

EDSON LUÍS NUNES

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FLUXÍMETROS TERMOELÉTRICOS
PARA MEDIDAS DE FLUXO DE CALOR

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JULHO - 1993



EDSON LUÍS NUNES

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FLUXÍMETROS TERMOELÉTRICOS
PARA MEDIDAS DE FLUXO DE CALOR

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorolo-
gia Agrícola, para a Obtenção do
Título de "Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JULHO - 1993

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação de Biblioteca Central da UFV

T

N972d
1993

Nunes, Edson Luís, 1964-

Desenvolvimento e avaliação de fluxímetros
termoelétricos para medidas de fluxo de calor /
Edson Luís Nunes. - Viçosa : UFV, 1993.
59p. : il.

Orientador: Evandro Ferreira Passos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
de Viçosa.

1. Medidores termoelétricos de fluxo-Fabrica-
ção. 2. Calor-Medidores de fluxo. 3. Solos, Flu-
xo de calor nos-Medição. I. Universidade Federal
de Viçosa. II. Título.

CDD 18.ed. 621.4022

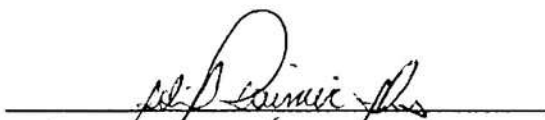
CDD 19.ed. 621.4022

EDSON LUÍS NUNES

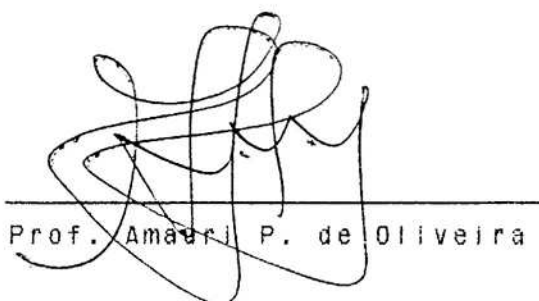
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE FLUXÍMETROS TERMOELÉTRICOS
PARA MEDIDAS DE FLUXO DE CALOR

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorolo-
gia Agrícola, para a Obtenção do
Título de "Magister Scientiae".

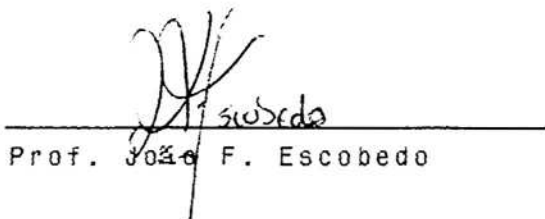
APROVADA: 10 de Abril de 1992.



Prof. Adri Rainier Alves
(Conselheiro)



Prof. Amauri P. de Oliveira



Prof. João F. Escobedo



Prof. Newton Ribeiro Rocha



Prof. Evandro Ferreira Passos
(Orientador)

À minha esposa Lourdes.

À minha filha Edilene.

Ao bebê, que está por chegar.

Aos meus pais Adilson e Maria.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor orientador desta pesquisa, Dr. Evandro Ferreira Passos, pelos valiosos conselhos e ensinamentos, pela orientação e amizade.

Ao professor Amauri Pereira de Oliveira, do IAG - USP, pela oportunidade de participar da campanha de medidas micro-meteorológicas no Centro Experimental Aramar, Iperó - SP.

Aos funcionários do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial aos senhores Marcílio, Sebastião, Valdemar e Espedito, pelo apoio no decorrer deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro.

À minha esposa Lourdes que, pelo estímulo e pela compreensão, foi, em parte, a causa do êxito do curso.

A meus pais Adilson e Maria, pelo carinho e pelos esforços dispendidos em prol de minha educação.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pela atenção e amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

BIOGRAFIA

EDSON LUÍS NUNES, filho de Adilson Nunes e Maria da Conceição Nunes, nasceu na cidade de Colatina, Estado do Espírito Santo, no dia 04 de setembro de 1964.

Realizou os cursos de 1º e 2º graus em Colatina - ES.

Graduou-se em Física, em janeiro de 1989, na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Em março de 1989, iniciou o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa.

Foi contratado, em fevereiro de 1991, pelo Departamento de Física das Faculdades Integradas do Vale do Rio Doce, Governador Valadares, Minas Gerais.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
EXTRATO	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Técnicas de Construção	6
2.2. Calibração	12
2.3. Distorção do Fluxo	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Construção dos Fluxímetros	25
3.1.1. Limpeza do Fio de Constantan e do Con- junto Base Isolante/Fio	27
3.1.2. Processo de Eletrodeposição	28
3.1.2.1. Solução Eletrolítica	28

3.1.2.2. Densidade de Corrente Usada	32
3.1.2.3. Tempo de Eletrodeposição	32
3.1.3. Proteção dos Fluxímetros	34
3.2. Condutividade Térmica dos Fluxímetros	34
3.3. Calibração dos Fluxímetros	34
3.4. Determinação do Tempo de Resposta dos Fluxímetros	35
3.5. Medidas de Campo	36
3.6. Medidas da Condutividade Térmica de Solos	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Tempo de Eletrodeposição	42
4.2. Calibração dos Fluxímetros	42
4.3. Determinação do Tempo de Resposta dos Fluxímetros	44
4.4. Medidas de Campo	46
4.5. Medida da Condutividade Térmica de Solos	47
5. CONCLUSÕES	54
BIBLIOGRAFIA	56

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Esquema da Montagem de Eletrodeposição Utilizado por Heard e Ward na Construção de um Sensor de Fluxo de Calor	7
2. Princípio de Construção do Sensor de Fluxo de Calor Tipo 1, Utilizado por Degenne e Klarsfeld, com Orifícios e Camadas Metalizadas: 1 = Cobre; 2 = Níquel ...	8
3. Princípio de Funcionamento do Sensor de Fluxo de Calor de Junções Coplanares	10
4. Propagação do Fluxo de Calor em um Sensor de Junções Coplanares, no qual as Junções Quentes e Frias Estão em um Mesmo Plano Não-isotérmico	10
5. Princípio de Construção do Sensor de Fluxo de Calor Tipo 2, Utilizado por Degenne e Klarsfeld: 1 = Cobre; 2 = Constantan	11

6. Sistema de Calibração que Utiliza o Método da Placa Quente Protegida	13
7. Sistema de Calibração que Utiliza o Método da Radiação Cercada	15
8. Esquema da Montagem de Calibração Sugerida por Tretlowen, Método da Folha Aquecida	17
9. Esquema do Aparato de Calibração Sugerido por Bligh e Apthorp	18
10. Isotermas e Linhas de Igual Fluxo de Calor para $K_s/K_m = \infty$ (a) e $K_s/K_m = 0$ (b)	24
11. Razão de Resposta do Fluxo de Calor, Q_s/Q_m , em Função da Razão da Condutividade, K_s/K_m , para Alguns Valores do Parâmetro Geométrico, G	24
12. Detalhe dos Fluxímetros Construídos	26
13. Esquema da Montagem de Eletrodeposição dos Fluxímetros Utilizada para a Obtenção da Termopilha	29
14. Esquema da Bancada de Medida de Condutividade Térmica Automatizada	38
15. Esquema da Montagem de Calibração da Sonda Miniatura Usada para Medir Condutividade Térmica	41
16. Curva de Calibração do Fluxímetro	43
17. Curva de Obtenção do Tempo de Resposta do Fluxímetro	45

18. Valores dos Fluxos de Calor Sensível (H) e Calor Latente (LE) para o Ar, do Fluxo de Calor no Solo (Q), Medido com o Fluxímetro, da Radiação Líquida (R_n), do Balanço de Energia ($Q - H - LE$), e do Resíduo = $R_n - (Q - H - LE)$, Medidos ao Longo do Dia 16 de Março de 1991 48
19. Condutividade Térmica de um Solo Franco Arenoso, em Função de Sua Umidade 51

LISTA DE QUADROS

Página

1. Condutividade Térmica (k), Razão das Condutividades (K_s/K_m) e Razão da Resposta do Fluxo de Calor (Q_s/Q_m) para Alguns Materiais e um Sensor de Fluxo de Calor Típico Disponível Comercialmente	23
2. Solubilidade do Sulfato de Cobre em Ácido Sulfúrico .	31
3. Valores Obtidos para a Constante de Calibração da Sonda Miniatura, Usada nas Medidas de Condutividade Térmica, em Função da Temperatura	49
4. Valores da Condutividade Térmica de Alguns Tipos de Solo Secos, Determinados com o Método da Sonda Miniatura	50
5. Valores da Condutividade Térmica de um Solo Franco Arenoso em Função de Sua Umidade	52

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área (m^2);
b	- Inclinação da reta "temperatura em função do $\ln(\text{tempo})$ ";
C	- Constante de calibração de um fluxímetro [$\mu V / (W \cdot m^{-2})$];
cp	- Calor específico à pressão constante ($J \cdot kg^{-1} K^{-1}$);
d	- Espessura (m);
G	- Parâmetro geométrico;
H	- Fluxo vertical turbulento de calor sensível (W / m^2);
i	- Corrente elétrica (A);
k	- Condutividade térmica do meio ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$);
km	- Condutividade térmica do meio ao redor do sensor ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$);
ks	- Condutividade térmica do sensor ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$);
kt	- Condutividade térmica da glicerina ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$);

L	- Comprimento (m);
L_v	- Calor latente de evaporação (J / Kg);
m	- Massa (kg);
q	- Potência dissipada por unidade de comprimento (W/m);
Q	- Fluxo de calor (W / m^2);
Q_s	- Fluxo de calor através do sensor (W / m^2);
Q_m	- Fluxo de calor através do meio, ao redor do sensor (W / m^2);
r, R	- Raio (m);
R_n	- Irradiância líquida (W / m^2);
T	- Temperatura (K);
T_m	- Temperatura da glicerina ($^{\circ}C$);
t	- Tempo (s);
v	- Força termoeletromotiva (V);
V	- Volume (m^3);
z	- Equivalente eletroquímico do cobre (Kg / C);
Z	- Coordenada vertical (m);
$\partial T / \partial Z$	- Gradiente vertical de temperatura (K / m);
ΔT	- Diferença de temperatura (K);
ρ_c	- Massa específica do Cobre (Kg / m^3);
ρ_a	- Massa específica do ar (Kg / m^3);
σ	- Poder termoelétrico de uma termopilha (K / V);
$(\overline{Q'w'})$	- Covariância entre a densidade do vapor de água e a velocidade vertical ($kg\ m^{-2}s^{-1}$); e
$(\overline{\theta'w'})$	- Covariância entre a temperatura e a velocidade vertical ($K\ m\ s^{-1}$).

