numa superfície porosa (atmômetros). Pela simplicidade, os Tanques Classe A são bastante recomendados (Vieira, 1989; Reichardt, 1987, Bernardo, 1989).

No que diz respeito aos métodos indiretos que utilizam equações na estimativa da ET_0 , as estimativas são feitas com base em análises de balanço de energia. Os modelos variam desde os mais simples, com base somente em dados de temperatura do ar à sombra, até os mais complexos, fundamentados em vários parâmetros meteorológicos.

A escolha de determinado método dependerá essencialmente da disponibilidade de dados meteorológicos, instrumentos de medição e equações ajustadas para a região de estudo (Doorenbos e Pruitt, 1997). A calibração e ajustes de coeficientes para a região de interesse são necessários, entretanto para a utilização confiável dos mesmos (Pereira *et al.*, 1997).

¹ Depósito enterrado, aberto na parte superior, contendo o terreno que se quer estudar, podendo possuir ainda um sistema de pesagem na parte inferior. O solo recebe a precipitação e a água é drenada para o fundo do sistema onde é coletada e medida, sendo a evapotranspiração obtida através da diferença entre o drenado, precipitação e armazenamento. Classificam-se basicamente em dois grupos: os de pesagem (mecânica, eletrônica, hidráulica e de flutuação) e os volumétricos (de drenagem e de compensação de lençol freático constante).

Na prática, para fins de manejo e irrigação de solos ou em estudos geotécnicos de balanço hídrico, pode-se calcular a evapotranspiração de uma cultura (ET_c) através da estimativa da Evapotranspiração de uma Cultura de Referência (ET_0) e de coeficientes culturais (K_c), conforme explicado a seguir.

4.1.5.1. Evapotranspiração de Referência (ET_0)

Inúmeros são os métodos de estimativa da ET_0 , sendo quase todos baseados em equações empíricas ou semi-empíricas que utilizam parâmetros meteorológicos. Essas equações utilizam principalmente valores de temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa ou pressão de vapor do ar e vento. A maioria destes parâmetros pode ser obtida através de estações meteorológicas automatizadas, conforme discutido mais adiante em detalhe.

Em 1990, a FAO reuniu um grupo de 14 especialistas em evapotranspiração para rever o *Irrigation and Drainage Paper 24* preparado por Doorenbos e Pruitt (1977). Dessa reunião, e mais recentemente a partir de 1998, a FAO e a ASCE passaram a recomendar o método de Penman-Monteith como exclusivo método padrão para definir e computar a evapotranspiração na escala diária e horária. A evapotranspiração das superfícies de culturas é determinada então pelo coeficiente cultural (K_c), que relaciona a ET_c à ET_0 , sendo ainda ajustada em função de um coeficiente de estresse (K_s) que relaciona a evapotranspiração às condições de umidade de solo presentes.

A equação combinada de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração em termos gerais é a seguinte:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p 1 \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad \text{[Equação 4-1]}$$

Em que:

λ - Calor Latente de Vaporização [MJ kg^{-1}]

R_n - Radiação Líquida na Superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$);

G - Fluxo de Calor do Solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$);

$(e_s - e_a)$ Déficit de Pressão de Vapor;

r_a densidade do ar media à pressão constante;

c_p – calor específico do ar;

Δ - Inclinação da Curva de Saturação de Vapor D'água a T_{hr} (kPa °C);

γ - Constante Psicrométrica (kPa °C);

ρ_a – Massa Específica Média do Ar à Pressão Constante

r_s e r_a resistência superficial e aerodinâmica.

A aproximação de Penman-Monteith, nesta forma, inclui todos os parâmetros que governam as trocas de energia e fluxos de calor latente em superfícies vegetais (evapotranspiração) uniformes. A maior parte dos parâmetros pode ser medida ou estimada a partir de dados meteorológicos. Esta equação pode ser utilizada para cálculos diretos da evapotranspiração de qualquer tipo de vegetação, uma vez que a resistência superficial (r_s) e a resistência aerodinâmica (r_a) são parâmetros inerentes ao tipo de vegetação.

Na estimativa da ET_0 pelo método da FAO Penman-Monteith, considera-se a resistência estomática de 70 sm^{-1} e a altura da cultura hipotética fixada em 0.12 m (Allen *et al.*, 1998). A equação de Penman-Monteith (PM), parametrizada por Allen *et al.* (*op cit.*), pode ser escrita para estimativas da ET_0 em intervalos horários como:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^0(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{[Equação 4-2]}$$

Em que:

ET_0 - Evapotranspiração de Referência (mm hora⁻¹),

T_{hr} - Temperatura Média do Ar (°C),

$e^0(T_{hr})$ - Pressão de Saturação de Vapor a Temperatura do Ar T_{hr} (kPa),

e_a - Média Horária da Pressão de Vapor Atual (kPa),

u_2 - Média Horária da Velocidade do Vento (m s⁻¹).

A pressão de saturação do vapor da água (e^0) pode ser determinada como:

$$e^0 = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T_{hr}}{T_{hr} + 237.3} \right] \quad \text{[Equação 4-3]}$$

A Pressão de Vapor Atual é calculada como:

$$e_a = e^0(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100} \quad \text{[Equação 4-4]}$$

Em que:

RH_{hr} - Média Horária da Umidade Relativa (%).

A constante psicrométrica (γ) pode ser determinada como:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \cdot 10^{-3} P \quad \text{[Equação 4-5]}$$

Em que:

γ - Constante Psicrométrica (kPa °C),

P - Pressão Atmosférica (kPa),

λ - Calor Latente de Vaporização, igual a 2.45 (MJ kg⁻¹),

c_p - Calor Específico à Pressão Constante, igual à 1.132 x 10⁻³ (MJ kg⁻¹ °C),

ε - Razão entre peso molecular do vapor d'água e do ar seco=0.622.

A Declinação da Curva de Saturação de Vapor D'água (Δ) é obtida a partir da fórmula:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T_{méd}}{T_{méd} + 237.3} \right) \right]}{(T_{méd} + 237.3)^2} \quad \text{[Equação 4-6]}$$

Em que:

$T_{méd}$ é a Temperatura Média do Ar.

O fluxo de calor do solo (G) pode ser calculado de acordo com as relações abaixo:

Durante o dia: $G = 0.1R_n$

Durante a noite: $G = 0.5R_n$

A Radiação Líquida (R_n), ou saldo de radiação, é obtida a partir de medidas de Radiação Solar Global, efetuadas com Piranômetros. De acordo com a teoria:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{[Equação 4-7]}$$

Em que:

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas ou fração da radiação solar global que não é refletida, obtido através da relação:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad \text{[Equação 4-8]}$$

Em que:

R_s = Radiação Solar Global medida no piranômetro

α = Albedo² –para superfícies gramadas assume-se hipoteticamente = 0.23.

$$R = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad \text{[Equação 4-9]}$$

Em que:

σ Constante de Stefan-Boltzmann [$4.903 \cdot 10^{-9}$ MJ K⁻⁴ m⁻² dia⁻¹];

$T_{\max, K}$ - Temperatura Máxima Absoluta em 24hs [$K = ^\circ C + 273.16$];

$T_{\min, K}$ - Temperatura Mínima Absoluta em 24hs [$K = ^\circ C + 273.16$];

e_a - Pressão de vapor atual [kPa];

R_s/R_{so} - Radiação de ondas curtas (≤ 1.0);

R_s – Radiação Solar Global Medida [$MJ m^{-2} dia^{-1}$];

R_{so} – Radiação Solar Global à Céu Aberto [$MJ m^{-2} dia^{-1}$].

$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a$

Em que:

z – Elevação acima do nível do mar (m)

R_a – Radiação Solar Extraterrestre [$MJ m^{-2} hr^{-1}$], que para períodos curtos é

obtida através da equação:

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\text{sen}(\omega_2) - \text{sen}(\omega_1))]$$

[Equação 4-10]

Em que:

G_{sc} - Constante Solar = $0.0820 MJ m^{-2} min^{-1}$;

d_r - Inverso da Distância Relativa Sol-Terra, igual a:

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad \text{[Equação 4-11]}$$

Em que J é o dia Juliano³.

² O albedo é o fator de reflexão da superfície (adimensional) em relação à radiação de onda curta. Este coeficiente varia com a cor, a aspereza e a inclinação da superfície, sendo da ordem de 0.05 a 0.2 para água, 0.1 a 0.4 para vegetação, 0.15 a 0.5 para solo descoberto e até 0.9 para neve (Hillel, 1970).

δ - Declinação Solar [radianos], igual a:

$$0.409 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad \text{[Equação 4-12]}$$

Em que:

φ - Latitude [radianos];

ω_1 - Ângulo de Incidência Solar ao Início do Período [radianos], sendo que:

$$\omega_1 = \omega - \left(\frac{t_1}{24}\right) \quad \text{[Equação 4-13]}$$

Em que:

ω_2 - Ângulo de Incidência Solar ao Final do Período [radianos], sendo que:

$$\omega_2 = \omega + \left(\frac{\pi_1}{24}\right) \quad \text{[Equação 4-14]}$$

$$\omega = \frac{\pi}{12} \{ [t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c] - 12 \} \quad \text{[Equação 4-15]}$$

Em que:

t - Hora (decimal)

L_z - Longitude do centro da zona de fuso [graus a Oeste de Greenwich];

L_m - Longitude local [graus a Oeste de Greenwich];

S_c - Correção Sazonal [hr], igual a:

$$S_c = 0.1645 \text{ sen}(2b) - 0.1255 \text{ cos}(b) - 0.025 \text{ sen}(b)$$

Em que b é um coeficiente de ajuste igual à:

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad \text{[Equação 4-16]}$$

³ É o número do dia contado a partir do primeiro do ano (31 de dezembro = 364; 1 de janeiro = 1).

4.1.5.2. Coeficientes Culturais (K_c) e Estimativa da Evapotranspiração da Cultura (ET_c)

O coeficiente de cultura (K_c) é dado pela relação entre a evapotranspiração máxima de cultura (ET_m), considerada como a que ocorre em condições hídricas ideais no solo, e a evapotranspiração de referência ET_0 , conforme a expressão:

$$K_c = ET_m/ET_0 \quad \text{[Equação 4-17]}$$

O coeficiente de cultura (K_c) é um indicador de grande significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, arquitetura da planta (parte aérea e sistema radicular), cobertura vegetal e transpiração da planta, o que se relaciona principalmente ao estágio de crescimento (Denmead & Shaw, 1962; Jensen, 1969; Wright, 1982; Allen *et al.*, 1994a e Allen *et al.*, 1994b). Os valores variam normalmente entre 0.5 e 1.5. Para a obtenção dos valores de valores de K_c , são utilizados métodos diretos para obtenção de valores de ET_m , como os lisímetros.

A determinação de ET_c pode ser também feita diretamente com o uso de parâmetros das plantas, como condutância estomática, obtidos através de porometria, e Índice de Área Foliar, que possibilitam determinar os valores de resistência superficial (r_s) padronizados no Critério FAO/PM. Detalhes do processo de modificação da equação de PM para diferentes valores de Índices de Área Foliar, Condutância Estomática, Albedo etc. são descritos no tópico sobre caracterização da vegetação.

4.2. Parâmetros Meteorológicos de Superfície

A observação de parâmetros meteorológicos de superfície é realizada em Estações Meteorológicas, locais tecnicamente escolhidos e preparados para tais fins. Os tipos de equipamentos, manuseio, técnicas de calibração e aferição, ajustes, correções, estimativas, horários de leitura, tratamento e transmissão dos dados e uso operacional são sistematizados e padronizados pela OMM⁴.

A instalação em uma área plana, cercada, de fácil acesso e coberta com grama aparada são pré-requisitos. Os instrumentos devem ficar a uma distância mínima de obstáculos que possam projetar sombra ou interferir nas condições atmosféricas locais. Os locais projetados ou preparados para receber Estações Meteorológicas são denominados Abrigos Meteorológicos. Os detalhes e critérios para instalação destes locais encontram-se no subitem 5.8.

4.2.1. Tipos de Estações Meteorológicas de Superfície

Estações Meteorológicas de Superfície podem ter como propósito desde medidas simples de temperatura e umidade do ar, visando monitoramento do tempo, até medições complexas para obtenção da ET_0 .

No que diz respeito às tecnologias empregadas, existem em duas modalidades: Convencionais e Automáticas. De acordo com sua utilização, as Estações Convencionais são agrupadas em cinco tipos: Estações Sinóticas, Estações Climatológicas, Estações Agrometeorológicas, Estações Meteorológicas Aeronáuticas e Estações Especiais (Vianello & Alves, 2002).

Nas Estações Sinóticas são realizadas observações para fins de previsão do tempo em horários padronizados internacionalmente, empregando-se o Tempo Médio de Greenwich ou “tempo universal” (TMG). Estações Meteorológicas Aeronáuticas são instaladas visando registrar e processar informações meteorológicas de superfície e altitude para fins aeronáuticos e sinóticos.

As Estações Climatológicas são divididas em Ordinárias e Principais. As Ordinárias são constituídas por abrigo meteorológico de pequeno porte, termômetros e pluviômetros. Já as Estações Climatológicas Principais devem ser capazes de realizar observações às 12:00, 18:00 e 24:00 (TMG), possuir um

⁴ Organização Mundial de Meteorologia (*WMO World Meteorological Organization*).

abrigo termométrico, termômetro de máxima, termômetro de mínima, psicrômetro com ventilador ou aspirador, pluviômetro, barômetro, cata-vento, anemômetro e/ou anemógrafo, evaporímetro de Piche, barógrafo, termógrafo ou termohigrógrafo, higrógrafo, pluviógrafo, heliógrafo e termômetros de solo (INMET, 1999).

Estações Agrometeorológicas realizam observações meteorológicas e fenológicas para relacionar os elementos meteorológicos às atividades agrícolas.

Para definição dos instrumentos presentes em uma Estação Meteorológica Automatizada (EMA ou PCD⁵) utiliza-se quando para determinação da ET₀ os mesmos parâmetros dos instrumentos do tipo Micrometeorológico.

4.2.2. Instrumentação Implementada

De grande importância na agrometeorologia, os sistemas de aquisição automática de dados vêm favorecendo o monitoramento das variáveis relacionadas ao SPAC ligadas direta ou indiretamente com o crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas, melhorando o manejo da atividade agrícola. Um das ferramentas mais importantes nesse sentido é a Estação Meteorológica Automatizada (EMA).

A seguir são descritos os diferentes tipos de sensores utilizados para realização de medições meteorológicas de superfície no Campo Experimental do Galeão. Com exceção dos pluviômetros *Decagon* e *Ville de Paris*, todos os demais sensores fazem parte da EMA instalada (*Campbell SCI*), descrita com maior detalhamento no subitem 5.2.3.5.

4.2.2.1. Pluviômetros

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda que o sensor de precipitação atmosférica mantenha-se em local livre em distância igual ou superior a quatro vezes a altura de eventuais obstáculos. A área de captação da precipitação deverá estar posicionada em plano horizontal a uma altura de 1,5 m.

⁵ Termo muito utilizado em meteorologia para referir as estações automatizadas (Plataforma de Coleta de Dado).

O local de instalação de pluviômetros deve ser recoberto por grama ou vegetação *local* de baixo porte.

Para o desenvolvimento desta tese foram utilizados três tipos de mecanismos para medições de precipitação pluvial, sendo um deles de registro manual, e os demais de registro automatizado (dois deles instalados fora do abrigo meteorológico (ver Figura 4.4.).

O pluviômetro automático instalado dentro do abrigo meteorológico, acoplado ao tripé (base) da estação foi o Modelo I2H (*Davis*) - Pluviômetro de balança, que possui uma precisão 4% (a 100 mm/h), sendo a faixa de leitura de 0 a 500 mm/h, e uma área de captação de 124cm², uma balança de 5.4 cm³, resultando em medições com uma precisão de 0.254mm.

Dentro do abrigo meteorológico, separado dos demais sensores, foi instalado um pluviômetro do tipo *Ville de Paris* visando gerar dados para validar os registros automatizados e também como parâmetro auxiliar nas medidas da erosão. Neste sentido, o pluviômetro foi utilizado para obter os totais pluviométricos relativos ao exato período de aferição das parcelas de erosão.

Os pluviômetros convencionais se baseiam na captação e acumulação de chuva para posterior medição com uma proveta graduada. O *Ville de Paris*, modelo considerado o mais tradicional no Brasil, consiste em um aro circular de captação com 400 cm², dotado de um cone coletor, encimando um recipiente com capacidade de acumulação de cerca de 5 litros. O corpo é construído em chapa de aço inoxidável, com 630 mm de comprimento e sua capacidade de acumulação em termos de altura de precipitação é de 125 mm. Apesar de rudimentares, sua área de captação (400cm²) possibilita obter resultados com uma boa resolução, sendo medido 0.025mm de chuva a cada 1mL.

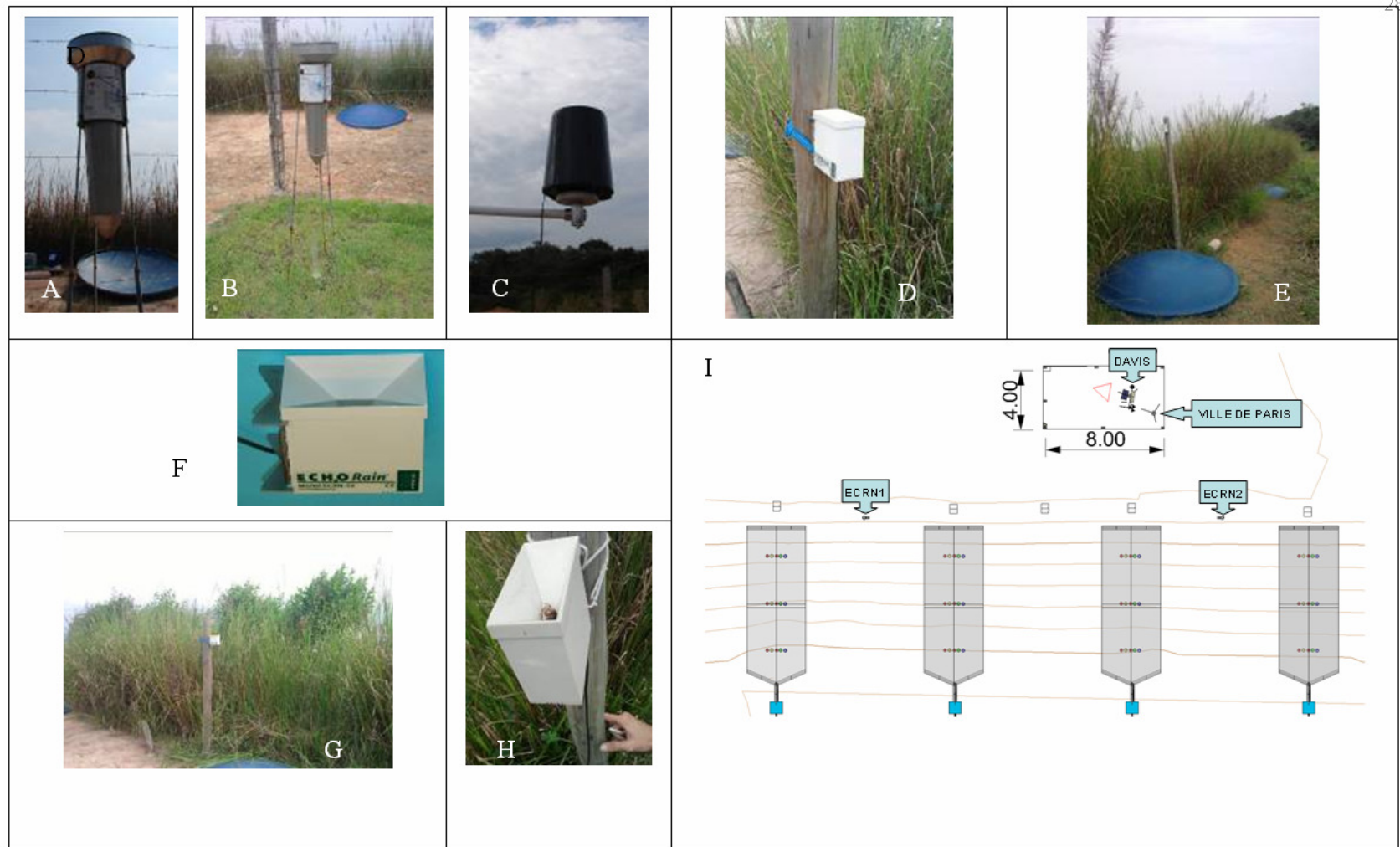


Figura 4-4 Pluviômetros instalados no Campo Experimental do Galeão. A,B – Ville de Paris; C – Davis; D,E – Decagon ECRN1; F – aspecto do ECRN; G,H – Decagon ECRN2; I – Modelo do Talude incluindo a estação meteorológica, parcelas de erosão e posição de todos os pluviômetros instalados.

Fora do abrigo meteorológico, mais precisamente na crista do talude, foram ainda instalados dois pluviômetros de bscula modelo ECRN (*Decagon Devices*). Estes pluviômetros foram instalados na rea objetivando posteriormente sua instalao abaixo do dossel das copas arbustivas e arbreas formadas nos diferentes tipos de tratamentos estudados na face do talude. Estes pluviômetros possuem uma rea de captao de 50cm² e uma bscula de 5cm³ (consideravelmente menor em relao do I2H), com 1 mm de resoluo como resultado (Tabela 4-1).

Tabela 4-1 Caractersticas dos pluvimetros instalados na rea de estudos.

Caractersticas	Instrumento		
	Davis	Decagon	Ville de Paris
rea de Captao (cm ²)	124	50	400
Volume da Bscula (cm ³)	5.4	5	xxx
Resoluo (mm)	0.254	1	xxx

4.2.2.2. Piranmetro

A radiao solar incidente no topo da atmosfera terrestre varia basicamente com a latitude e o tempo, a qual, ao atravessar a atmosfera, interage com seus constituintes. A componente desta radiao espalhada em outras direes  chamada radiao solar difusa; a parte que chega diretamente  superfcie do solo  chamada radiao solar direta. A radiao solar global seria o somatrio destas duas componentes.

Instrumentos voltados  medio da radiao solar so denominados Radimetros. Dependendo do tipo da componente da radiao medida, estes passam a ter nomes especficos. A radiao solar global  medida pelo Piranmetro, a radiao terrestre (ou radiao lquida)  medida por um radimetro chamado Pirgemetro e a radiao fotossinteticamente ativa pelo Radimetro PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). Todos esses radimetros so funcionalmente semelhantes e devem ser instalados em suportes que garantam seu perfeito nivelamento em locais abertos sem a presena de sombras, obstculos e reas reflexivas.

No Hemisfrio Sul recomenda-se a instalao do instrumento na face Norte, minimizando a possibilidade de sombras de sensores ou estruturas da estao meteorolgica. A radiao solar global no  dependente da altura do instrumento,

mas recomenda-se instalação entre 1,5 m e 2 metros de altura, dada a facilidade de acesso. Sua unidade de medida é o W/m^2 .

O piranômetro instalado na Estação Meteorológica da área de estudos é o modelo *PYR CS300 (Apogee)*, com uma faixa de medição de 300 a 1100 nm (0 a $2000 W/m^2$) e uma saída de 0.2 mV por W/m^2 . Sua instalação foi feita acima do termo-higrômetro (Figura 4-5).

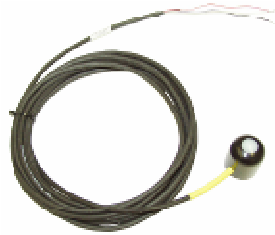


Figura 4-5 Piranômetro CS300 e sua posição na Estação Meteorológica.

4.2.2.3. Termo-higrômetro

O Termo-higrômetro é um instrumento que permite obter diretamente a Temperatura e a Umidade Relativa do Ar, através de dois sensores conjugados. O conjunto é protegido por um abrigo meteorológico que pode ser de plástico ou alumínio na cor branca.

O abrigo evita a exposição direta dos elementos sensores aos raios solares e à chuva, além de garantir a livre circulação do ar permitindo um equilíbrio com a atmosfera a sua volta. Suas unidades de medida são o $^{\circ}C$ para temperatura e % para umidade relativa. As medições podem sofrer a influência dos seguintes condicionantes externos:

- Fortes fontes industriais de calor;
- Proximidade a coberturas (ou telhados);
- Lugares íngremes ou abrigados;
- Vegetação alta ou ocorrência de aglomerações;
- Locais mal drenados.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM), entidade internacional ligada à ONU, que coordena as atividades operacionais na área das Ciências Atmosféricas, estabelece normas e alturas padrões para instalação dos instrumentos meteorológicos, portanto, o conjunto sensor de temperatura e a

umidade relativa do ar devem ser efetuados a uma altura entre 1,25 a 2,00 m acima do terreno.

A estação meteorológica instalada no talude possui acoplado o Termo-Higrômetro Modelo CS215 (*Campbell Sci.*). O instrumento está instalado a 2,00 m do solo, seguindo as normas da OMM (Figura 4-6). A sua faixa de medição é de -40°C a $+70^{\circ}\text{C}$, com uma precisão de $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$.



Figura 4-6 Termo-Higrômetro CS215.

4.2.2.4. Anemômetro e Cata-ventos

São instrumentos que determina a direção e a velocidade horizontal do vento, respectivamente. As unidades de medida para Velocidade do vento são m/s ou Km/h, e para Direção do Vento $^{\circ}$ (Graus).

Sensores de vento deverão ser instalados em área livre acima do nível do terreno ao seu redor, com distância horizontal 10 vezes superior à altura do obstáculo. Em alguns casos a distância horizontal pode ser reduzida para três vezes sua altura, sendo que valores inferiores a estes inviabilizam por completo a representação do fenômeno.

A direção do vento é definida como a direção de onde ele sopra. É expressa em graus, medidos no sentido dos ponteiros do relógio, a partir do norte geográfico (norte verdadeiro). Em informações climatológicas usa-se a Rosa dos Ventos com oito pontos de direção. Cada quadrante da Rosa dos Ventos corresponde a 90° . Padronizou-se o norte ser 0° , o leste 90° , o sul 180° e o oeste 270° . As alturas de medição recomendadas e são de $3,0\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ ou $2,0\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ e $10,0\text{ m} \pm 0,5\text{ m}$ como opcional (AASC)⁶, ou $10,0\text{ m}$ (EPA⁷ e OMM).

⁶ American Association of State Climatologists, EUA.

A estação meteorológica instalada no talude possui uma central com anemômetro e cata-vento modelo *Young3002-5* (*R.M.Young*), mostrado na Figura 4-7, operando uma faixa de medição de 0 a 50 m/s, com uma precisão de $\pm 0,5$ m/s (para rajadas de até 60 m/s) e medições da direção dos ventos de 0 a 360° (5° aberto).



Figura 4-7 Anemômetro e Cata-Ventos Wind Sentry3002-5 (Young Meteorological Instruments).

4.2.2.5. Aquisição de Dados

Com exceção dos pluviômetros da *Decagon* e o *Ville de Paris*, todos os demais sensores para medição de parâmetros meteorológicos de superfície foram adquiridos em conjunto na EMA Campbell do Brasil LTDA.

A EMA utilizada, modelo *Campbell SCI* (2008, Campbell do Brasil Ltda.), é um sistema composto pelos sensores já mencionados, montados em um tripé de 2.5 m de altura, juntamente com uma caixa ambientalmente selada (10" x 12") abrigando um *Datalogger*, e um painel solar para fornecimento de energia. Na Tabela 4-2 estão relacionados todos os sensores utilizados no monitoramento, bem como suas características básicas.

⁷ *Environmental Protection Agency, EUA.*

Tabela 4-2 Resumo das características dos sensores montados na Estação Meteorológica Compacta SCI.

Parâmetro	Unid	Sensor	Modelo	Faixa de Medição	Precisão	Resolução de Saída
Temperatura do Ar	°C	Termo-Higrômetro	<i>Campbell CS-215</i>	-40°C a 70°	± 0.3 a 25°C; ± 0.4 para 5°C a 40°C; ± 0.9 para - 40°C a 70°C.	10 ⁻⁵ °C
Umidade Relativa	%RH	Termo-Higrômetro	<i>Campbell CS-215</i>	0-100%	± 2% para 10% a 90%; ± 4% 0 a 100%.	10 ⁻³ %RH
Velocidade do Vento	m/s	Anemômetro	<i>R.M. Young 3002-5</i>	0-50m/s	± 5m/s	10 ⁻² m/s
Direção do Vento	°NV	Cata-ventos	<i>R.M. Young 3002-5</i>	0-360°	± 5°	10 ⁻⁵ °NV
Radiação Solar Global	W/m ⁻²	Piranômetro	<i>Campbell PYR-Apogee CS-300</i>	0-2000 W/m ⁻²	± 5% (para radiação total diária).	10 ⁻⁵ W/m ⁻²
Precipitação Pluvial	mm	Pluviômetro	<i>Davis</i>	0-500mm	4%	0.254 mm

O *Datalogger*, modelo CR200 (*Campbell Sci*, 2006), possui 128 Kb de memória para dados, cinco canais analógicos S.E., dois canais de pulsos, duas portas de controle, uma entrada SDI-12, 2 canais de excitação de voltagem, uma porta serial padrão RS232, opcional: rádio 900 MHz a 2.4 GHz, um regulador de voltagem (Figura 4-8).



Figura 4-8 Estação Meteorológica Compacta Campbell, destacando-se o abrigo para sistema de aquisição de dados e o Painel Solar.

O sistema possui o *software Windows Logger Net v 3.3* para aquisição e visualização dos dados. As programações dos sensores e das séries de dados podem ser feitas no *CRBASIC* ou no *Windows Short Cut* (foi utilizada a versão 2.6/2008, *Campbell Scientific, Inc*). Para aquisição dos dados foram criadas três programações. A primeira executa a coleta dos dados meteorológicos em intervalos de 15 minutos, sendo o intervalo de escaneamento dos sensores de 10 segundos. Os parâmetros medidos, suas unidades e dados gravados na primeira série de programação da estação encontram-se resumidos na (Tabela 4-3).

Tabela 4-3 Parâmetros medidos, unidades e dados gravados na primeira série de aquisição gerada no Short Cut.

Parâmetro Medido	Unidade	Dado Gravado
Velocidade do Vento	m/s	Média
Velocidade do Vento	m/s	Máxima (hh:mm:ss)
Direção do Vento	°NV	Média/Desvio
Temperatura do Ar	°C	Média
Umidade Relativa	%RH	1 Amostragem
Radiação Solar	W/m ² MJ/m ²	Média Total
Precipitação	mm	Total

A segunda série tem como objetivo efetuar a aquisição dos mesmos dados, porém em intervalos horários (visando adequar a aquisição dos dados ao monitoramento da água no solo). O intervalo de escaneamento dos sensores continua de 10 segundos. A radiação solar máxima é também registrada, tendo em vista o maior intervalo de aquisição de dados. Os parâmetros medidos, suas unidades e dados gravados na segunda série de programação da estação encontram-se resumidos na (Tabela 4-4).

Tabela 4-4 Parâmetros medidos, unidades e dados gravados na segunda série de aquisição gerada no Short Cut.

Parâmetro Medido	Unidade	Dado Gravado
Velocidade do Vento	m/s	Média
Velocidade do Vento	m/s	Máxima (hh:mm:ss)
Direção do Vento	°NV	Média/Desvio
Temperatura do Ar	°C	Média
Umidade Relativa	%RH	1 Amostragem
Radiação Solar	W/m ²	Média
	MJ/m ²	Total
Precipitação	W/m ²	Máxima
	mm	Total

A terceira série é utilizada para gerar estimativas de ET_0 em intervalos horários. Para isso os sensores são configurados segundo a seguinte programação de aquisição de dados (Tabela 4-5):

Tabela 4-5 Parâmetros medidos, unidades e dados gravados na segunda série de aquisição gerada no Short Cut.

Parâmetro Medido	Unidade	Dado Gravado
Temperatura do Ar	°C	Média
Umidade Relativa	%RH	Média
Velocidade do Vento	m/s	Média
ET_0	mm	Total

Como a equação utilizada para geração de valores de ET_0 neste sistema é a padronizada pela ASCE (FAO/ PM, já discutida), é ainda necessário especificar as coordenadas geográficas (Latitude e Longitude em graus decimais, sendo o Ocidente e o Hemisfério Sul representado por valores negativos) e a altitude local, que possuem relações com os parâmetros γ , R_n e G (já discutidos).

4.3. Sucção Matricial

A sucção matricial dos solos pode ser determinada direta ou indiretamente em campo a partir vários instrumentos, como o tensiômetro, o bloco de gesso, sensores de condutividade térmica e sensores de matriz granular (GMS). O GMS, patenteado por Larson (1993) & Hawkins (1985) e fabricado desde 1989 pela *Irrrometer Inc*, representou um grande avanço em relação ao monitoramento da sucção matricial. O sensor tem sido objeto de pesquisas para fins agrícolas desde então, aonde seu desempenho vem sendo avaliado como substituto para o tensiômetro no controle de sistemas de irrigação.

As principais vantagens do método são: o baixo custo dos sensores; a faixa de medição que vai até aproximadamente 200kPa (melhor em relação aos tensiômetros, nos quais normalmente as leituras vão de zero até 80kPa); a sua durabilidade em campo (muito maior em relação aos blocos de gesso); sua manutenção simples. Além disso, os sensores não estão sujeitos ao congelamento ou crescimento de raízes junto às sondas em função da umidade provenientes das mesmas (como o tensiômetro), ou ainda problemas de desgaste em solos salinos (como o bloco de gesso).

Visando avaliar a sucção do solo, objetivando estudar os mecanismos de transferência de umidade dos solos para as plantas, bem como mecanismos de infiltração e percolação da água no solo, foram utilizados sensores os GMS *Watermark 200SS-15* (Irrrometer Company, Riverside, CA).

4.3.1. Sensor de Matriz Granular

O GMS é composto por dois eletrodos acoplados em um bloco de gesso compactado que está envolvido por uma matriz granular (areia quartzosa), sendo que a condutividade elétrica varia em função da umidade presente. A partir do equilíbrio entre os valores de sucção matricial do sensor e do solo que o envolve, pode-se obter a sucção do solo por meio de uma curva de calibração (Mendes *et al.*, 2007).

O corpo das sondas é cilíndrico (mede aproximadamente oito cm), sendo a matriz granular envolvida com uma tela de aço sobre uma manta sintética que possibilita o contato com o solo (Figura 4-9).

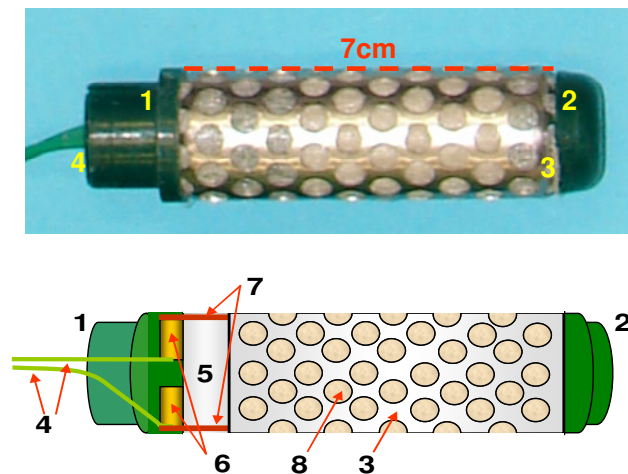


Figura 4-9 Sensor GMS da marca Watermark modelo 200SS-15.

As leituras em resistência ($k\Omega$) obtidas das sondas são convertidas através de sistema de aquisição de dados para valores de sucção (kPa), utilizando-se equações de calibração, como de Shock *et al.* (1998).

$$\Psi \text{ (kPa)} = (4.093 + (3.213 * k\Omega)) / (1 - (0.009733 * k\Omega) - (0.01205 * T_s)) \quad \text{[Equação 4-18]}$$

Onde T_s é a temperatura do solo e Ψ é a sucção (em kPa).

Irmak & Harman (2001) fizeram uma revisão a respeito das diferentes equações de calibração existentes na literatura. Todas elas levam em consideração variações de temperatura dado o fato de que o aumento da mesma ocasiona em diminuições na resistência (Spaans & Baker, 1992). De acordo com estes últimos autores bem como em *Irrrometer* (2005), variações de temperatura ocasionam teoricamente em erros de 1 a 3% por °C. Shock *et al.* (1998) observaram que quanto mais seco o solo tanto mais pronunciados são os efeitos da temperatura, conforme na Figura 4-10.