EXTRATO

NUNES, Edson Luís, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1993. Desenvolvimento e Avaliação de Fluxímetros Termoelétricos para Medidas de Fluxo de Calor. Professor Orientador: Evandro Ferreira Passos. Professores Conselheiros: Adil Rainier Alves e Hélio Alves Vieira.

O presente trabalho, realizado no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da UFV, consistiu no desenvolvimento de fluxímetros termoelétricos de boa precisão e baixo custo. Os fluxímetros desenvolvidos, que têm como sensores termopilhas obtidas por eletrodeposição, foram calibrados, usando-se uma metodologia de calibração simples e eficiente. Foram determinados também os tempos de resposta dos mesmos. Os fluxímetros foram testados, em campo, no experimento micrometeorológico realizado no Centro Experimental Aramar (CEA), em Iperó, SP, de 11 a 22 de março de 1991, coordenado

pelo Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da USP.

Foram feitas medidas de condutividade térmica para diversos tipos de solo, inclusive em função do seu teor de umidade, com a finalidade de se poder quantificar as perturbações ocasionadas pela diferença de condutividade térmica do sensor e do meio onde ele está inserido.

1. INTRODUÇÃO

A temperatura do solo é importante para a agricultura, em virtude de sua influência na germinação de sementes e no crescimento das culturas. As variações nas temperaturas do solo são controladas pela taxa com que a energia é trocada na superfície do solo - fluxo de calor no solo. Em hidrologia, o conhecimento do fluxo de calor no solo é necessário quando o balanço de energia da superfície é usado na estimativa das taxas de evaporação (OLIVER et alli, 1987).

RAO e VIANELLO (1977) destacam a importância dos estudos sobre temperatura e fluxo de calor no solo, citando uma recomendação da ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA, sob o título "MEDIDAS DAS TEMPERATURAS DA TERRA" (EARTH TEMPERATURE MEASUREMENTS), a qual recomenda que os membros (países) providenciem para que se façam estudos das medidas de radiação, de temperatura da superfície da terra e de fluxos de calor no solo.

Os estudos, em meso e microescala, sobre a influência do fluxo de calor no solo em alguns fenômenos meteorológicos direcionam-se basicamente para as modificações sofridas pelas massas de ar em contato com a superfície, o desenvolvimento dos sistemas frontais, os efeitos sobre a ocorrência de geadas e orvalho, a partição de energia no sistema solo-atmosfera e para a previsão de temperaturas máximas e mínimas (CARSON e MOSES, 1963).

Conforme SANDANIELLO (1983) e SELLERS (1965), em estudos teóricos sobre o comportamento do fluxo de calor no solo, é costume formular algumas hipóteses simplificadoras, tais como considerar o solo como meio homogêneo e isotrópico, sem fontes e sumidouros de calor. Com essas condições, e considerando apenas a direção vertical (coordenada Z), pode-se obter a quantidade de calor que flui por unidade de área e por unidade de tempo em um regime estacionário, como função da diferença de temperatura, isto é:

$$Q = -k \frac{\partial T}{\partial Z}, \quad (1)$$

em que Q é a densidade de fluxo de calor (W/m^2),

k é a condutividade térmica do meio ($W m^{-1} K^{-1}$), e

$\partial T / \partial Z$ é o gradiente vertical de temperatura (K/m).

O sinal negativo na expressão mostra que o fluxo de calor se dá no sentido contrário ao do gradiente de temperatura.

Como, na realidade, segundo VIANELLO et alii (1977), o solo não é um meio homogêneo, a equação 1 só pode ser aplicada

a um solo se as variações locais, causadas pela estrutura granular do solo e de outras heterogeneidades, forem desprezadas. Conseqüentemente, Q representa um valor médio, englobando todas as irregularidades locais; T , a temperatura média de um plano horizontal a uma profundidade Z ; e k a condutividade térmica média, incluindo a influência de grânulos, pequenas pedras, fissuras, raízes de plantas etc.

Se ao invés disso forem usados sensores termoelétricos, previamente calibrados em laboratório para a medida do fluxo de calor no solo, ter-se-á essa medida em função apenas da tensão gerada no sensor, em virtude da diferença de temperatura entre as junções termoelétricas, conhecendo-se, obviamente, a constante de calibração do sensor, que é uma característica de cada um deles.

Assim, este trabalho teve como objetivos:

- a) construir e caracterizar sensores de fluxo de calor termoelétricos.
- b) quantificar as perturbações ocasionadas pela diferença de condutividade térmica do sensor e do meio onde ele está inserido, visando aplicação em solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Segundo TRETHOWEN (1986), os sensores de fluxo de calor foram sugeridos por Houghten e Wood, em 1921, e têm sido usados desde 1924.

De acordo com ANDRETTA *et alli* (1981) e ORLANDI *et alli* (1985), pode-se verificar que:

- Os sensores de fluxo de calor operam com base no princípio de que uma diferença de temperatura (ΔT) entre as duas superfícies de uma placa fina gera um fluxo de calor através da mesma. O fluxo de calor, Q , através dessa placa fina, de espessura d , e condutividade térmica k , em regime estacionário, é dado pela equação 1, escrita na forma seguinte:

$$Q = - \frac{k}{d} \Delta T . \quad (2)$$

Conseqüentemente, se k e d são conhecidos, Q pode ser obtido pela medida de ΔT .

- Nos fluxímetros termoelétricos, a diferença de temperatura entre as duas superfícies da placa é medida por uma termopilha. A termopilha é um grande número de termopares conectados em série, posicionados entre as superfícies, de tal modo que as junções termoelétricas, quentes e frias, estejam em contato ou próximas a elas. Além disso, se a força termoeletromotiva da termopilha é v (Volts), gerada nas junções termoelétricas, em razão da diferença de temperatura entre as duas superfícies (efeito Seebeck), a equação 2 torna-se:

$$Q = - \frac{k}{d} \alpha v, \quad (3)$$

em que α (K/V) é a constante de proporcionalidade entre a diferença de temperatura (ΔT) e a força termoeletromotiva da termopilha (v). Logo, o fluxo de calor, passando através do sensor, será proporcional à tensão gerada na termopilha, isto é:

$$Q = C v, \quad (4)$$

em que C , constante de calibração em $\mu V/(Wm^{-2})$, é determinado pela calibração individual de cada sensor. Assim, o fluxo de calor a ser medido é obtido pela multiplicação do valor da tensão v por este fator C (VAN DER GRAAF, 1985).

2.1. Técnicas de Construção

TRETHOWEN (1986) informa ainda que, em 1962, De Jong e Marquenie descreveram a técnica de produzir termopilhas com muitas junções por eletrodeposição.

HEARD E WARD (1982) descrevem a construção de um sensor de fluxo de calor por eletrodeposição de cobre em um fio de constantan, usando uma placa de "perspex" de 3 mm de espessura, 40 mm de largura e 50 mm de comprimento. O fio de constantan, de 0,193 mm de diâmetro, foi enrolado na placa, perfazendo um total de 80 espiras. O fio e a placa foram desengordurados com um solvente, e, subseqüentemente, mascarados em ambos os lados, com verniz, para prevenir uma eletrodeposição não desejada, em virtude do movimento ascendente da solução metálica entre as espiras do fio pela ação da capilaridade (Figura 1). Quando a eletrodeposição terminou, o sensor de fluxo de calor foi então lavado, seco e protegido com uma camada de verniz.

DEGENNE e KLARSFELD (1985) descrevem a construção de dois tipos de sensores de fluxo de calor: o primeiro consistia de junções entre dois metais, formando os termoelementos em dois planos paralelos. Um certo número de orifícios, alinhados alternadamente com cobre e níquel, passa através de uma placa de epoxy, de 2,5 mm de espessura, sendo os metais que ligam os lados dos orifícios conectados com lâminas de cobre (de 5 por 10 mm), que funcionam como contato superficial. A Figura 2

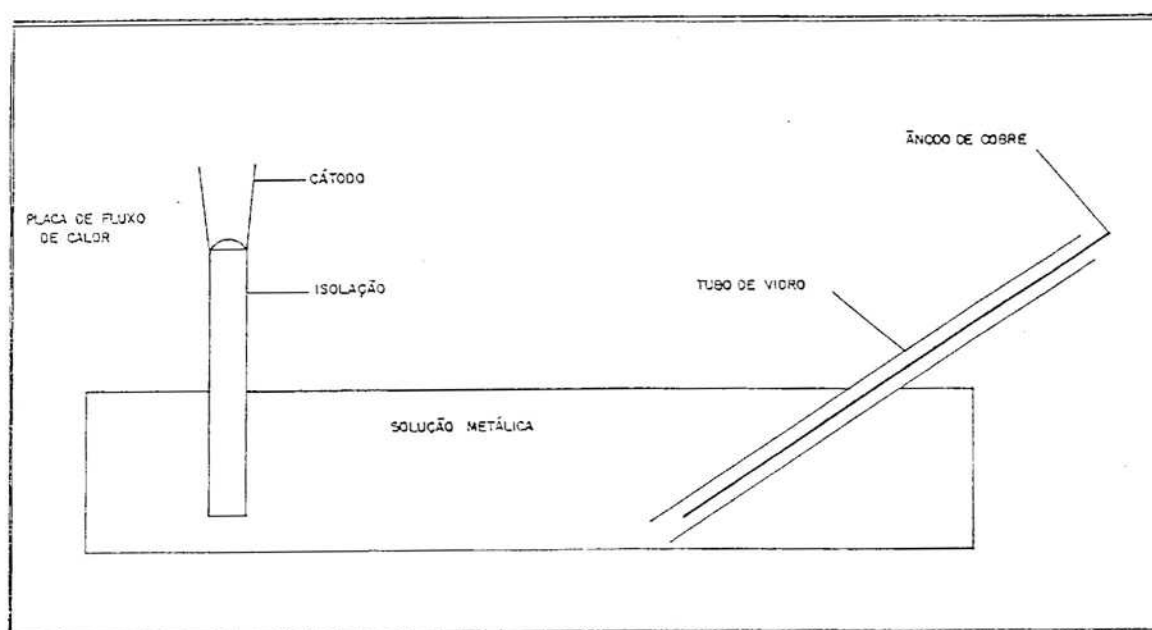
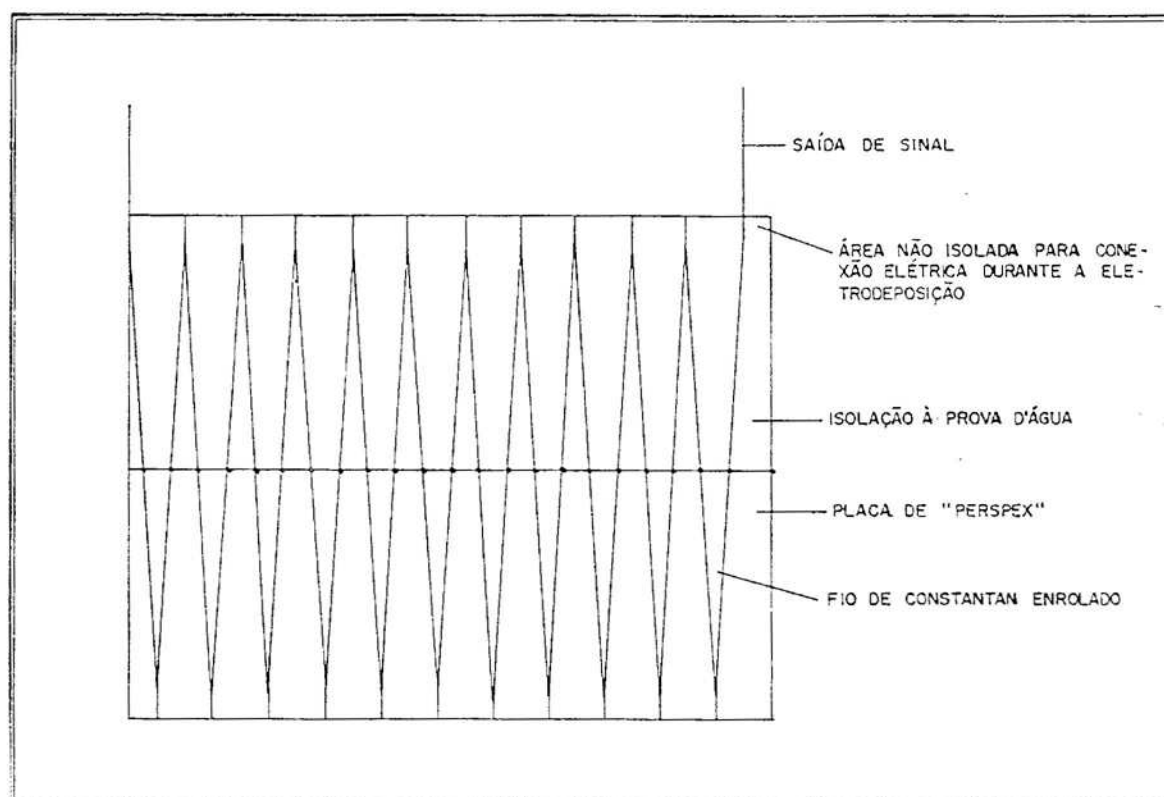