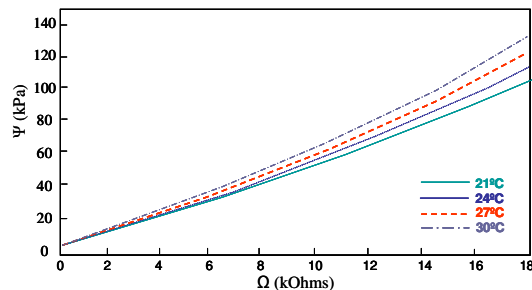


Figura 4-10 Efeito da temperatura na conversão de $k\Omega$ para kPa utilizando-se a equação de Shock *et al.* de 1998 (Chard, 2006).

O tempo de resposta dos sensores é um ponto fraco (em torno de seis vezes maior que o do tensiômetro (Mendes *et al.*, 2007). Além disso, sabe-se que os resultados possuem uma menor precisão para valores entre zero e 10kPa. Outro problema pode acontecer se o GMS for submetido a sucções muito elevadas (acima de 80kPa), onde a contração do solo no contato com o sensor, entre outros fatores, pode ocasionar em problemas no processo de re-saturação da matriz granular, fazendo com que ocorram leituras errôneas. Nestes casos os sensores devem ser retirados do solo, saturados e reinstalados.

4.3.2. Sistema de Aquisição de Dados

O Sistema de aquisição de Dados utilizado para os sensores GMS é o *Monitor #900M*. (Watermark). Cada sistema foi adquirido em conjunto com oito sensores GMS 200SS-15 e 1 geotermômetro 200TS (Figura 4-11). O sistema permite leituras em intervalos de até 1 minuto em oito portas que podem ser configuradas para aquisição de dados de GMS, geotermômetros (200TS), transdutores de nível (4-20 mA) e voltagem. Com leituras horárias nas oito portas o sistema tem uma autonomia de 170 dias, podendo ser configurado de diferentes

formas, de acordo com os tipos de sensores instalados e sua quantidade. A alimentação dos sistemas é feita por meio de uma bateria de 9 Volts situada no corpo do circuito impresso.

A bateria de 9 Volts, se alcalina, tem teoricamente um prazo de vida útil, com o sistema funcionando com leituras horárias de todas as portas, de um ano, porém ao longo do período de monitoramento pôde ser constatado que a durabilidade é menor. Possivelmente devido ao comprimento diferenciado dos fios nos diferentes GMS instalados em cada *logger* ocorreu uma oscilação desta duração: em 1 *logger* a bateria durou pouco mais de 6 meses, na maioria deles a duração foi de 8 meses, tendo já sido feita a troca de todas as baterias após 8 meses de funcionamento do sistema, quando os *loggers* que tiveram melhor performance começaram a acusar bateria fraca. Apesar de ser um ponto fraco dos *loggers*, a simplicidade deles e o Display LCD mostrando o estado da bateria auxiliou muito na manutenção.



Figura 4-11 Sistema de Aquisição de Dados Watermark Monitor#900M.

As configurações do Monitor#900M foram efetuadas via conexão RS232, com utilização do *software Watergraph 3.2 (Irrrometer Inc.)*. O próprio Monitor#900M converte os valores de resistência (Ω) obtidos em valores de sucção (kPa), valendo-se da equação de calibração de Shock *et al.* (1998).

Para aquisição de dados de GMS tem-se três alternativas básicas de instalação dependendo da existência e da quantidade de geotermômetros existentes. Nos períodos em que não haviam geotermômetros acoplados ao *loggers* para calibração dos efeitos da temperatura nas leituras de sucção, o valor na equação de calibração é automaticamente 25°C. No *logger* onde foi instalado somente um geotermômetro, representativo de todos os GMS acoplados, este foi colocado na primeira porta, pois todos os demais sensores ligados em série sua tem leituras calibradas em função destes valores de temperatura. Nos momentos em que mais de um geotermômetro foi instalado no *logger*, procedeu-se colocando os GMS referentes aos mesmos em série, de acordo com a Figura 4-12.

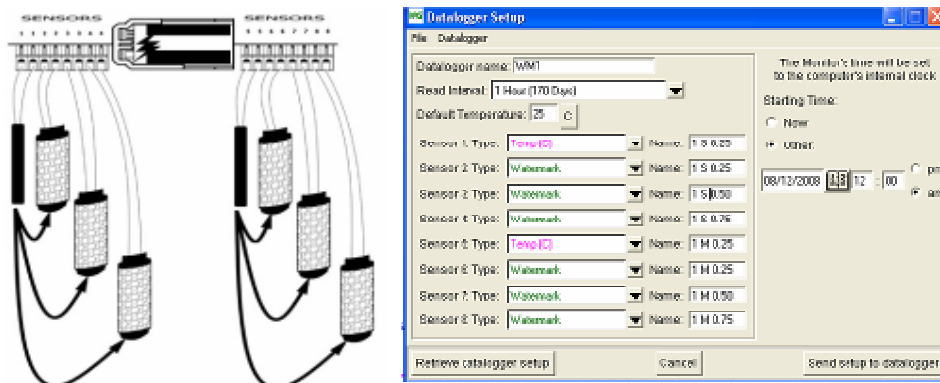


Figura 4-12 Instalação de programação do Monitor 900M para seis sensores GMS e dois geotermômetros.

4.4. Teor de Umidade Volumétrico

Há diversos métodos que quantificam o teor de umidade volumétrico dos solos. Os métodos indiretos são aqueles que estimam o teor umidade volumétrico no solo (θ) a partir de outras propriedades do solo. Nos estudos de monitoramento hidrológico estes são ideais devido à praticidade, rapidez e repetibilidade das medidas, porém são necessárias calibrações para obtenção de precisão nas medidas (Silva *et al.*, 2008).

Dentre os métodos indiretos, os baseados na constante dielétrica do solo (ϵ), os mais utilizados são o de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e frequência no domínio do tempo (FDR) ou técnica por capacitância. Estes métodos têm sido utilizados na pesquisa, em função da sua precisão, facilidade de acoplamento a um sistema de coleta de dados, rapidez e segurança ao operador. Apesar de ambos os métodos se basearem na medida de ϵ , cada método apresenta características específicas que resultam em algumas vantagens e desvantagens ao usuário final.

Relações entre alterações na constante dielétrica dos solos e modificações de θ são estudadas desde os trabalhos de Smith-Rose em 1933 (Heathman & McAfee, 2005). Estudos precursores dos métodos eletromagnéticos datam de 1951 (de acordo com revisão histórica de Grant *et al.*, 1978). Pioneiros nestas técnicas, Fellner & Feldegg (1969), partindo do estudo de propriedades dielétricas de misturas heterogêneas feito por Looor (1964), introduziram a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para medição da constante dielétrica de vários materiais (dentre eles o solo), adaptando métodos originados na área de telecomunicações para detecção de descontinuidades em cabos de linhas de transmissão.

Na década de 80 Topp e colaboradores (1980, 1985) obtiveram resultados promissores com a aplicação de TDR para a medida de ϵ e θ , popularizando a utilização de métodos eletromagnéticos para monitoramento da água no solo, e abrindo caminho para o surgimento de diversos métodos similares.

4.4.1. Métodos Eletromagnéticos

A constante dielétrica medida para um solo é uma média ponderada das constantes dielétricas das frações dos componentes do solo, ou seja, das fases sólida, líquida e gasosa (Vaz, 2008). Existem grandes diferenças entre as constantes dielétricas (ϵ) dos componentes do sistema solo – água - ar ($\epsilon_{\text{água}}=80.4$, $\epsilon_{\text{ar}}=1$ e $\epsilon_{\text{solo}}=3-7$, dependendo de textura, composição, salinidade, macro e microestrutura etc.). Os métodos eletromagnéticos (ou dielétricos) se baseiam no princípio de que mudanças de θ acarretam em expressivas alterações na constante dielétrica do meio (ϵ), que é então medida visando à obtenção indireta de valores de θ .

Os principais métodos eletromagnéticos existentes, detalhados nos tópicos a seguir, são os métodos de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), e Radares de Penetração no Solo (GPR). Existem ainda outros métodos relacionados à modelos de sondas menos conhecidos, não discutidos nesta tese, como o WCR⁸, o ADR⁹, o TDT¹⁰, e sondas combinadas, como as descritas por Vaz *et al.* (2000), Macedo *et al.* (2000) e Assis (2008), onde se combina medições de θ com resistência à penetração e sucção matricial.

4.4.1.1. Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

No método TDR mede-se o tempo de deslocamento t (ns) de uma seqüência de pulsos que possuem harmônicos na frequência de microondas em uma linha de transmissão (antena), composta por duas hastes de aço de comprimento conhecido L (cm), introduzidas no solo (Tomaselli & Bacchi, 2001). Quanto maior o valor de θ no solo, maior este tempo de deslocamento e maior a constante dielétrica relativa aparente do solo ϵ conforme a equação:

$$\epsilon = \left[\frac{ct}{(2L)} \right]^2 \quad \text{[Equação 4-19]}$$

Onde c (aproximadamente 29.9977 cm/ns) é a de propagação velocidade da luz no ar.

⁸ WCR (*Water Content Reflectometer*, Campbell Scientific Inc. 1996): sensor muito semelhante ao TDR constituído por duas hastes (guia de ondas) conectadas a uma placa de circuito impresso, atuando como multivibrador biestável cuja frequência de oscilação ou período varia com ϵ do solo. A leitura é obtida a partir do período da onda que passa pela haste de transmissão ou guia de ondas (Hornbuckle, 2003). A faixa de leitura é de 0,7 a 1,6 MS. Limitações: difícil calibração; necessidade de fonte extra; processo de cravação muito trabalhoso (Czarnomsky, 2005).

⁹ ADR (*Amplitude Domain Reflectometry*): Técnica onde o conteúdo de umidade volumétrico é medido através de variações na impedância solo/sonda. Limitações: pequeno volume de solo medido, difícil calibração, problemas com pedregosidade, poros com ar ou fluxo direto de água nas sondas.

¹⁰ TDT (*Time Domain Transmission*): circuito simples e barato comparado ao TDR. Mede-se o tempo de propagação de pulso eletromagnético em uma linha de transmissão unidirecional. Pode ser constituído por uma guia de ondas metálicas ou bandas flexíveis (de até 1 metro), inseridos em um bloco elétrico. Método com precisão baixa, grande volume representativo, exige grande revolvimento de solo devido ao tamanho das sondas.

Topp *et al.* (1980), considerando ε como função direta de θ , determinaram a relação entre as duas variáveis, representando-a por uma equação polinomial cúbica:

$$\varepsilon = a + b\theta + c\theta^2 + d\theta^3 \quad \text{[Equação 4-20]}$$

Onde $a=3.03$, $b=9.3$, $c=146$ e $d=76.7$ são constantes empíricas de ajustes desenvolvidos com dados de onze solos estudados por estes autores. Apesar de muito utilizada (Patterson & Smith, 1981; Dalton & Van Genuchten, 1986; Zegelin *et al.*, 1989 entre outros), sua validade não é aplicável para todos os intervalos possíveis de θ e também camadas de solo, principalmente em função de variações na porosidade (Tomaselli, 2001).

A calibração do TDR (relação entre θ e ε) vem sendo amplamente discutida, várias abordagens de calibração já foram investigadas, entre elas as de Topp *et al.* (anteriormente citada), com modelos cúbicos empíricos e Dasberg & Hopmans (1992), Dirksen & Dasberg (1993) e Ponizovsky (1999) com os modelos semi-empíricos e físicos, baseados nos modelos dielétricos de misturas.

4.4.1.2. Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR)

A melhoria da qualidade e resolução de osciladores de alta frequência (50-150MHz), aliada à redução dos preços, tem despertado interesse crescente pelo uso de sensores FDR¹¹ (Dean, 1987, Paltineaou & Starr, 1997). Os sensores são normalmente considerados menores, mais versáteis e baratos em relação ao TDR, sendo que o arranjo do sistema é muito adaptável, permitindo configurações variadas para um mesmo tipo de circuito.

No método, a permissividade dielétrica do meio é obtida medindo-se o tempo de carga de um capacitor (Figura 4-13) que utiliza o meio (solo) como dielétrico (isolante). Isto é, a constante dielétrica (ε) é obtida inserindo-se uma sonda no solo que, ao contato com este, forma um capacitor.

¹¹ Conhecidos também como capacitivos. Alguns modelos existentes: *EasyAg*, *EnvironSmart*® e *Diviner 2000*® (*Sentek Pty Ltd*, AUS); *Thetaprobe* (*Delta-T Devices Ltd*, Cambridge, UK); *ECH₂O-Probes* (*Decagon Devices*, Pullman, Washington, USA); *C-Probe* (*Agrilink Int.Inc.* USA); *Aquaflux*, *Aquapro*; *Gopher*; *Moisture Pro*; *Prism*.

Definindo-se primeiramente a relação entre o tempo de carga (t) que o capacitor leva para ir da Voltagem Inicial (V_i) para a Voltagem Final (V_f), depois de aplicada uma Voltagem (V):

$$\frac{V - V_f}{V_i - V_f} = e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{[Equação 4-21]}$$

Onde R é a Resistência e C a Capacitância (Figura 4-13).

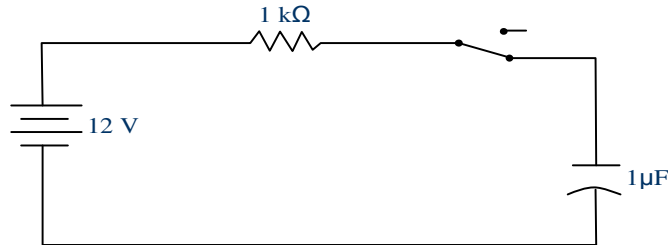


Figura 4-13 Ilustração de um circuito de capacitor não polarizado.

As modificações na voltagem ao longo do capacitor em função do tempo podem ser determinadas mantendo-se a resistência e a voltagem constantes, de modo que o tempo de carga do capacitor (t) é função da capacitância de acordo a equação (Figura 4-14):

$$t = -RC \ln \left(\frac{V - V_f}{V_i - V_f} \right) \quad \text{[Equação 4-22]}$$

Figura 4-14 Carga do capacitor após fechamento da chave.

Para capacitores de placas paralelas, a capacitância é função da permissividade dielétrica do meio de acordo com a expressão:

$$C = \frac{kA}{S} \quad \text{[Equação 4-23]}$$

Onde A é a área das placas e S a distância entre as mesmas. Como A e S são valores fixos, o tempo de carga do capacitor é função (idealmente linear) da permissividade dielétrica do meio circundante.

$$k = \frac{t}{\frac{RA}{S} \ln \left(\frac{V - V_f}{V_i - V_f} \right)} \quad \text{[Equação 4-24]}$$

As sondas nem sempre são constituídas por placas paralelas, porém a relação acima independe da geometria adotada. Basicamente, uma sonda FDR é constituída de um par de eletrodos que funciona como um capacitor eletrônico; quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico (isolante) do capacitor. Desde que a área dos eletrodos e a distância entre eles são fixas na sonda, a capacitância aumenta consideravelmente com um aumento no número de moléculas de água livres e com seus dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor (Paltineau & Starr, 1997; Sentek, 2000).

Assim, quando θ é alterado são medidas alterações na capacitância, convertidas através de um circuito interno, existente no próprio corpo da sonda, para um output em *milivolts*, valor RAW¹² ou valores de θ obtidos mediante calibração.

4.4.1.3. Radar de Penetração no Solo (GPR)

O método do GPR¹³ se baseia na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas e funciona com princípios similares ao método de reflexão sísmica e à técnica de sonar. O princípio do GPR consiste na emissão contínua de ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10MHz e 2500MHz, e recepção dos sinais refletidos nas estruturas ou interfaces em subsuperfície. A propagação do sinal e o alcance das ondas eletromagnéticas dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais, dentre elas ϵ , permeabilidade magnética e condutividade elétrica.

Dentre as muitas aplicações do GPR bem sucedidas destacam-se mapeamento de plumas de contaminação, monitoramento da frente de umedecimento de perfis de solo, detecção de água subterrânea, vazamentos de combustíveis, estruturas enterradas, como sistemas de encanamento antigos.

¹² Para aumentar a resolução do *output* podem ser utilizados todos os incrementos disponíveis de bits (4100 no caso do sistema da *Decagon*).

¹³ O GPR (Radar de Penetração no Solo, tradução para *Ground Penetrating Radar*).

Recentemente têm surgido muitos trabalhos envolvendo medições de θ com uso de GPR (Greaves *et al.* 1996; Weisler *et al.* 1998; Huisman *et al.*, 2003; Wollschläger e Hoth, 2005).

De acordo com Mendes (2008) existem três métodos para utilização de ondas irradiadas por GPR na medição de θ , denominados “Arranjo de Afastamento Constante”, ou *Common Offset*; *Common Midpoint* (CMP) e *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR).

No primeiro método (Arranjo de Afastamento Constante), a distância de separação entre as antenas é mantida e a cada medida as antenas se deslocam em conjunto. Neste método, as ondas eletromagnéticas emitidas pelo GPR para dentro do solo são parcialmente refletidas ao se chocarem com substratos como a rocha subjacente ao solo ou camadas de solo com permissividades dielétricas distintas.

O método é limitado e tem sua aplicação restrita a terrenos onde são observados significativos contrastes de permissividade dielétrica. A reflexão de ondas no topo da zona saturada é um bom exemplo de aplicação (Mendes, 2008).

Nos outros dois métodos de detecção de θ com uso de GPR (*Common Midpoint* e *Wide Angle Reflection and Refraction*), aumenta-se gradativamente a distância entre as antenas transmissora e receptora sempre num intervalo fixo pré-determinado, e as diferenças se relacionam a quantidade de antenas que se movem (somente uma no WARR e ambas no CMP). Nestes métodos, da mesma forma que no Arranjo de Afastamento Constante, não há controle da resolução em profundidade e as mensurações são bastante laboriosas (Mendes, *op.cit.*), principalmente na presença de vegetação, o que restringe o uso destas técnicas para fins agrícolas e aplicações em bioengenharia de solos.

4.4.1.4. Discussão

Dos métodos eletromagnéticos vistos até o momento, para o estabelecimento de sistemas de monitoramento contínuo *in situ*, o TDR e o FDR são de longe os mais utilizados. Algumas razões para tal já foram expostas, como a dificuldade de monitorar áreas densamente vegetadas com GPR (mais apropriado para execução de varreduras), assim como os requerimentos de energia, necessidades de calibração e problemas de inserção dos WCR, TDT,

ADR etc. Quando se questiona por outro lado dentre as técnicas de FDR e TDR, qual é mais apropriada para determinado estudo, as opiniões são conflitantes.

No método de TDR o tempo de propagação do pulso é função apenas da raiz quadrada o tempo de trânsito e um valor fixo ($c/2L$), e c e L são valores constantes fixos. Os resultados obtidos são muitas vezes considerados menos susceptíveis a condições específicas de calibração (solo e clima) quando comparado ao FDR.

Porém, em termos práticos, o interesse em um ou outro método deve ser fundamentado na relação custo-benefício. Os instrumentos baseados em métodos de TDR tendem a ser mais caros, pois é necessária a produção de pulsos elétricos em uma série temporal de alta precisão, digitalizando as voltagens de retorno em intervalos em torno de 100 picosegundos.

As medições são executadas em séries de pulsos e a digitalização ocorre a cada intervalo entre os pulsos que se sucedem, sendo uma reflectância completa composta de 250 pulsos (Wacker, 2002). Como a velocidade da luz no ar gira em torno de 29.9977 cm/ns e as dimensões das sondas variam de 10 cm a 30 cm, é necessária uma excelente eletrônica para resolver o problema, havendo, portanto, grande complexidade em termos numéricos. A maior vantagem é a baixa sensibilidade à salinidade (enquanto não houver atenuação de sinal) e temperatura.

No método, por outro lado, FDR não existe a necessidade de dispositivos incluindo medições em intervalos tão precisos quanto no TDR. As medições podem ser executadas através de um circuito padrão. Não há digitalização necessária até que o sinal seja convertido em DC, o que torna as sondas muito mais baratas e simplificadas. Como desvantagem o FDR tende a possuir uma maior susceptibilidade a variações de temperatura ou salinidade.

Em solos com elevada condutividade elétrica o FDR requer calibrações específicas, porém as sondas lêem em um intervalo maior em relação ao TDR em solos com elevada condutividade elétrica. Apesar de o FDR possuir, sem a utilização de calibrações específicas, uma precisão menor, sua resolução é maior em função dos ruídos provocados pelos processos de análises dos traços envolvidos no TDR (Wacker, 2002).

A Tabela 4-6 sumariza o que é medido, componentes, frequência de oscilação, vantagens, desvantagens e custos dos TDR, FDR e GPR.

Tabela 4-6 Quadro Comparativo dos métodos eletromagnéticos. Dados de Czarnomski *et al.* (2005) Noborio (1996); Campbell Sci. (1996 e 2004).

	FDR	TDR	GPR
O que é medido	Capacitância do solo (campo elétrico de alta frequência); Voltagem de saída.	ϵ a partir do tempo do pulso aplicado em refletir no “guia de ondas” (hastes), alterando a impedância.	Uma antena transmissora irradia pulsos curtos de ondas eletromagnéticas, registrados por uma antena receptora em função do tempo de percurso.
Componentes	Datalogger.	Testador de cabos com gerador de pulsos.	Conjunto de Antenas; fonte Externa.
Frequência de Oscilação	~50-150MHz	~1-120GHz	~10MHz-1GHz
Vantagens	Dados contínuos; Alta resolução; Fácil instalação. Bastante preciso.	Reconhece erros. Mais preciso que o FDR.	Método não invasivo; Abrange grandes áreas; Detecção do Topo da Zona Saturada.
Desvantagens	Pouco sensível à temperatura; Calibração padrão subestima a umidade. Contato sonda-solo crítico na qualidade das medidas.	Eletrônica complexa. Difícil interpretação do sinal. Alto custo.	Problemas de resolução em profundidade; mensurações de campo bastante laboriosas.
Custo	FDR < TDR < GPR		

Como apontou este estudo, para a correta execução das medições deve haver grande interação entre as sondas e o solo ao redor delas, de modo a gerar medições representativas, estando o campo eletromagnético de atuação das sondas em contato com uma amostra representativa das condições de umidade do perfil de solo.

Portanto, a existência de problemas de inserção de sondas, e tratando-se de vazios no contato solo-sonda, possui uma grande influência nas medições, sugerindo que estes problemas são os maiores responsáveis pelas distorções existentes nas medições em campo.

4.4.2. Sondas FDR ECH₂O

Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizadas as sondas FDR da linha *ECH₂O-Probes* modelo EC-10 (ano de fabricação 2001, *Decagon Devices Inc.*, USA). O modelo é constituído por trilhas de cobre seladas entre duas placas

de fibra de vidro impregnada com resina epóxi (mesmo material utilizado para circuitos impressos).

A sonda possui 14.5cm de comprimento (10 cm no corpo da sonda com um circuito de 4.5cm na extremidade) x 3.17cm de largura x 0.15cm de espessura. O campo eletromagnético gerado pelas trilhas de cobre é transmitido tanto para o corpo de fibra de vidro da sonda quanto para o solo onde está inserida, numa zona de influência de 2 cm em relação à superfície plana (que vai gradativamente diminuindo a partir da origem) não havendo sensibilidade nas extremidades. A Figura 4-15 mostra os detalhes da sonda EC-10 e de sua área de influência.

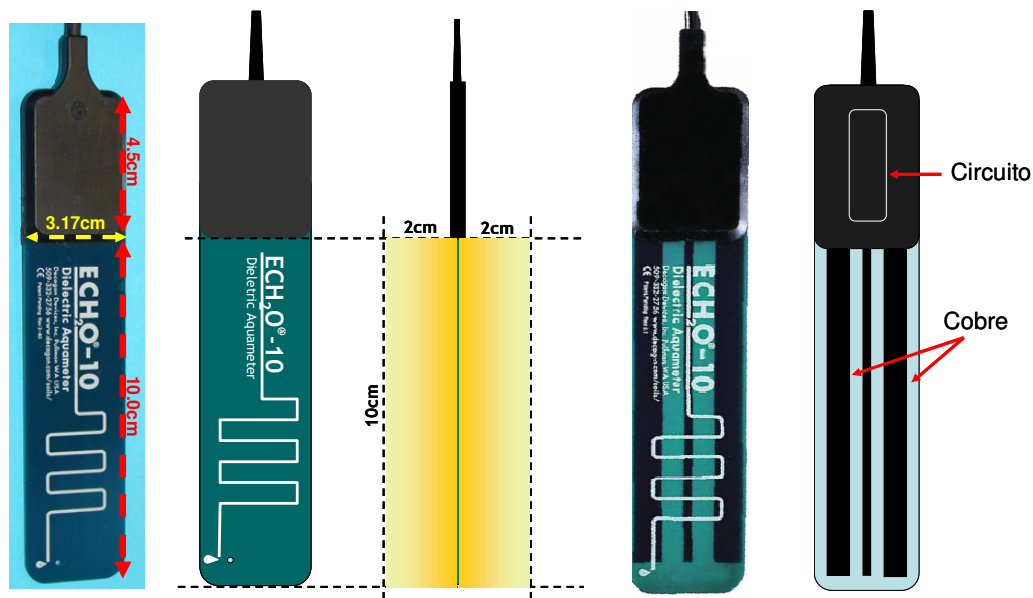


Figura 4-15 Sonda FDR ECH₂O EC-10, observando-se dimensões, área de influência e componentes básicos.

As sondas ECH₂O trabalham em uma frequência de 100MHz, o tempo de medição é de 10ms, realizam leituras com precisão de 0.04m³/m³ (para solos minerais com condutividade elétrica inferior a 0.5dS/m, mas pode chegar a 0.02m³/m³ mediante calibrações específicas), numa excelente resolução de 0.002m³/m³, com medidas de θ na faixa de 0 ao solo saturado.

A conexão de saída do circuito se dá por um cabo de saída do tipo estéreo padrão, com *plug* 3.5mm, constituído por um fio terra (cru), um de excitação (branco) e saída análoga (vermelho).

Segundo o fabricante, podem ser efetuadas extensões neste cabeamento de até 60 metros, sendo para isso providos kits do próprio fabricante, que entretanto, quando testados nesta tese, provaram-se ineficientes. O método de extensão

utilizado foi o recomendado em nota técnica recente Decagon (2007), onde é utilizado método de soldagem padrão, com termo-contrátil para isolamento externo dos fios. Observa-se que para a adaptação dos cabos foi necessário o *plug* estéreo original, sendo que os *plugs* nacionais testados apresentaram elevado ruído, o que possivelmente ocorreu como resultado de diferenças na geometria dos mesmos. Neste caso, os *plugs* originais foram reaproveitados da própria sonda para obtenção de leituras sem ruído.

A Figura 4-16 mostra resultados de um ensaio realizado objetivando comparar o desempenho dos métodos de extensão. No ensaio foi colocada em um recipiente de 22L uma quantidade de solo proveniente do talude, seco ao ar e peneirado (#2 mm). Posteriormente foi adicionado 500mL de água visando avaliar a resposta dos sensores. O ensaio mostrou um tempo de resposta dos sensores à adição de água no solo de ≈ 2 min para todas as ondas utilizadas, exceto na extensão com plug nacional, que mostrou elevado ruído.

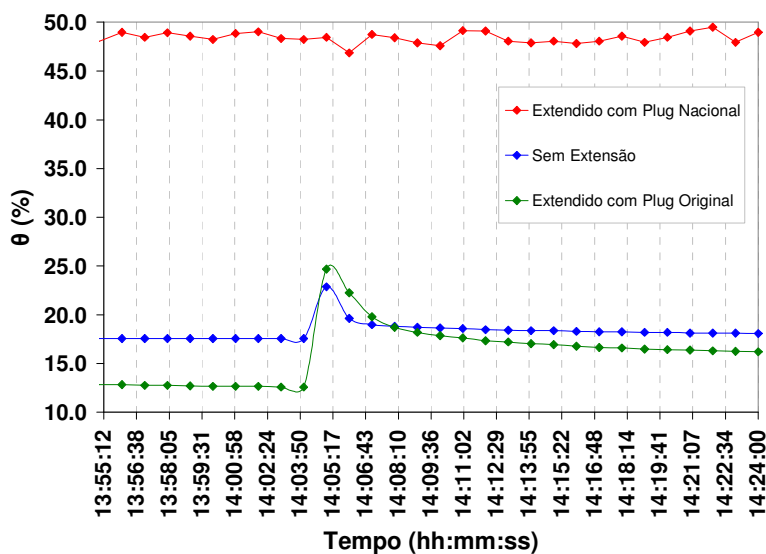


Figura 4-16 Efeito do tipo de *plug* utilizado para confecção de extensões.

Os sistemas de aquisição de dados compatíveis com as sondas EC-10 devem ser capazes de fornecer uma excitação de 2.5 a 5 v (DC) por 10ms, e leituras de voltagem com resolução de 12bits ou mais. A corrente necessária é de 2mA a 2.5V e 7-8mA a 5V.

4.4.3. Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados utilizado para as sondas EC-10 e para os pluviômetros ECRN foi o *Em50* (Decagon Devices). O sistema possui cinco

canais com 32-bits de resolução, excitados com 3.0V por canal. Os conectores são do tipo estéreo 3.5mm.

O Em50 possui uma memória *flash* de 1MB (capacidade para 28.672 leituras nas 5 portas) não volátil, sendo alimentado por cinco pilhas AA, Alcalinas ou de lítio. As pilhas duram teoricamente 5 anos, mas nas condições de campo onde os sistemas foram implantados as mesmas duraram em torno de 1 ano, havendo vazamento e até comprometimento do circuito impresso de um dos *loggers*, tendo sido necessária uma manutenção do mesmo.

O *case* do sistema é impermeável, fabricado em IP45 NEMA4X, ambiente de operação entre 45° e -40°C, porém a saída para os fios é provida de um isolamento de borracha que se mostrou pouco eficaz, uma vez que deixou passar umidade e insetos nas condições de campo.

A comunicação externa com o computador é realizada por meio de saída RS232, sendo utilizado o *software* para Windows *ECHO Utility* (*Decagon Devices Inc.*), ou opcionalmente o *DataTrac Lite* (mesmo fabricante). Ressalta-se que o conector de saída é específico e vem acompanhando o *logger*. O sistema permite exclusivamente a instalação de sensores da marca *Decagon*, dentre eles as sondas FDR EC-10 e os pluviômetros ECRN utilizados neste estudo.

Para sondas EC-10 o Em50 possui uma opção de coleta de dados em valor RAW (não processado), que foi utilizada durante os ensaios de calibração. Tal valor representa todos os incrementos disponíveis de números de 12-bits (total de 4096) nos quais as medições são armazenadas. Na configuração RAW, a calibração de fábrica do instrumento possui a seguinte equação:

$$\theta \text{ (cm}^3\text{/cm}^3\text{)} = 0.000571 * \text{RAW} - 0.376 \quad \text{[Equação 4-25]}$$

A Figura 4-17 mostra os detalhes do Em50, incluindo o posicionamento das pilhas, botão *reset* e status, canais de entrada e saída RS232.

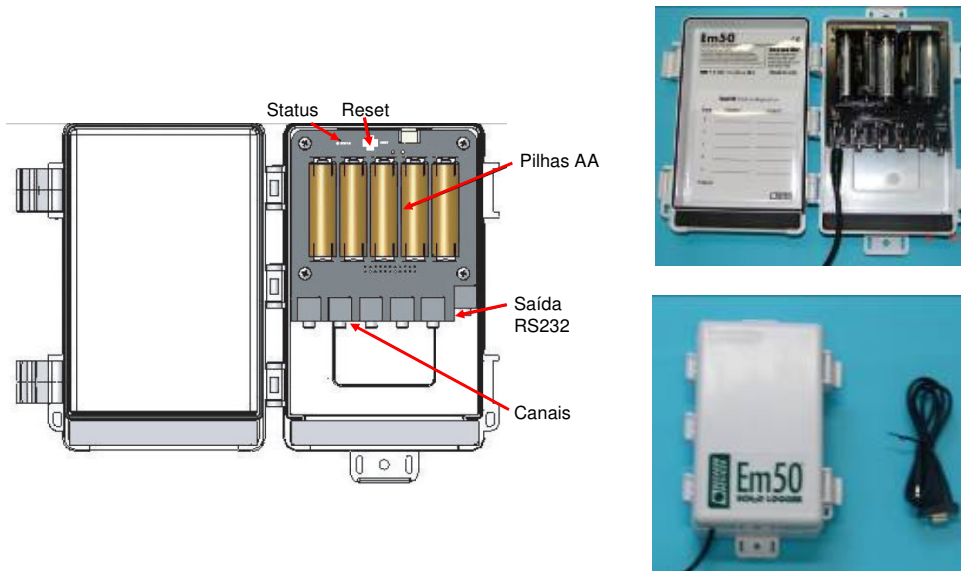


Figura 4-17 Detalhes do *Datalogger* Em50.

4.4.4. Técnicas de Calibração Implementadas

Os solos possuem propriedades elétricas extremamente diversas, de acordo com suas características geotécnicas, químicas e mineralógicas. Devido a variações na estrutura, textura, salinidade, pH, etc., dos solos, as equações de calibração genéricas de fábrica possuem uma precisão de em torno de $\pm 3 - 4\%$ para a maioria dos solos de textura média a fina, sendo que a precisão diminui para solos de textura grosseira ou de alta salinidade, podendo chegar a $\pm 10\%$.

A grande vantagem dos FDR em geral, como já mencionado, está no fato de que a precisão das medições pode chegar a $\pm 1-2\%$ para qualquer camada de solo, desde que seja executada calibração específica. Testes (Czarnomski *et al.*, 2005) comprovaram que medições com a sonda ECH₂O utilizando-se de calibrações específicas podem atingir tal desempenho a um preço consideravelmente menor que os TDR. Note que a resolução, precisão, repetibilidade e similaridade de resultado entre sondas são excelentes nas sondas ECH₂O, sendo, portanto, necessária calibração de somente uma sonda para cada tipo particular de solo.

Para a calibração das sondas FDR ECH₂O EC-10 para os materiais estudados foram testados três tipos de metodologias, aqui denominadas Método I, Método II (com uso de estufa a 105°C), Método III (com variação de densidade). Dada impossibilidade de efetuar ensaios com amostras indeformadas (estas se quebram no ato da inserção das sondas) os métodos escolhidos são todos baseados

na análise de corpos de prova montados a partir de amostras amolgadas, que são compactadas com valores de ρ_d escolhidos em função das propriedades dos solos em campo e do objetivo da calibração.

4.4.4.1. Preparação das Amostras

Para preparação das amostras os solos foram secos ao ar, destorroados e peneirados (#3 mm), eliminando o material mais grosseiro que pode comprometer o processo de compactação dos corpos de prova (Figura 4-18).



Figura 4-18 Solos após destorroamento e peneiramento.

4.4.4.2. Método I

Neste método corpos de prova foram compactados tentando-se chegar o mais próximo possível da massa específica seca de campo (ρ_d). As calibrações foram feitas correlacionando-se as leituras das sondas EC-10 (valores RAW) aos valores de θ obtidos através de pesagens de volumes conhecidos.

No procedimento, após a preparação o das amostras procede-se a montagem dos corpos de prova. Primeiramente se adicionou ao solo pesado na bandeja, de maneira uniforme, para cada etapa do ensaio, diferentes volumes de água destilada, (foram utilizados 300mL; 600mL; 900mL; 1200mL; 1500mL).

Foi confeccionado um cilindro para montagem do corpo de prova utilizando-se um PVC ($\Phi=14.5$ mm, $L=190$ mm, $\text{vol.}=3135.88$ cm³), um cilindro compactador (Proctor Normal, utilizado em ensaios de compactação dinâmica para definição e controle de compactação de campo), e uma sonda ECH₂O EC-10 ($\text{vol.}=14.08$ cm³) (Figura 4-19). Os corpos de prova foram moldados compactando os solos dentro do PVC juntamente com a sonda, sendo, posteriormente as medições, extraído volume conhecido (extrator *Kopecky*; $\text{vol.}=48.86$ cm³) para pesagem e obtenção de θ .



Figura 4-19 Material utilizado para e extração de amostras indeformadas (Kopecky) e para montagem dos corpos de prova. Da esquerda para a direita: amostrador Kopecky, cilindro para realização do ensaio, cilindro compactador Proctor Normal.

Para a aquisição dos dados foi efetuada uma leitura (RAW) para cada corpo de prova montado. Após a coleta de dados a pesagem de volumes conhecidos foi feita extraíndo-se três amostras (*Kopecky*) por corpo de prova avaliado. Deste modo foram obtidos valores de ρ_d , θ , w e RAW para cada volume de água adicionado, sendo os dados organizados conforme o modelo abaixo (Tabela 4-7).