FIGURA 1 - Esquema da Montagem de Eletrodeposição Utilizado por Heard e Ward na Construção de um Sensor de Fluxo de Calor

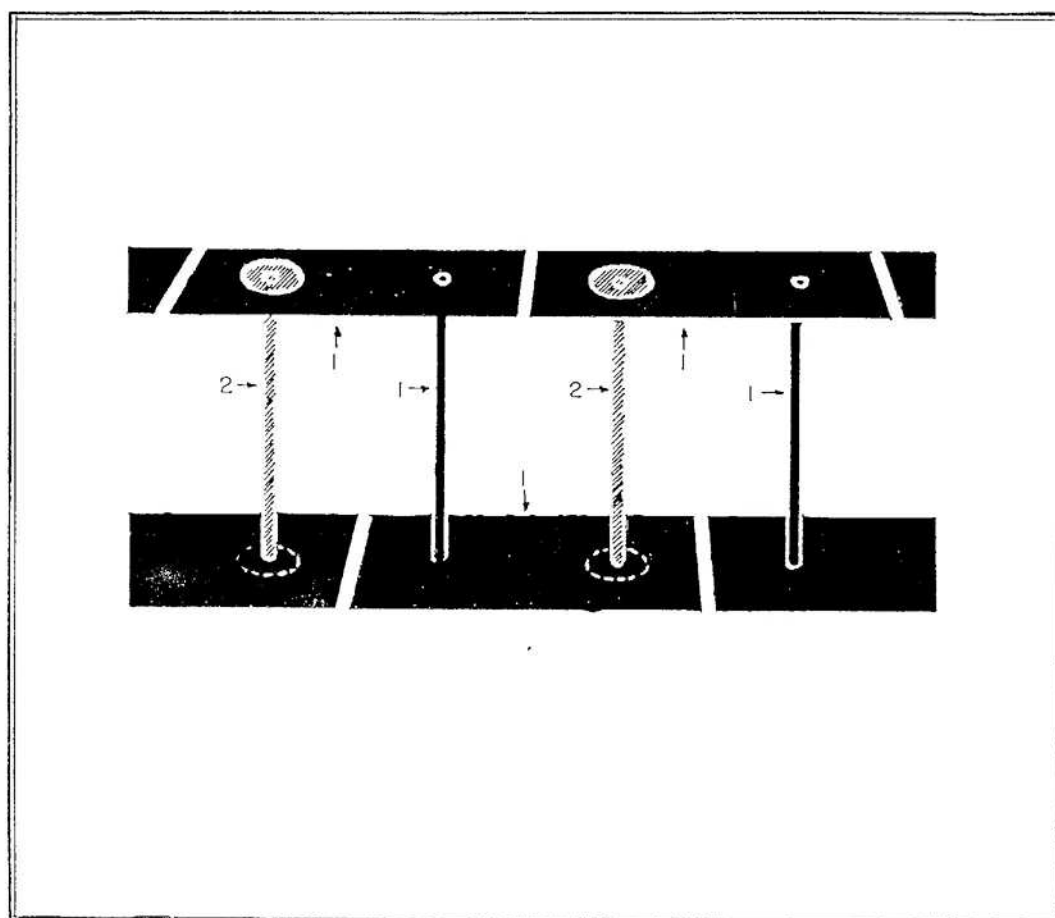


FIGURA 2 - Princípio de Construção do Sensor de Fluxo de Calor Tipo 1, Utilizado por Degenne e Klarsfeld, com Ori-fícios e Camadas Metalizadas: 1 = Cobre; 2 = Ní-quel

ilustra como as junções quentes e frias estão posicionadas em série. O método empregado elimina totalmente qualquer necessidade de fios de termopares e soldas. O circuito elétrico e as junções foram feitas sobrepondo, alternadamente, os dois metais (níquel e cobre) e fazendo uso da metalização e das técnicas de fotocorrosão. O segundo tipo de sensor, descrito por DEGENNE e KLARSFELD (1985), apresenta as suas junções quentes e frias num mesmo plano (Figura 3). Isto permitiu que se fizesse menor uso de materiais e técnicas de fotocorrosão que na configuração clássica das junções em dois planos.

Em uma configuração de junção coplanar, segundo DEGENNE e KLARSFELD (1985), o sensor de fluxo de calor só pode trabalhar se as junções estiverem a temperaturas diferentes (Figura 4). Isto é possível se for criada uma perturbação local do fluxo térmico, de forma que o plano das junções não esteja ao longo de uma isoterma. Uma perturbação semelhante pode ser obtida (DEGENNE e KLARSFELD) com placas de cobre arranjadas alternadamente em dois planos paralelos ao plano das junções, e fazendo parte do circuito por meio de placas de cobre furadas (Figura 5). As diferenças na condutividade entre os elementos constituintes de todo esse conjunto criam um gradiente de temperatura tangencial, como mostrado na Figura 4.

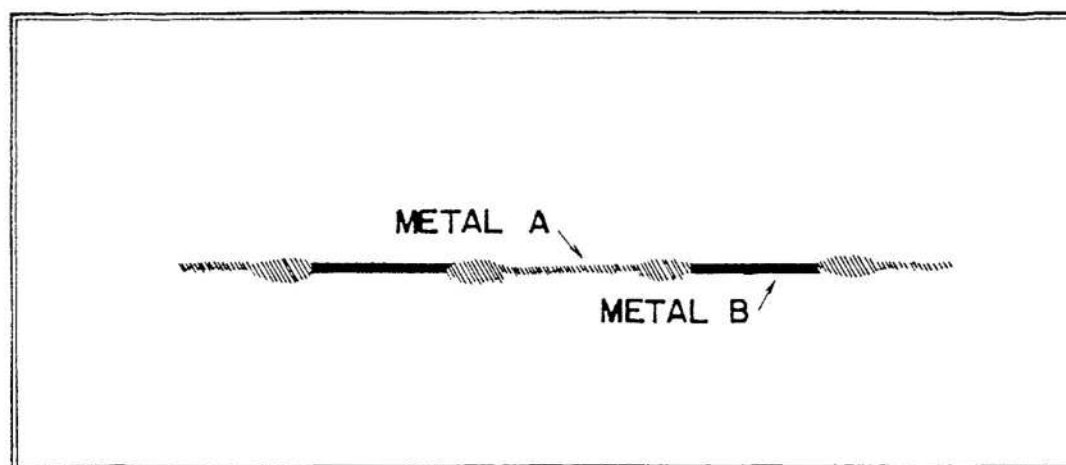


FIGURA 3 - Princípio de Funcionamento do Sensor de Fluxo de Calor de Junções Coplanares

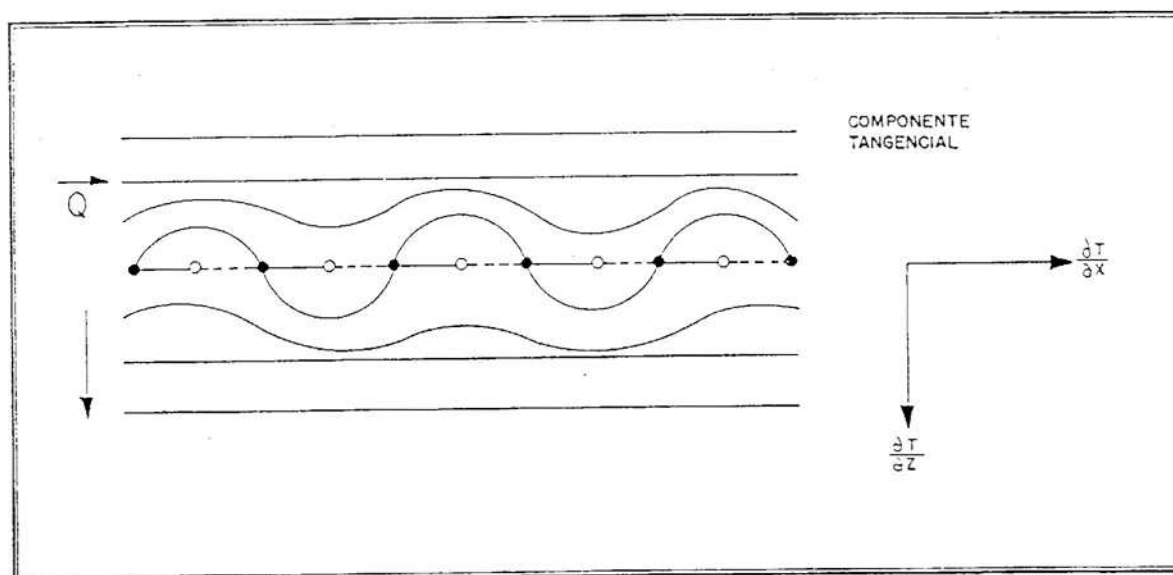


FIGURA 4 - Propagação do Fluxo de Calor em um Sensor de Junções Coplanares, no qual as Junções Quentes e Frias Estão em um Mesmo Plano Não-isotérmico