Tabela 4-7 Planilha utilizada para determinação dos parâmetros de calibração (com resultados da calibração do solo roxo).

N° Cap.	Vol. Água (mL)	Leitura (RAW)	Cap + solo úmido	Cap + solo seco	Peso Cápsula	Solo úmido	Solo seco	$m_w ; V_w$ (g; cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	θ (cm ³ /cm ³)
1	0	729	87.623	86.723	21.761	65.862	64.962	0.900	1.386	0.019
2	0	729	87.474	86.662	20.870	66.604	65.792	0.812	1.404	0.017
3	0	729	84.569	83.735	22.267	62.302	61.468	0.834	1.312	0.018
4	300	907	91.184	84.061	22.028	69.156	62.033	7.123	1.324	0.152
5	300	907	92.818	84.665	22.964	69.854	61.701	8.153	1.317	0.174
6	300	907	95.145	86.465	22.360	72.785	64.105	8.680	1.368	0.185
7	600	921	88.946	81.227	21.546	67.400	59.681	7.719	1.274	0.165
8	600	921	90.925	82.710	21.801	69.124	60.909	8.215	1.300	0.175
9	600	921	94.535	86.184	21.334	73.201	64.850	8.351	1.384	0.178
10	900	1037	109.505	92.595	21.545	87.960	71.050	16.910	1.516	0.361
11	900	1037	103.989	88.385	20.824	83.165	67.561	15.604	1.442	0.333
12	900	1037	108.650	92.179	21.724	86.926	70.455	16.471	1.504	0.351
13	1200	1217	106.209	85.180	21.761	84.448	63.419	21.029	1.353	0.449
14	1200	1217	103.860	80.173	20.870	82.990	59.303	23.687	1.266	0.505
15	1200	1217	105.104	84.010	22.267	82.837	61.743	21.094	1.318	0.450
16	1500	1228	102.413	78.927	21.761	80.652	57.166	23.486	1.220	0.501
17	1500	1228	102.299	79.151	20.870	81.429	58.281	23.148	1.244	0.494
18	1500	1228	102.452	79.105	22.267	80.185	56.838	23.347	1.213	0.498

4.4.4.3. Método II

Foi observada tanto com a utilização das equações de calibração obtidas tanto no Método I quanto com o uso da Equação de Calibração de Fábrica uma grande quantidade de dados incoerentes de θ nas séries históricas de dados de campo, indicando a persistência de subestimativas mediante ambas as metodologias acarretando em perdas de dados.

Visando gerar uma calibração mais eficiente, que incluía resultados anteriormente subestimados e desconsiderados (θ negativo), foi gerado um ponto a mais na calibração colocando-se os solos para secar em estufa a 105°C e depois sendo seguido o protocolo adotado no método anterior para determinação da relação RAW x θ . Os resultados foram organizados juntamente com a calibração do Método I, visando uma análise comparativa.

4.4.4.4. Método III

Como já dito, o contato solo-sonda constitui um ponto crítico na qualidade dos dados obtidos de sondas FDR. Por isso é necessária extrema cautela durante os processos de instalação de sondas em campo para manter a estrutura original do solo presente em contato íntimo com o corpo da sonda e evitar a existência de quaisquer vazios (ar) que possam interferir na capacitância do solo.

Nos métodos anteriores, na impossibilidade de efetuar ensaios de calibração em amostras indeformadas, os corpos de prova foram moldados o mais próximo possível dos valores de ρ_d de campo. O ρ_d pode ser considerado um bom parâmetro para indicar a fidelidade do contato solo-sonda. Para solos residuais, entretanto, sabe-se que existe grande influência da estrutura sobre as propriedades hidráulicas.

Nos métodos adotados anteriormente o ρ_d era automaticamente obtido e controlado mediante a alocação de volume e peso de solo conhecido. Durante a execução dos ensaios observou-se que pequenas mudanças de posição das sondas ao longo dos corpos de provas, ou uma pequena compactada junto ao corpo da sonda, provocavam grande variação nas respostas, indicando uma sensibilidade das sondas às variações no ρ_d .

Desta forma, um terceiro método de ensaio de calibração foi efetuado visando estimar a influência de variações neste parâmetro sobre as equações de

calibração. Para isso, primeiro cinco cilindros foram confeccionados com segmentos de tubos PVC ($\Phi=14.5$ mm, $L=500$ mm) para execução de ensaios simultâneos com todos os camadas de solos. Para fechar uma das extremidades do cilindro foi utilizado um tampão de PVC (2 mm), ficando também as sondas presas com elásticos (Figura 4-20).



Figura 4-20 Cilindros utilizados nos ensaios pelo Método III.

Para compactação dos corpos de prova foi pesada a mesma massa de solo que foi utilizada para cada camada de solo nos ensaios anteriores. Para umedecimento as amostras foram, anteriormente à montagem do corpo de prova, colocadas em bandejas, sendo acrescentados os mesmos volumes de água destilada utilizados nos ensaios anteriores exceto o estágio de 1600mL (onde a compactação começou a ficar em seu limite prático, com empelotamento ou excesso de plasticidade) de forma uniforme, procedendo-se a homogeneização do conjunto. O solo úmido junto com a bandeja foi pesado em uma balança (Tipo Roberval com braços iguais, capacidade 10 kg). Após o solo ser adicionado mediante a aplicação de uma única camada (evitando danificar as sondas), os corpos de prova foram compactados com uso do cilindro Proctor Normal, aplicando-se diferentes quantidades de golpes visando gerar diferentes energias de compactação.

A Tabela 4-8 relaciona a quantidade de golpes aplicada a cada estágio à Energia de Compactação (E_c) correspondente, de acordo com a relação geral válida para sistemas de compactação dinâmica:

$$E_c = (M \times H \times N_g \times N_c) / V \quad \text{[Equação 4-26]}$$

Onde: M = Massa, H = Altura, N_g é o número de vezes, e N_c o número de camadas de solo com mesma umidade, dispostas em um molde de volume conhecido, V .

Tabela 4-8 Energias de compactação aplicadas nos diferentes ensaios de compactação dinâmica e nas diferentes etapas do ensaio.

Designação	M (kg)	H (cm)	N _c	N _g	Vol. (cm ³)	E _c (kg.cm/cm ³)
Proctor Normal	2.5	30.5	3	26	1000	5.948
Proctor Normal	4.5	45.7	5	12	2000	6.170
Calibração Ponto 1	2.5	30.5	1	0	1000	0
Calibração Ponto 2	2.5	30.5	1	10	1000	0.763
Calibração Ponto 3	2.5	30.5	1	20	1000	1.525
Calibração Ponto 4	2.5	30.5	1	40	1000	3.050
Calibração Ponto 5	2.5	30.5	1	60	1000	4.575
Calibração Ponto 6	2.5	30.5	1	80	1000	6.100
Calibração Ponto 7	2.5	30.5	1	100	1000	7.625
Intermediária	4.5	45.7	5	26	2000	13.367
Proctor Modificado	4.5	45.7	5	55	2000	28.277

Observa-se que a energia de compactação máxima obtida no ensaio não chega ao valor que se poderia alcançar mediante o ensaio Proctor modificado, onde a E_c é de 28.277 kg.cm/cm³. Mesmo não tendo alcançado E_c acima de 10 kg.cm/cm³, os resultados dos ensaios discutidos a seguir mostraram que a metodologia foi suficiente para gerar uma variabilidade substancial no ρ_d dos corpos de prova, possibilitando a calibração do efeito deste parâmetro sobre o comportamento dos sensores.

Após a compactação dos corpos de prova foi aferida a altura de solo dentro do cilindro, utilizada posteriormente para obtenção dos valores de ρ_d a partir do volume ocupado pelo solo no cilindro e dos dados de umidade gravimétrica obtidos após a secagem e pesagem dos solos.

Posteriormente à aferição da altura de solo no cilindro foram adquiridos os dados das sondas (RAW). Em seguida o corpo de prova foi desmontado e todo o solo foi colocado em uma bandeja para secagem em estufa a 105°C, sendo utilizado para remoção total do solo da sonda e do cilindro um picete com água destilada. Após a secagem o solo foi pesado (na mesma balança), sendo determinada a umidade gravimétrica com base no peso de solo antes e depois da estufa. A Tabela 4-9 mostra o modo de organização dos dados utilizado para a execução dos ensaios com o Método III.

Tabela 4-9 Organização dos dados para a execução dos ensaios com o Método III.

Vol. Água (mL)	N_g	Solo úmido	Solo seco	V_w (cm ³)	w	Leitura (RAW)	Altura da Col. Solo (cm)	V_t (cm ³)	pd	V_s (cm ³)	θ (cm ³ /cm ³)
0	0	4695.2	4695.2	0	0.000	582	25.50	4210.7	1.115	4210.7	0.0
0	10	4695.2	4695.2	0	0.000	592	24.50	4045.6	1.161	4045.6	0.0
0	20	4695.2	4695.2	0	0.000	596	24.00	3963.0	1.185	3963.0	0.0
0	40	4695.2	4695.2	0	0.000	599	23.00	3797.9	1.236	3797.9	0.0
0	60	4695.2	4695.2	0	0.000	602	22.50	3715.3	1.264	3715.3	0.0
0	80	4695.2	4695.2	0	0.000	603	22.00	3632.8	1.292	3632.8	0.0
0	100	4695.2	4695.2	0	0.000	604	21.50	3550.2	1.323	3550.2	0.0
300	0	5465.0	5170.0	295	0.057	782	26.50	4375.8	1.181	4375.8	0.1
300	10	5465.0	5170.0	295	0.057	813	25.50	4210.7	1.228	4210.7	0.1
300	20	5465.0	5170.0	295	0.057	826	24.50	4045.6	1.278	4045.6	0.1
300	40	5465.0	5170.0	295	0.057	838	24.00	3963.0	1.305	3963.0	0.1
300	60	5465.0	5170.0	295	0.057	845	23.50	3880.5	1.332	3880.5	0.1
300	80	5465.0	5170.0	295	0.057	850	23.20	3830.9	1.350	3830.9	0.1
300	100	5465.0	5170.0	295	0.057	854	23.00	3797.9	1.361	3797.9	0.1
600	0	5780.0	5195.0	585	0.113	818	28.50	4706.1	1.104	4706.1	0.1
600	10	5780.0	5195.0	585	0.113	852	27.00	4458.4	1.165	4458.4	0.1
600	20	5780.0	5195.0	585	0.113	864	26.00	4293.3	1.210	4293.3	0.1
600	40	5780.0	5195.0	585	0.113	879	25.50	4210.7	1.234	4210.7	0.1
600	60	5780.0	5195.0	585	0.113	888	25.00	4128.1	1.258	4128.1	0.1
600	80	5780.0	5195.0	585	0.113	894	24.50	4045.6	1.284	4045.6	0.1
600	100	5780.0	5195.0	585	0.113	899	24.00	3963.0	1.311	3963.0	0.1
900	0	6120.0	5170.0	950	0.184	847	29.50	4871.2	1.061	4871.2	0.2
900	10	6120.0	5170.0	950	0.184	878	27.50	4541.0	1.139	4541.0	0.2
900	20	6120.0	5170.0	950	0.184	893	26.50	4375.8	1.181	4375.8	0.2
900	40	6120.0	5170.0	950	0.184	910	25.50	4210.7	1.228	4210.7	0.2
900	60	6120.0	5170.0	950	0.184	923	25.00	4128.1	1.252	4128.1	0.2
900	80	6120.0	5170.0	950	0.184	933	24.50	4045.6	1.278	4045.6	0.2
900	100	6120.0	5170.0	950	0.184	939	24.00	3963.0	1.305	3963.0	0.2
1200	0	6360	5160	1200	0.233	870	31	5118.9	1.008	5118.9	0.234
1200	10	6360	5160	1200	0.233	895	30	4953.8	1.042	4953.8	0.242
1200	20	6360	5160	1200	0.233	912	29	4788.7	1.078	4788.7	0.251
1200	40	6360	5160	1200	0.233	939	28	4623.5	1.116	4623.5	0.260
1200	60	6360	5160	1200	0.233	955	27	4458.4	1.157	4458.4	0.269
1200	80	6360	5160	1200	0.233	969	26.5	4375.8	1.179	4375.8	0.274
1200	100	6360	5160	1200	0.233	982	26	4293.3	1.202	4293.3	0.280

4.4.5. Resultados de Calibrações

A discussão dos resultados das calibrações é apresentada em quatro etapas. Na primeira são discutidos os resultados das calibrações com uso do Método I, observando-se valores médios, desvio e coeficiente de variação do ρ_d obtido nos diferentes corpos de prova e algumas tendências observadas com a utilização deste método para processamento de dados de campo.

Na segunda etapa são discutidos os resultados do Método II, comparando com o Método I, e também indicando os valores mínimos de RAW para os diferentes materiais avaliados.

Na terceira são apresentados os resultados de calibrações com o Método III, sendo discutidos dados de curvas de compactação e calibração obtidas para cada solo avaliado, propondo-se uma calibração em função do ρ_d . De posse destes dados foram geradas calibrações gerais, utilizadas posteriormente no desenvolvimento do Capítulo VI para interpretação do monitoramento de campo.

4.4.5.1. Resultados Experimentais do Método I

A seguir são apresentados resultados experimentais dos ensaios realizados com o Método I, estando dispostos valores de RAW, θ e ρ_d obtidos para os diferentes solos avaliados (Tabela 4-10).

Observa-se que os valores RAW foram maiores para os solos roxo e vermelho-escuro. Com o objetivo de gerar equações de calibração dos dados dos ensaios foram processados através de correlação linear entre os valores de RAW e θ . A Figura 4-21 mostra estes resultados, bem como as equações de calibração e R^2 obtido em cada solo avaliado.

Tabela 4-10 Resultados das calibrações para os 5 camadas de solos estudados

Vol. Água	Solo Roxo			Solo Vermelho Escuro			Solo Vermelho			Solo Vermelho-Amarelo			Solo Amarelo		
	RAW	ρ_d	θ	RAW	ρ_d	θ	RAW	ρ_d	θ	RAW	ρ_d	θ	RAW	ρ_d	θ
0	729	1.386	0.019	769	1.246	0.021	713	1.437	0.028	675	1.369	0.012	683	1.515	0.009
0	729	1.404	0.017	769	1.270	0.021	713	1.462	0.015	675	1.365	0.012	683	1.565	0.010
0	729	1.312	0.018	769	1.222	0.021	713	1.436	0.015	675	1.314	0.011	683	1.503	0.009
300	907	1.324	0.152	885	1.268	0.094	804	1.499	0.102	755	1.372	0.088	760	1.458	0.083
300	907	1.317	0.174	885	1.224	0.107	804	1.389	0.088	755	1.341	0.090	760	1.508	0.092
300	907	1.368	0.185	885	1.272	0.107	804	1.518	0.102	755	1.364	0.089	760	1.531	0.103
600	921	1.274	0.165	956	1.320	0.259	832	1.520	0.192	800	1.339	0.170	812	1.508	0.177
600	921	1.300	0.175	956	1.369	0.286	832	1.676	0.226	800	1.483	0.194	812	1.548	0.184
600	921	1.384	0.178	956	1.287	0.262	832	1.585	0.203	800	1.432	0.174	812	1.525	0.177
900	1037	1.516	0.361	988	1.344	0.363	964	1.637	0.307	1055	1.638	0.292	949	1.620	0.311
900	1037	1.442	0.333	988	1.416	0.389	964	1.552	0.299	1055	1.596	0.292	949	1.525	0.279
900	1037	1.504	0.351	988	1.307	0.374	964	1.447	0.269	1055	1.603	0.303	949	1.637	0.302
1200	1217	1.353	0.449	1203	1.318	0.472	1033	1.472	0.77	1098	1.499	0.363	1036	1.27	0.372
1200	1217	1.266	0.505	1203	1.267	0.485	1033	1.515	0.395	1098	1.481	0.374	1036	1.530	0.366
1200	1217	1.318	0.450	1203	1.278	0.474	1033	1.513	0.395	1098	1.577	0.389	1036	1.513	0.359
1500	1228	1.220	0.501	1298	1.155	0.575	1136	1.390	0.443	1114	1.593	0.445	1123	1.517	0.444
1500	1228	1.244	0.494	1298	1.106	0.559	1136	1.487	0.473	1114	1.526	0.431	1123	1.470	0.423
1500	1228	1.213	0.498	1298	1.099	0.589	1136	1.355	0.46	1114	1.531	0.448	1123	1.490	0.433

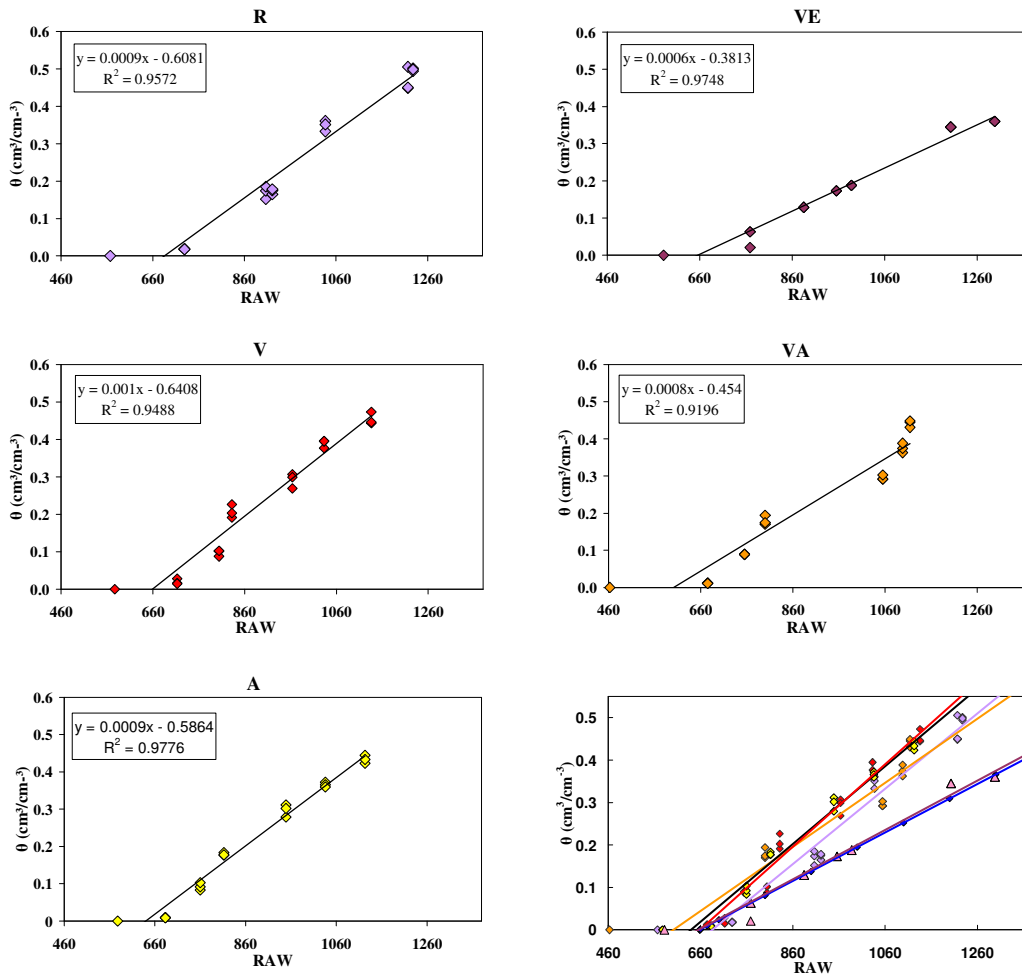


Figura 4-21 Calibrações específicas das sondas EC-10 para os solos do Talude utilizando-se o Método I. No canto inferior esquerdo observa-se a análise comparativa de todas as curvas de calibração obtidas.

As equações de calibração obtidas através destas correlações encontram-se na Tabela 4-11, onde constam também valores médios, desvios e coeficientes de variação obtidos para o ρ_d nos diferentes corpos de prova.

Tabela 4-11 Equações de calibração obtidas com o Método I.

Solo	Massa Específica Seca (g/cm^3)				Equação	
	pd (Anel)	Média	Despad	C.V	$\theta = 0.0006\text{RAW} - 0.3760$	R^2
R	1.632	1.341	0.088	6.539	$\theta = 0.0009*\text{RAW} - 0.6081$	0.9572
VA	1.535	1.277	0.082	6.405	$\theta = 0.0008*\text{RAW} - 0.454$	0.9196
V	1.497	1.494	0.084	5.603	$\theta = 0.001*\text{RAW} - 0.6408$	0.9488
VE	1.575	1.265	0.083	6.567	$\theta = 0.0006*\text{RAW} - 0.3813$	0.9748
A	1.625	1.527	0.045	2.921	$\theta = 0.0009*\text{RAW} - 0.5864$	0.9776

Os valores de ρ_d obtidos nos corpos de prova para o solo vermelho foram os mais próximos aos de campo, observando-se um maior coeficiente de variação e valores de ρ_d abaixo dos de campo nos demais.

Conforme já mencionado, confrontando os resultados das calibrações com os dados de monitoramento de campo, percebeu-se que muitas vezes as calibrações indicaram valores negativos, o que mostrou a necessidade de um ajuste, que foi proposto através do Método II.

4.4.5.2. Resultados Experimentais com o Método II

Visando comparar os resultados de calibrações obtidos pelo Método II e Método I, foram gerados gráficos de correlação com ambas as séries de dados (Figura 4-22). Observam-se duas retas em cada gráfico. As pretas são resultados do Método I e as em cores são resultados do Método II, onde foram acrescentados os pontos referentes ao solo seco em estufa a 105°C por 24hs.

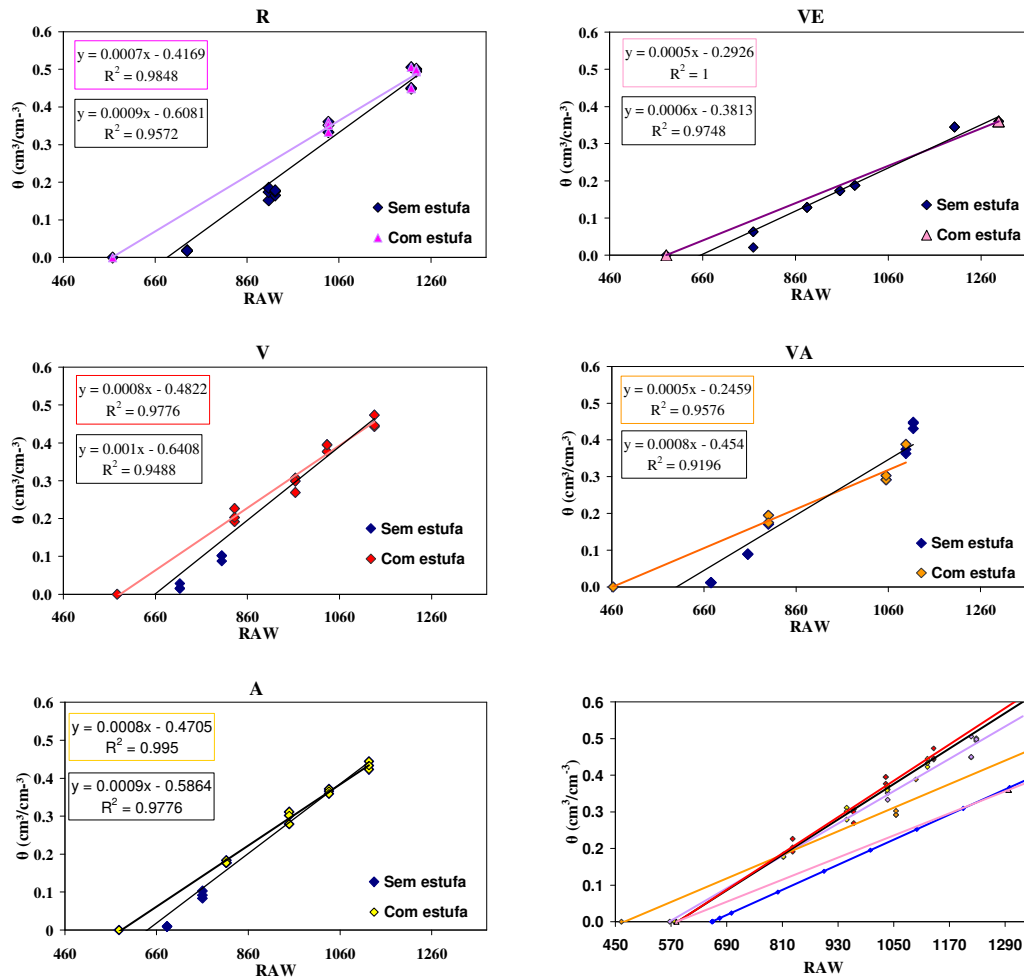


Figura 4-22 Calibrações específicas das sondas EC-10 para os solos do Talude utilizando-se o Método II (cores) e o Método I (em azul). No canto inferior esquerdo observa-se a análise comparativa de todas as curvas de calibração obtidas.

As equações de calibração obtidas, bem os valores de R^2 para os dados de ajuste selecionados encontram-se na Tabela 4-12.

Tabela 4-12 Equações de calibração e respectivos valores de R^2 obtidas com o Método II.

Solo	Equação de Calibração	R^2
R	$\theta = 0,0007*RAW - 0,4169$	0.9848
VA	$\theta = 0,0006*RAW - 0,2459$	0.9576
V	$\theta = 0,0008*RAW - 0,4822$	0.9776
VE	$\theta = 0,0005*RAW - 0,2926$	1
A	$\theta = 0,0008*RAW - 0,4705$	0.995

O uso das modificações implementadas nas curvas após a utilização do Método II se mostrou um passo importante para o refinamento das equações de calibração obtidas com o Método I, pois valores inferiores a 660 de RAW eram desconsiderados levando à perda de muitos dados de campo.

4.4.5.3. Resultados Experimentais pelo Método III

Os resultados das calibrações pelo Método III estão divididos em três etapas: traçado das curvas de compactação e calibrações por ρ_d para cada camada de solo; relação $\rho_d \times RAW$ para cada valor de θ em cada solo; determinação da equação de calibração.

Na primeira etapa, com o objetivo de confirmar a obtenção de diferentes valores de ρ_d e w , confirmando as etapas de compactação, foram geradas curvas para as diferentes energias de compactação empregadas (Tabela 8) e valores de w gerados com a adição dos volumes de água destilada de 0 a 1200mL.

Por questões práticas, não foi possível a execução do ensaio com adição de 1500mL de água, pois ocorre empelotamento e formação de vazios nas menores energias de compactação e excesso de plasticidade nas maiores ocorrendo distorções do corpo de prova que impossibilitam as aferições de volume. Fenômeno semelhante foi reportado por (Marinho *et al.*, 2005) na tentativa de estabelecer uma calibração para avaliação do efeito de variações de ρ_d nas calibrações de sondas TDR.

As Figura 4-23, Figura 4-24, Figura 4-25, Figura 4-26 e Figura 4-27 apresentam as curvas $w \times \rho_d$ obtidas para cada energia de compactação utilizada, junto os gráficos de calibração específicos para cada ρ_d correspondente.

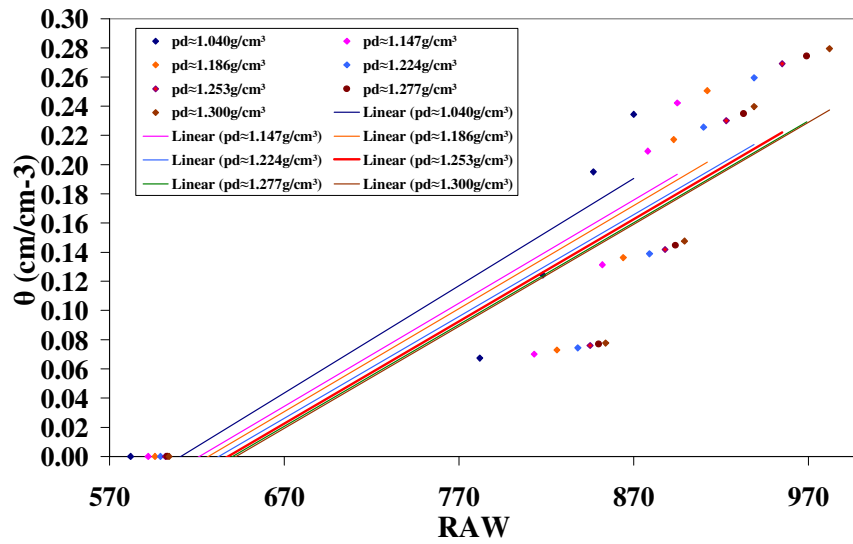
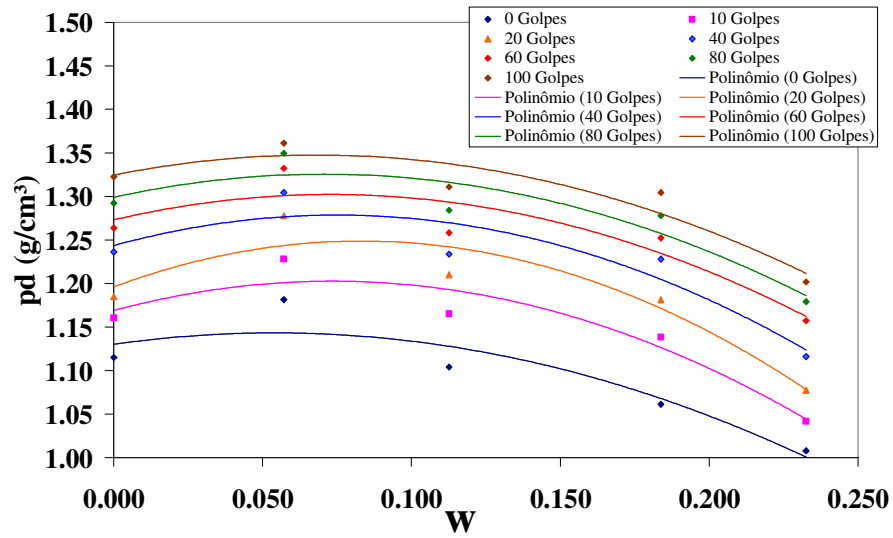


Figura 4-23 Curvas $w \times \rho_d$ obtidas para o solo VE e calibrações por valor de ρ_d .

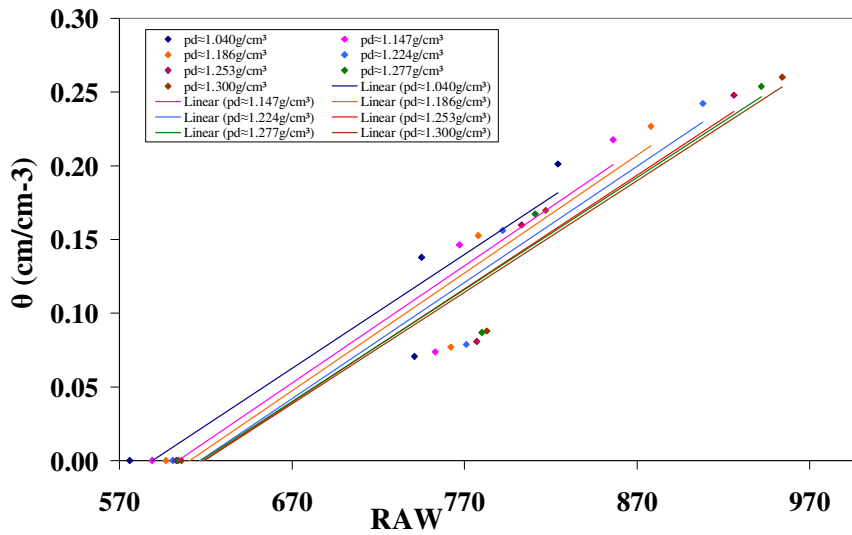
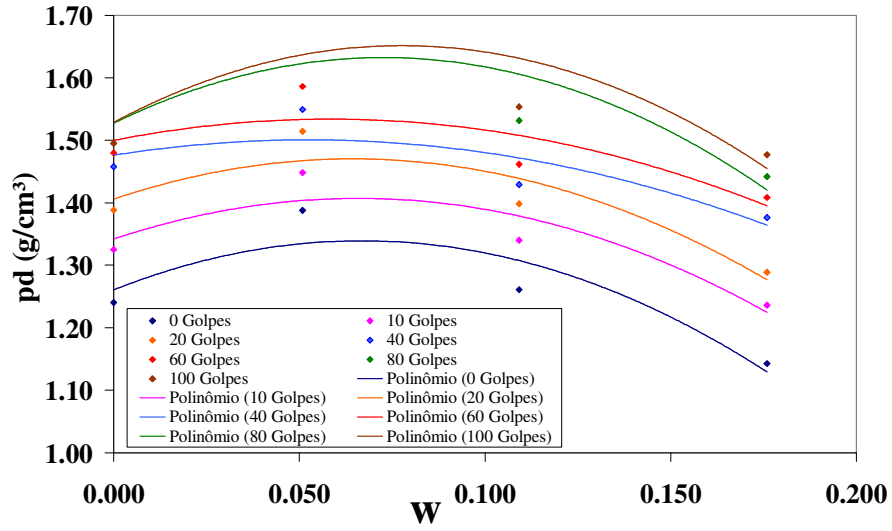


Figura 4-24 Curvas $w \times \rho_d$ obtidas para o solo V e calibrações por valor de ρ_d .

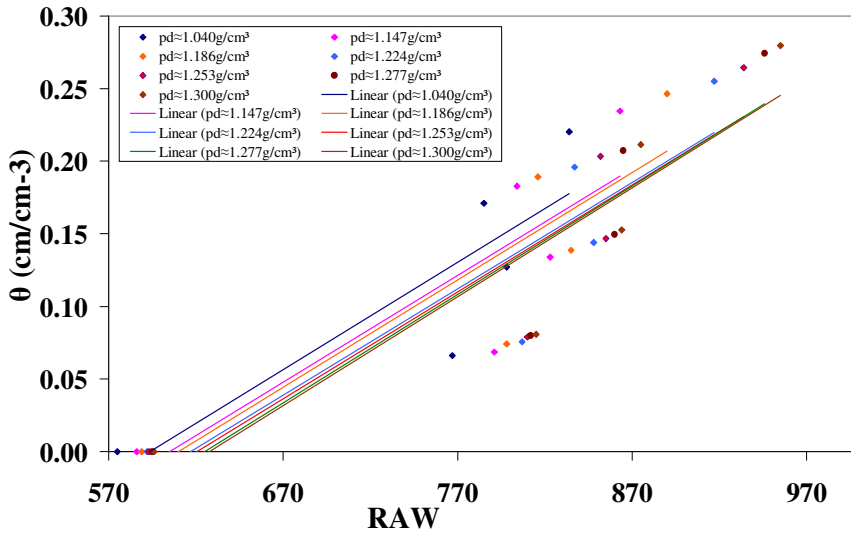
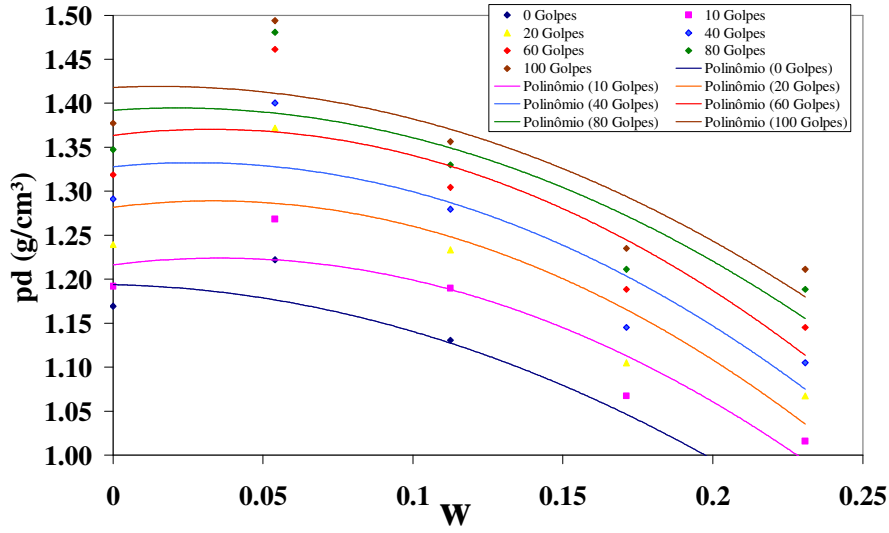


Figura 4-25 Curvas $w \times \rho_d$ obtidas para o solo R e calibrações por valor de ρ_d .