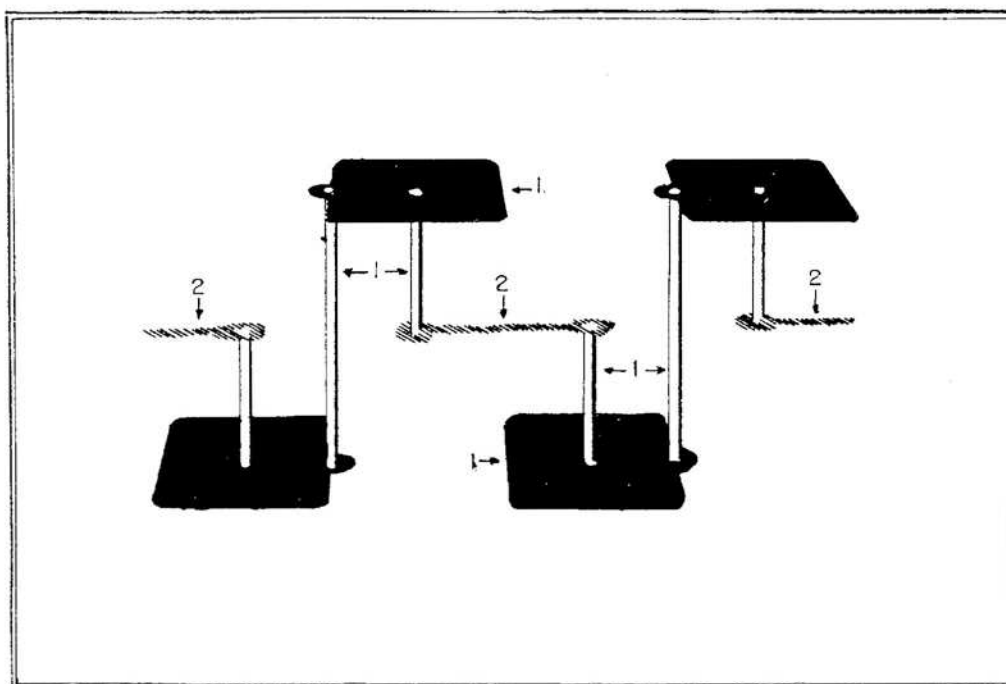


FIGURA 5 - Princípio de Construção do Sensor de Fluxo de Calor Tipo 2, Utilizado por Degenne e Klarsfeld; 1 = Cobre; 2 = Constantan

2.2. Calibração

BLIGH e APTHORP (1985) mencionam duas técnicas de calibração usadas correntemente pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), o método da placa quente protegida e o método da radiação cercada. Segundo eles, o método da placa quente protegida tem a vantagem de ser capaz de calibrar os sensores no nível de fluxo e de temperatura que eles experimentarão no campo, mas requer muita precisão e um equipamento de controle elétrico caro. No método da radiação cercada é usado um fluxo de calor que é cem ou mais vezes maior que o fluxo de calor observado no campo, requerendo, também, boa precisão e um equipamento de controle elétrico igualmente caro.

ANDRETTA et alii (1981) descrevem dois mecanismos de calibração, utilizando os métodos da placa quente protegida e da radiação cercada. O mecanismo que utiliza o método da placa quente protegida, Figura 6, é constituído de uma placa de cobre circular (diâmetro ≈ 22 cm) sobre a qual é instalado o sensor de fluxo de calor. O elemento aquecedor é constituído de um disco de metal fino (diâmetro ≈ 10 cm) com um resistor elétrico colado a ele. Uma quantidade conhecida de calor pode ser gerada eletricamente no elemento aquecedor pelo efeito Joule. A placa superior, com temperatura controlada, é ajustada de forma a ter a mesma temperatura que o elemento aquecedor; de modo que todo o calor gerado é forçado a passar

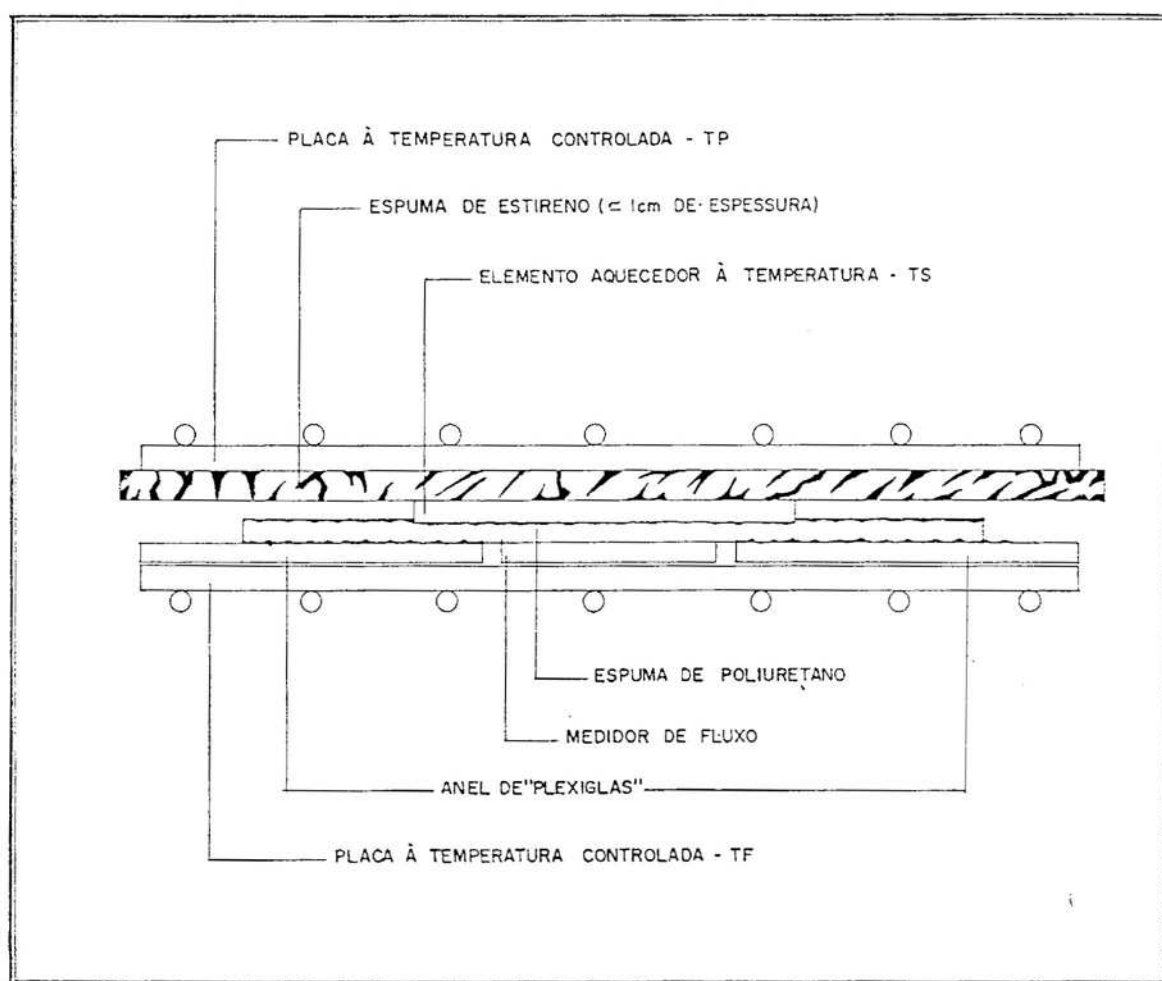


FIGURA 6 - Sistema de Calibração que Utiliza o Método da Placa Quente Protegida

através do sensor de fluxo de calor. Um anel de plexiglas, de 2mm de espessura, em torno do sensor de fluxo de calor, e uma espuma de poliuretano, de 2mm de espessura, sobre o mesmo, asseguram a uniformidade do fluxo de calor entre o elemento aquecedor e o sensor abaixo. Assim, a constante de calibração do sensor de fluxo de calor pode ser determinada a partir da medida da tensão de saída do sensor para diferentes valores do fluxo de calor.

No mecanismo que utiliza o método da radiação cercada, Figura 7, o fluxo de calor que passa através do sensor é o de calor trocado entre as duas superfícies horizontais. Quando a placa superior está quente, não há troca convectiva, e o fluxo de calor pode ser facilmente calculado, usando as conhecidas fórmulas para troca de calor por radiação e condução entre superfícies paralelas. Os efeitos de borda não devem influenciar se a camada de ar for suficientemente estreita. As superfícies da placa superior e do sensor de fluxo de calor são cobertas com uma camada cuja emissividade, no infravermelho termal, é conhecida.

De acordo com TRETHOWEN (1985), o método da placa quente protegida apresenta uma limitação prática. Uma calibração acurada requer que o sensor tenha a mesma dimensão que a placa quente ou que se acople a suas bordas um material com a mesma condutividade térmica, de modo a igualar a dimensão do sensor com a dimensão da placa quente. Isto pode não ser sempre possível.