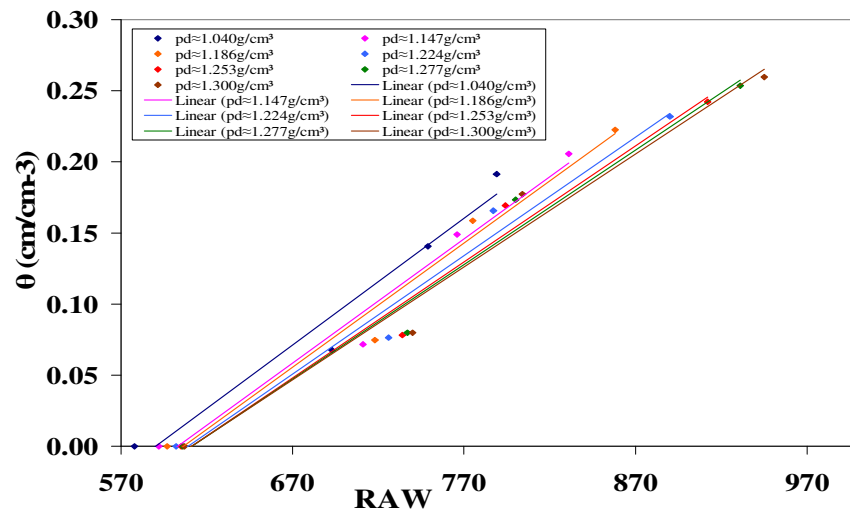
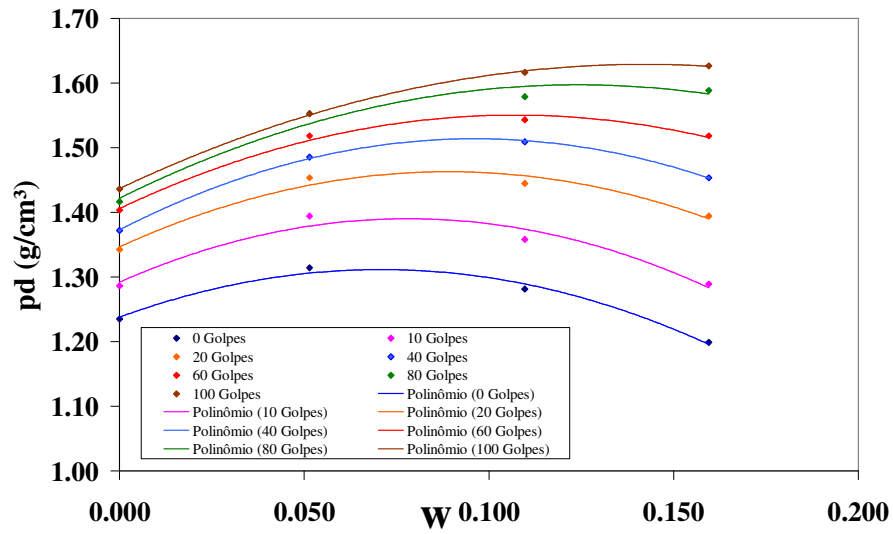


Figura 4-26 Curvas $w \times \rho_d$ obtidas para o solo A e calibrações por valor de ρ_d .

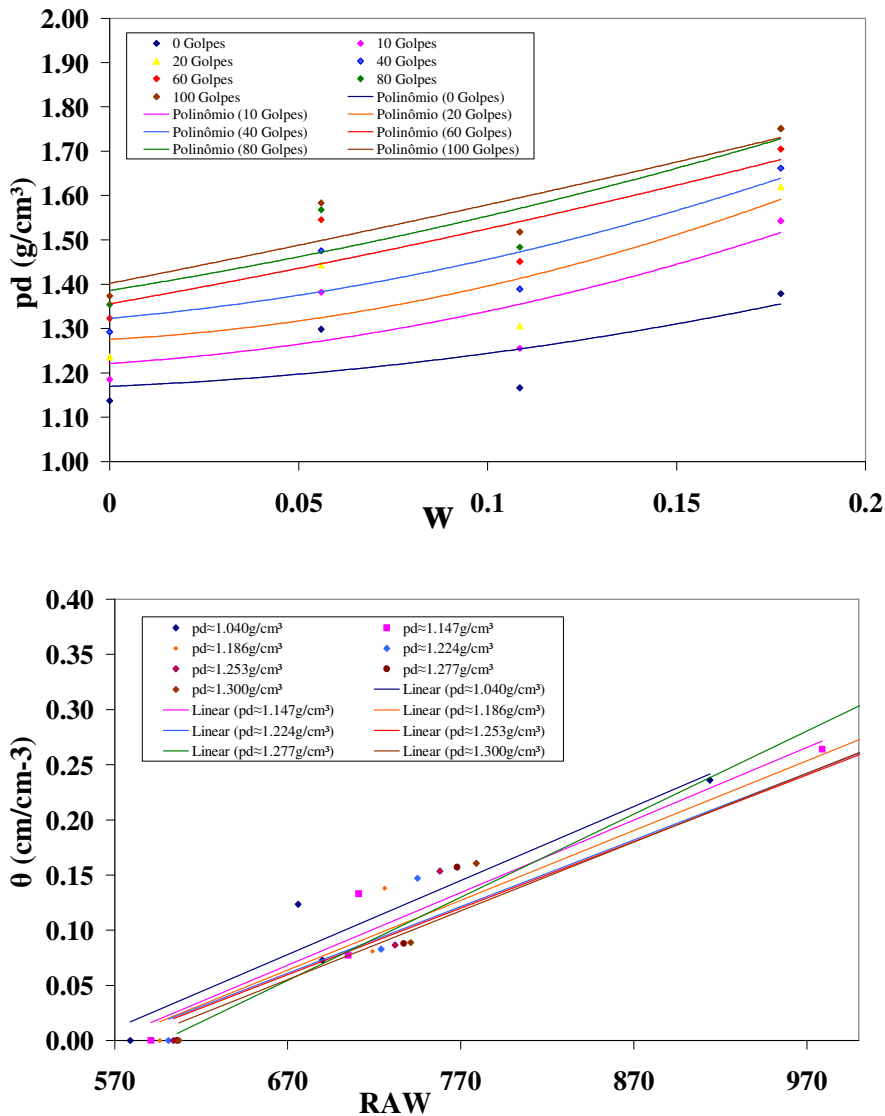


Figura 4-27 Curvas $w \times \rho_d$ obtidas para o solo VA e calibrações por valor de ρ_d

À exceção do solo vermelho amarelo, em todos os demais ensaios foi possível percorrer a trajetória de um ensaio de compactação. Tendo sido constatado isso, partiu-se para a avaliação dos efeitos de variações no ρ_d sobre as calibrações. O efeito detectado de variações do ρ_d sobre os gráficos de calibração indica um deslocamento progressivo das retas de calibração para direita para valores de ρ_d maiores, com um acréscimo nos coeficientes lineares e manutenção aproximada dos coeficientes angulares.

Objetivando extrapolar os valores de RAW para os valores de ρ_d de campo graficamente, posteriormente a esta etapa, valores de ρ_d e RAW foram

correlacionados para cada valor de θ em cada camada de solo, visando ainda comparar os dados com previsões lineares. Os dados obtidos graficamente mostraram-se bastante semelhantes às previsões, de modo que em termos gerais qualquer uma das metodologias se presta ao caso.

Uma vez extrapolados os valores de RAW para cada valor de θ foram geradas curvas de calibração para valores de ρ_d de campo dos solos. Observa-se nos gráficos que aumentos no ρ_d são diretamente correlacionados a acréscimos dos valores de RAW em todos os solos estudados.

Com o objetivo de analisar esta tendência foi gerado um gráfico para cada camada de solo com as médias dos coeficientes angulares e lineares das retas de calibração ($\rho_d \times \text{RAW}$) para cada valor de θ nos corpos de prova. Os dados destas calibrações foram divididos, por camada de solo e apresentados nas Figura 4-28, Figura 4-29, Figura 4-30, Figura 4-31 e Figura 4-32.

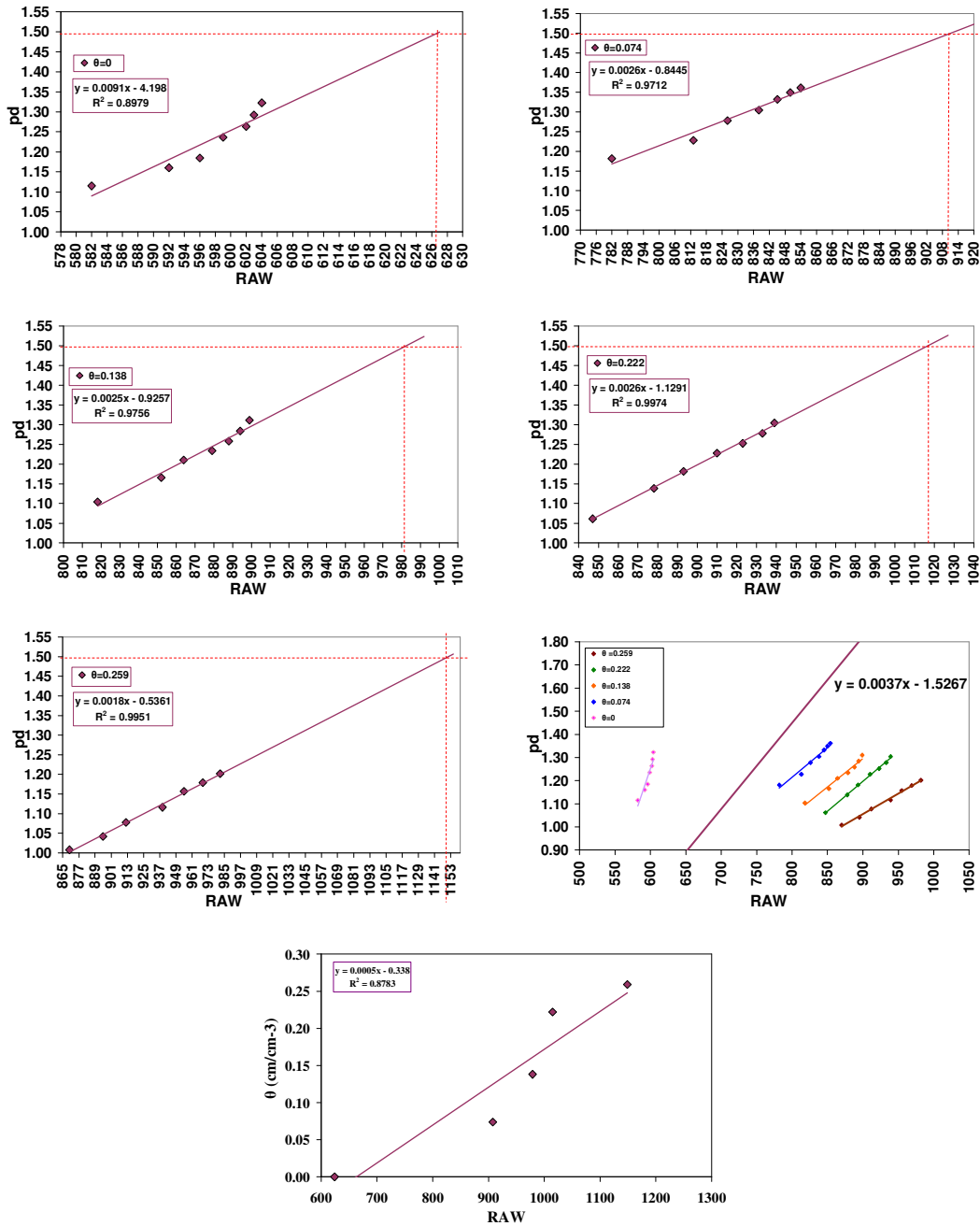


Figura 4-28 Resultados de calibrações para o solo VE utilizando-se o Método III. Os gráficos A, B, C e D apresentam a relação p_d versus RAW para os diferentes valores de θ obtidos, o quadro E apresenta a relação geral entre p_d versus RAW para todos os valores de θ e o quadro F apresenta a calibração resultante.

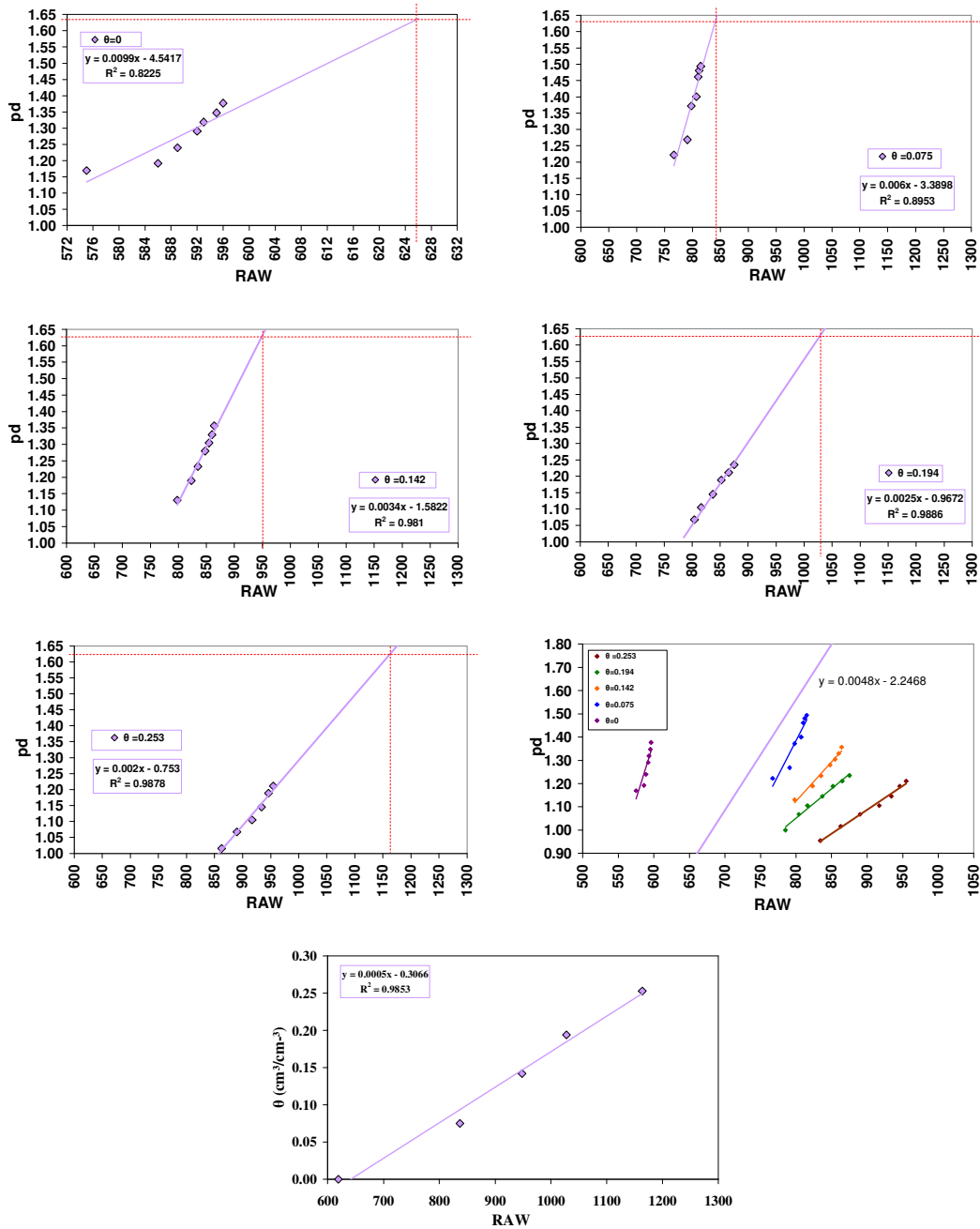


Figura 4-29 Resultados de calibrações para o solo R utilizando-se o Método III. Os gráficos A, B, C e D apresentam a relação pd versus RAW para os diferentes valores de θ obtidos, o quadro E apresenta a relação geral entre pd versus RAW para todos os valores de θ e o quadro F apresenta a calibração resultante.

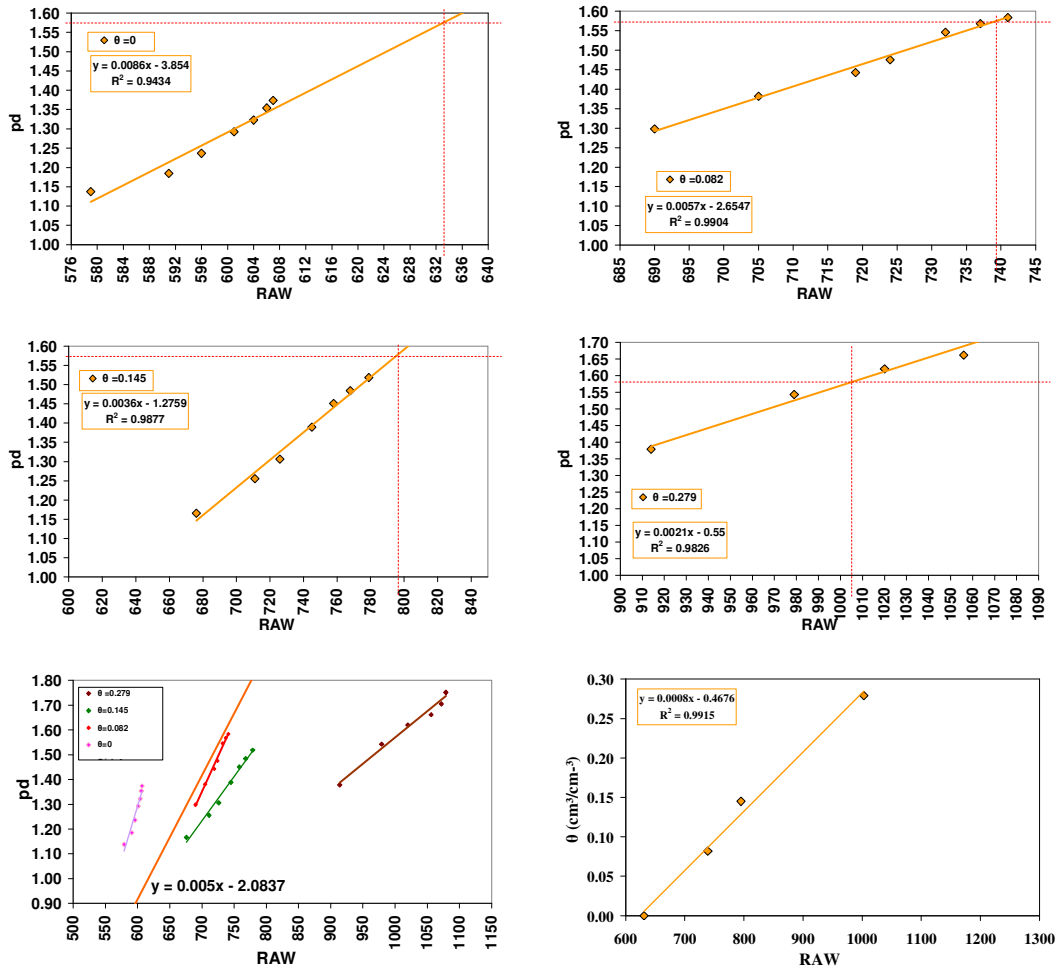


Figura 4-30 Resultados de calibrações para o solo VA utilizando-se o Método III. Os gráficos A, B e C apresentam a relação ρ_d versus RAW para os diferentes valores de θ obtidos, o quadro D apresenta a relação geral entre ρ_d versus RAW para todos os valores de θ e o quadro E apresenta a calibração resultante.

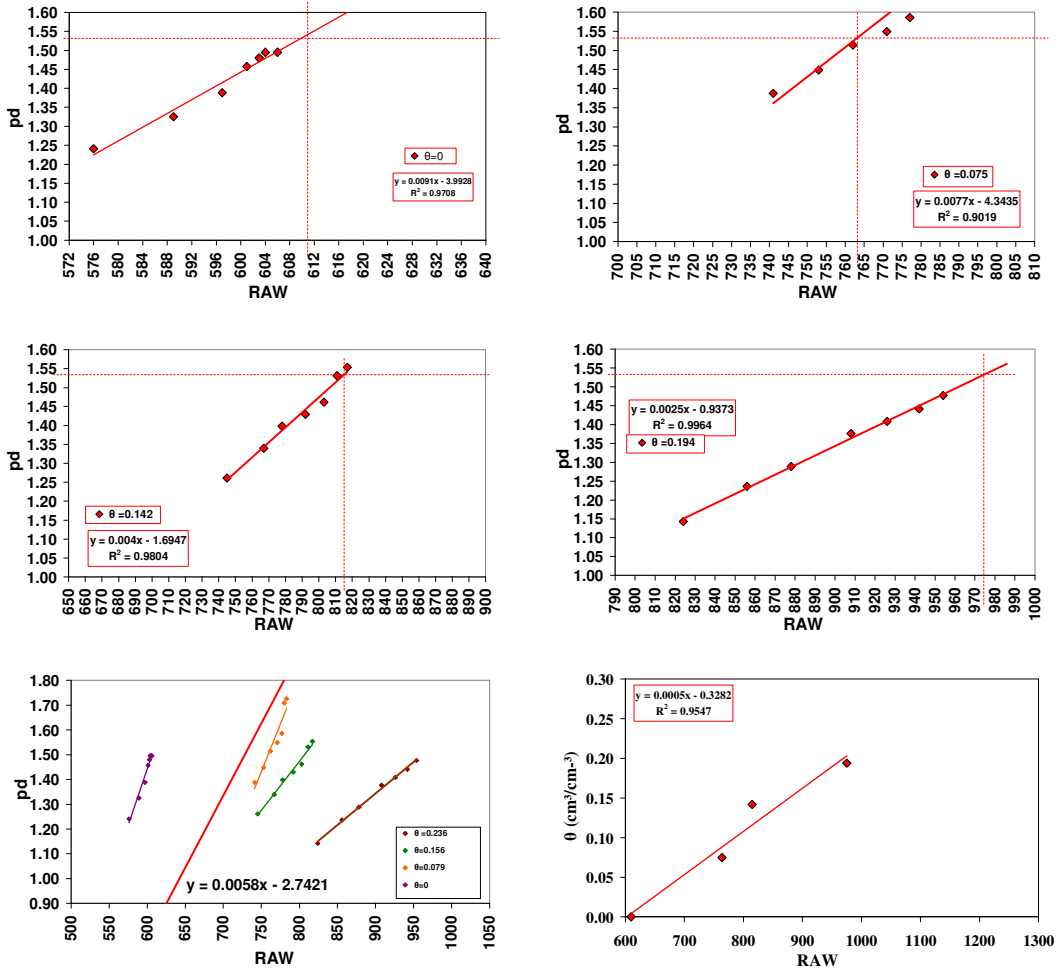


Figura 4-31 Resultados de calibrações para o solo V utilizando-se o Método III. Os gráficos A, B e C apresentam a relação ρ_d versus RAW para os diferentes valores de θ obtidos, o quadro D apresenta a relação geral entre ρ_d versus RAW para todos os valores de θ e o quadro E apresenta a calibração resultante.

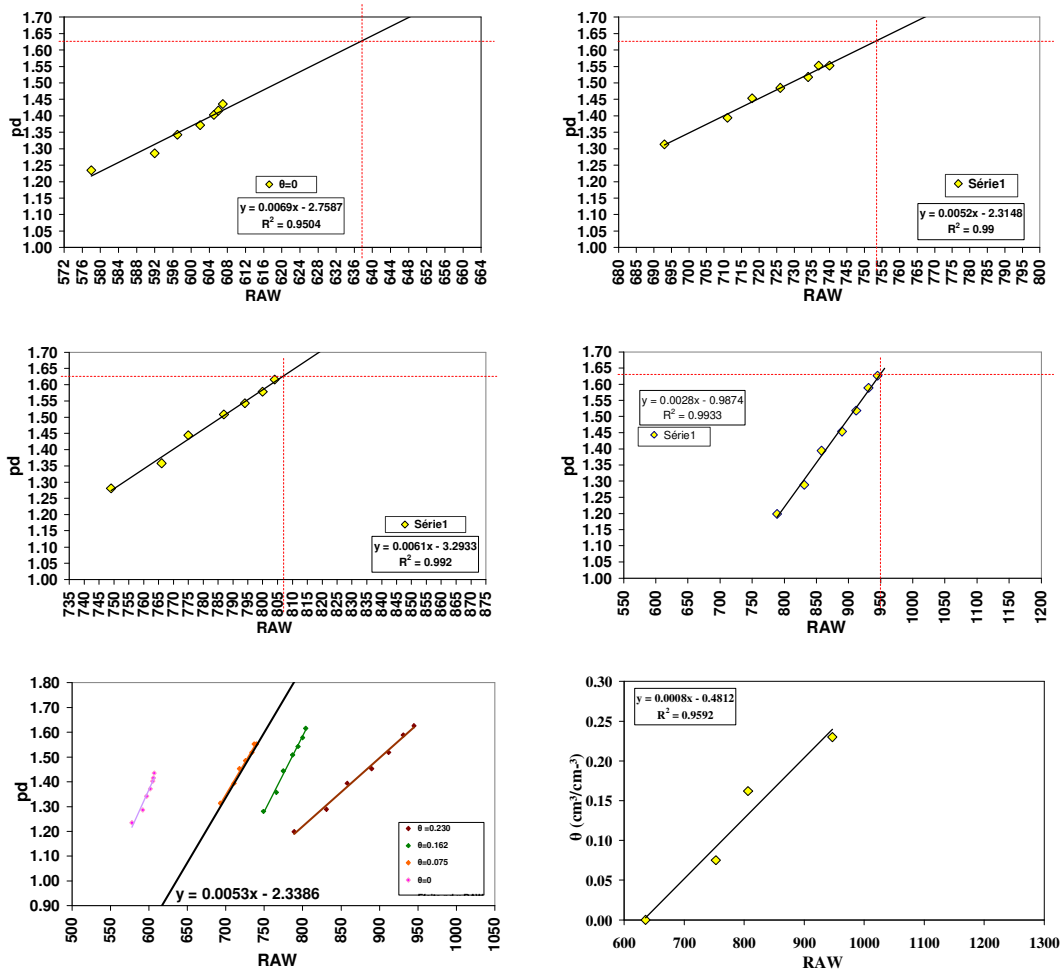


Figura 4-32 Resultados de calibrações para o solo A utilizando-se o Método III. Os gráficos A, B e C apresentam a relação ρ_d versus RAW para os diferentes valores de θ obtidos, o quadro D apresenta a relação geral entre ρ_d versus RAW para todos os valores de θ e o quadro E apresenta a calibração resultante.

Os resultados das calibrações pelo Método III, sintetizados na Figura 4-33 e Tabela 4-13, mostram à exceção do solo vermelho-escuro, nos demais foi possível obter valores de R^2 superiores a 0.95, com valores de coeficiente angular e linear parecidos com as calibrações anteriores, mostrando que o método foi bastante eficiente. Observou-se, entretanto a necessidade de inclusão dos pontos de calibração obtidos no Método II para solo seco em estufa de modo a eliminar erros de subestimativas de valores de campo.

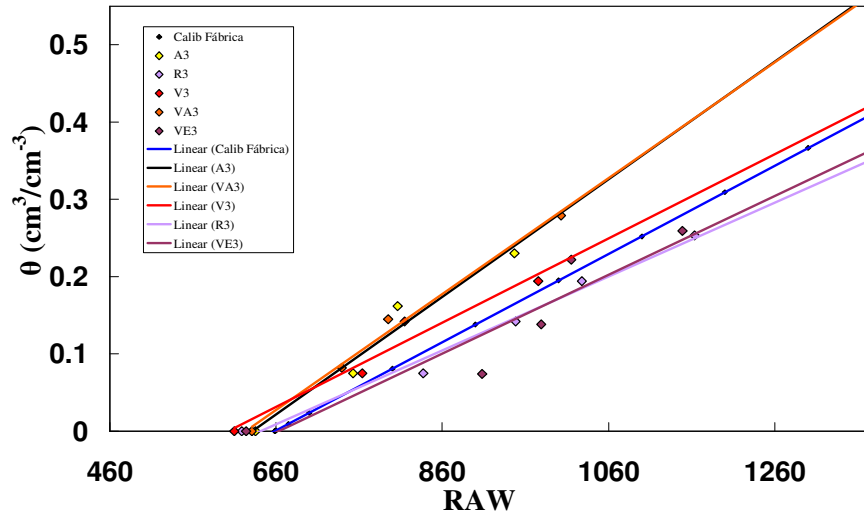


Figura 4-33 Calibração com Método III, comparadas à equação de calibração de fábrica.

Tabela 4-13 Equações de calibração e respectivos valores de R^2 obtidas através do Método III.

Solo	Equação de Calibração	R^2
R	$\theta = 0,0005*RAW - 0,3066$	0.9853
VA	$\theta = 0.0008*RAW - 0.4676$	0.9915
V	$\theta = 0.0005*RAW - 0.3282$	0.9547
VE	$\theta = 0.0005*RAW - 0.338$	0.8783
A	$\theta = 0.0008*RAW - 0.4812$	0.9592

4.4.6. Discussão

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa de todos os métodos a Figura 4-34 mostra os resultados de todas as calibrações comparados à equação de calibração de fábrica (em azul). Um primeiro aspecto constatado foi um coeficiente angular substancialmente maior em relação à equação de calibração de fábrica, além de um pequeno decréscimo nos coeficientes lineares, o que provavelmente ocorre provavelmente em função de particularidades relativas distribuição granulométrica, curva característica de sucção, micromorfologia e mineralogia dos solos residuais tropicais.

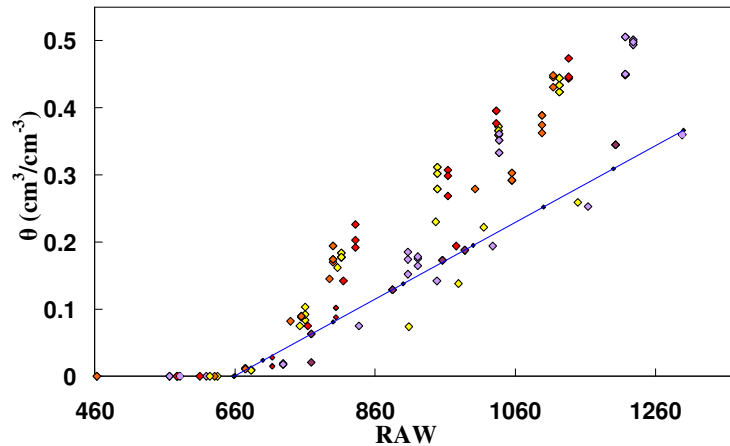


Figura 4-34 Resultados de todos os pontos de calibração para os diferentes solos estudados, comparados à equação de calibração de fábrica.

Avaliando os gráficos da Figura 4-35, observa-se que o Método III apresentou um resultado substancialmente diferente para o solo vermelho e roxo, sendo que o resultado médio de todas as calibrações (Método IV) mostrou também problemas de subestimativas.

Concluída a série de ensaios de calibração com uso dos três métodos, cujos resultados encontram-se sintetizados na Figura 4-34 e Figura 4-35, foi realizada uma análise dos resultados das diferentes calibrações em relação aos dados de monitoramento de campo obtidos de conjuntos de sondas instalados no talude em diferentes profundidades e agrupados por camada de solo. Para isso, foram tomados como base ensaios de caracterização dos materiais estudados, resumidos na Tabela 4-14:

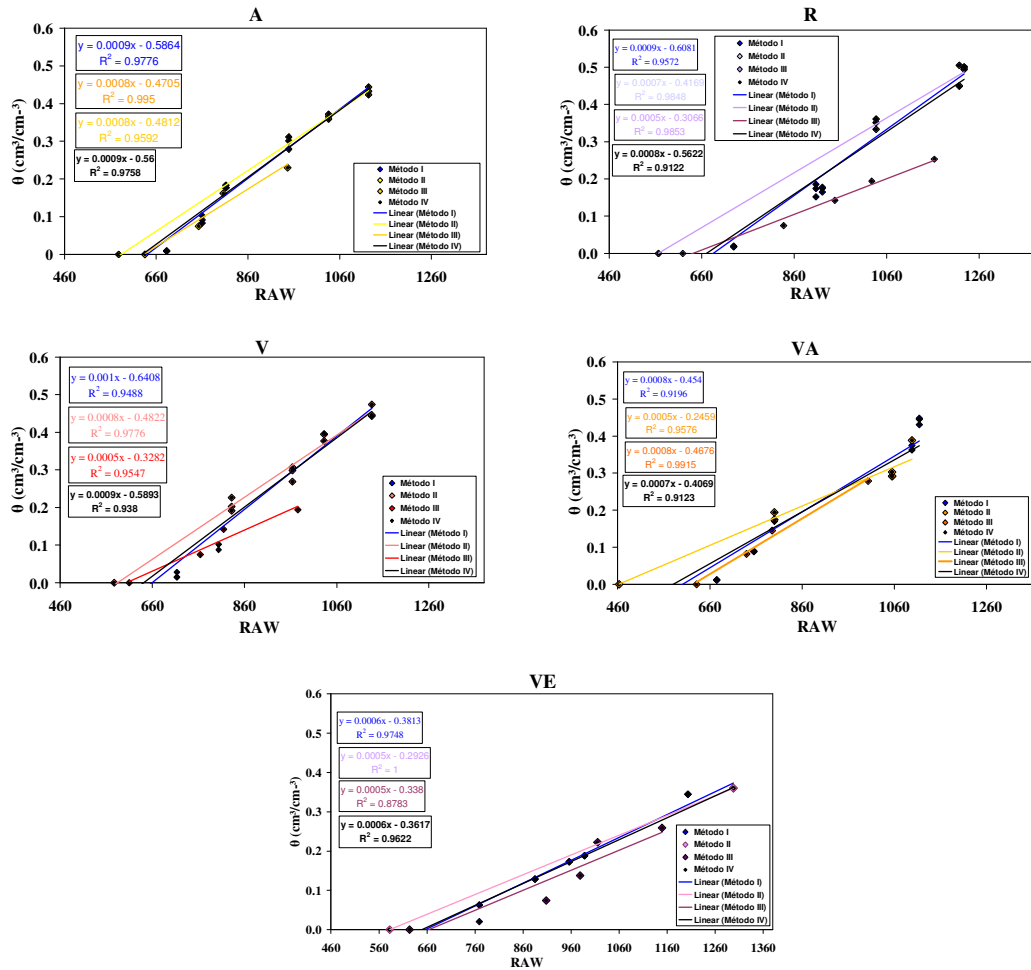


Figura 4-35 Comparação dos diferentes métodos de calibração das sondas EC-10 para os solos do Talude utilizando-se o Método I (azul) Método II (cores claras) e o Método III (cores escuras), Método IV (Preto).

Tabela 4-14 Resumo de ensaios de caracterização dos solos.

Solo	Granulometria (%)				Gs	e	n (%)	ρ_d (g/cm ³)
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila				
R	0.0	24.5	28.6	46.9	2.675	0.64	38.9	1.632
VE	0.0	9.0	25.1	65.8	2.728	0.82	45.0	1.497
V	2.7	50.6	17.3	29.4	2.651	0.72	42.0	1.535
VA	8.8	61.1	9.1	20.9	2.651	0.68	40.5	1.575
A	0.4	53.9	28.8	16.9	2.654	0.63	38.6	1.625

Primeiramente, visando a interpretação dos dados de monitoramento utilizando-se diferentes métodos de calibração para o solo vermelho-amarelo, foram gerados gráficos para o ponto de monitoramento ITS nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m e 0.75 m durante o período de 27/10/2008 a 9/11/2008 (Figura

4-36). Pode-se notar como inclusão de pontos pelo Método II se mostrou importante, sendo que em nenhum outro método foi possível incluir os menores valores de RAW encontrados no monitoramento de campo para os dias mais secos.

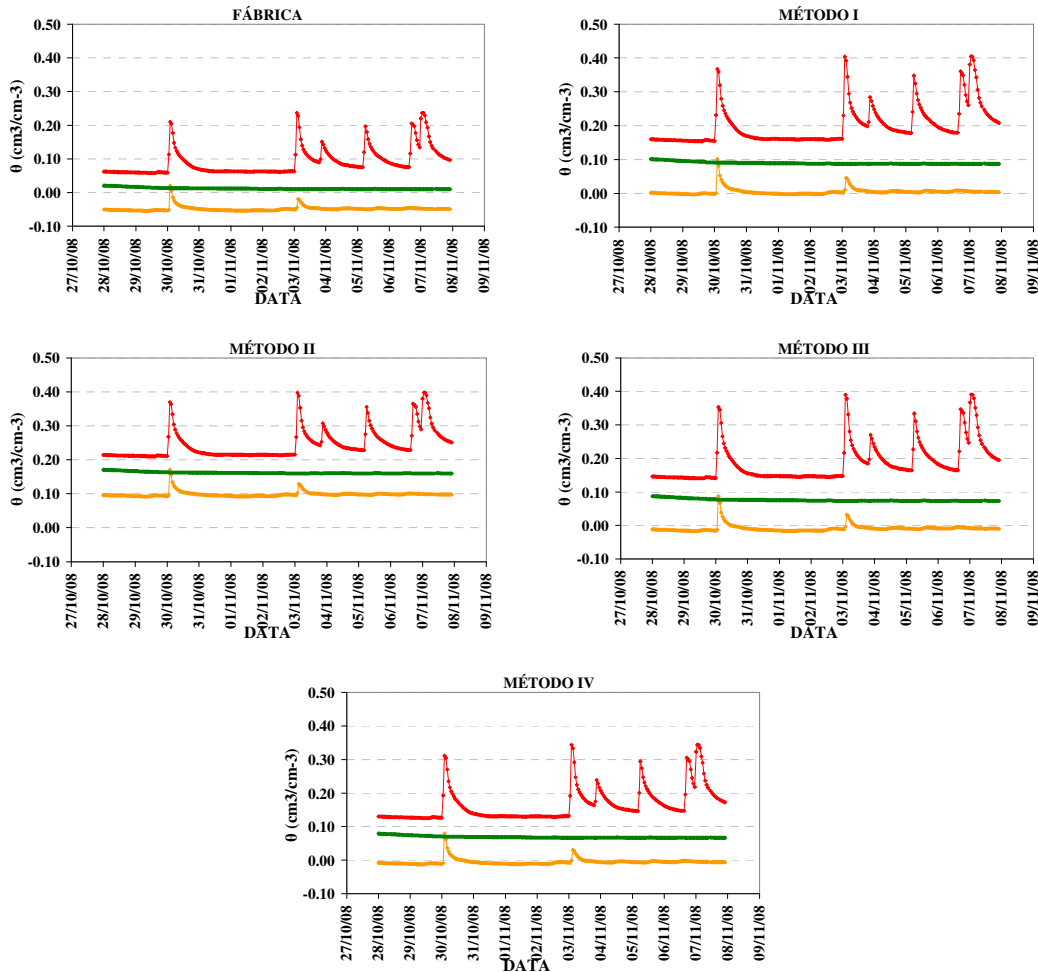


Figura 4-36 Gráficos para o ponto de monitoramento 1TS (solo VA), utilizando as diferentes equações de calibração obtidas, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m e 0.75 m, no período de 27/10/2008 a 9/11/2008.

Em termos de valores elevados de θ , todas as equações mostraram uma tendência coerente, com valores máximos em torno de 40%, o que é perfeitamente condizente com o valor esperado para o solo saturado, uma vez que o valor de n de campo é de 40.5%.

Para a análise dos dados de monitoramento e equações de calibração para o solo VE, foram selecionados os dados de monitoramento do ponto 4TM, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m e 0.90 m para o período de monitoramento de 10/11/2008 a 23/11/2008 (Figura 4-37). Neste caso, todas as

curvas podem se ajustar teoricamente aos dados de campo, uma vez que os valores de n para este solo são de 40%, porém supõe-se que os ajustes foram melhores para as calibrações com os Métodos II e III.

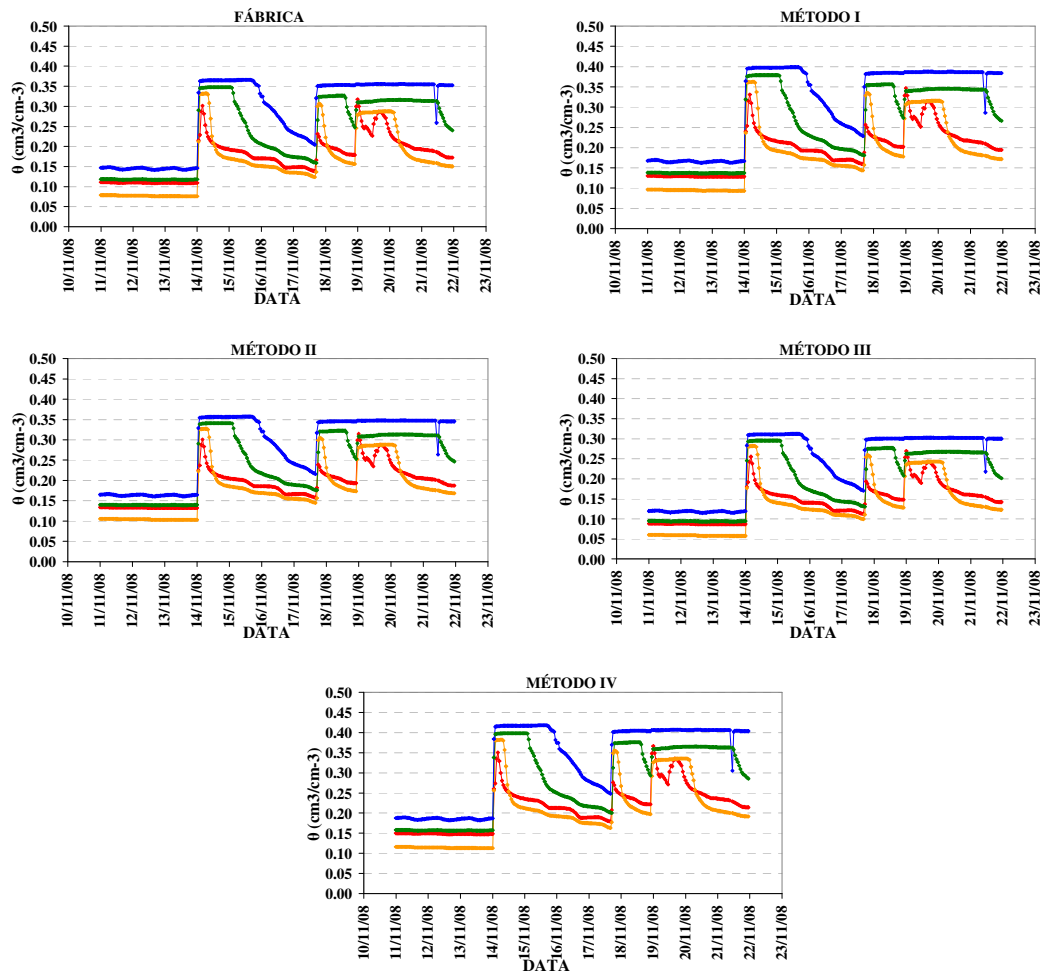


Figura 4-37 Gráficos para o ponto de monitoramento 4TM (solo VE), utilizando as diferentes equações de calibração obtidas, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m e 0.75 m, no período de 20/11/2008 a 23/11/2008.

Para a análise dos dados de monitoramento e equações de calibração para o solo roxo foram selecionados dados de monitoramento do ponto 3TI, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m e 0.90 m para o período de monitoramento de 30/08/2008 a 03/10/2008 (Figura 4-38). Como os valores de n são de 28%, observa-se que as equações de calibração obtidas pelos Métodos I e II e IV não estão coerentes, sendo a melhor escolha a equação pelo Método III, diferente de todos os demais solos.

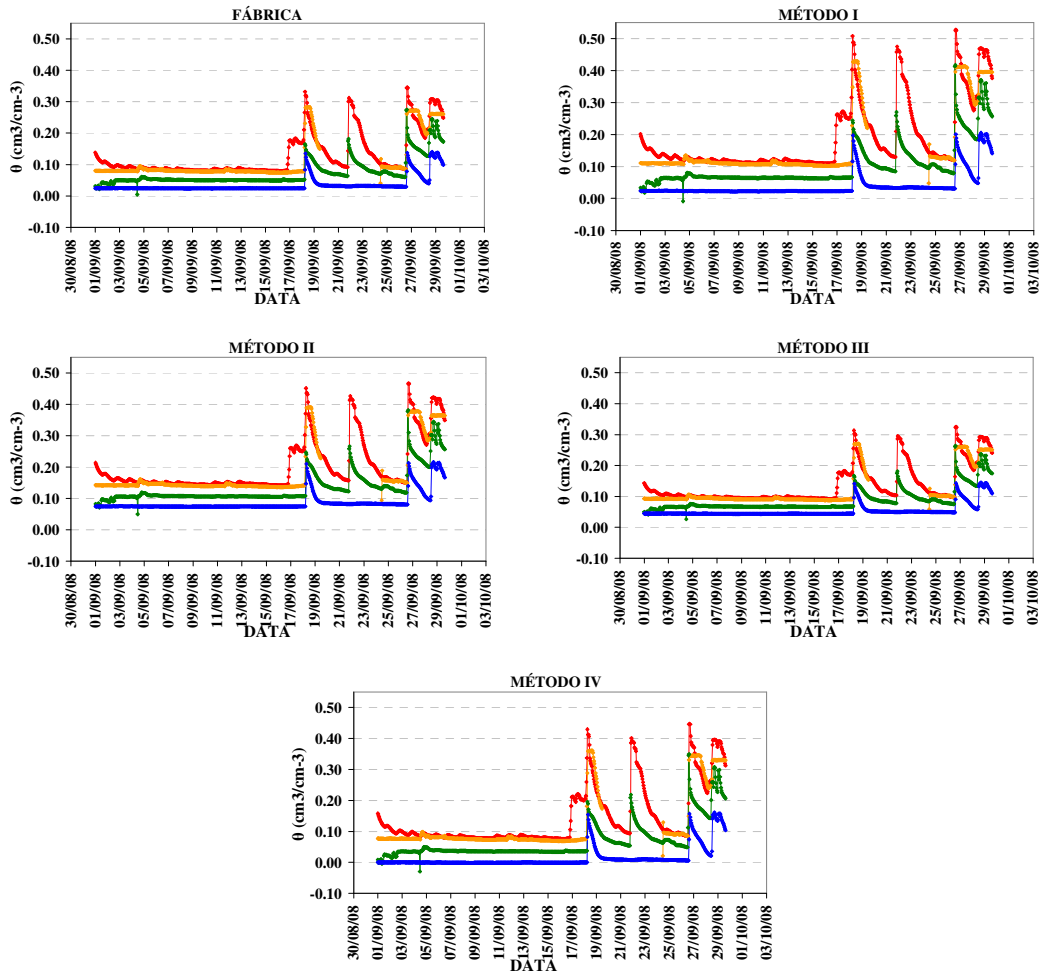


Figura 4-38 Gráficos para o ponto de monitoramento 3TI (solo R), utilizando as diferentes equações de calibração obtidas, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m e 0.75 m, no período de 30/08/2008 a 03/10/2008.

Para a análise dos dados de monitoramento e equações de calibração para o solo vermelho foram selecionados dados de monitoramento do ponto 4TS, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m e 0.90 m para o período de monitoramento de 30/08/2008 a 01/10/2008 (Figura 4-39).

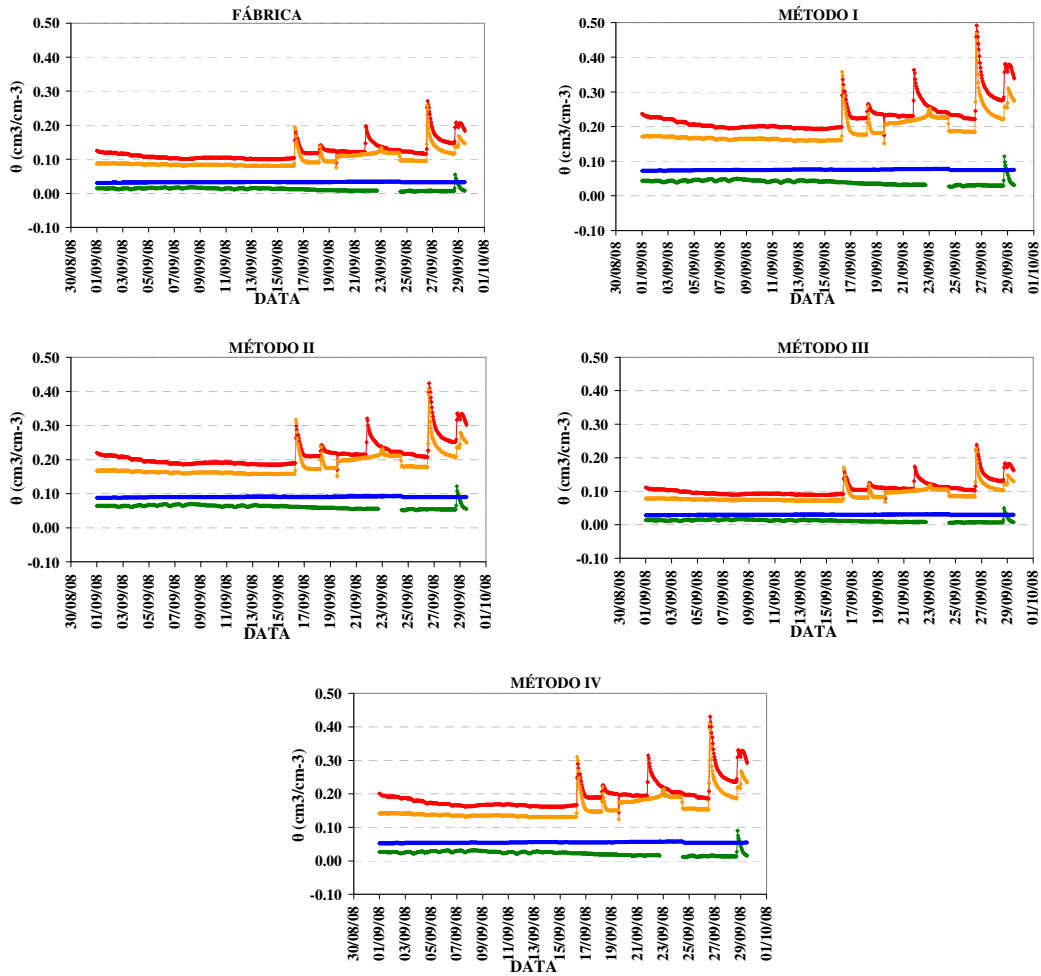


Figura 4-39 Gráficos para o ponto de monitoramento 4TS (solo V), utilizando as diferentes equações de calibração obtidas, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m e 0.75 m, no período de 30/08/2008 a 01/10/2008.

Para a análise dos dados de monitoramento e equações de calibração para o solo amarelo foram selecionados dados de monitoramento do ponto 4TI, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m e 0.90 m para o período de monitoramento de 30/08/2008 a 01/10/2008 (Figura 4-40).

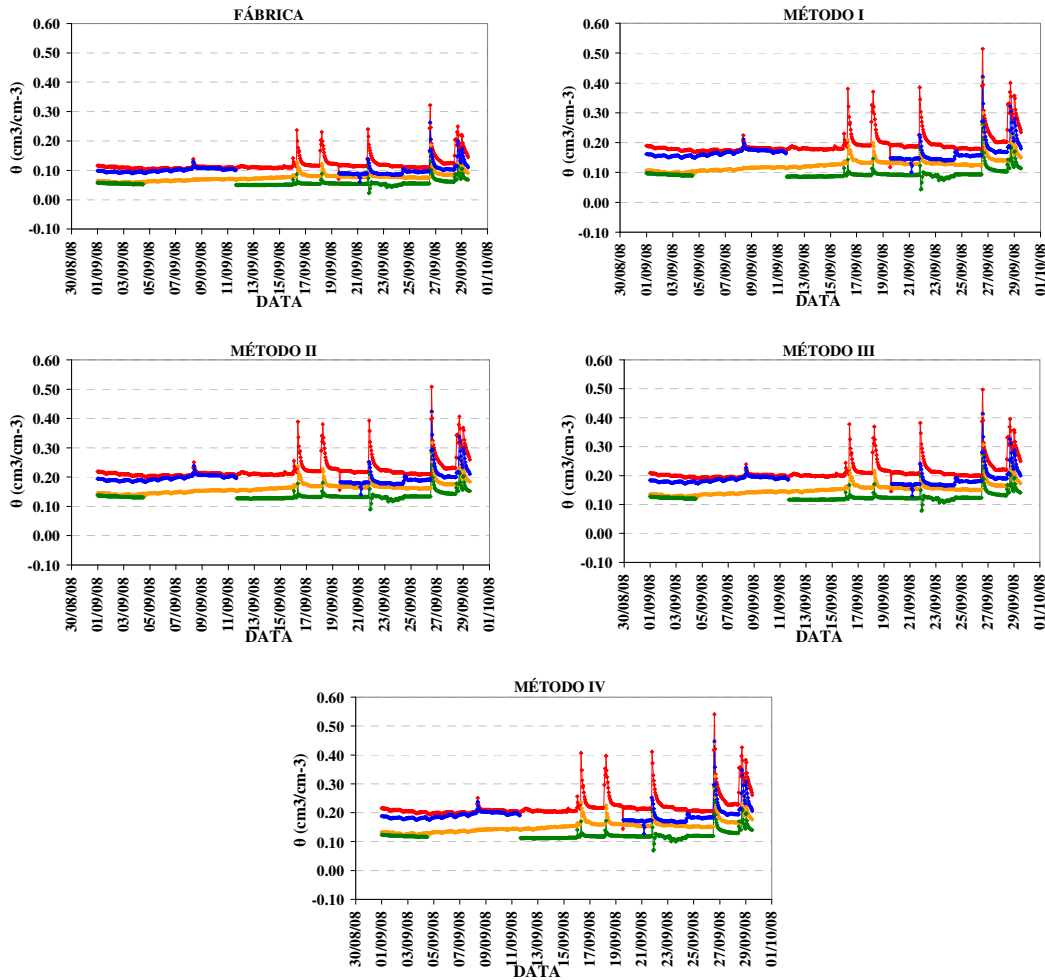


Figura 4-40 Gráficos para o ponto de monitoramento 4T1 (solo A), utilizando as diferentes equações de calibração obtidas, nas profundidades de 0.25 m, 0.50 m e 0.75 m, no período de 30/08/2008 a 01/10/2008.

Considerando um n de 38.6%, as maiores limitações nas calibrações deste solo referem-se aos valores máximos, uma vez que só foram obtidos valores coerentes nas profundidades de 0.90 m, 0.75 m, sendo que para as profundidade de 0.25 m e 0.50 m todas as calibrações, exceto a própria curva de calibração de fábrica, geraram dados de θ maiores que os valores de n do solo.

Talvez isto esteja ocorrendo devido à falhas na determinação dos valores de n para o solo em laboratório, porém, como os valores se aproximam muito dos encontrados para os outros materiais do talude, supõe-se que este comportamento pode estar ocorrendo também em função de outras variáveis, como distribuição granulométrica e Limites de Atterberg, cujos valores são substancialmente menores em relação aos demais solos avaliados.

4.5. Escoamento Superficial

A seleção correta de instrumentos para medição de vazão depende de vários fatores. Dentre estes se destacam a exatidão desejada para a medição, o tipo de fluido envolvido (líquido ou gás, limpo ou sujo, número de fases, condutividade elétrica, transparência, etc.) e as condições termodinâmicas de trabalho: níveis de pressão e temperatura no qual o medidor deve atuar; espaço físico disponível; custo, etc. (ASME, 1971).

Em parcelas de erosão a tubulação (normalmente de $\Phi = 100$ mm) que conduz a enxurrada para as caixas coletoras pode ou não ficar saturada durante as chuvas, sendo necessário um sistema que meça pequenas vazões e permita a passagem de sólidos suspensos e da carga de fundo sem problemas de entupimento. A implantação de um sistema medição de vazão em canal aberto para medição de escoamento livre tem sido recomendada para situações bastante semelhantes, como na medição de enxurradas em valas de drenagem de talhões de cultivo (MCT/FINEP/CT-HIDRO, 2008) ou em sistemas de controle de vazão de estações de tratamento de efluentes (ETEs) industriais ou urbanos. Costa (2004) desenvolveu um sistema para medições automatizadas de escoamento superficial em parcelas de erosão com 80m², onde o volume escoado de cada parcela foi conduzido para Calhas HS¹⁴ onde foram instalados sensores de nível.

As maiores limitações encontradas nestes sistemas até hoje se relacionam à manutenção das condições de fluxo nos vertedores e flumes, diante da dinâmica natural de transporte e deposição de sedimentos em canais, onde o assoreamento, obstrução e entupimento destes são problemas recorrentes, prejudicando tanto medidas de níveis quanto de concentração de sedimentos.

Dentre os diferentes tipos de sistemas existentes para medições em canal aberto, os vertedores do tipo Calha Parshall apresentam como principais vantagens uma perda de carga desprezível, medições bastante precisas e características eficientes de auto-limpeza.

¹⁴ Calhas HS – São um tipo de vertedouro (ou flume) com saída triangular de paredes espessas (semelhante a um funil), com profundidade de 0.6 m, precedido por um poço tranquilizador retangular onde são realizadas as medições de nível.

4.5.1. Calhas Parshall

Os medidores Parshall, ou Calhas Parshall, são tipos de flumes em que, através de estrangulamentos e ressaltos, estabelecem, para uma determinada seção vertical a montante, uma relação entre a vazão e a lâmina de fluido. O sistema foi desenvolvido pelo engenheiro Ralph L. Parshall, em cooperação com o Departamento de Irrigação dos Estados Unidos (1920-1925), sendo considerado uma modelo aprimorado de Calha de Venturi (USBR, 1984).

Desenvolvido inicialmente para aplicações em irrigações, observa-se atualmente seu uso mais freqüente em aplicações industriais e em saneamento, como na medição contínua de vazão e/ou mistura rápida de coagulantes em Estações de Tratamento de Água (ETAs) e / ou Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) industriais ou urbanos. De fato, na grande maioria das Estações de Tratamento de Água projetadas e construídas no Brasil, quase que por exigência, a medição de água bruta é realizada por este medidor (Frangipani & Gomes, 2005).

A Calha Parshall possui uma estrutura com paredes verticais, composta de três partes: uma seção convergente, uma seção estrangulada (*throat section/* garganta) e uma seção divergente. O nível do fundo do canal na seção convergente deve ser mais alto do que o nível na seção divergente. A Seção Convergente tem por função reduzir/adequar à velocidade do fluido em sua entrada, diminuindo a possibilidade de turbulências e aumentando a capacidade de precisão de mensuração do equipamento. Na Seção de Estrangulamento (Garganta) o líquido é submetido a uma concentração produzida pelo estreitamento das laterais e/ou pela elevação do fundo do canal. A Seção Divergente ou de Alargamento, posicionada na parte final do equipamento, tem por objetivo propiciar a normalização do fluxo do canal. A Figura 4-41 mostra os diferentes componentes das Calhas Parshall, observando-se também a terminologia adotada para cada uma das medidas de projeto.

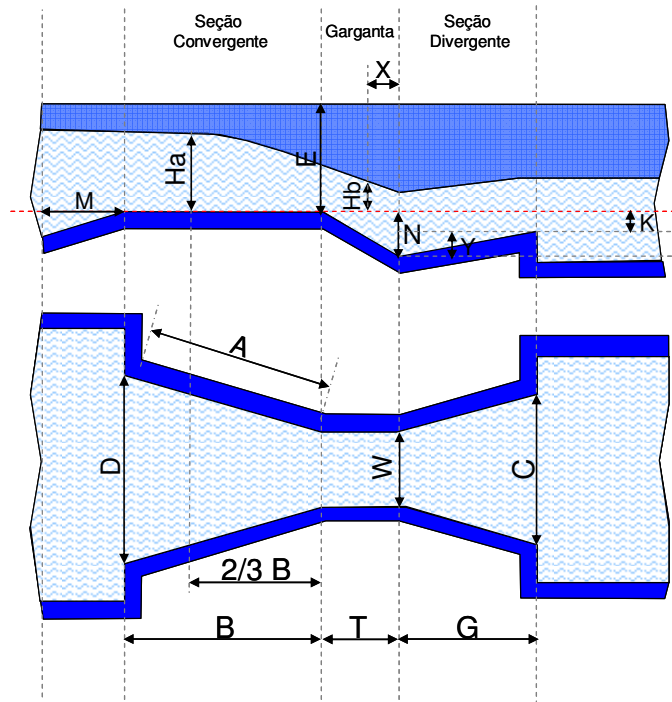


Figura 4-41 Componentes da Calha Parshall e terminologia para medidas de projeto (adaptado de ASTM 1941:1975).

As dimensões das medidas de projeto variam de acordo com o tamanho da calha, que é medido de acordo com a largura da garganta (W). A Tabela 4-15 relaciona estas medidas em função de W , de acordo com a norma ASTM 1941:1975.

Tabela 4-15 Dimensões dos componentes da Calha Parshall de acordo com os valores de W (dados de ASTM 1941:1975).

W	A	B	C	D	E	T	G	K	M	N	X	Y
"	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1"	363	356	93	168	229	76.2	203	19	-	28.6	7.94	12.7
2"	414	406	135	214	254	114	254	22.2	-	42.9	9.52	25.4
3"	467	457	178	259	610	152	305	25.4	-	57.2	25.4	38.1
6"	621	610	394	397	610	305	610	76.2	305	114.3	50.8	76.2
9"	880	864	381	575	762	305	457	76.2	305	114.3	50.8	76.2
12"	1372	1343	610	845	914	610	914	76.2	381	228.6	50.8	76.2
18"	1448	1419	762	1026	914	610	914	76.2	381	228.6	50.8	76.2
24"	1524	1495	914	1207	914	610	914	76.2	381	228.6	50.8	76.2
36"	1677	1645	1219	1572	914	610	914	76.2	381	228.6	50.8	76.2
48"	1829	1794	1524	1937	914	610	914	76.2	457	228.6	50.8	76.2
60"	1981	1943	1829	2302	914	610	914	76.2	457	228.6	50.8	76.2
72"	2134	2092	2134	2667	914	610	914	76.2	457	228.6	50.8	76.2
84"	2286	2242	2438	3032	914	610	914	76.2	457	228.6	50.8	76.2
96"	2438	2391	2743	3397	914	610	914	76.2	457	228.6	50.8	76.2

O princípio de funcionamento da Calha é semelhante à Calha Venturi. O estrangulamento existente após o trecho convergente produz um nível no líquido medido diretamente relacionado à vazão. A partir das medições deste nível são obtidas leituras de vazão. A equação de descarga usada para este tipo de vertedouro é dada por:

$$Q = 2.2 * W * (H)^n \quad \text{[Equação 4-27]}$$

Onde: W em polegadas; H é a altura do da lâmina do fluido na seção convergente; n é um valor que difere ligeiramente de 3/2 de acordo com as dimensões da calha.

As Calhas Parshall, assim qualquer tipo de vertedouro, apresentam tipicamente uma precisão de +/- 2 a 4% (v.i.)¹⁵ (Frangipani & Gomes, 2005). A precisão de calhas Parshall relacionada à sua submersão, que é expressa pela relação entre os níveis de água à montante (Ha) e à jusante (Hb). A relação Ha/Hb, expressa em %, é chamada de submersão ou afogamento. Obstáculos ou falta de declividade a jusante são causas frequentes de afogamento das calhas. Na operação não desejada, porém possível, ou seja, condição de escoamento por submersão, além da medida na crista, será preciso também uma medida da altura da lâmina de água a jusante, num ponto próximo da seção final da garganta.

De acordo com ASTM 1941:1975, uma submersão de 60% (para Calhas de até 9") e 70% para as demais, não afeta as condições de escoamento. Valores superiores ao limite indicam que perturbações ocorridas a jusante do medidor se propagam à montante. Nestas condições a Calha Parshall é denominada de afogada e a vazão real será inferior àquela que se obteria pelo emprego da Fórmula $Q = K * (H)^n$.

Para determinação da vazão em calhas afogadas é necessário aplicar um fator de correção, que depende do tamanho das Calhas Parshall, que é designado em função da largura da seção de estrangulamento [W].

A norma vigente no Brasil para dimensionamento das Calhas Parshall é a NBR/ ISSO 9826:2008. Porém, tendo em vista que esta é relativamente nova, a grande maioria dos modelos existentes obedece à ASTM 1941:1975. A Tabela

¹⁵ A precisão expressa em porcentagem do valor instantâneo significa que o percentual de erro admitido refere-se ao valor medido. Um medidor de vazão com precisão de +/- 2% v.i terá um erro tolerado de mais ou menos 1 m³/h, quando estiver indicando 50 m³/h (1m³/h = 2% de 50 m³/h).

4-16 apresenta os valores de n e K , bem como limites máximo e mínimo de vazão, para os tamanhos disponíveis no mercado, de acordo com a norma ASTM 1941:1975.

Tabela 4-16 Valores de n e K e limites de vazão para diferentes tamanhos de Calhas Parshall (ASTM 1941:1975).

Largura da Garganta [W]		Limites de Vazão [m ³ /h]		Valores de $n - K$ [para vazão em m ³ /h]	
Polegadas	mm	Min.	Max.	n	K
1"	1.02	19.4	25.4	1,550	217,29
2"	2.04	47.9	50,8	1,550	434,58
3"	3.06	115	76,2	1,547	633,60
6"	5.1	398	152,4	1,580	1371,60
9"	9.17	907	228,6	1,530	1926,00
12"	11.2	1641	304,8	1,522	2484,00
18"	15.3	2508	457,2	1,538	3794,40
24"	42.8	3374	609,6	1,550	5133,60
36"	62.2	5138	914,4	1,556	7855,20
48"	132	6922	1219,2	1,578	10566,00
60"	163	8726	1524,0	1,587	13420,80
72"	265	10551	1828,8	1,595	16254,00
84"	306	12376	2133,6	1,601	19101,60
96"	357	14221	2438,4	1,606	21963,60
120"	612	20388	3048,0	1,600	26865,77
144"	816	35679	3657,6	1,600	31893,72
180"	816	61164	4572,0	1,600	39439,05
240"	101	9 101941	6096,0	1,600	52019,16
300"	152	9 122329	7620,0	1,600	64599,27
360"	152	9 152911	9144,0	1,600	77179,38
480"	203	9 203881	12192,0	1,600	102332,78
600"	254	8 305822	15240,0	1,600	127493,00

O dimensionamento da Calha Parshall neste estudo foi feito com base nos valores de escoamento superficial, obtidos através de leituras manuais feitas em intervalos de 24hs nas caixas coletoras (conforme metodologia discutida no Capítulo 3). Para isso foi identificado o evento de chuva que gerou o maior volume de escoamento superficial ao longo da série histórica monitorada, que foi o dia 14/12/2007. A Figura 4-42 mostra os dados do Pluviômetro ECRN registrados no dia 14/12/2007.

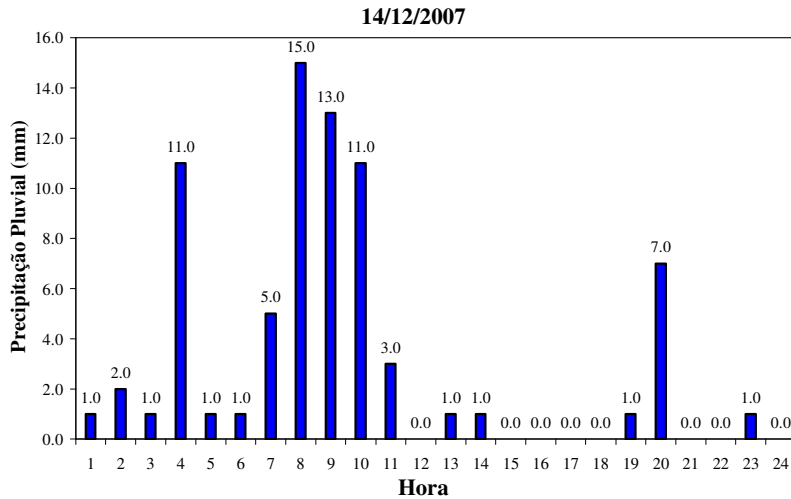


Figura 4-42 Precipitação pluvial (mm/h) no dia 14/12/2007.

Neste dia o total pluviométrico foi de 75 mm (24hs), concentrado em quatro eventos principais de intensidades entre 11 e 15 mm/h, gerando um volume total escoado de 3142L. Considerado que nas três horas consecutivas em que a chuva atingiu esta intensidade (≥ 11 mm/h), o volume de enxurrada chegou a 75% do volume medido (aumentando a margem de erro, uma vez que os eventos somam 52% do volume total), então o volume representativo seria de 2356.5L, correspondendo a 0.785m³/h.

É importante ressaltar que os valores de vazão estimados pelo método acima tiveram como base registros de escoamento referentes a intervalos de 24hs, o que dificulta estimativas de vazões máximas instantâneas. Os limites de vazão mínima na Calha também podem ser considerados bastante subjetivos, uma vez que dependem da precisão e resolução dos registros de nível na seção convergente.

Como uma medida visando cobrir eventos de menor intensidade, optou-se pelo menor modelo existente, com $W = 1''$, já que o limite superior de medição é consideravelmente maior que as vazões máximas esperadas para as parcelas de erosão.

Definida a dimensão da Calha, partiu-se para a escolha do modelo mais adequado, que no caso foi o CONTECH (CPARSHALL, CONTECH Ind. e Com. de Equipamentos Eletrônicos Ltda), que possui $W=1''$ e amplitude de medição, segundo o fabricante, de 0.4 a 20.41m³/h. A amplitude de medição estimada pelo fabricante difere do normatizado para este tamanho, que seria entre 19.4 e

25.4m³/h para este valor de W (conforme descrito na Tabela 4-16), em função de análises e testes empíricos realizados em laboratório.

As Calhas são feitas com fibra de vidro, moldada em peça única, respeitando a norma ASTM 1941:1975 quanto às dimensões dos diferentes componentes (Figura 4-43). A parte interna possui acabamento liso com aplicação de gel isoftálico cor azul com inibidor de raios ultravioleta. A parte externa possui nervuras longitudinais e existem tirantes de alumínio para reforço da estrutura. Uma escala graduada fixa na calha (em m³/h) relaciona o nível a ser medido com a vazão na calha.



Figura 4-43 Detalhes da Calha Parshall CONTECH.

Com valores de n e K para largura de garganta W=1” de 1,550 e 217.29mm obtêm-se a equação de descarga específica (m³/h) da Calha:

$$Q = 217.29*(H)^{1.55} \quad \text{[Equação 4-28]}$$

A Tabela 4-17 estabelece, utilizando a equação de descarga acima vazões de descarga para diferentes níveis na Calha:

Tabela 4-17 Relação entre nível H (mm) e vazão (m³/h) na Calha Parshall.

H (mm)	Vazão (m ³ /h)
2	0.01
5	0.06
10	0.17
20	0.51
50	2.09
100	6.12
150	11.48
200	17.93
210	19.34
220	20.79



4.5.2. Transmissor de nível ultra-sônico

As Calhas Parshall geralmente possuem uma escala graduada em vazão, sendo as unidades mais comuns: m³/h, l/min, l/s ou m³/h. Para a execução de medições automatizadas destes níveis é necessário instalar um medidor de nível.

A escolha de um transmissor de nível ultra-sônico se deu em função de seu princípio de funcionamento acústico, onde o parâmetro medido, que é o tempo de reflexão da onda, não é influenciado pela concentração de sedimentos no fluido (van den Elsen *et al.*, 2003).

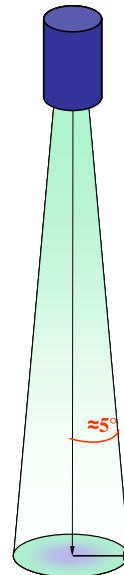
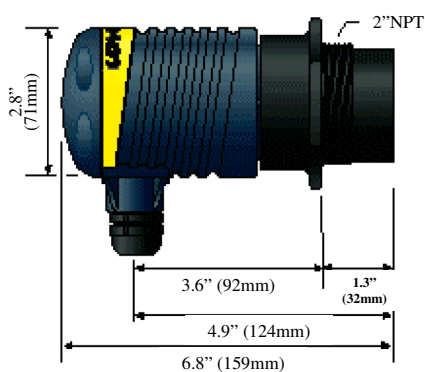
Atualmente, os medidores de nível mais utilizados nas Calhas Parshall são de fato os ultra-sônicos, devido à precisão ($\pm 0.25\%$ F.E.) e praticidade, pois, como o sensor não entra em contato direto com o fluido, não há problemas de incrustações. Além disso, têm-se a vantagem da possibilidade de transmissão à distância, através sinal elétrico, seja por um sinal analógico 4-20mA, seja por uma comunicação digital RS485.