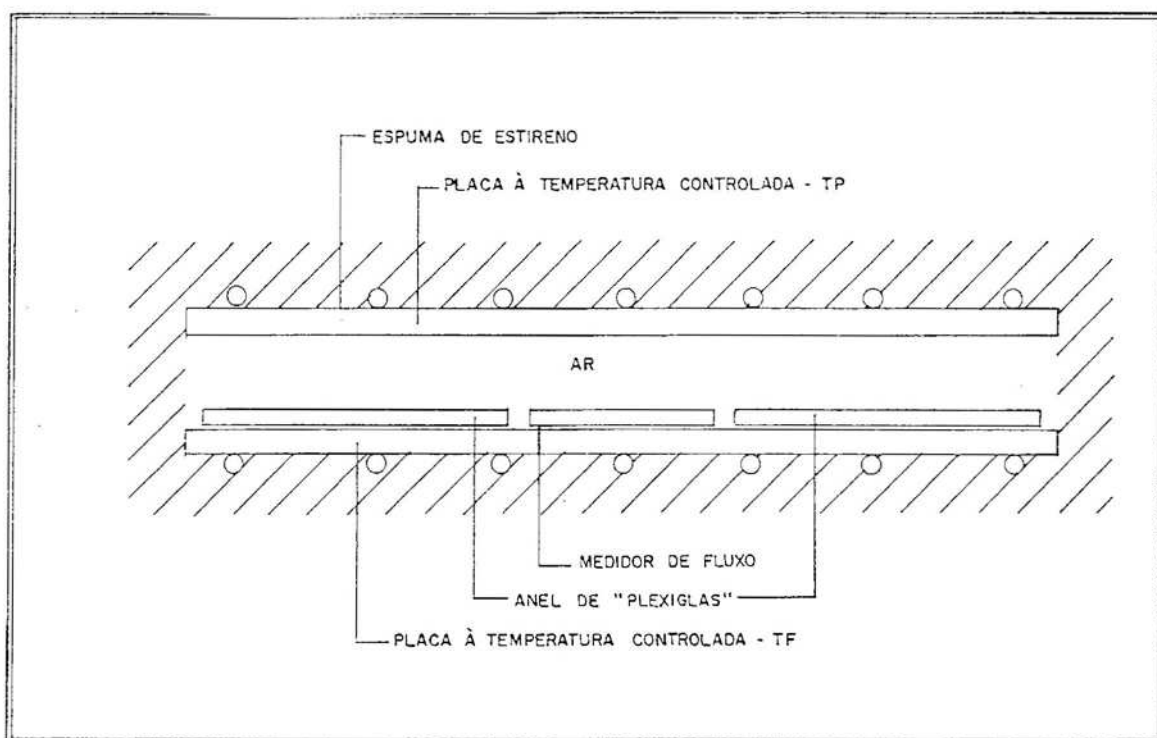


FIGURA 7 - Sistema de Calibração que Utiliza o Método de Radiação Cercada

TRETHOWEN (1985) propõe um procedimento de calibração ilustrado na Figura 8, chamado de método da "folha aquecida". Um par de sensores de fluxo de calor é acoplado a uma folha aquecida. Este método tem várias vantagens e pode ser considerado um candidato ao método padrão para sensores de fluxo de calor montados em uma superfície, por causa dos seguintes fatores:

1. fornece sensibilidade intrínseca e tempo de resposta constante.
2. é relativamente rápido.
3. pode ser usado facilmente, independente da dimensão do sensor e das propriedades internas.
4. usa equipamentos simples e não requer instalações especiais (a não ser medidas de tensão bem precisas).
5. facilita obtenção dos dados e os resultados são consistentes.

Uma desvantagem é que um único sensor não pode ser calibrado por este método.

BLIGH e APTHORP (1985) apresentam um novo aparato de calibração usado pelo Massachusetts Institute of Technology (Figura 9). Este aparato gera um fluxo de calor unidimensional mensurável pela manutenção de um estado de diferença de temperatura através de uma resistência térmica fixa. A diferença de temperatura é produzida por dois reservatórios de temperaturas constantes: um com cera de n-octadecano solidificando ($28,2^{\circ}\text{C}$), e outro com água e gelo fundente (0°C). Estes reservatórios contam com o fato de que uma substância pura mu-

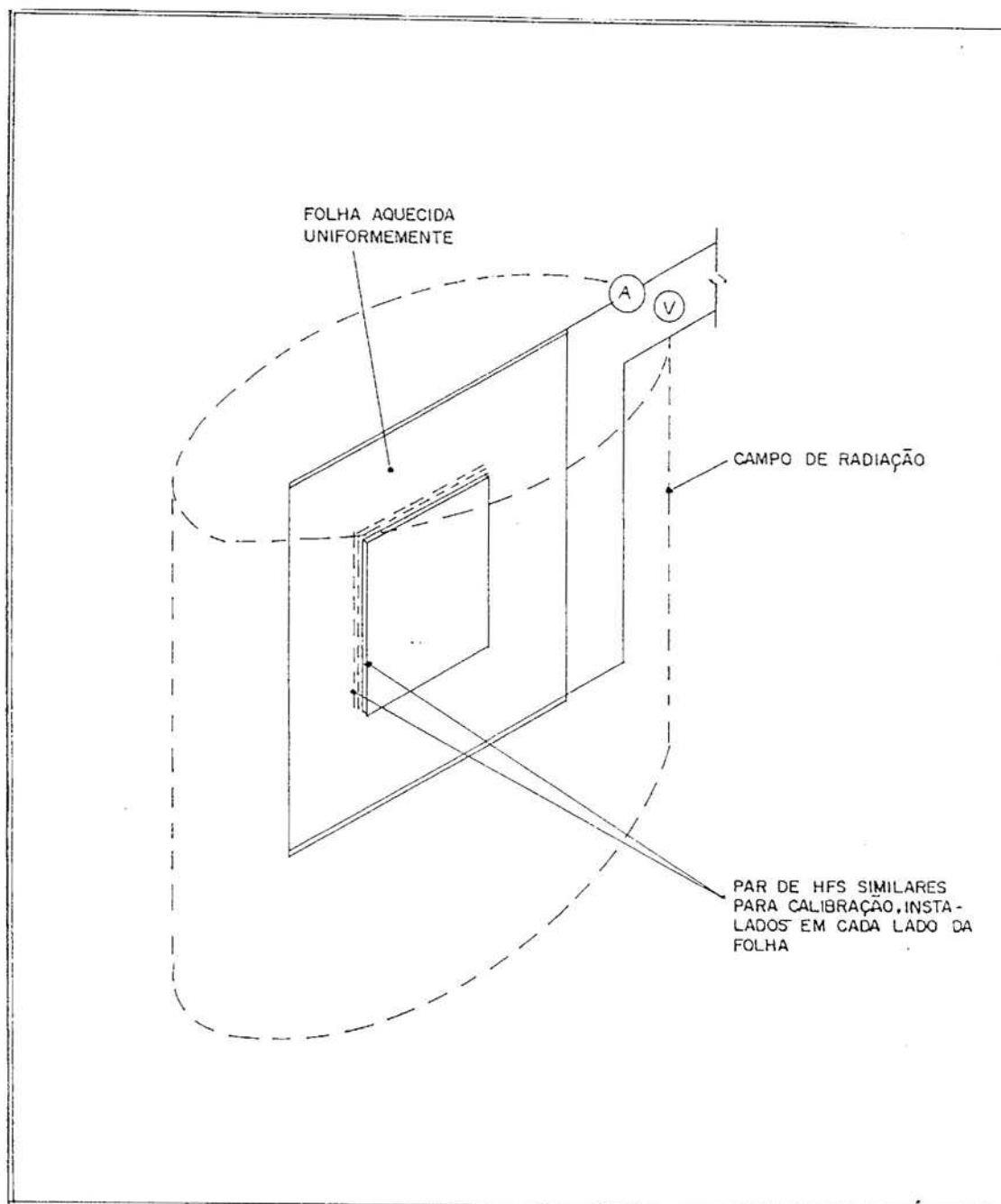


FIGURA 8 - Esquema da Montagem de Calibração Sugerida por Tretlowen, Método da Folha Aquecida

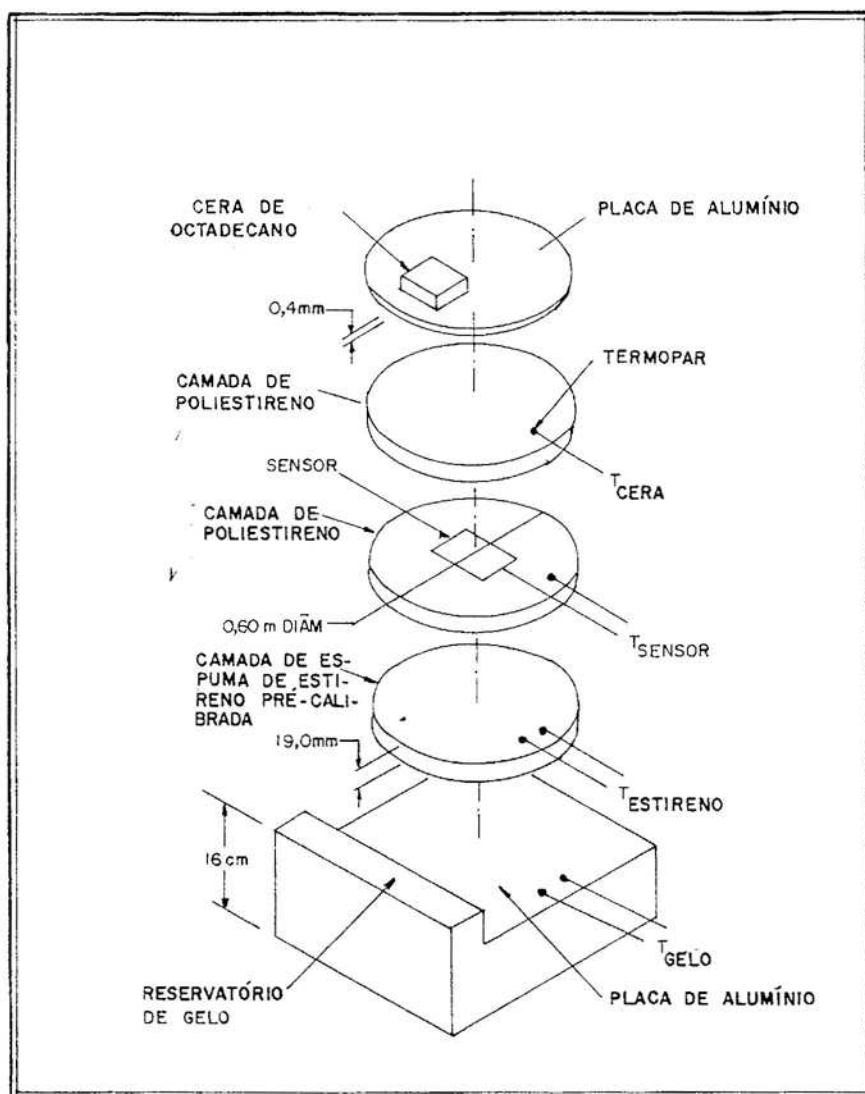


FIGURA 9 - Esquema do Aparato de Calibração Sugerido por Bligh e Apthorp

da de fase a uma temperatura constante, de modo que a temperatura de cada reservatório é termodinamicamente definida, sem requerer qualquer aparato de controle. Este método de produzir uma temperatura constante é bem simples que usar qualquer forma de aquecedor elétrico controlado.

A resistência térmica é feita com duas camadas espessas de poliestireno e uma de espuma de estireno pré-calibrada. O sensor é montado em um entalhe feito em uma das camadas de poliestireno, usando um filme de graxa térmica para reduzir a resistência de contato térmico entre ele e o poliestireno. Essa resistência de contato, que é crítica em outros tipos de aparatos de calibração, não é importante aqui pelo fato de ser muito grande a resistência térmica do poliestireno, podendo a resistência de contato ser desprezada. O fluxo de calor é calculado pela medida da queda de temperatura através da camada de espuma de estireno pré-calibrada.

2.3. Distorção do Fluxo

Em virtude da diferença entre a condutividade térmica dos sensores de fluxo de calor e o meio ao redor, há uma significativa distorção entre o fluxo através do sensor e o fluxo através do meio ao redor do sensor. Para calcular a razão entre o fluxo no sensor e o fluxo não perturbado, é necessário conhecer a razão entre a condutividade do material

e a condutividade do sensor, a geometria do sensor e de seu arredor, e se o sensor tem ou não revestimento de placas metálicas. Esses são dados facilmente obtidos, com exceção da condutividade térmica do sensor. Alguns fabricantes de sensores de fluxo de calor não publicam a condutividade dos seus sensores, e há evidência de que ela varia de sensor para sensor (FLANDERS, 1985a).

É importante conhecer a condutividade térmica média de um sensor, especialmente porque há a possibilidade de que a condutividade possa diferir muito de sensor para sensor (BLIGH e APTHORP, 1985). O único mecanismo para a medição de condutividade de sensores mencionado na literatura é o de Schwerdtfeger. Ele gerou uma diferença de temperatura uniforme através de um sensor pré-calibrado colocado entre dois recipientes contendo água com diferentes temperaturas, de modo que cada superfície do sensor estivesse em contato turbulento com a água. A diferença de temperatura através do sensor é medida por termopares fixados em cada superfície do sensor, e o fluxo de calor através do sensor é calculado pela tensão de saída, conforme a equação 4. A condutividade do sensor é então obtida pela equação 2. Este é um bom método, pois supera o problema da resistência de contato entre o sensor e o meio ambiente ao seu redor, primeiro, por maximizar o coeficiente de transferência de calor entre a água e o sensor, assegurado pelo regime turbulento, e, segundo, pelo fato de os termopares estarem fixados diretamente em cada superfície do sensor. A desvantagem é que, para ser usado, o sensor deve estar previamente calibrado.

APTHORP e BLIGH (1985) observaram que, em um material uniforme ($k = \text{constante}$), um gradiente de temperatura uniforme produz um fluxo de calor uniforme. Se, no entanto, a condutividade térmica é diferente em alguma parte do espaço, o gradiente de temperatura uniforme não gerará um fluxo uniforme, mas o fluxo será maior nas áreas de maior condutividade; esse maior fluxo local alterará o gradiente de temperatura uniforme original, produzindo um padrão de temperatura deformado tridimensionalmente. Um exemplo disso é um material contendo um sensor de fluxo de calor. Se, por exemplo, o sensor tem uma condutividade térmica maior que a do meio em seu redor, então o fluxo de calor através do sensor será maior que o fluxo no material não perturbado, e esse alto fluxo alterará a temperatura local e os campos de fluxo de calor. Pelo contrário, se o sensor tem condutividade menor que a do meio em seu redor, o fluxo através do sensor será menor que o fluxo não perturbado; outra vez, portanto, esse menor fluxo alterará o campo de temperatura local. A maior parte dos sensores são placas finas quadradas ou retangulares com bordas agudas e que, portanto, produzem campos de fluxos distorcidos localmente, por causa da súbita mudança na condutividade térmica em torno das laterais do sensor.

De acordo com FLANDERS (1985b), Schwerdtfeger determinou a razão entre o fluxo de calor através do sensor e o fluxo de calor do meio ao redor como uma função da razão entre as duas condutividades (k_s/k_m):

$$Q_s/Q_m = \frac{k_s/k_m}{1 + G (k_s/k_m - 1)} \quad (5)$$

em que $0 < G < 1$ é o parâmetro geométrico que pode ser admitido como sendo igual a 0,83 para um sensor fino com sua área sensível afastada da borda. Q_s é o fluxo de calor através do sensor (W/m^2), Q_m é o fluxo de calor do meio ao redor (W/m^2), k_s é a condutividade térmica do sensor ($W m^{-1} K^{-1}$) e k_m é a condutividade térmica do meio ao redor do sensor ($W m^{-1} K^{-1}$).

APTHORP e BLIGH (1985) apresentam um quadro mostrando a condutividade térmica de alguns materiais, a razão das condutividades k_s/k_m para um sensor de condutividade térmica igual a $0,360 W m^{-1} K^{-1}$. A razão de resposta do fluxo de calor, Q_s/Q_m , foi inserida em tal tabela, de acordo com a equação 5, como se vê no Quadro 1.

FLANDERS (1985b) mostra as isothermas e as linhas de igual densidade de fluxo de calor simuladas para os casos em que o sensor está envolvido por um meio de condutividade homogênea, menor e maior que a condutividade do sensor (Figura 10). Mostra, também, um gráfico de Q_s/Q_m em função de k_s/k_m (equação 5), Figura 11, para vários valores do parâmetro geométrico, G .

QUADRO 1 - Condutividade Térmica (k), Razão das Condutividades (ks/km) e Razão da Resposta do Fluxo de Calor (Qs/Qm) para Alguns Materiais e um Sensor de Fluxo de Calor Típico Disponível Comercialmente

Materiais	$K(W\ m^{-1}K^{-1})$	ks/km	Q_s/Q_m (G = 0,83)
Alumínio	225,00	0,002	0,012
Aço	45,30	0,008	0,045
Concreto	1,82	0,198	0,592
Terra levemente umedecida	1,07	0,336	0,749
Vidro	1,02	0,353	0,762
Areia seca	0,325	1,108	1,017
Solo seco	0,130	2,769	1,122
Madeira	0,121	2,975	1,127
Placa de gesso	0,107	3,364	1,136
Papelão	0,064	5,625	1,162
Lã de vidro	0,038	9,474	1,179
Poliestireno	0,036	10,000	1,181

ks/km é a razão das condutividades para um sensor típico disponível comercialmente ($ks = 0,360\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$).

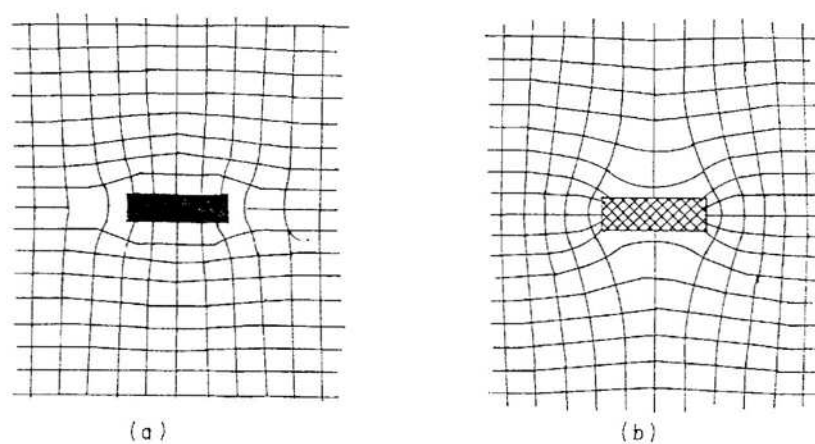


FIGURA 10 - Isotermas e Linhas de Igual Fluxo de Calor para $K_s/K_m = 1.0$ (a) e $K_s/K_m = 0$ (b)

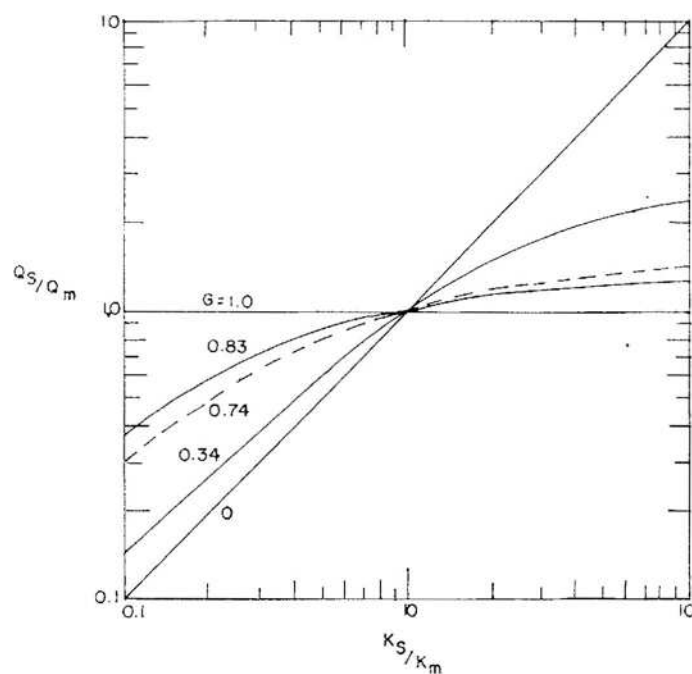


FIGURA 11 - Razão de Resposta do Fluxo de Calor, Q_s/Q_m , em Função da Razão da Condutividade, K_s/K_m , para Alguns Valores do Parâmetro Geométrico, G

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Construção dos Fluxímetros

Foram construídos sensores de fluxo de calor, utilizando-se termopilhas de cobre-constantan obtidas por eletrodeposição. Os sensores foram concebidos para operar na posição horizontal, perpendicularmente ao fluxo de calor (Figura 12). As junções termoelétricas, quentes e frias, foram posicionadas nas faces opostas do sensor de fluxo de calor.