Nos transmissores de nível ultra-sônicos, uma onda ultra-sônica é pulsada a uma frequência 50 kHz da base do transdutor. A onda reflete contra o fluido e retorna ao transdutor. O microprocessador converte a velocidade de propagação do transdutor ao fluido e do retorno em distância entre o transmissor e o fluido, medindo 8 pulsos por segundo.

Para o desenvolvimento desta tese foram instalados transmissores ultra-sônicos modelo LU-20 5001, fabricação nacional (CONTECH Ltda, 2008, ver Figura 4-44). O modelo possui uma saída de corrente (4 a 20mA), mede numa faixa de 0,1 a 5 metros com resolução de 3 mm com compensação automática de

temperatura (temperatura de trabalho entre -20°C a 60°C e pressão de trabalho de 30PSI (2BAR) a 25°C). A alimentação necessária é de 12 a 36VDC. O corpo é fabricado em Polipropileno e o transdutor é PVDF. Visando à obtenção de leituras instantâneas, um display LCD indica o nível em polegadas ou centímetros.

Para a correta instalação do LU-20 é importante verificar o seu campo de atuação para que o mesmo não entre em contato com as bordas da calha. O campo possui um ângulo de abertura em torno de 5° , sendo que a altura preconizada pelo fabricante para instalação dos LU-20 na Calha Parshall de 1" de W é pelo menos 6" (150 mm), sendo necessário atentar para interferências com as paredes. Os sensores devem ser instalados na seção convergente a uma distância de 2/3B.



Raio (mm)	Altura (mm)
11.44	0
12.09	10
12.73	20
13.38	30
14.03	40
14.68	50
15.33	60
15.98	70
16.63	80
17.28	90
17.93	100
18.57	110
19.22	120
19.87	130
20.52	140
21.17	150

Figura 4-44 Transmissor de nível ultra-sônico LU-20 5001, destacando-se a relação Altura/Raio da sua área de atuação e suas características.

Para acoplar os transmissores LU-20 nas Calhas foram utilizados suportes compostos por quatro hastes de latão (178.5 mm de altura), fixadas em tirantes de alumínio (6.4 mm espessura), sustentando uma plataforma de PVC quadrada com 151 mm de lado (228 cm²) e 15 mm de espessura, onde foi feita uma rosca com $\Phi=51.4$ mm para a instalação do transmissor. A Figura 4-45 mostra os detalhes da Calha CPARSHALL com o suporte utilizado instalação do transmissor de nível ultra-sônico.

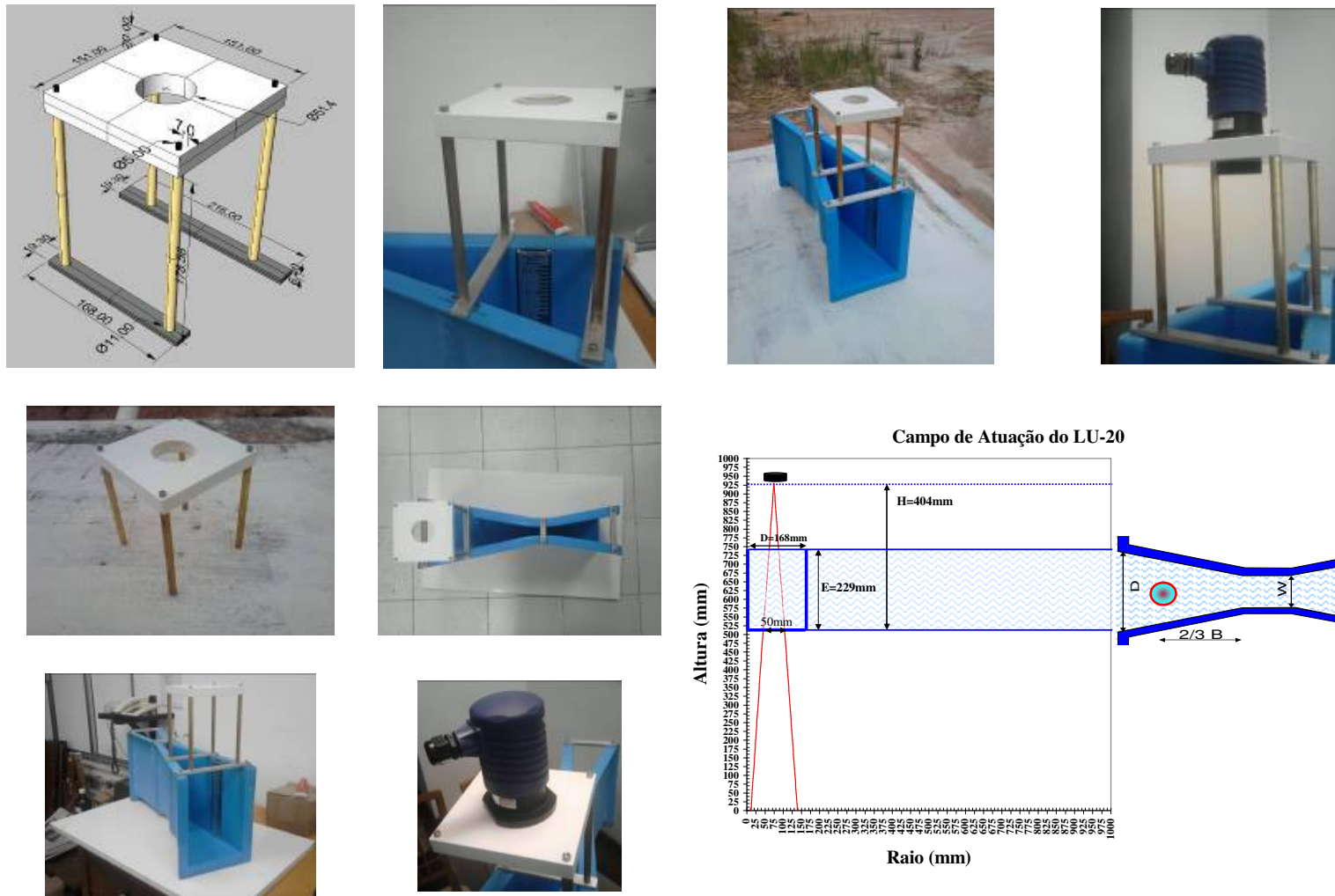


Figura 4-45 Detalhes do suporte do transmissor ultra-sônico na Calha Parshall, bem como seu posicionamento e campo de atuação no fundo da calha.

A estrutura instalada proporcionou uma altura H de 404 mm do piso da calha até a cabeça do transmissor (contando uma interferência de 1cm entre a rosca e a base de PVC, como mostrado na FIG XX), geando um campo de atuação para o LU-20 no piso da calha com um raio de 50 mm de diâmetro, deixando uma boa margem em relação às paredes.

4.5.3. Técnica de Calibração e Resultados Obtidos

Visando traçar uma curva de calibração relacionando medidas de vazão obtidas na régua do instrumento com os valores de nível nos transmissores, as Calhas Parshall, instrumentadas com transmissores LU-20 5001, foram colocadas em uma caixa d'água (500L) para posterior processo de inundação. O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidráulica da PUC-Rio, utilizando-se do *Datalogger* modelo *ALMEMO*[®] 2890-9 (*Ahlborn GmbH, DE*) para aquisição dos dados. O conjunto foi conectado a um PC via terminal visando o controle contínuo das condições experimentais (Figura 4-46).



Figura 4-46 Transmissores LU-20 5001 acoplados às Calhas CPARSHALL, conectados ao *logger* ALMEMO[®] 2890-9 e ao PC. A caixa d'água é usada para calibrar o transmissor para diferentes níveis da Calha Parshall.

O *ALMEMO*[®] 2890-9 é um *Datalogger* portátil universal que possui um display LCD (128x128) com nove entradas para 9 canais, mais 32 adicionais (sondas multifuncionais ou programação de processos), com 512kB de memória

(expansível com cartões *SmartMedia*[®]). A alimentação é feita por bateria recarregável 6NMH, adaptador AC para 12VDC. O aparelho é capaz de alimentar sensores com até 12VDC (máximo 100mA) para uso com bateria recarregável ou adaptador principal.

A aquisição dos dados foi efetuada a cada 10 segundos, durante 1h57min40seg, elevando-se o nível do reservatório em 5 mm a cada 3 minutos. Foram tomadas notas do nível mostrado na régua, do nível indicado no *Display* LCD do Transmissor, além da aquisição automática dos dados via *Datalogger*. Os resultados desta calibração encontram-se na Figura 4-47.

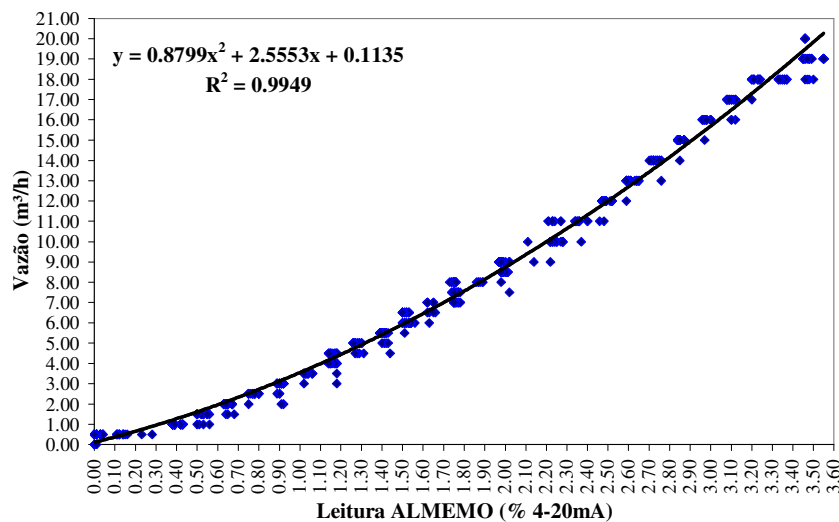


Figura 4-47 Resultados da Calibração dos Transmissores LU-20 acoplados às Calhas Parshall. Aquisição de dados com *Datalogger* ALMEMO[®] 2890-9.

A equação de calibração obtida que correlaciona os dados de nível observados na escala graduada (m³/h) e os valores produzidos no *ALMEMO*[®] 2890-9 (% de 4-20mA) (R=0.9949) é a desta forma:

$$y = 0.8799x^2 + 2.5553x + 0.1135 \quad \text{[Equação 4-29]}$$

4.6. Concentração de Sedimentos nas Enxurradas

Os mecanismos de transporte de sedimentos pelas enxurradas em parcelas de erosão podem ser medidos de forma semelhante ao realizado em canais fluviais, valetas de drenagem etc. Ainda que sob condições hidráulicas controladas, impostas pelas parcelas de erosão e pelas Calhas Parshall, o processo de deposição de sedimentos ao longo do corpo da instrumentação é em geral o maior limitante em medições de vertedores. Tais processos podem ocorrer mesmo com Calhas Parshall, que apresentam características favoráveis de autolimpeza sendo determinados pelas propriedades geotécnicas dos solos, características das chuvas, manejo e cobertura vegetal, declividade e comprimento de rampa do talude e da tubulação que precede a instrumentação.

Uma vez iniciada a movimentação das partículas nas parcelas, os processos envolvidos no seu transporte e deposição dependerão da velocidade de decantação da enxurrada. Esta, por sua vez, depende de fatores inerentes a partículas em decantação, tais como tamanho, forma, peso específico, e de fatores ligados ao meio fluido (viscosidade, peso específico, etc.).

Em termos de transporte de sedimentos por correntes hídricas, os processos de movimentação das partículas podem ser agrupados em três categorias: arraste, suspensão e saltação (ver Figura 4-48). O transporte em suspensão ocorre quando a intensidade da turbulência é maior que a velocidade de deposição das partículas movimentadas, o transporte por saltação ocorre por uma série de saltos curtos, podendo ser considerado como uma fase intermediária entre transporte por suspensão e arraste (Carvalho 1994, *op. cit.* Jorge & Uehara, 1998). O transporte por arraste é mais lento e refere-se à dinâmica da carga de fundo.

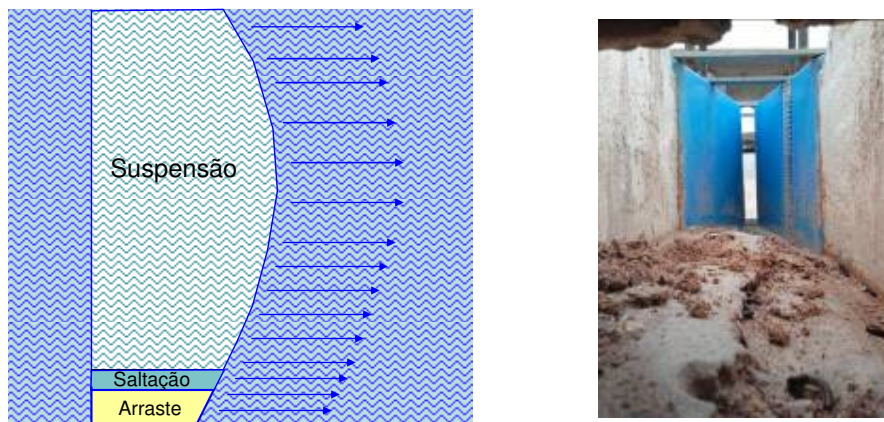


Figura 4-48 À esquerda: categorias de processos de movimentação de partículas em um canal de fluxo (adaptado de EPA, 1997); à direita – foto retratando processo de deposição no fundo do canal da Parcela II após uma chuva intensa.

Em canais abertos, quando as condições de fluxo são alteradas, por uma redução na velocidade média da corrente ou na intensidade da turbulência, as partículas maiores, mais densas e de menor esfericidade são deixadas para trás.

A deposição persistente em determinadas posições ao longo da instrumentação constitui possivelmente uma das maiores limitações em termos de manutenção do sistema de medição automatizado. Observações ao longo do período de monitoramento nas Calhas Parshall mostraram que mesmo com as características favoráveis de autolimpeza estes sistemas podem ser obstruídos por sedimentos durante os eventos de chuva, o que indica a necessidade de manutenção esporádica. Neste sentido, a Figura 4-49 mostra o canal de entrada da Parcela de controle durante a observação de um evento de chuva no dia 19-01-09.

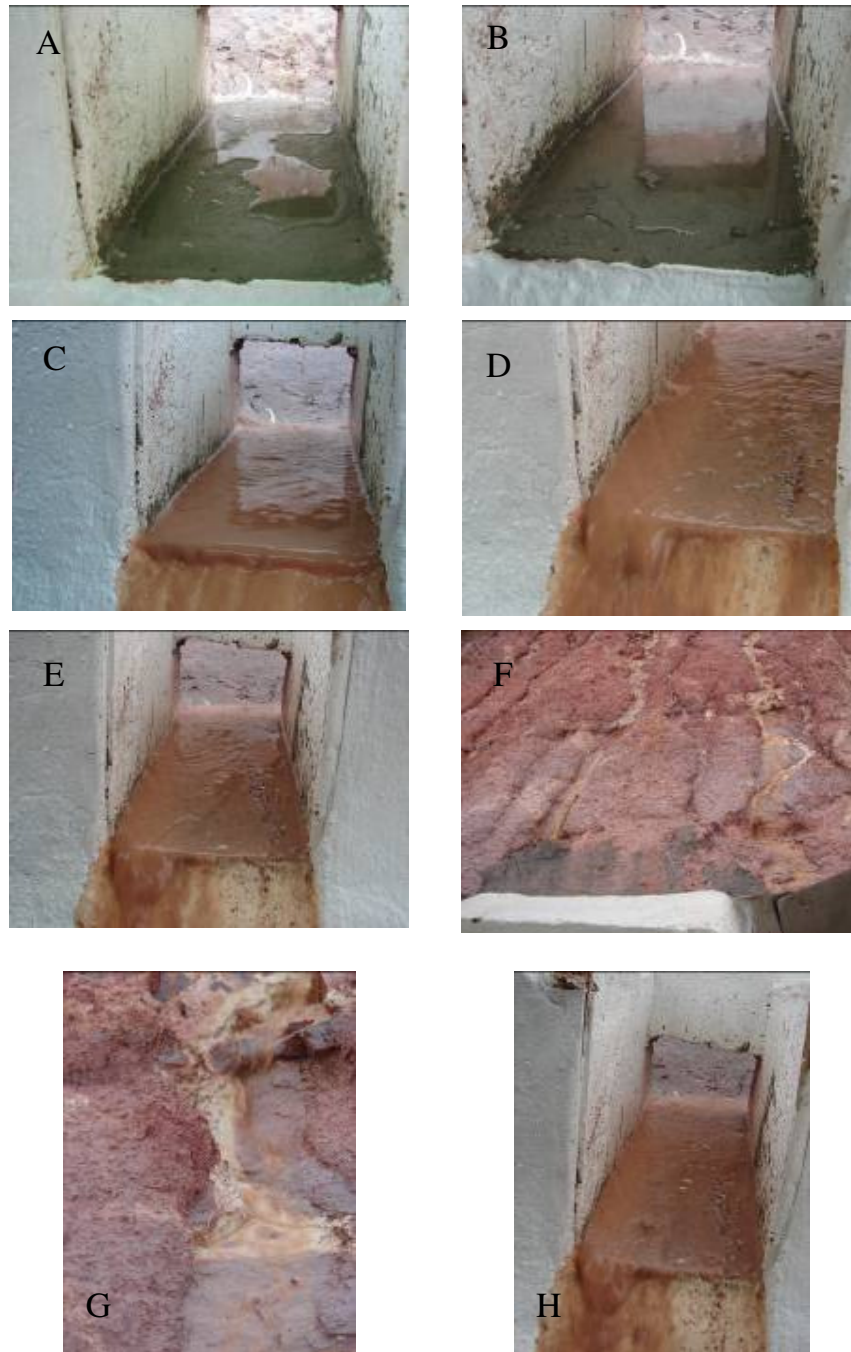


Figura 4-49 Transporte de sedimentos em correntes hídricas. Seqüência de um evento de chuva ocorrido no dia 19 de janeiro de 2009, retratando as diferentes concentrações de sedimentos presentes no escoamento superficial durante o evento erosivo. A,B,C,D,E – seqüência de evolução de entrada das primeiras enxurradas. F,G – aspecto da parcelas sendo lavada pela enxurrada. H – aspecto do canal no final do evento, podendo-se evidenciar um início de acúmulo de sedimentos mesmo com um canal livre.

Medidas de concentração de sedimentos efetuadas mediante situações semelhantes às estudadas nas parcelas de erosão, como as de van den Elsen *et al.* (2003) e Zhou & Tingwu (2006), mostraram limitações na adaptação de sondas de turbidez para mensuração de processos de erosão superficial. Ambos os autores apontam para problemas de deposição de sedimentos, sujeira, incrustações e obstrução geral do canal de fluxo na presença da sonda, prejudicando a leitura das sondas. Estas limitações levaram à necessidade de manutenção e limpeza dos sensores após cada evento, dificultando as mensurações e prejudicando a confiabilidade dos resultados.

Independente das dificuldades existentes nos processos de instalação e de adaptação de instrumentos em campo para medição de concentração de sedimentos, o desenvolvimento tecnológico de sensores, principalmente em aplicações voltadas para águas fluviais, marinhas e estuarinas, vem facilitando a aquisição automática dos dados. Neste sentido, medidas de concentração de sedimentos obtidas a partir de coletas de amostras têm sido substituídas recentemente pela utilização de sondas. Dentre estas se destacam as sondas acústicas de condutividade e sensores óticos (onde a concentração de sedimentos em suspensão é obtida indiretamente a partir de medidas de turbidez).

Apesar da sonda de condutividade (conhecida como TDS) medir diretamente o Total de Sólidos Suspensos (TSS¹⁶) nos fluidos mediante princípio acústico, os turbidímetros, que medem indiretamente este mesmo parâmetro por meio da turbidez têm recebido mais atenção recentemente (Lewis, 1996) dada possibilidade de medição de maiores concentrações.

Em respeito à variabilidade da concentração de sedimentos ao longo dos eventos de escoamento, diversos estudos tentaram estimar curvas chave relacionando volume de escoamento com concentração de sedimentos para determinadas situações. Como exemplo pode-se citar o trabalho de Jianghong & Tingwu (2006), no qual durante os eventos de escoamento superficial na micro-

¹⁶ TSS - Total de Sólidos Suspensos – Método de laboratório padronizado por EPA – TSS (*Method 160.2*), ou em ASTM (D3977-79) para SSC (*Suspended Sediments Concentration*) – utiliza-se também para a designação CSS - Concentração de Sedimentos em Suspensão. A unidade para a medida de CSS é (mg/L⁻¹ ou kg/m⁻³).

bacia monitorada a concentração de sedimentos aumentava aproximando-se do momento de descarga máxima. Van den Elsen *et al.* (2003), estudando a descarga de enxurrada na saída de uma voçoroca através de um sistema automatizado, encontraram tendência semelhante, observando-se a necessidade de utilização de instrumentos que possibilitem medir maiores concentrações de sedimentos visando evitar subestimativas.

Com o objetivo de desenvolver um mecanismo para registro automatizado da concentração de sedimentos no escoamento superficial, específico para as parcelas de erosão, neste subitem é proposto um sistema sendo discutidas técnicas de calibração e instrumentos recomendados.

4.6.1. Técnicas de Calibração

O conhecimento das características dos sólidos presentes nas enxurradas é imprescindível para a calibração de um sistema automatizado de medição. Visando gerar uma caracterização dos materiais presentes nas enxurradas coletadas nas caixas d'água foram conduzidas análises em laboratório visando a determinação do total da CSS, turbidez, pH, anteriormente à secagem em estufa do material para pesagem de sólidos.

Foram também efetuadas análises de Distribuição Granulométrica e Densidade Relativa dos Grãos (G_s) da lama coletada nas parcelas. No primeiro momento foram avaliados materiais armazenados na Parcela 2 (Controle) anteriormente ao desenvolvimento da vegetação, sendo conduzida uma segunda bateria de análises visando à caracterização dos sólidos presentes nas enxurradas na presença da vegetação.

A Figura 4-50 mostra a distribuição granulométrica dos sedimentos das enxurradas da Parcela 2. O material possui 30.9% de argila, 20% de silte, 11.7% de areia fina, 24.8% de areia média e 11.5% de areia grossa, tratando-se portanto um material com características mais semelhantes aos solos amarelo e vermelho, refletindo a maior erodibilidade e área de exposição dos mesmos.

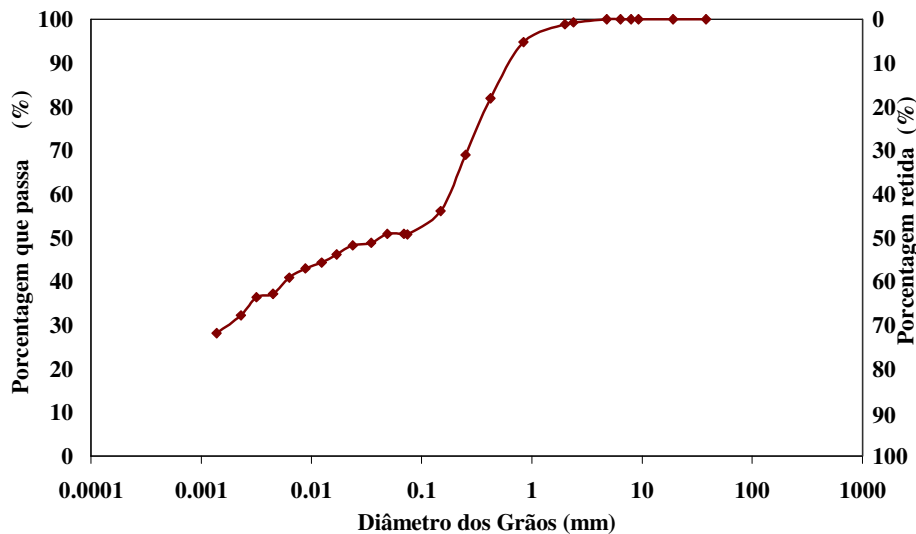


Figura 4-50 Curva de Distribuição Granulométrica dos sólidos presentes nas enxurradas da Parcela 2.

Avaliações de densidade relativa dos grãos foram conduzidas no Laboratório da Embrapa Solos posteriormente também utilizando material de cada uma das quatro parcelas após o desenvolvimento da vegetação. O ρ_s do material coletado nas parcelas, previamente a implantação das técnicas de bioengenharia, é de 1.661g/cm^3 .

Visando monitorar ainda a CSS e a turbidez das enxurradas coletadas, foram conduzidas análises com sensores específicos de campo, porém no Laboratório de Solos e Plantas da Embrapa Solos, utilizando-se de materiais coletados durante o período de 30/08/08 a 30/10/08. Estas foram efetuadas no momento da abertura das amostras em laboratório para secagem na estufa. O objetivo do uso de instrumentação de campo foi definir posteriormente um instrumento que seja adequado para instalação no sistema das parcelas.

4.6.1.1. Total de Sólidos Suspensos

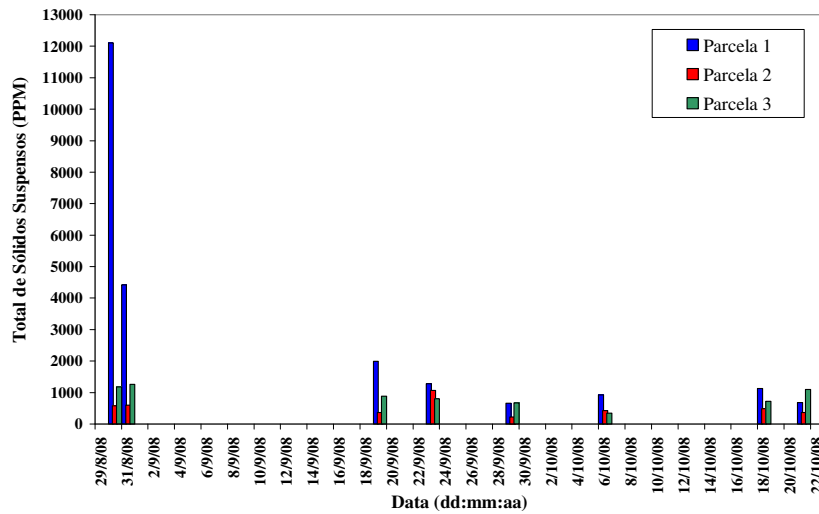
Os métodos tradicionalmente utilizados para determinação do teor de sedimentos suspensos valem-se da coleta de amostras em campo para determinações em laboratório, apesar da existência atualmente de sensores acústicos (TDS, também denominados condutivímetros) capazes de aferir este parâmetro. As duas principais normas de análise de amostras são: Análise de Concentração de Sedimentos Suspensos (SSC, ASTM D3977-97); Análise de Total de Sólidos Suspensos (TSS, EPA 1602).

Para medição do TDS foi utilizada a sonda de multiparamétrica de Condutividade e TDS modelo SC-100 (INSTRUTHERM Ltda.), que quando conectada ao PH-1500 torna-o um medidor de condutividade e TDS. A sonda possui 22 mm de diâmetro x 120 mm de comprimento, sendo constituída por um eletrodo de haste de carbono de longa vida, com um circuito impresso, Display LCD, registros máx e min., congelamento de dados, desligamento automático, saídas serial RS232. As leituras são feitas com tempo de amostragem de 0.8 segundos, permitindo a aquisição de dados de Condutividade (2mS e 20mS); TDS (2000PPM, 20000PPM); Temperatura (0 a 60°C). A Tabela 4-18 relaciona a resolução e a precisão para as diferentes unidades de aferição:

Tabela 4-18 Resolução e precisão da Sonda SC-100 para as diferentes unidades de aferição.

Escala	Resolução	Precisão
0.2 a 1.999mS	0.001mS	± (3% + 1d)
2 a 19.99mS	0.01mS	± (3% + 1d)
0 a 65°C (ATC)	0.1°C	±0.8°C
132 a 1320PPM	1PPM	± (3% + 1d)
1320 a 13.200PPM	10PPM	± (3% + 1d)
0 a 20.0mg/L	0.1mg/L	±0.4mg/L

Os resultados de monitoramento referem-se ao período de chuvas de 30/08/2008 a 21/10/2008, quando foram aferidas as mostras de todo o material erodido. A Figura 4-51 mostra resultados preliminares obtidos.



Data	Parcela	TSS (ppm)	Data	Parcela	TSS (ppm)
30/8/2008	P1	12110	29/9/2008	P1	670
	P2	580		P2	230
	P3	1180		P3	680
31/8/2008	P1	4430	6/10/2008	P1	930
	P2	600		P2	430
	P3	1260		P3	350
19/9/2008	P1	1990	18/10/2008	P1	1130
	P2	370		P2	490
	P3	890		P3	720
23/9/2008	P1	1290	21/10/2008	P1	690
	P2	1080		P2	370
	P3	800		P3	1100

Figura 4-51 Total de Sólidos Suspensos de amostras de enxurradas no período de 30/08/2008 a 21/10/2008 com a utilização da sonda TDS SC-100.

Ao contrário do que supostamente seria encontrado, os maiores valores de CTSS foram encontrados nas amostras da Parcela 3, que das três avaliadas, é a que apresenta quantitativamente as menores taxas de erosão e escoamento superficial. Esta tendência, entretanto diminui nos eventos de menor intensidade, quando o CSS é baixo para todas as parcelas avaliadas. Estes valores maiores podem estar acontecendo em função da própria composição mais leve dos materiais das enxurradas da Parcela 1, o que precisa ser ainda confirmado através de ensaios de caracterização dos materiais das enxurradas de todas as parcelas, justificando a importância deste tipo de avaliações.

4.6.1.2. Turbidez

A CSS tem considerável influência na da turbidez da água impedindo a penetração da luz. Existem diversos métodos de medição da turbidez, sendo mais recomendados os turbidímetros nefelométricos baseados no retroespalhamento (*backscattering*) da luz, que resultam em uma unidade de turbidez chamada de NTU (*Nefelometric Turbidity Unit*). Outros instrumentos medem a luz absorvida ou transmitida dando origem à unidade FTU (*Formazin Turbidity Unit*). Existe também o Disco de Secchi, utilizado tradicionalmente em monitoramento limnológico, para a medição da transparência (propriedade oposta à turbidez) de lagos.

Observa-se a necessidade de utilizar uma sonda capaz de medir elevadas concentrações de sólidos nas enxurradas. Após determinado limite de leitura as condições de concentração de sedimentos visivelmente não puderam ser corretamente avaliadas nem com a sonda TDS SC-100 nem com a Sonda Multiparamétrica utilizados. Dificuldades semelhantes foram encontradas por van den Elsen *et al.* (2003), sendo ressaltada a limitação dos instrumentos utilizados (que no caso lêem até 100g/l), que poderia levar a interpretação errônea dos dados obtidos em campo.

Existem atualmente sensores capazes de ler concentrações muito superiores aos instrumentos utilizados em todos os trabalhos citados até o momento. Estes, turbidímetros, também baseados em princípios de retroespalhamento de luz, podem medir, dependendo do modelo, concentrações de 50g/L (OBS-3+, D&A, 2006) ou até 500g/L (OBS-5+, D&A 2006), que representa pelo menos duas vezes o observado para modelos de gerações anteriores.

Com o objetivo de testar a sonda multi-paramétrica Oriba (cedida pela Embrapa Solos especificamente para este teste), foram comparados os resultados de aferições realizadas no campo e posteriormente com a amostra em laboratório, com o objetivo de verificar possíveis mudanças na turbidez após o armazenamento das amostras. No caso das análises em laboratório, anteriormente à execução das medições a amostra foi agitada e homogeneizada ainda dentro do recipiente de armazenamento. Os resultados destas análises comparativas para o dia 19/09/08 encontram-se sintetizados na Tabela 4-19.

Tabela 4-19 Resultados de análises de TSS, Turbidez e pH, obtidos a partir e análises das enxurradas em campo, para o dia 19 de setembro de 2008.

Data	Parcela	TDS Campo (ppm)	TDS Laboratório (ppm)	Turbidez Campo (NTU)	pH Campo
19/9/2008	P1	1770	1990	999	7.11
	P2	330	370	999	7.54
	P3	780	890	498	7.4

A Tabela 4-20 sintetiza as características de alguns turbidímetros nacionais e importados selecionados como adequados para a instrumentação de parcelas de erosão, tendo em vista as condições estabelecidas.

Tabela 4-20 Características de alguns turbidímetros recomendados para instrumentação de parcelas de erosão.

	Solar Instrumentação	OBS-3+ (D&A)	OBS-5+ (D&A)
Faixa de Medição (NTU)	0-2500	0-4000	xxxx
Faixa de Medição (Concentração)	0-5000 ppm	0-5000mg/L (lamas) 0-50g/L (areias)	0-500g/L
Precisão*	Não Revelado	0.25NTU 0.5mg/L (lamas) 0.25g/L (areias)	5mg/L (lamas) 0.5g/L (areias)
Alimentação	9-30v	5-15 (V) 9-15 (mA)	6-18 (V) 55 (mA)
Saída	0-2500 mV	4-20 mA	PC RS232
Dimensões	Φ=30 mm	141 mm x 25 mm	380 mm x 60 mm
Custo		Solar < OBS-3+ < OBS-5+	

* Depende de calibrações específicas.

4.6.2. Proposta de Instrumentação Automatizada

Com base nas potencialidades e limitações observadas nos sensores utilizados durante os ensaios de calibração, foi projetado um sistema para monitoramento automatizado em campo da concentração de sedimentos nas enxurradas em parcelas de erosão através de turbidímetros acoplados à jusante das Calhas Parshall. Como dito, a localização dos sensores é um ponto crucial no desenvolvimento deste tipo de sistema, conforme constatado em estudos envolvendo situações similares. Tendo em vista isso foi feito um projeto para acoplar turbidímetros nas janelas dos canais de medição de volume de escoamento. O processo de adaptação envolve a construção de uma espécie de funil para gerar uma carga de água mínima durante os eventos de chuva capaz de

submergir o elemento sensor do turbidímetro sem ficar muito próximo às paredes do conduto, evitando a sedimentação e entupimento do mesmo.

A construção do funil e a adaptação de um encaixe para acoplagem das sondas dependem da geometria desta última, que poderá variar em função da escolha do equipamento. Entretanto, adotando-se o mesmo procedimento utilizado para construção de canal para Calha Parshall, com a janela de vidro, pode-se optar posteriormente pelo tipo mais adequado de encaixe. No caso deste projeto, considerando-se que o corpo do Turbidímetro Modelo OBS-3+ (*D&A Instrument Company*, 2006), que possui 141 mm x 25 mm, ou o Sensor de Turbidez da Solar (Sensor BS – Solar 2009), ambos trabalhando com um pequeno elemento sensor na ponta (a Figura 44 mostra as dimensões do OBS-3+), pode-se calcular a localização do conjunto da estrutura de alvenaria. Posteriormente à determinação desta localização são realizadas as instalações, que devem incluir um isolamento de borracha para que o turbidímetro possa ser removido para manutenção preferencialmente após cada chuva. Isto pode ser feito na base da janela, onde já se distanciou um pouco da calha, evitando a formação de condições de fluxo afogado, e ao mesmo tempo aumentando a carga hidráulica para geração de uma turbulência no funil que facilita a medição da concentração de sedimentos na enxurrada passante (ver Figura 4-52).

No caso do OBS-3+, o sistema é compatível com o *Logger CR-200* Campbell da estação meteorológica, havendo, no entanto somente uma entrada para isso disponível. O modelo OBS-5+ possui uma memória flash interna, sendo necessário somente aquisição direta no Laptop via interface serial. O modelo da Solar também é compatível com a maioria dos loggers existentes, e o OBS-3+ pode também ser adaptado a outros tipos de sistemas.

Uma observação importante diz respeito à otimização dos dados mediante calibrações para os materiais avaliados, o que deve ser feito para cada parcela de erosão. Para esta calibração podem ser comparados dados de CSS de amostras coletadas e levadas para laboratório, mediante comparação de medições com os resultados das pesagens. Com o objetivo de abranger uma maior diversidade de concentrações de sedimentos nas equações de calibração podem ser ainda preparadas soluções com CSS definido, elaboradas a partir da mistura dos sedimentos secos de cada parcela com água comum.

Para a obtenção de diferentes valores de CSS, podem-se colocar diferentes quantidades de sedimentos em um determinado volume de água, sendo calculada a CSS utilizando-se a relação:

$$C = \{M_s / [V_i + (M_s/\rho_s)]\} \quad \text{[Equação 4-30]}$$

Onde:

C é a concentração (g/L), M_s é a massa de sedimento adicionada (g), V_i é o volume de água adicionado (L) e ρ_s é a massa específica do sedimento (convertido de g/cm^3 para g/L multiplicando-se por 10^3).