Os sensores de fluxo de calor foram compostos essencialmente de duas partes: uma base eletricamente isolante e um conjunto de termopares associados em série. Como base isolante foi usada uma placa de fenolite de 7,00 cm de comprimento, 3,10 cm de largura e 0,08 cm de espessura. Para



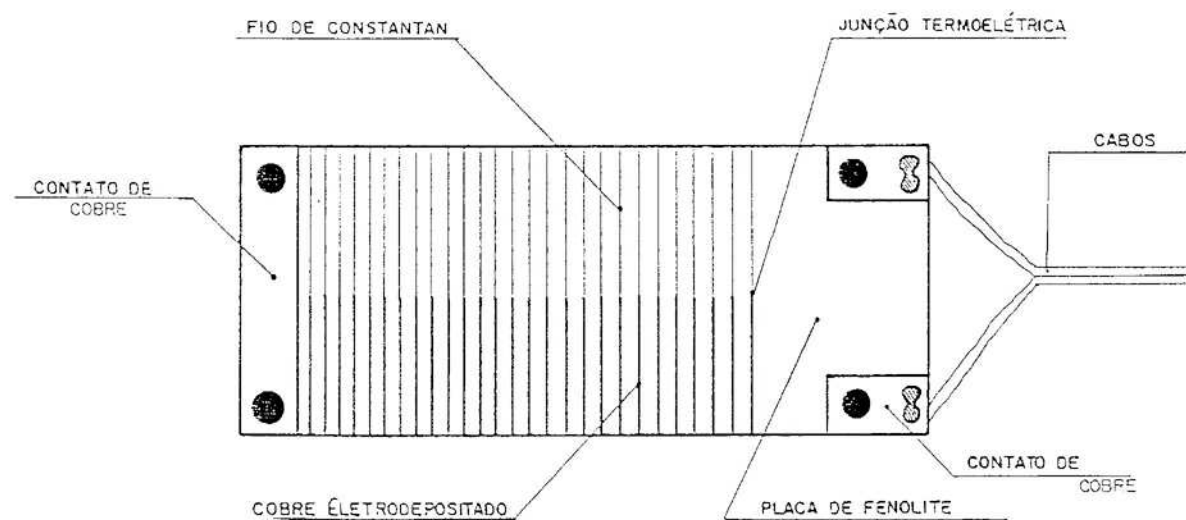


FIGURA 12 - Detalhe dos Fluxímetros Construídos

se obter o conjunto de termopares, 50 voltas de um fio de constantan de 0,005 cm de diâmetro foram dadas na base isolante (um maior número de voltas implica maior resposta do dispositivo, mas na prática há uma limitação, em virtude da dificuldade de diminuir a distância entre as voltas e evitar um contato elétrico). Este conjunto passou por um processo de eletrodeposição (eletrólise) em uma solução de sulfato de cobre e ácido sulfúrico, após passar por um processo de limpeza mecânica e de desengorduramento.

3.1.1. Limpeza do Fio de Constantan e do Conjunto Base Isolante/Fio

O fio de constantan passou por um processo de limpeza mecânica e de desengorduramento antes de ter sido instalado na base isolante.

A limpeza mecânica consistiu no uso de uma esponja de aço embebida com redutor Thinner, para facilitar a remoção da camada protetora de verniz do fio de constantan utilizado.

Usou-se álcool isopropílico e tetracloreto de carbono no processo de desengorduramento ou limpeza fina. Esse processo foi realizado manualmente com uma esponja de algodão embebida nos respectivos produtos.

O fio de constantan, após ter passado pelo processo de limpeza mecânica e de desengorduramento, foi instalado na

placa isolante, perfazendo um total de 50 espiras. Foram coladas, com Araldite secagem rápida, na placa isolante finas lâminas de cobre que tinham como finalidade servir de contato elétrico para o fio de constantan. Esse conjunto (base isolante/fio de constantan) também passou pelo processo de limpeza fina ou desengorduramento.

3.1.2. Processo de eletrodeposição

O conjunto (base isolante/fio de constantan), utilizado para confeccionar os fluxímetros, foi isolado com uma camada de verniz na parte onde não se desejava que houvesse eletrodeposição de cobre, ou seja, na metade de cada espira, em ambas as faces do sensor.

O esquema de eletrodeposição está detalhado na Figura 13.

3.1.2.1. Solução Eletrolítica

Os eletrólitos ácidos de cobre têm uma composição muito simples. Constam, via de regra, de sulfato de cobre, ácido sulfúrico e um ou mais aditivos.

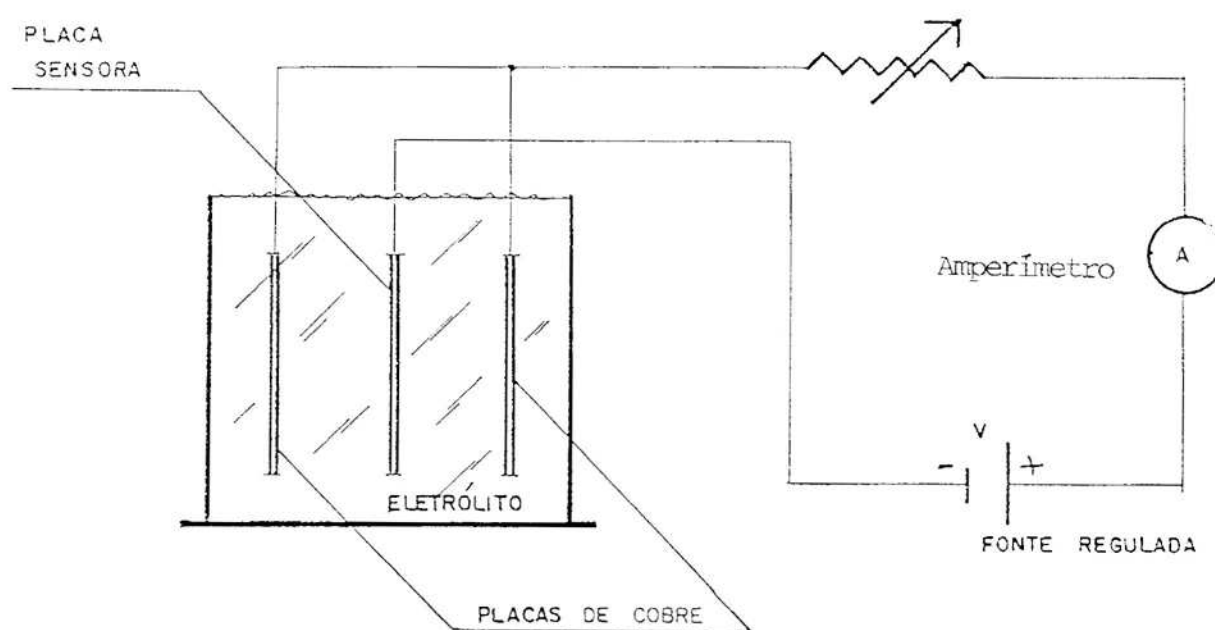


FIGURA 13 - Esquema da Montagem de Eletrodeposição dos Fluxímetros Utilizada para a Obtenção da Termopilha

A solução eletrolítica usada no processo de eletrodeposição foi obtida com base nas recomendações de VERLAG (1970). Essa solução era composta de CuSO_4 - 250 g/l, H_2SO_4 / 96% - 100 g/l e Tiouréia - 1 g/l.

A tiouréia, bem como os demais aditivos orgânicos, apresenta uma grande influência sobre as propriedades mecânicas das camadas de cobre. Com um teor de 0,025 g/l de tiouréia no eletrólito, há um aumento de dureza no cobre de 25% e, com um teor de 0,4 g/l, de 70% (VERLAG, 1973).

O sulfato de cobre é o fornecedor dos íons de cobre II (Cu^{2+}), porém as camadas de cobre obtidas somente com o sulfato de cobre contêm sais básicos. Assim, obtém-se, no cátodo, óxido de cobre I, havendo, pois, um decréscimo no rendimento do cobre metálico. Para obter camadas de cobre aceitáveis e melhorar também a condutividade, foi necessário adicionar ácido sulfúrico ao eletrólito.

A solubilidade do sulfato de cobre diminui com o aumento da concentração de ácido sulfúrico, de acordo com o Quadro 2, VERLAG (1973).

QUADRO 2 - Solubilidade do Sulfato de Cobre em Ácido Sulfúrico

Ácido Sulfúrico g/l	Solubilidade do Sulfato de Cobre g/l
0,0	352
24,5	326
49,0	304
72,5	285
98,1	267
122,6	250

Obviamente, deve-se manter o teor salino abaixo do limite de solubilidade, em banhos galvânicos, a fim de evitar a cristalização de sais no ânodo. Razão pela qual foi utilizada uma concentração de 250 g/l de sulfato de cobre.

O aumento da concentração de ácido sulfúrico tem maior influência sobre a capacidade condutora do eletrólito que as alterações do teor de cobre. Assim, por exemplo, aumentando-se a concentração de ácido sulfúrico de 50 para 100 g/l, tem-se uma duplicação da condutividade elétrica. O aumento do teor de ácido sulfúrico age também sobre o refinamento dos cristais, diminuindo-os, enquanto o teor de cobre do eletrólito é de pouca importância para o tamanho dos cristais (VERLAG, 1973).

A temperatura também tem influência sobre o tamanho do cristal, e pode-se afirmar que um abaixamento de temperatura provoca uma diminuição dos cristais. Por este motivo, mantém-se a temperatura inferior a 200 °C nos eletrólitos de sulfato de cobre. Sabendo que a tiouréia se decompõe acima de 50 °C em ácido sulfídrico, gás carbônico e amoníaco, é necessário manter os banhos eletrolíticos de cobre, que contêm tiouréia ou seus derivados, à temperatura ambiente (VERLAG, 1973).

3.1.2.2. Densidade de Corrente Usada

Após alguns testes de laboratório, verificou-se que a densidade de corrente de 1 A/dm² mostrou-se adequada para a solução eletrolítica usada, resultando na formação de camadas de cobre homogêneas e de pequena granulometria.

3.1.2.3. Tempo de Eletrodeposição

O tempo de eletrodeposição para cada fluxímetro foi calculado conforme lei de Faraday, segundo a equação:

$$t = m / (z i) \quad (6)$$

em que t é o tempo em segundos, m é a massa (kg) de cobre a ser eletrodepositada, i é a corrente em Amperes, e Z é o equivalente eletroquímico do cobre ($32,94 \times 10^{-8}$ Kg/C).

A massa de cobre a ser eletrodepositada foi calculada pela equação seguinte:

$$m = \rho_c V, \quad (7)$$

em que ρ_c é a massa específica do cobre ($8,89 \times 10^3$ Kg/m³) e V o volume (m³) de cobre a ser eletrodepositado, calculado como:

$$V = L A, \quad (8)$$

sendo L o comprimento (m) do fio a sofrer eletrodeposição e A a área (m²) da seção transversal deste fio.

É recomendável, MARUR (1982), que o raio do fio de constantan juntamente com o cobre eletrodepositado (R), seja o dobro do raio do fio de constantan (r). Logo, a área da seção transversal do cobre eletrodepositado pode ser calculada como:

$$A = \pi (R^2 - r^2). \quad (9)$$

A corrente elétrica i depende da área da superfície a ser eletrodepositada e da densidade de corrente elétrica com a qual se vai trabalhar.