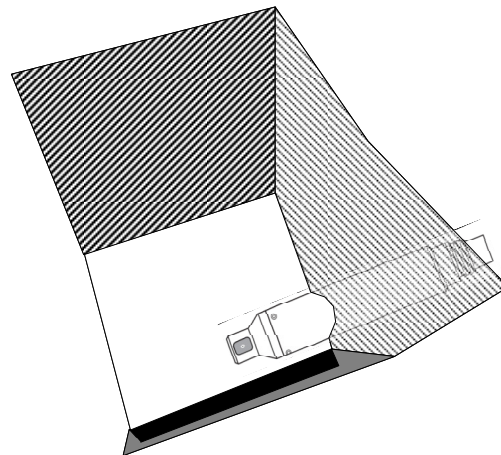
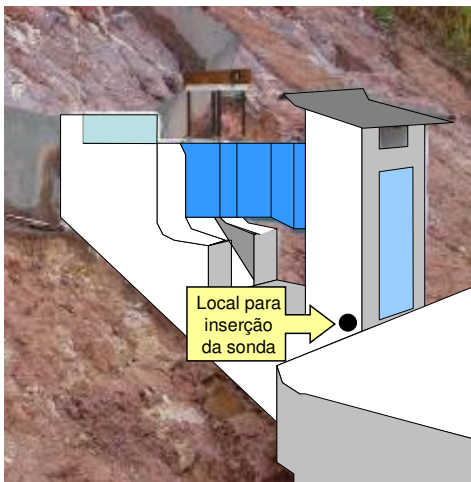
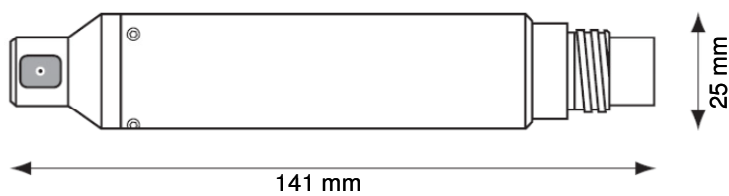


Figura 4-52 Acoplagem de instrumentação para medição de concentração de sedimentos nas parcelas de erosão.

4.7. Caracterização da Vegetação

Após a implantação de um plano de revegetação de taludes, é importante observar as características de estabelecimento, crescimento e desenvolvimento apresentadas pelas diferentes espécies, tais como: tempo de germinação, biometria, produção de biomassa, relação raiz/parte aérea, taxa de recobrimento e área foliar.

O crescimento da vegetação caracteriza-se por um aumento no tamanho e/ou peso, possuindo um caráter quantitativo. O termo desenvolvimento é mais abrangente e envolve todas as mudanças qualitativas (diferenciação) e quantitativas (crescimento) experimentadas pela planta (Magalhães, 2005).

Devido à diversidade de espécies normalmente utilizadas na implantação de técnicas de bioengenharia de taludes, a vegetação que cresce forma uma complexa comunidade com muitas interações formando ambientes específicos. Em termos práticos, o trabalho experimental nesta linha visa investigar o estabelecimento, crescimento e desenvolvimento de sistemas vegetais compostos por várias espécies, que se desenvolvem e persistem em uma dada situação (Carneiro *et al.*, 2002).

Como foram incluídos os principais tipos técnicas de bioengenharia de taludes nas parcelas de erosão avaliadas nesta tese, a vegetação resultante apresenta diferenças marcantes, envolvendo diversos fatores, como: características de cada espécie; competição entre espécies; qualidade e quantidade das sementes ou das mudas utilizadas; propriedades dos solos; adubação; fixação da hidrossemeadura e da biomassa, etc.

Com o objetivo de envolver o maior número de variáveis para as parcelas de erosão avaliadas, são primeiramente delineados aspectos de técnicas de mensuração, importantes na definição das metodologias implementadas, sendo posteriormente discutidas individualmente as estratégias utilizadas para cada parcela.

4.7.1. Estabelecimento, Crescimento e Desenvolvimento

A partir de análises de estabelecimento, crescimento e desenvolvimento da vegetação podem ser avaliados os efeitos de determinados métodos de plantio sobre o desenvolvimento das espécies e também inferidos aspectos da atividade

fisiológica. A análise de crescimento pode ser muito útil na parametrização da seleção de espécies, além de fornecer também informações importantes em análises de balanços de energia e balanço hídrico de taludes.

Durante a fase inicial de estabelecimento, as diferenças de crescimento são reflexos mais diretos de características fisiológicas das espécies implantadas. Uma espécie pode apresentar germinação e crescimento inicial rápidos, resultantes de alongamentos de caules associados à elevação do meristema apical, ou à maior capacidade de perfilhamento para situações específicas (Einloft, 1996). Entretanto, estas variações de comportamento entre espécies, relativas à velocidade de crescimento inicial, não implicam necessariamente em melhor desempenho final da cobertura vegetal.

Existem alguns tipos de análises de estabelecimento da vegetação em projetos de bioengenharia: avaliações do pegamento de mudas, através de taxas de mortalidade; análises de germinação de sementes; densidade populacional; facilidade de atravessar a tela vegetal; fixação da hidrossemeadura e até taxas de interceptação das chuvas.

Ao descrever e estudar uma planta, é norma geral subdividi-la em duas partes de acordo com a posição acima e abaixo da superfície do solo, denominadas, respectivamente, parte aérea e parte radicular, permitindo esta última a extração de água e nutrientes, assim como a fixação dela no solo (Vega *et al.*, 2005).

A relação raiz/parte aérea varia com as diferentes espécies e com as condições ambientais, o que indica a importância de avaliações específicas para estimar com precisão tanto o crescimento da parte aérea quanto das raízes.

Como parâmetros de crescimento existem desde medições simples de comprimento, altura, DAC ou DAP (Diâmetro à Altura do Colo ou à Altura do Peito), Área Basal, Projeção e Diâmetro de Copas (AC), até medições por métodos mais trabalhosos como avaliações de biomassa aérea (fitomassa) e biomassa radicular; relação parte aérea/raízes em comprimento ou biomassa; comprimento e densidade de raízes e arquitetura radicular.

De uma maneira geral os métodos de medições de crescimento da vegetação podem ser agrupados em destrutivos (envolvem o abate das plantas) os não-destrutivos (medições *in-situ* sem remoção). Estas avaliações têm sofrido um grande avanço com o desenvolvimento de técnicas de processamento e análise de

imagens aplicadas à pesquisa agropecuária, tais como estudos de raízes, morfologia do solo, doenças foliares, dentre outras, possibilitando a obtenção de informações complementares às técnicas experimentais convencionais, de tempo e custos muito elevados, e permitindo o desenvolvimento de ferramentas mais precisas, rápidas e a custo reduzido (Jorge, 1996).

Neste sentido, com o objetivo de auxiliar no estudo de raízes, cobertura vegetal, porosidade do solo, área e doenças foliares, dentre outras, foi desenvolvido pela EMBRAPA-CNPDIA o Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo - SIARCS[®], que se utiliza de processamento e análise de imagens digitais (Jorge & Crestana, 1996).

4.7.1.1. Métodos Não-Destrutivos

As análises biométricas de altura, DAP ou DAC, Área Basal e Diâmetro e Área e Projeção de Copas são medidas não destrutivas efetuadas com régua, a fita métrica e a trena, ou hipsômetros¹⁷ para medições de indivíduos de maior porte. Para espécies rasteiras e de baixo porte utiliza-se a medida de comprimento, muitas vezes somando-se ainda os comprimentos das raízes para obtenção de um comprimento total do indivíduo.

Outros métodos de avaliação não-destrutivos envolvem medidas de taxas de recobrimento ou aspectos fisiológicos, como a transpiração. Neste sentido, a condutância estomática, parâmetro relacionado ao processo conforme já discutido, pode ser medida em laboratório (com câmara de pressão) ou em campo (com porômetros), por métodos destrutivos ou não-destrutivos. O Índice de Área Foliar, anteriormente estimado somente por métodos destrutivos, tem sido também obtido através de fotos hemisféricas e sensores óticos. A taxa de recobrimento é um parâmetro utilizado normalmente em estudos de espécies rasteiras ou de baixo porte, sendo normalmente realizada através de processamento de imagens, com posicionamento específico dos equipamentos perpendicular ao solo a uma altura definida (normalmente 1.6 m).

¹⁷ Hipsômetros: instrumentos utilizados para medições de altura de espécies vegetais de grande porte. Existem alguns modelos, como o Hipsômetro de Christen, Hipsômetro de Haga, Hipsômetro de Blume-Leiss, Hipsômetro de Weise (Couto & Ferrari, 1979).

4.7.1.2. Métodos Destrutivos

Análises de biomassa aérea, índice de área foliar, biomassa radicular, densidade e comprimento de raízes, arquitetura radicular e densidade populacional constituem alguns dos principais métodos destrutivos utilizados para a caracterização do crescimento e desenvolvimento da vegetação.

Os métodos utilizados nesta tese são descritos nos subitens a seguir, subdivididos em métodos para parte aérea (Biomassa Aérea e Densidade Populacional) e para os Sistemas Radiculares.

4.7.1.2.1. Biomassa Aérea e Densidade Populacional

Após a derrubada dos indivíduos inicia-se a análise da biomassa fresca e seca. Para a determinação da biomassa fresca os compartimentos vegetais (caule, galhos grossos, galhos finos e folhas) são separados e pesados individualmente. A determinação da biomassa seca é realizada com amostras dos mesmos compartimentos vegetais, que são pesados, colocados em estufas de circulação forçada de ar, a 65° C, e novamente pesados, para determinação da massa seca e teor de umidade. Em relação às amostras do caule, foram retirados discos a altura do peito (1.30 m) que são pesados e colocados na estufa, no caso de árvores de mais de 1.5 m de altura, e serão pesados por inteiro os indivíduos menores. Estas pesagens serão posteriormente utilizadas para a determinação da biomassa seca.

Uma vez abatidos os indivíduos de uma parcela para avaliação da biomassa aérea, é conveniente também determinar a densidade populacional, que representa o número de indivíduos de uma determinada espécie por metro quadrado.

Para se estimar a quantidade de carbono orgânico (CO) na biomassa da parte aérea pode ser utilizado um fator de conversão de 0.45, proposto por Botkin *et al.* (1993, *apud.* Shumacher *et al.*, 2002).

4.7.1.2.2. Sistemas Radiculares

A pesquisa sobre raízes teve seu início por volta do começo do século dezoito, com os trabalhos pioneiros de Hales (1727), que escavou raízes de plantas cultivadas para observar sua morfologia. A base do conhecimento

necessário a estes tipos de avaliações encontra-se na fisiologia e na ecologia radicular. A fisiologia radicular é o estudo dos reais processos necessários ao desenvolvimento radicular, como divisão celular e mecanismos de absorção de nutrientes. Já a ecologia radicular é o estudo dos fatores ambientais, como umidade, disponibilidade de nutrientes e densidade do solo, que interferem no crescimento e estrutura das raízes (Böhm, 1979).

De acordo com Böhm (*op cit.*), estudos sobre crescimento radicular devem ser feitos a partir da avaliação das características das raízes, como massa, comprimento e área, no tempo e no espaço, em conjunto com os fatores que influenciam na distribuição do sistema radicular.

De forma geral, a avaliação de raízes tem sido efetuada de duas maneiras: diretamente no perfil de solo ou através de raízes lavadas. Devido a uma grande dificuldade presente no estudo de sistemas radiculares de plantas perenes, diversos métodos diretos já foram desenvolvidos, como: perfurações com trado, escavações, monolitos com placas de pregos¹⁸, trincheiras ou parede do perfil, contagem manual, placas com parede de vidro, rhizotron¹⁹, etc. (Guimarães *et al.*, 1997; Jorge, 1999; Medina & Neves, 1999, Veja *et al.*, 2005).

Os métodos de avaliação de sistemas radiculares, propostos para a investigação de taludes submetidos a técnicas de bioengenharia, são resumidamente descritos a seguir.

4.7.1.2.2.1. Avaliação do Perfil de Solo

Nesse método, amplamente utilizado por permitir estudos simultâneos na mesma trincheira, observa-se a distribuição dos sistemas radiculares no perfil do solo. Para isso é aberta uma trincheira, sendo realizadas as aferições e tomadas imagens por meio de desenho (croqui), câmara fotográfica ou filmadora.

¹⁸ Uma variação muito usada do método do monólito, no método uma placa com pregos é pressionada contra a trincheira onde estão as raízes, retirando-se um bloco único, onde estas manterão sua posição original após a lavagem, devido à presença dos pregos.

¹⁹ O rhizotron é uma construção no subsolo com janelas de vidro que permitem a observação das raízes in vivo, enquanto a parte aérea. (Jorge *et al.*, 1996).

A distribuição do sistema radicular ao longo do perfil é analisada com o auxílio de uma malha metálica com 1 x 1 m, com 20 cm de quadrícula e um total de 400 cm² de superfície por quadrícula, segundo procedimento descrito por Jorge (1999). Podem ser contados nesta etapa visualmente o número de raízes no perfil, ou tomadas imagens de cada uma das quadrículas deles separadamente.

Para a aquisição das imagens deve ser estipulada uma distância do perfil de solo, que normalmente é de em torno de 0.30 m, principalmente devido também a dificuldades operacionais em se utilizar distâncias maiores.

Posteriormente as imagens são processadas pelo SIARCS, que possui uma ferramenta que subdivide a imagem original, em função do número de colunas e linhas desejadas, quantificando o comprimento de raízes em cada uma delas (Carvalho, 1999).

Na descrição das raízes podem ser informadas as classes de tamanho, com base no diâmetro das mesmas, usando-se os termos muito finas, finas, médias, grossas e muito grossas (Tabela 4-21), conforme especificado por IBGE (2005):

Tabela 4-21 Classes de tamanho de raízes segundo IBGE (2005).

Muito finas	< 1 mm
Finas	1 a < 2 mm
Médias	2 a < 5 mm
Grossas	5 a < 10 mm
Muito grossas	10 mm

A abundância de raízes no perfil também vem sendo classificada de acordo com a seguinte classificação relacionada à relação unidades/área (Tabela 4-22, de IBGE, 2005):

Tabela 4-22 Classificação da abundância de raízes no perfil de solo (de IBGE, 2005).

Poucas	< 1 por U.A.
Comuns	1 a 5 por U.A.
Abundantes	> 5 por U.A.

Os conhecimentos da distribuição e massa de raízes estão estreitamente relacionados. Métodos de escavação com a tomada de imagens do perfil de solo e a extração de blocos indeformados para quantificação de massa de raízes, bem como a determinação da biomassa radicular de exemplares de espécies vegetais devem ser preferencialmente executados em conjunto.

Alguns autores consideram o método de imagens digitalizadas um dos mais eficientes, já que os resultados podem levar a maior exatidão do que os obtidos por contagem manual (Jorge, 1999; Schroth *et al.*, 1999). No entanto, há

necessidade de melhor preparo dos perfis, assim como de equipamento digitalizador especial (câmara digital e computador), o que faz com que esse método seja uma forma de avaliação mais custosa (Vega *et al.*, 2005).

4.7.1.2.2.2. Arquitetura Radicular

Para a descrição das arquiteturas radiculares das leguminosas arbóreas são avaliados padrões de hábitos radiculares. Existem alguns sistemas e definições, como as propostas por Pritchett (1979, Figura 4-53) e Harrington *et al.* (Figura 4-54), Menzie e Mason (Figura 4-55), apresentados em Carneiro (1995), centrando-se as avaliações nas raízes principais, sendo que raízes secundárias e algumas laterais são excluídas das avaliações. Metodologia semelhante foi empregada por Andrade (1997) e Andrade *et al.* (1997), para avaliação da arquitetura radicular de leguminosas arbóreas (*Mimosa Caesalpinifolia*, *Acácia mangium* e *Acácia Holocericea* e da vegetação espontânea em Planossolo) e também por Santos (1998) para avaliação da arquitetura radicular das leguminosas *Albizia lebeck*, *Acácia angustissima* e *Trema micrantha* em talude de aterro.

Visando seguir estas metodologias, foram avaliados os seguintes critérios para descrição (segundo metodologia proposta por Santos, 1998):

- Identificação da arquitetura radicular para classificação como pivotante, fasciculado ou superficial;
- No caso de se tratar de sistema radicular pivotante, foram identificadas a orientação de crescimento e as suas possíveis deformações;
- Avaliação do desenvolvimento e deformações das raízes laterais, além da presença de raízes secundárias;
- Foi utilizada a expressão diâmetro mediano para o diâmetro da raiz pivotante principal, na altura da metade da profundidade máxima.

Hábitos Radiculares - Na classificação de Pritchett (Figura 4-53) existem três tipos: o pivotante que possui raiz ou raízes na direção vertical; o fasciculado que apresenta várias ramificações a partir do tronco; e o superficial, onde a maior parte das raízes está distribuída horizontalmente na superfície do solo.

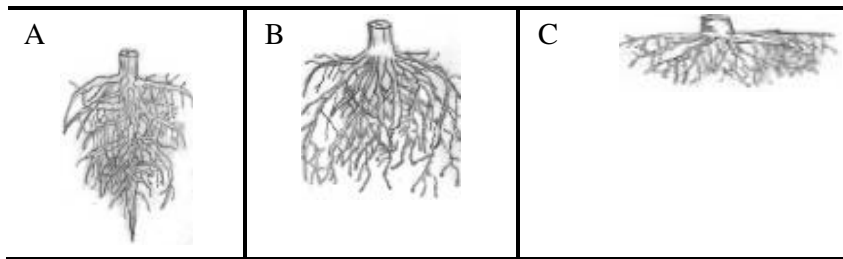


Figura 4-53 Arquitetura dos sistemas radiculares de acordo com a nomenclatura proposta por Pritchett: A - Pivotante; B – Fasciculado; C – Superficial (adaptado de Pritchett, 1979).

Claramente vertical		Definida, mas não vertical.
Com ramificação, mas claramente vertical.		Ausência de raiz pivotante

Figura 4-54 Classes de orientação de crescimento de raízes pivotantes (adaptado de Carneiro, 1995).

Forte, dominante e bem desenvolvida.		Crescimento inibido, má conformação, mas ainda com raiz pivotante bem definida.
Claramente recurvada		Deformada em uma ou mais curvaturas, mas com desenvolvimento vertical.
		Deformada para horizontal ou ausente

Figura 4-55 Classificação de Menzie das deformações de raízes pivotantes (adaptado de Carneiro, 1995).

4.7.1.2.2.3. Biomassa Radicular

Os métodos para determinação da biomassa radicular são bastante simplificados e a quantificação da biomassa fresca e seca das raízes segue uma metodologia semelhante à utilizada na parte aérea, com exceção do procedimento para a retirada das amostras, que se dá pelo método da escavação de trincheira aberta ou coleta de blocos indeformados (método do monólito).

O método de blocos ou monólito consiste da retirada de amostras de solo em blocos de dimensões definidas para posterior lavagem, separação e determinação de comprimento ou peso das raízes. Uma das limitações desse método é o processo de lavagem e separação das raízes, que consome grande tempo (Jorge *et al.*, 1996). Apesar disso, pela precisão dos dados obtidos esse método tem sido usado para comparar a eficiência de outros métodos mais simplificados (Böhm, 1979).

Para avaliação de indivíduos, posteriormente à sua separação completa da massa de solo, inicia-se a retirada de todas as raízes laterais que são peneiradas no campo e no laboratório, lavadas, pesadas e amostradas para a obtenção da biomassa fresca e seca. Em relação à raiz pivotante, após a determinação da biomassa fresca, retiram-se discos que são pesados e colocados na estufa para a determinação do peso seco.

4.7.2. Caracterização da Vegetação nas Parcelas de Erosão

Neste tópico são descritos separadamente os métodos utilizados para a caracterização da cobertura vegetal em cada uma das parcelas avaliadas: Método Parcela 1 (Embrapa Solos); Parcela 3 (Hidrossemeadura); Parcela 4 (Biomanta). Em todas as parcelas as avaliações envolveram taxas de estabelecimento, biometria, biomassa aérea e radicular, comprimento e densidade de raízes e arquitetura radicular.

Um aspecto importante na definição dos pontos de amostragem da vegetação foi o posicionamento ao longo do comprimento da rampa do talude. No que diz respeito à distribuição da umidade, sabe-se que nos pés dos taludes solos tendem a possuir maiores valores de umidade em relação à crista. Como resultado, em taludes de corte a vegetação tende a crescer melhor no terço inferior, deixando muitas vezes as cristas desprotegidas e provocando a erosão e/ou a instabilização

dos mesmos. Estes processos podem se tornar especialmente acentuados com a utilização de determinadas técnicas de bioengenharia, como as aplicações de hidrossemeadura convencionais. A Figura 4-56 ilustra algumas situações típicas em que a umidade no terço inferior do talude favoreceu um maior crescimento da vegetação.

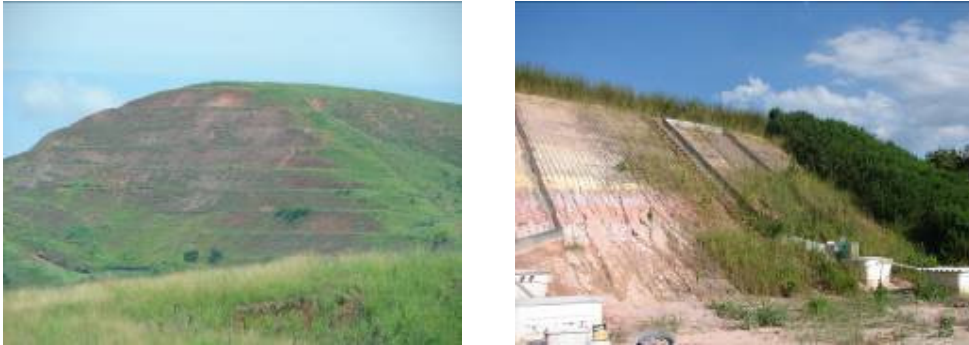


Figura 4-56 Desenvolvimento diferenciado de plantios por hidrossemeio ao longo do comprimento da rampa dos taludes. Acima fotos da Rodovia Rio Juiz de Fora, abaixo à esquerda observa-se a Parcela 3 e à direita um hidrossemeio em talude na Rodovia Rio Santos realizado em fevereiro de 2008.

Assim, visando avaliar a cobertura vegetal existente nas parcelas da maneira mais abrangente possível, e também com objetivo de avaliar a influência da posição no talude sobre a cobertura vegetal, medições foram efetuadas através da divisão do talude em três seções de amostragem: terço superior, terço médio, terço inferior.

4.7.2.1. Parcela 1

Com o objetivo de avaliar o estabelecimento das mudas implantadas, a partir do croqui com a localização de cada uma das covas no talude (abordado no Capítulo III), foram determinadas as espécies implantadas e as substituições de mudas, observando-se as espécies introduzidas nas substituições. Com base no monitoramento e na taxa de mortalidade medida antes e após as substituições foi estimada uma taxa geral de mortalidade para o tratamento.

O estabelecimento do capim Vetiver foi avaliado em termos qualitativos, uma vez que foi introduzido através de linhas com plantio em sulco obtendo um ótimo desempenho. Aspectos do crescimento e desenvolvimento foram ainda avaliados posteriormente (descrito a seguir).

Visando avaliar as características de crescimento das leguminosas implantadas, foram efetuadas medidas em cada indivíduo de altura e DAP após 13 meses de plantio. Devido a maior facilidade de execução, para avaliação do Capim Vetiver foram efetuadas medições de altura após 30, 60, 90 dias e 13 meses de plantio.

Objetivando avaliar a biomassa e a arquitetura radicular foram selecionadas três áreas, uma por terço do talude, com dimensões de 1.5 m por 2 m. Nestas áreas foi efetuado o abate dos indivíduos e a abertura de uma trincheira para avaliação de perfil, com 0.90 m de profundidade por 1 m de largura, perpendicular à face do talude, com a posição central no eixo das leguminosas selecionadas à uma distância de 0.3 m do tronco do indivíduo analisado. Para o preparo do perfil de solo, primeiramente o perfil foi pintado com tinta *spray* de cor branca, sendo e posteriormente lavado com água para retirada do solo alterado pelo tratamento, expondo somente as raízes pintadas.

Tendo sido efetuada esta etapa foi colocada uma malha de 0.80 m de altura por 1 m de largura que possui 20 quadrículas de 20cm², totalizando 0.8 m². As imagens foram obtidas individualmente para cada uma das quadrículas. Após a abertura das trincheiras seguiu-se à caracterização dos sistemas radiculares e também uma descrição de aspectos da morfologia e arquitetura radicular das leguminosas avaliadas.

4.7.2.2. Parcela 3

Para avaliar o estabelecimento da cobertura vegetal e a fixação da hidrossemeadura, foram avaliados os três terços do talude aos 30, 60, 90, 120 dias e 13 meses.

Primeiramente, foram feitas observações e tiradas fotografias objetivando avaliar o período de emergência de cada espécie por terço. Posteriormente, para a caracterização do crescimento da cobertura vegetal foram efetuadas medições de altura média da cobertura vegetal por terço, 13 meses após o hidrossemeio, tomando-se como base a avaliação de todos os indivíduos em uma área de 1.5 m por 2 m.

Visando avaliar ainda o desenvolvimento da vegetação implantada, foram efetuadas observações referentes à emissão de flores e frutos.

Tendo sido realizada esta medição se procedeu ao abate da vegetação para avaliação da biomassa aérea, biomassa radicular, densidade populacional, arquitetura radicular, densidade e comprimento de raízes. Nesta etapa foram utilizadas as mesmas áreas utilizadas para as medições de altura dos indivíduos.

Para o estudo dos sistemas radiculares foram abertas trincheiras de 0.9 m por 1 m nos três terços do talude, objetivando realizar uma avaliação geral dos sistemas de raízes presentes. Neste sentido utilizou-se a mesma metodologia apontada para a Parcela 1.

4.7.2.3. Parcela 4

Para avaliar o estabelecimento da cobertura vegetal, bem como o a fixação e a facilidade de atravessamento da biomanta das diferentes espécies, foram avaliados os três terços do talude aos 30, 60, 90, 120 dias e 13 meses.

Primeiramente, foram feitas observações e tiradas fotografias objetivando avaliar o período de emergência de cada espécie por terço, assim como a facilidade de atravessar a biomanta.

Para a caracterização do crescimento da cobertura vegetal foram efetuadas medições de altura média por terço, 13 meses após o plantio e recobrimento do solo com a biomanta, tomando-se como base a avaliação de todos os indivíduos em uma área de 1.5 m por 2 m.

Visando avaliar desenvolvimento da vegetação implantada, foram efetuadas observações da emissão de flores e frutos.

Para avaliação da biomassa aérea, biomassa radicular, densidade populacional, arquitetura radicular, densidade e comprimento de raízes, bem como para a abertura das trincheiras foram seguidos os mesmos critérios adotados para a Parcela 3.

4.7.3. Comportamento hidrológico

Visando gerar dados para as análises de balanço hídrico e balanço de energia, discutidas no Capítulo V, foram determinados alguns parâmetros relacionados ao comportamento hidrológico de taludes na presença da vegetação. Neste sentido, as avaliações constaram de medições da interceptação e atravessamento das chuvas, e também determinações de parâmetros de resistência

superficial e aerodinâmica importantes em análises de balanços de energia, na determinação de valores de evapotranspiração das culturas. Estes últimos foram determinados a partir de Fórmulas Matemáticas Para a Análise de Crescimento.

A técnica de análise de crescimento, desenvolvida por cientistas ingleses, permite através de avaliações periódicas e com a utilização de fórmulas matemáticas, a determinação do padrão de acúmulo e distribuição de massa seca nas diversas partes da planta durante o seu ciclo vegetativo e reprodutivo. Calbo et al. (1989), relatam que o uso de modelos matemáticos para expressar o crescimento e seus parâmetros derivados (AF, IAF, etc.) é muito popular e pode eventualmente fornecer subsídios para melhor compreensão dos diferentes processos fisiológicos envolvidos na morfogênese da planta. Detalhes destes processos serão abordados no Capítulo V.

4.7.3.1. Avaliação da Intercepção e Atravessamento

Conforme já mencionado na introdução, foram efetuadas medições de atravessamento e intercepção das chuvas nas Parcelas 1 e 4 através da instalação de pluviômetros abaixo do dossel das copas arbóreas e arbustivas. Os pluviômetros utilizados foram os do modelo ECRN (*Decagon Devices*), já descrito no subitem de parâmetros meteorológicos, sendo instalados um por parcela, no terço médio do talude, a 0.3 m do solo, com uso de estacas de madeira. Observa-se que para a Parcela 3 não foi possível efetuar estes tipos de avaliações pois a vegetação é incipiente e não apresenta mecanismo de atravessamento.

4.7.3.2. Resistência Superficial e Aerodinâmica

Além das avaliações de atravessamento e intercepção foram também determinados alguns parâmetros culturais incluídos na formulação geral da equação de Penman e Monteith (Allen *et al.*, 1998). Conforme já discutido, esta formulação inclui todos os parâmetros que governam as trocas de energia e fluxos de calor latente em superfícies vegetais (evapotranspiração) uniformes, sendo que a mesma pode ser utilizada para cálculos diretos da evapotranspiração de qualquer tipo de vegetação, uma vez que a resistência superficial (r_s) e a resistência aerodinâmica (r_a) são parâmetros inerentes ao tipo de vegetação.

A resistência superficial (r_s) descreve a resistência do fluxo de vapor através das cavidades estomáticas, área foliar total e superfície do solo. A resistência aerodinâmica, r_a , envolve o atrito do ar fluindo nas superfícies vegetais (Figura 4-57).

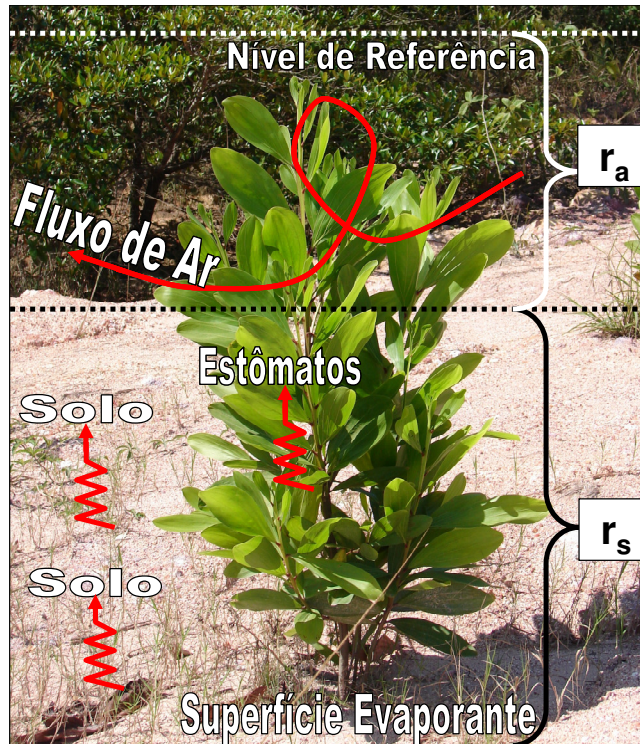


Figura 4-57 Diagrama representativo das componentes: resistência superficial (r_s) e resistência aerodinâmica (r_a).

4.7.3.2.1. Resistência Aerodinâmica (r_a)

Os processos de transferência de calor e vapor d'água em uma superfície evaporante para o ar acima do dossel são determinados pela resistência através da relação:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}} \right] \ln \left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad \text{[Equação 4-31]}$$

r_a – resistência aerodinâmica [$s \, m^{-1}$],

z_m – altura das medições dos ventos [m],

z_h – altura das medições de umidade [m],

- d – altura de deslocamento do plano zero [m],
 z_{om} – Índice rugosidade governando a transferência de calor e valor [m],
 z_{oh} – Índice rugosidade governando a transferência de calor e valor [m],
 k – constante de von Karman's (igual a -0.41),
 u_z – velocidade dos ventos à altura z [$m\ s^{-1}$].

Para grande parte das culturas os valores de d [m] e z_{om} [m] podem ser estimados a partir da altura das plantas (h) utilizando-se as seguintes relações:

$$d=2/3h \quad \text{[Equação 4-32]} \quad z_{om} = 0.123 h \quad \text{[Equação 4-33]}$$

O valor de z_{oh} [m] pode também ser aproximado através da seguinte relação:

$$z_{oh} = 0.1 z_{om} \quad \text{[Equação 4-34]}$$

Assim, assumindo-se uma altura constante de 0.12 m e uma altura de medição padronizada de velocidade dos ventos, temperatura e umidade relativa à 2 m ($z_m = z_h = 2$ m), a resistência aerodinâmica r_a [$s\ m^{-1}$] para a superfície de referência (grama) torna-se:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{2 - 2/3(0.12)}{0.123(0.12)}\right] \ln\left[\frac{2 - 2/3(0.12)}{(0.1)0.123(0.12)}\right]}{(0.41)^2 u_z} = \frac{208}{u_z} \quad \text{[Equação 4-35]}$$

Em que u_2 é a velocidade dos ventos a 2 m do solo.

Desta forma, ao longo do desenvolvimento do monitoramento hidrológico os valores deste parâmetro puderam ser ajustados diretamente em função das medidas de altura executadas nas parcelas, conforme descrito no item 1.1.2.

4.7.3.3. Resistência Superficial (r_s)

Quando se estuda pormenorizadamente a resistência superficial deve-se determinar a taxa de cobertura do solo, pois se a vegetação não o cobrir por completo, deve-se levar em consideração a evaporação direta do solo. Além disso, quando da existência de restrições hídricas a estes processos, a resistência dependerá do status hídrico da planta, relacionado ao seu potencial, e a sucção dos

solos. Existem, todavia, proposições simplificadas e aceitas em termos gerais (Allen et al., 1998) para estimativas deste parâmetro através da seguinte relação:

$$r_s = \frac{r_f}{IAF_{ativo}} \quad \text{[Equação 4-36]}$$

Em que:

r_s - resistência superficial [$s\ m^{-1}$],

r_1 - resistência estomática de uma folha bem iluminada [$s\ m^{-1}$],

IAF_{ativo} – Índice de Área Foliar [m^2 / m^{-2}].

A contribuição das folhas nos processos de transferência de calor e valor d'água é assim determinada pelo IAF_{ativo} representado pela parte superior do dossel e obtido a partir da mensuração do Índice de Área foliar as plantas.

O IAF_{ativo} é determinado a partir do Índice de Área Foliar. Diversas são as formas de se medir a área foliar de um cultivo, porém muitas são inadequadas por serem destrutivas e por dependerem de aparelhos que só estão disponíveis em laboratórios ou, ainda, por demandarem excessiva mão-de-obra para execução (Soares *et al*, 2005). Métodos clássicos de determinação da área foliar em culturas agrícolas consistem na medida do número e área foliar individual (de acordo com Sbrissia & Silva (2008) determinada medindo-se a largura, comprimento e área), ou utilizando-se um planímetro (integradores de área). Os integradores ópticos de área foliar (ex.: LI-COR 3100, LI-COR 3000) são aparelhos bastante precisos, mas são importados e de difícil manutenção. O uso de imagens digitalizadas para medida da área foliar é uma alternativa aos métodos citados. Neste sentido o SIARCS tem se mostrado uma ferramenta adaptável a estas medidas.

No desenvolvimento desta tese foram efetuadas medições de área foliar para todos os indivíduos arbóreos abatidos, através do método de contagem e medição de área foliar individual através da largura e comprimento. Para espécies rasteiras e arbustivas avaliadas o IAF foi medido a partir de um indivíduo representativo de cada estágio de monitoramento, por terço de avaliação no talude.

Tendo sido determinados os valores de IAF, uma equação geral para determinação do IAF_{ativo} , proposta por Allen *et al.* (1998) pode ser utilizada:

$$IAF_{ativo} = 0.5\ IAF \quad \text{[Equação 4-37]}$$

Para gramíneas este índice pode ainda ser simplificado para através da seguinte relação:

$$\mathbf{IAF = 24 h} \quad \mathbf{[Equação 4-38]}$$

Em que h é a altura da cultura [m].

O valor de r_1 - resistência estomática de uma folha bem iluminada [$s\ m^{-1}$], para gramíneas, possui um valor em torno de $100\ s\ m^{-1}$ sem restrições hídricas. Assim, assumindo estes valores para a determinação de r_s [$s\ m^{-1}$] para uma superfície gramada com 0.12 m de altura têm-se:

$$r_s = \frac{100}{0.5(24)(0.12)} \approx 70\ sm^{-1} \quad \mathbf{[Equação 4-39]}$$

Os valores de r_1 representam a resistência superficial de folhas individuais. Estes valores dependem da cultura avaliada e podem ser obtidos através de medições de condutância estomática com porômetros. Os valores de condutância apresentam grandes oscilações ao longo dos estágios fenológicos e disponibilidade hídrica das culturas, sendo que a maior parte do conhecimento disponível é voltada para estudos fisiológicos e ecofisiológicos.

Nesta tese, visando incluir de alguma maneira os parâmetros de área foliar obtidos, e de modo a ajustar as equações de evapotranspiração para as culturas avaliadas, foram utilizados os valores médios de resistência de $100\ sm^{-1}$. Assim, foram determinados para intervalo de medição da vegetação estes parâmetros, que juntamente com a resistência aerodinâmica, também determinada a partir de parâmetros específicos das culturas, possibilitam o ajuste da equação geral de Penman Monteith.

Por fim, um último parâmetro referente à vegetação, incluído na determinação da evapotranspiração, é o albedo, considerado para a cultura de referência como 0.23 (adimensional). Devido às dificuldades de estimar estes valores, que por vezes acarretam em distorções na equação de evapotranspiração, e também dado que normalmente os valores se situam entre 0.2 e 0.25 (para superfícies vegetais o valor possui um espectro que varia de 0.1 a 0.4), o valor de referência (0.23) foi mantido para todas as culturas para os cálculos específicos de evapotranspiração das culturas.

4.8. Instalação da Instrumentação em campo

4.8.1. Abrigo Meteorológico

Quando o propósito da implantação de um abrigo meteorológico é estimar a ET_0 devem ser seguidos os critérios recomendados pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia) para Estações Meteorológicas Convencionais.

De acordo com as, as estações devem ser montadas em um local plano, longe de instalações elétricas que possam produzir interferências eletromagnéticas, como fios de alta tensão, motores elétricos, etc. A distância de obstáculos recomendada pela OMM é de pelo menos 10 vezes a altura deste, ou seja, na hipótese de haver uma árvore com altura de 10 m, a estação deverá ser montada a uma distância de 100 m ou superior a este obstáculo.

Pode ser ainda utilizado como critério alternativo para distância de obstáculos uma distância mínima equivalente ao dobro da diferença de altura entre o obstáculo e a altura dos sensores no tripé da estação medição. O mais importante para instalação é garantir de alguma forma que estão sendo representadas condições locais para uma área aberta com grama em torno de 8-12 cm de altura.

Para a área do abrigo, a maioria das agências recomenda 100m² com o solo coberto por grama ou vegetação local de baixo porte. É desejável acesso restrito à área com instalação de cerca com alambrado na altura máxima de 1,5 m e único acesso à área pela face Sul. Selecionado o local da instalação da estação, deve-se identificar e marcar a direção Norte (Norte Verdadeiro – Geográfico). Para tal é determinado o Norte Magnético com o uso de uma bússola e descontada a declinação magnética do local e data específicos (ver Figura 4-58). No caso do Campo Experimental do Galeão foram utilizados dados do Observatório Nacional (MCT) utilizando-se o programa *Geomag v5.2 (NGDC/ US National Geophysical Data Center)* para: $-22^{\circ}47'10''$; $-43^{\circ}13'27''$; ano base 2008.

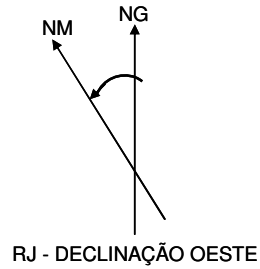


Figura 4-58 Determinação da Declinação magnética para cálculo do Norte Verdadeiro.

Para instalação do Abrigo Meteorológico do Campo Experimental do Galeão foi instalada uma cerca (moirões de concreto com 2.2 m de altura) abrangendo uma área gramada retangular de 4 m x 8 m. O Abrigo, orientação geográfica, localização da EMA e do *Ville de Paris* encontram-se na Figura 4-59.

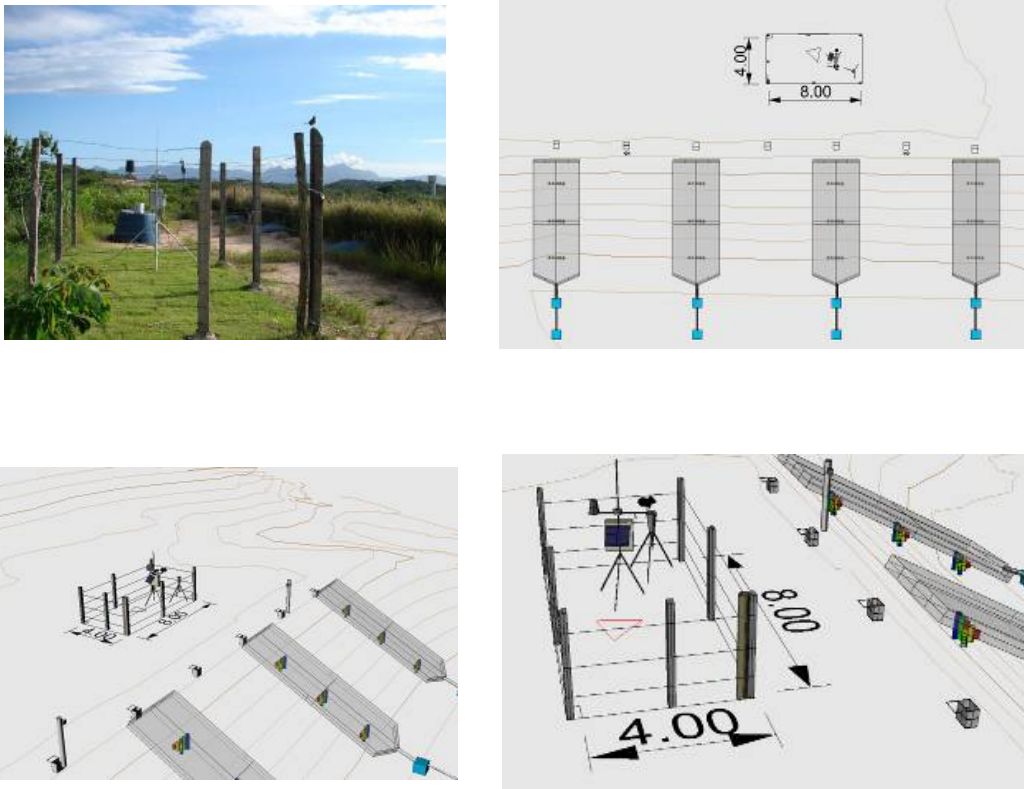


Figura 4-59 Abrigo Meteorológico no Campo Experimental do Galeão.

À exceção dos pluviômetros ECRN, todos os instrumentos para medição de parâmetros meteorológicos foram instalados dentro do abrigo meteorológico. O pluviômetro *Ville de Paris* foi instalado a 1.5 m do solo e a 1 m de distância do tripé da Estação Meteorológica. (O posicionamento dos pluviômetros ECRN se

deu na crista do talude, fixados em moirões de eucalipto a uma altura de 2 m) em duas diferentes posições.

O objetivo da implantação dos ECRN foi desenvolver uma técnica de medição automatizada da interceptação das chuvas. O primeiro passo foi gerar uma série histórica mínima para calibração dos sensores, no caso de 1 ano. Para isso, os ECRN foram mantidos nas suas posições iniciais ao longo de pelo menos um ano. Os gráficos de correlações entre os dados obtidos encontram-se no capítulo seguinte referente a resultados de monitoramento.

4.8.2. Monitoramento da água no solo

4.8.2.1. Pontos de Monitoramento

A profundidade de instalação e o posicionamento ao longo do comprimento da rampa são os dois principais aspectos relacionados ao posicionamento de sensores para medição da água no solo em taludes. A escolha de locais, em ambos os casos, é função do processo específico que se pretende avaliar.

O objetivo na escolha de profundidades de instalação de sensores depende do processo de infiltração presente (vertical, lateral subsuperficial etc.), bem como da influência da vegetação. Exemplo de aplicação destes parâmetros são os sistemas de irrigação automatizados, onde a tomada de decisões e o acionamento dos aspersores estão condicionados a leituras de Ψ e θ . Nestes sistemas, onde a vegetação é o principal indicador, normalmente são instalados sensores em pelo menos duas profundidades, denominados respectivamente superficial (de acionamento de irrigação) e profundo (de controle de irrigação) (Faria & Costa, 1987).

Quando se instala uma instrumentação para medição da água no solo em sistemas agrícolas, a quantidade de profundidades a ser monitorada é ainda função da profundidade das raízes e também do método de irrigação empregado. Assim, em plantas jovens instalam-se sensores superficialmente e aprofunda-se à medida que se observa o desenvolvimento das raízes. Geralmente utiliza-se apenas um sensor na metade da profundidade efetiva das raízes de plantas com sistema radicular de até 0.4 m.

Para plantas com raízes mais profundas (0.5 m a 1.3 m), recomenda-se instalar um sensor a $\frac{1}{4}$ da profundidade efetiva das raízes e outro a $\frac{3}{4}$ deste valor

(superficial e profundo). Os sensores superficiais indicam o momento em que as plantas começam a sofrer com estresse hídrico e os mais profundos indicam as condições de penetração e infiltração.

Existe uma série de resultados publicados sobre a profundidade efetiva de raízes, assim como recomendações para profundidades de instalação de tensiômetros (IAPAR, 1987; Taylor, 1965). Moretti Filho (1967) recomenda a instalação de tensiômetros de acordo com a profundidade efetiva das raízes, como mostrado na Tabela 4-23.

Tabela 4-23 Profundidades recomendadas para instalação de tensiômetros de acordo com a profundidade efetiva da zona ativa das raízes (de Moretti Filho, 1967).

Profundidade da zona ativa de raízes (cm)	Profundidade do sensor (cm)	
	Superficial	Profundo
45	20	30
60	30	45
90	30	60
120 +	45	90

Como no caso do talude têm-se diversos tipos de espécies, que crescem tanto a partir de mudas quanto a desde seu pegamento e o objetivo é uma análise comparativa por pelo menos um ano, foram escolhidas quatro profundidades, tentando abranger a zona ativa de raízes de todas as espécies implantadas. Para isso os instrumentos foram instalados nas profundidades de 0.25m; 0.50m; 0.75m e 0.90m.

Outro aspecto importante na definição dos pontos de monitoramento é a posição ao longo do comprimento da rampa do talude. No que diz respeito à distribuição da umidade, conforme apontado anteriormente, nos pés dos taludes os solos tendem a possuir maiores valores de umidade em relação à crista. Visando avaliar estes efeitos sobre o comportamento hidrológico da vegetação, as baterias de sensores foram instaladas, para cada parcela de erosão, em três terços: superior, médio e inferior (Figura 4-60).

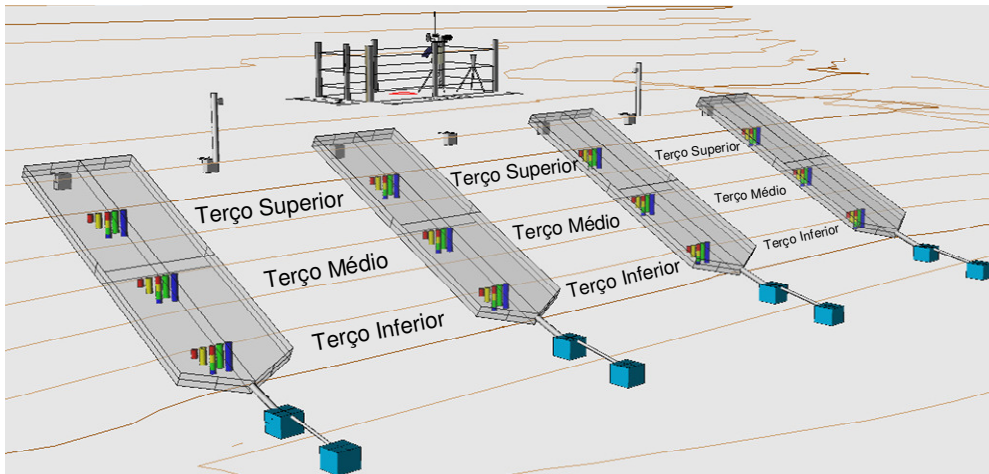
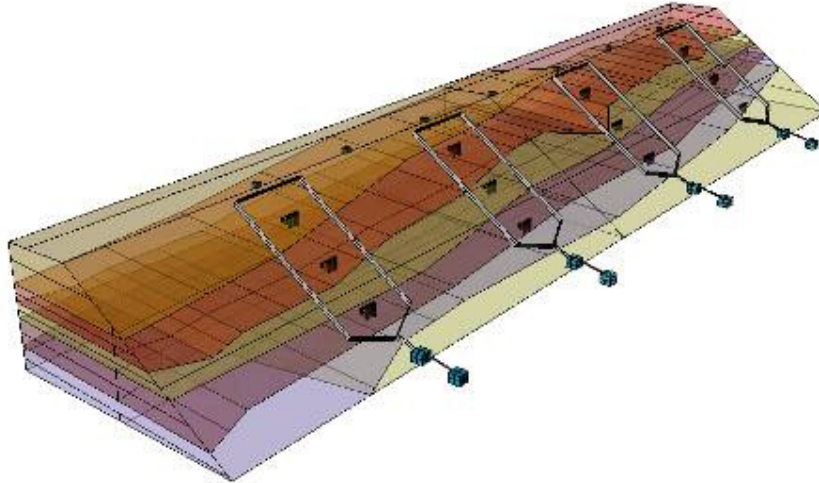


Figura 4-60 Posicionamento dos pontos de monitoramento e das baterias de sensores ao longo dos três terços no talude, para as quatro parcelas estudadas.

Ressalta-se que os pontos de monitoramento foram escolhidos, como um todo, a partir de parâmetros de profundidade e geométricos onde se observa direta relação com o processo de crescimento da vegetação.

Tendo sido definidos os pontos de monitoramento, procedeu-se a instalação das sondas. No momento da cravação no subsolo, foram coletadas amostras para definição dos solos presentes visando ainda ajustar o modelo tridimensional elaborado no Capítulo 4. Os pontos de monitoramento relacionados aos diferentes camadas de solos existentes na face do talude encontram-se na Figura 4-61.



Ponto	Solo	Ponto	Solo	Ponto	Solo	Ponto	Solo
1I 0.25	VE	2I 0.25	R	3I 0.25	R	4I 0.25	R
1I 0.5	R	2I 0.5	R	3I 0.5	R	4I 0.5	A
1I 0.75	R	2I 0.75	R	3I 0.75	R	4I 0.75	A
1I 0.9	R	2I 0.9	R	3I 0.9	A	4I 0.9	A
1M 0.25	A	2M 0.25	A	3M 0.25	A	4M 0.25	VE
1M 0.5	A	2M 0.5	A	3M 0.5	A	4M 0.5	VE
1M 0.75	A	2M 0.75	VE	3M 0.75	VE	4M 0.9	VE
1M 0.9	A	2M 0.9	VE	3M 0.9	VE	4M 0.75	VE
1S 0.25	VA	2S 0.25	V	3S 0.25	V	4S 0.25	V
1S 0.5	VA	2S 0.5	V	3S 0.5	V	4S 0.5	V
1S 0.75	VA	2S 0.75	V	3S 0.75	V	4S 0.75	V
1S 0.9	V	2S 0.9	V	3S 0.9	V	4S 0.9	V

Figura 4-61 Pontos de monitoramento relacionados aos diferentes camadas de solos existentes na face do talude.

4.8.2.2. Técnicas de Instalação

Para a instalação de cada um dos conjuntos de sensores foram feitos cinco furos com auxílio de trado de helicoidal, alinhados horizontalmente no talude. O furo central foi utilizado para instalação dos GMS. A instalação dos sensores GMS foi efetuada utilizando-se o método padrão preconizado na literatura, onde prepara-se uma lama com solo retirado do furo, sendo esta depois despejada em quantidade suficiente para garantir um bom contato entre o solo envolvente e os sensores. A cada profundidade os GMS foram inseridos subverticalmente através de um furo piloto, aproveitando-se as paredes do mesmo, de modo que os mesmos ficassem instalados acoplados ao solo indeformado (Figura 4-62).

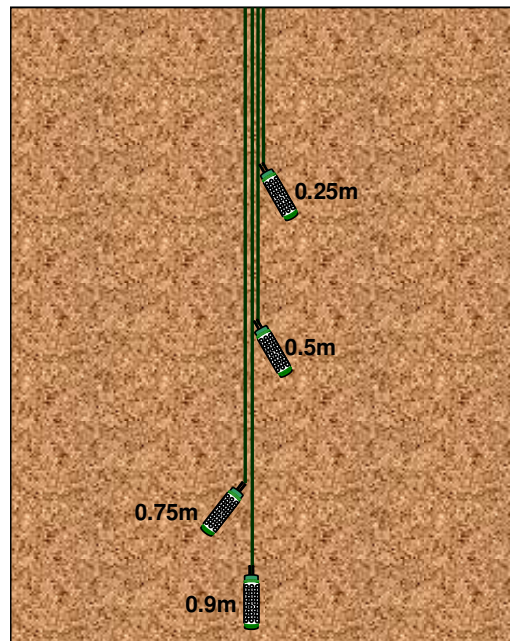


Figura 4-62 Posicionamento dos subhorizontal GMS para inserção no talude.

Para a instalação dos sensores FDR foi utilizado um insensor específico fornecido pelo fabricante, que viabiliza a cravação direta da sonda no terreno. Para instalação destas sondas, primeiramente foi aberto um furo com o trado helicoidal de diâmetro ligeiramente superior ao do equipamento de cravação. Posteriormente é efetuado com uma espécie de gabarito (uma lâmina metálica) um pré-furo com 4 cm de largura e 1 mm de espessura, onde foi inserida a sonda por meio do insensor. Depois destas etapas os furos foram tapados utilizando-se de lama produzida com o material extraído do furo, de forma semelhante ao executado para os GMS. Detalhes do processo de instalação das sondas FDR, assim como os equipamentos utilizados são apresentados na Figura 4-63.



Figura 4-63 Processo de inserção no talude com o gabarito.

As sondas FDR foram instaladas em furos individuais, devido à dificuldade em garantir o contato entre solo/ sonda, sendo que as sondas GMS ficaram posicionadas entre sensores FDR instalados a 0.50 m e 0.75 m. Nas extremidades

da série foram posicionados, à esquerda dos sensores GMS sondas à 0.25 e 0.5 m, e à direita sensores à 0.75 m e 0.90 m.

Visando identificar os diferentes pontos instalados os fios foram identificados com fitas adesivas adotando para ambos os sensores o seguinte código de cores: vermelho para a profundidade de 0.25 m, amarelo para 0.5 m, verde para 0.75 e azul para 0.9 m. (Figura 4-64). Para determinação do terço de monitoramento procedeu-se marcando os fios com uma fita para o terço inferior, duas para o médio e três para o inferior.

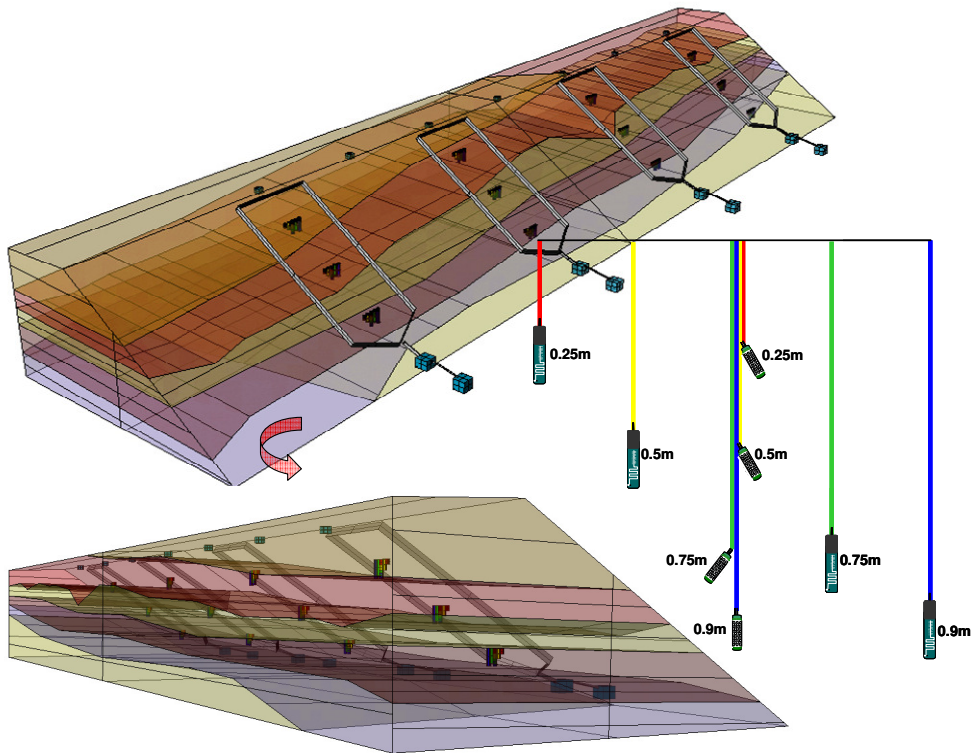


Figura 4-64 Posicionamento dos sensores no talude, com cores para identificação das profundidades de instalação.

4.8.2.3. Aquisição de dados

Os sensores GMS foram conectados aos sistemas *Monitor#900M* e os FDR ao *Em50* que possuem, respectivamente, oito e cinco canais de entrada. Para o *Monitor#900M* seguiu-se à recomendação de instalação de pelo menos um geotermômetro para calibração dos dados de resistência obtidos nos GMS em cada *logger*. Já nos *loggers Em50* as entradas foram compartilhadas, no total, somente com os dois pluviômetros *Decagon ECRN*, que são compatíveis somente com este sistema.

Como explicado, os GMS e os FDR foram alocados no talude nas quatro parcelas, em três terços (inferior, médio e superior) e quatro profundidades (0.25 m, 0.5 m, 0.75 m, 0.9 m), totalizando 48 pontos de monitoramento e 96 sensores instalados. Para os FDR foi necessária a instalação de 10 *loggers Em50* para aquisição dos 48 pontos, e para os GMS foi necessário a utilização de 7 *loggers Monitor#900M*.

Com o objetivo de minimizar o comprimento dos fios e abrigar os *loggers* da melhor forma possível em campo, foram construídas sete caixas, a meio metro da crista do talude e igualmente espaçadas em 6 m. Estas caixas foram instaladas embutidas no solo, com 0.45m de profundidade e 0.35 x 0.40 de largura, sendo providas de portas de aço trancadas por cadeados.

O processo de construção envolveu a escavação de uma trincheira de aproximadamente 0.40 m x 0.40 m x 0.40 m, onde foram embutidas as caixas em alvenaria, utilizando-se tijolos maciços, sendo pintada também por dentro com tinta impermeabilizante branca. Para a passagem da fiação foi mantida uma fresta de 1 cm de altura e 10 cm de comprimento, na face da porta voltada para o talude (detalhes das caixas de armazenamento na **Figura 4-65**).

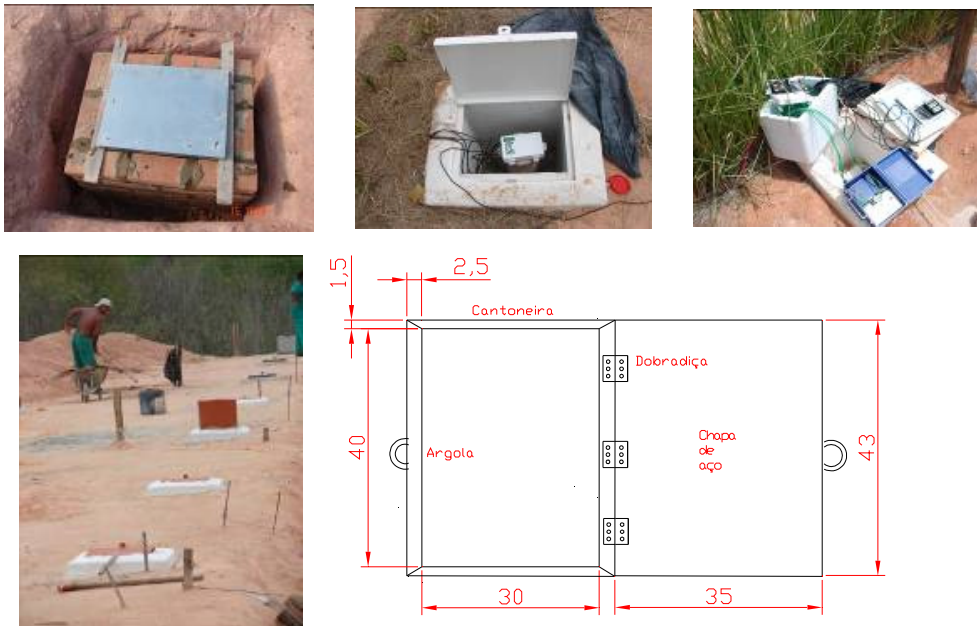


Figura 4-65 Caixas de armazenamento de Dataloggers.

A distribuição dos *loggers Em50* nas caixas foi efetuada utilizando-se dois tipos de configuração: nas caixas 1, 3, 5 e 7 foram alocados dois Em50; nas caixas 2 e 6 foi alocado somente um (utiliza-se a abreviação DL1, DL2, etc. daqui por

diante para referir-se a estes sistemas). Como as sondas EC-10 são fabricadas exclusivamente com 5 m de fio, foi necessária a utilização de extensões para a instalação deste sistema em campo. A Tabela 4-24 sumariza as distâncias necessárias para a instalação das sondas nos 48 pontos de monitoramento.

Tabela 4-24 Distâncias de instalação das sondas EC-10.

Ponto	Caixa	DL	Dist. (m)	Ponto	Caixa	DL	Dist. (m)
1I 0.25	1	1	11.19	3I 0.25	5	6	11.19
1I 0.5	1	1	11.44	3I 0.5	5	6	11.44
1I 0.75	1	1	11.19	3I 0.75	5	6	11.19
1I 0.9	1	1	11.34	3I 0.9	5	6	11.34
1M 0.25	1	1	7.55	3M 0.25	5	6	7.55
1M 0.5	1	2	7.80	3M 0.5	5	7	7.80
1M 0.75	1	2	7.55	3M 0.75	5	7	7.55
1M 0.9	1	2	7.70	3M 0.9	5	7	7.70
1S 0.25	1	2	3.88	3S 0.25	5	7	3.88
1S 0.5	1	2	4.13	3S 0.5	5	7	4.13
1S 0.75	2	5	8.94	3S 0.75	6	10	8.94
1S 0.9	2	5	9.09	3S 0.9	6	10	9.09
2I 0.25	3	3	11.19	4I 0.25	7	8	11.19
2I 0.5	3	3	11.44	4I 0.5	7	8	11.44
2I 0.75	3	3	11.19	4I 0.75	7	8	11.19
2I 0.9	3	3	11.34	4I 0.9	7	8	11.34
2M 0.75	3	3	8.05	4M 0.75	7	8	7.55
2M 0.9	3	4	8.20	4M 0.9	7	9	7.80
2M 0.5	3	4	7.30	4M 0.5	7	9	7.55
2M 0.25	3	4	7.05	4M 0.25	7	9	7.70
2S 0.25	3	4	3.88	4S 0.25	7	9	3.88
2S 0.5	3	4	4.13	4S 0.5	7	9	4.13
2S 0.75	2	5	8.94	4S 0.75	6	10	8.94
2S 0.9	2	5	9.09	4S 0.9	6	10	9.09

Devido ao preço dos cabos originais utilizados para extensões, e visando minimizar o comprimento de extensões necessário, as sondas FDR foram divididas em quatro tamanhos diferentes: sem extensão – S - (5m); com extensão pequena – P - (comprimento total 9.5m); com extensão média – M - (11.57m) e com extensão grande – G - (total de 12.5m). A Tabela 4-25 mostra a distribuição dos diferentes tamanhos de extensões utilizados nos EC-10, bem como respectivas caixas de armazenamento e *loggers* utilizados.

Tabela 4-25 Distribuição das extensões utilizadas nos EC-10.

DL	Caixa	Port	Ponto	Ext.	DL	Caixa	Port	Ponto	Ext.
1	1	1	1I 0.25	M	6	5	1	3I 0.25	G
		2	1I 0.5	M			2	3I 0.5	M
		3	1I 0.75	M			3	3I 0.75	G
		4	1I 0.9	M			4	3I 0.9	M
		5	1M 0.25	P			5	3M 0.25	P
2	1	1	1M 0.5	P	7	5	1	3M 0.5	P
		2	1M 0.75	P			2	3M 0.75	P
		3	1M 0.9	P			3	3M 0.9	P
		4	1S 0.25	S			4	3S 0.25	S
		5	1S 0.5	S			5	3S 0.5	S
3	3	1	2I 0.25	G	8	7	1	4I 0.25	G
		2	2I 0.5	M			2	4I 0.5	M
		3	2I 0.75	G			3	4I 0.75	G
		4	2I 0.9	M			4	4I 0.9	M
		5	2M 0.75	P			5	4M 0.25	P
4	3	1	2M 0.9	P	9	7	1	4M 0.5	P
		2	2M 0.5	P			2	4M 0.75	P
		3	2M 0.25	P			3	4M 0.9	P
		4	2S 0.25	S			4	4S 0.25	S
		5	2S 0.5	S			5	4S 0.5	S
5	2	1	1S 0.75	P	10	6	1	3S 0.75	P
		2	1S 0.9	P			2	3S 0.9	P
		3	2S 0.75	P			3	4S 0.75	P
		4	2S 0.9	P			4	4S 0.9	P
		5	xxx	xxx			5	xxx	xxx

Quanto ao GMS, foi instalado em cada uma das sete caixas um *logger Monitor#900M*, sendo utilizada a mesma numeração para ambos (a caixa nº1 abriga o *Monitor#900M* nº1, sendo utilizado como abreviação WM1, WM2, etc. daqui por diante). Devido à facilidade de aquisição de sensores com extensões de diferentes tamanhos (os preços também não variam), para instalação deste sistema foram adquiridos dois comprimentos de fios diferentes (15 e 20 m). A Tabela 4-26 sumariza as distâncias necessárias para a instalação dos GMS nos 48 pontos de monitoramento e os respectivos comprimentos de fios utilizados. A Tabela 4-27 resume o posicionamento das sondas GMS nos Loggers Watermark para a aquisição dos dados.

Tabela 4-26 Distâncias necessárias para a instalação dos GMS nos 48 pontos de monitoramento e os respectivos comprimentos de fios utilizados.

Ponto	WM	Dist.(m)	Ponto	WM	Dist.(m)	Ponto	WM	Dist.(m)	Ponto	WM	Dist.(m)
1I 0.25	1	11.19	2I 0.25	3	11.19	3I 0.25	5	11.19	4I 0.25	7	11.19
1I 0.5	1	11.44	2I 0.5	3	11.44	3I 0.5	5	11.44	4I 0.5	7	11.44
1I 0.75	1	11.19	2I 0.75	3	11.19	3I 0.75	5	11.19	4I 0.75	7	11.19
1I 0.9	1	11.34	2I 0.9	3	11.34	3I 0.9	5	11.34	4I 0.9	7	11.34
1M 0.25	1	7.55	2M 0.25	3	7.55	3M 0.25	5	7.55	4M 0.25	7	7.55
1M 0.5	1	7.80	2M 0.5	3	7.80	3M 0.5	4	7.80	4M 0.5	7	7.80
1M 0.75	1	7.55	2M 0.75	3	7.55	3M 0.75	4	12.61	4M 0.75	7	7.70
1M 0.9	2	12.76	2M 0.9	4	12.76	3M 0.9	5	7.70	4M 0.90	6	12.61
1S 0.25	2	8.94	2S 0.25	4	8.94	3S 0.25	5	8.94	4S 0.25	6	8.94
1S 0.5	2	9.19	2S 0.5	2	9.19	3S 0.5	4	9.19	4S 0.5	6	9.19
1S 0.75	2	8.94	2S 0.75	2	8.94	3S 0.75	4	8.94	4S 0.75	6	8.94
1S 0.9	2	9.09	2S 0.9	4	9.09	3S 0.9	6	9.09	4S 0.9	6	9.09

Tabela 4-27 Posicionamento das sondas GMS nos *loggers Watermark* para a aquisição dos dados.

WM	Port	Ponto	WM	Port	Ponto	WM	Port	Ponto	WM	Port	Ponto
	1	GT1S 0.25		1	GT1S 0,50		1	GT2S 0,50		1	GT3S 0,50
	2	1I 0.25		2	1M 0.9		2	2I 0.25		2	2M 0.9
	3	1I 0.5		3	1S 0.25		3	2I 0.5		3	2S 0.25
1	4	1I 0.75	2	4	1S 0.5	3	4	2I 0.75	4	4	2S 0.9
	5	1I 0.9		5	1S 0.75		5	2I 0.9		5	3M 0.5
	6	1M 0.25		6	1S 0.9		6	2M 0.25		6	3M 0.75
	7	1M 0.5		7	2S 0.5		7	2M 0.5		7	3S 0.5
	8	1M 0.75		8	2S 0.75		8	2M 0.75		8	3S 0.9
	1	GT3S 0.25		1	GT3S 0.75		1	GT4S 0.5			
	2	3I 0.25		2	3S 0.75		2	4I 0.25			
	3	3I 0.5		3	GT4S 0.25		3	4I 0.5			
5	4	3I 0.75	6	4	4M 0.9	7	4	4I 0.75			
	5	3I 0.9		5	4S 0.25		5	4I 0.9			
	6	3M 0.25		6	4S 0.5		6	4M 0.25			
	7	3M 0.9		7	4S 0.75		7	4M 0.5			
	8	3S 0.25		8	S 0.9		8	4M 0.9			

4.8.3. Instalação de Calhas Parshall

A correta instalação de Calhas Parshall em campo obedece a critérios estabelecidos nas normas ASTM 1941:1975 e NBR/ ISSO 9826:2008. Aspectos básicos como as medidas recomendadas em função de valores de W, bem como nivelamento e construção de canal à montante, este último que constitui um dos aspectos mais importantes.

Em condições padronizadas utiliza-se um comprimento mínimo de $20 \cdot H$ para o trecho a montante, sendo esta medida dependente das dimensões da Calha. Neste estudo, procurou-se obter um trecho a montante com comprimento de pelo menos 142 cm, que é o mínimo preconizado pelo fabricante (de acordo com ASTM 1941:1975 a altura máxima permitida seria em torno de 7 cm, que representa uma vazão elevada para as parcelas estudadas). Desta forma, o volume escoado nas calhas segue para as caixas coletoras através de um conduto projetado de forma a evitar a ocorrência de regime afogado. Com o objetivo de possibilitar a execução de calibrações posteriores em laboratório (e/ou no caso da necessidade de implantação de outros tipos de sensores) as Calha Parshall foram encaixadas por meio de trilhos fabricados com cantoneiras de alumínio, fixados em uma estrutura de alvenaria construída entre o antigo emboque das folhas de zinco e a caixa coletora. Foi também construído um conduto adaptado para substituir as calhas na ausência destas, feito com PVC de $\Phi=100$ mm e maderite nas extremidades.



Figura 4-66 Detalhes da instalação das Calhas Parshall nas parcelas de erosão. A – Posicionamento do canal; B – construção do canal na Parcela II; C,D,E - Instalação completa na Parcela II; F – Parcela III instrumentada,; G,H – Parcela IV instrumentada com o canal; I,J – detalhes de nivelamento da Calha Parshall; L,M – peça de maderite e PVC utilizada para substituição das calhas no canal de fluxo.

4.8.3.1. Aquisição de Dados

Para aquisição dos dados em campo o foi utilizado o *Logger ALMEMO® 2890-9*, o mesmo utilizado em laboratório, alimentado por uma bateria 60Ah automotiva, diretamente (soquete DC), devido ao elevado consumo de energia, pois o sistema não pode ser deixado em modo de hibernação (o intervalo mínimo para aquisição de dados neste caso é de 2 minutos). O *Logger* foi instalado na Caixa 2, dentro do isopor, juntamente com o Em50 (DL5) e o Monitor#900M (WM2). A bateria de alimentação foi posicionada embaixo do isopor. Os dados foram adquiridos continuamente em intervalos de 30 segundos, gerando um elevado consumo de energia (o *Display LCD* tanto do *Logger* quanto do transmissor ficam ativados continuamente) (Figura 4-67).



Figura 4-67 Instalação do Logger ALMEMO® 2890-9 em campo para aquisição dos dados do LU-20.

Para fornecer a quantidade de energia necessária, alternativa ao uso de um painel solar em fase de instalação, foi implantada uma rotina de recarga e revezamento de baterias, sendo empregadas para isso duas unidades (uma de 40Ah e uma de 60Ah).