3.1.3. Proteção dos Fluxímetros

Após terminada a eletrodeposição, os fluxímetros foram limpos com água deionizada, e, depois de secos, foi dada uma camada de verniz para completar a proteção na parte sensora.

3.2. Condutividade Térmica dos Fluxímetros

Como a placa de fenolite (resina fenólica reforçada com papel) foi o material predominante na construção dos fluxímetros, considerou-se que a condutividade térmica dos mesmos tivesse valor similar ao da placa de fenolite.

O valor da condutividade térmica da placa de fenolite foi obtido através da National Electrical Manufacturers Association Standards Publication / n.º LI 1 - 1971 (R1976), como sendo $k = 0,293 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

3.3. Calibração dos Fluxímetros

Os fluxímetros foram calibrados contra uma placa de fluxo fabricada pela "Radiation and Energy Balance Systems,

Inc." (REBS) modelo HFT-1, projetado para medidas de fluxo de calor em solos.

A montagem de calibração consistiu de um recipiente com terra, onde um protótipo de fluxímetro foi colocado próximo da placa de fluxo da REBS, ambos a um centímetro de profundidade. A seguir, lâmpadas de tungstênio, dispostas acima do recipiente, foram acesas de forma a iluminar igualmente a superfície na região onde estavam instalados os sensores. Enquanto isto, os sinais provenientes dos sensores eram registrados automaticamente. Após desligadas as lâmpadas, registrou-se também a inversão do fluxo de calor.

3.4. Determinação do Tempo de Resposta dos Fluxímetros

O tempo de resposta é definido como o intervalo de tempo decorrido entre o instante do recebimento ou da retirada de um estímulo pelo sensor e o instante em que o equilíbrio é atingido pelo mesmo.

A constante de tempo de um sensor é o tempo decorrido até que o sensor atinja 63,2 % (ou $1/e$) do sinal de equilíbrio.

Os fluxímetros foram colocados sobre um recipiente com areia, com uma das faces em contato com a superfície da mesma. A outra face foi exposta a uma radiação proveniente de uma lâmpada incandescente de 300 W. Os sinais dos sensores, em

milivoltagem, foram registrados em função do tempo, pelo sistema de aquisição de dados até que se estabilizassem.

3.5. Medidas de Campo

Para verificar a resposta dos fluxímetros desenvolvidos em condições reais de campo, um dos fluxímetros foi testado no experimento micrometeorológico, realizado no Centro Experimental Aramar de 11 a 22/03/91, coordenado pelo Departamento de Meteorologia do Instituto Astronômico e Geofísico da USP.

Foram feitas medidas do fluxo de calor no solo com um dos fluxímetros construídos. Foram efetuadas também medidas de superfície através de uma torre micrometeorológica de 5 m de altura, equipada com um conjunto de sensores compostos de um anemômetro sônico; um termômetro de arame fino e um higrômetro de Krypton para medir, respectivamente, velocidade vertical do vento, temperatura e densidade do vapor de água com frequência de amostragem de até 10 Hz. Além destas medidas, foram feitas medidas de radiação solar, radiação líquida, umidade relativa do ar e pressão atmosférica (OLIVEIRA e SAKAI, 1991). A radiação líquida foi medida com um protótipo de radiômetro líquido, desenvolvido no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da UFV. Os dados foram coletados através de um sistema de aquisição de dados do tipo multiplexador e conversor analógico digital por seis dias

consecutivos, totalizando cerca de 90 Mb armazenados em disquetes, em uma forma compactada e em fita magnética.

3.6. Medidas da Condutividade Térmica de Solos

A condutividade térmica de algumas amostras de solo, inclusive em função do teor de umidade, foi obtida, utilizando-se um método de medida em regime transiente, o método da sonda miniatura. A sonda utilizada consistiu de uma agulha hipodérmica de 0,55 mm de diâmetro externo e 3,00 cm de comprimento, dentro da qual havia um termopar tipo T no ponto médio da agulha e um fio aquecedor de constantan de 0,08 mm de diâmetro (SWEAT, 1974 e 1976; PASSOS et alli, 1982 e 1985).

Para efetuar a medida da condutividade térmica, a sonda foi inserida na amostra e, uma vez em equilíbrio térmico, fez-se passar uma pequena corrente elétrica no fio aquecedor através do acionamento de um canal atuador (canal 0) do sistema de aquisição de dados que estava conectado em série com o fio aquecedor, uma fonte regulada de tensão e um resistor de constantan (1 Ohm). O circuito do termopar teve suas extremidades ligadas diretamente a um dos canais do sistema de aquisição de dados, Figura 14.

Um programa em turbo-pascal foi desenvolvido para automatizar a bancada de medida de condutividade térmica. Após a leitura da temperatura inicial da sonda, o canal 0 (atuador)

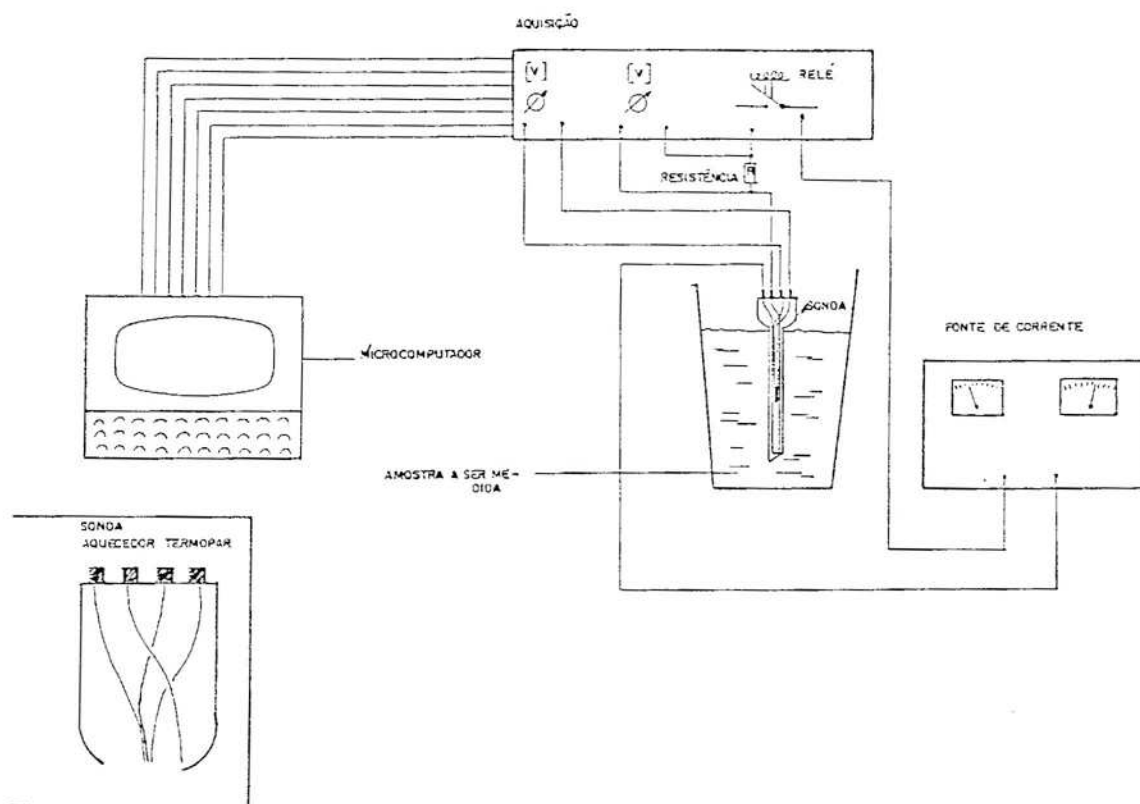


FIGURA 14 - Esquema da Bancada de Medida de Condutividade Térmica Automatizada

é fechado de forma a energizar a sonda, enquanto a temperatura é registrada em função do tempo. A seguir, a tensão nos terminais do resistor de constantan é registrada (a qual, dividida pela resistência de 1,0 Ohm, fornecerá a corrente e também a potência dissipada na sonda). O canal 0 (atuador) é então desligado e o programa passa ao cálculo da condutividade térmica.

A condutividade térmica foi obtida com base na equação seguinte, derivada a partir da equação de Fourier para uma fonte linear de calor num meio infinito:

$$k = q \frac{\ln(t_2/t_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)} \quad , \quad (10)$$

em que q (W/m) é a potência dissipada por unidade de comprimento da sonda, T_2 e T_1 são as temperaturas correspondentes aos tempos t_2 e t_1 , medidos a partir do instante em que a sonda é energizada. Denominando b a inclinação da reta "temperatura em função do $\ln(\text{tempo})$ ", a equação (10) fica:

$$k = \frac{q}{4 \pi b} \quad . \quad (11)$$

Uma vez calculados a condutividade térmica e o coeficiente de correlação r^2 da reta "temperatura em função do $\ln(\text{tempo})$ ", o programa aguarda um tempo, predeterminado pelo operador, para que a amostra retorne à sua temperatura inicial. A seguir o programa recomeça uma nova medida.

Considerando a dimensão finita da sonda e sua inércia térmica não desprezível, ela deve ser previamente calibrada

com materiais de condutividade térmica conhecida (PASSOS *et alii*, 1982 e 1985). Usualmente a glicerina é utilizada para esta finalidade.

A montagem utilizada para a calibração da sonda miniatura está mostrada na Figura 15. A condutividade térmica da glicerina foi calculada a partir da equação sugerida por STÖRI (1985):

$$k_t = 0,283 + (0,00014 T_m). \quad (12)$$

em que k_t é a condutividade térmica da glicerina em $W m^{-1} K^{-1}$ e T_m é a temperatura em $^{\circ}C$.

No estudo da condutividade térmica, em função do teor de umidade do solo, a amostra de solo foi colocada dentro de um recipiente cilíndrico com diâmetro 3,0 cm, cuja parede lateral foi feita em tela metálica fina, de forma a permitir a transferência de umidade. Após encharcada de água, a amostra foi pesada, medindo-se sua condutividade térmica (10 repetições) e, a seguir, a amostra foi deixada por alguns minutos numa estufa a $100^{\circ}C$. Logo após, a amostra foi retirada da estufa, permitindo que ela entrasse em equilíbrio térmico com o ambiente. Após nova pesagem, mediu-se novamente a condutividade térmica e assim sucessivamente, até que a amostra estivesse completamente seca. O teor de umidade do solo foi calculado pelo método da secagem em estufa.



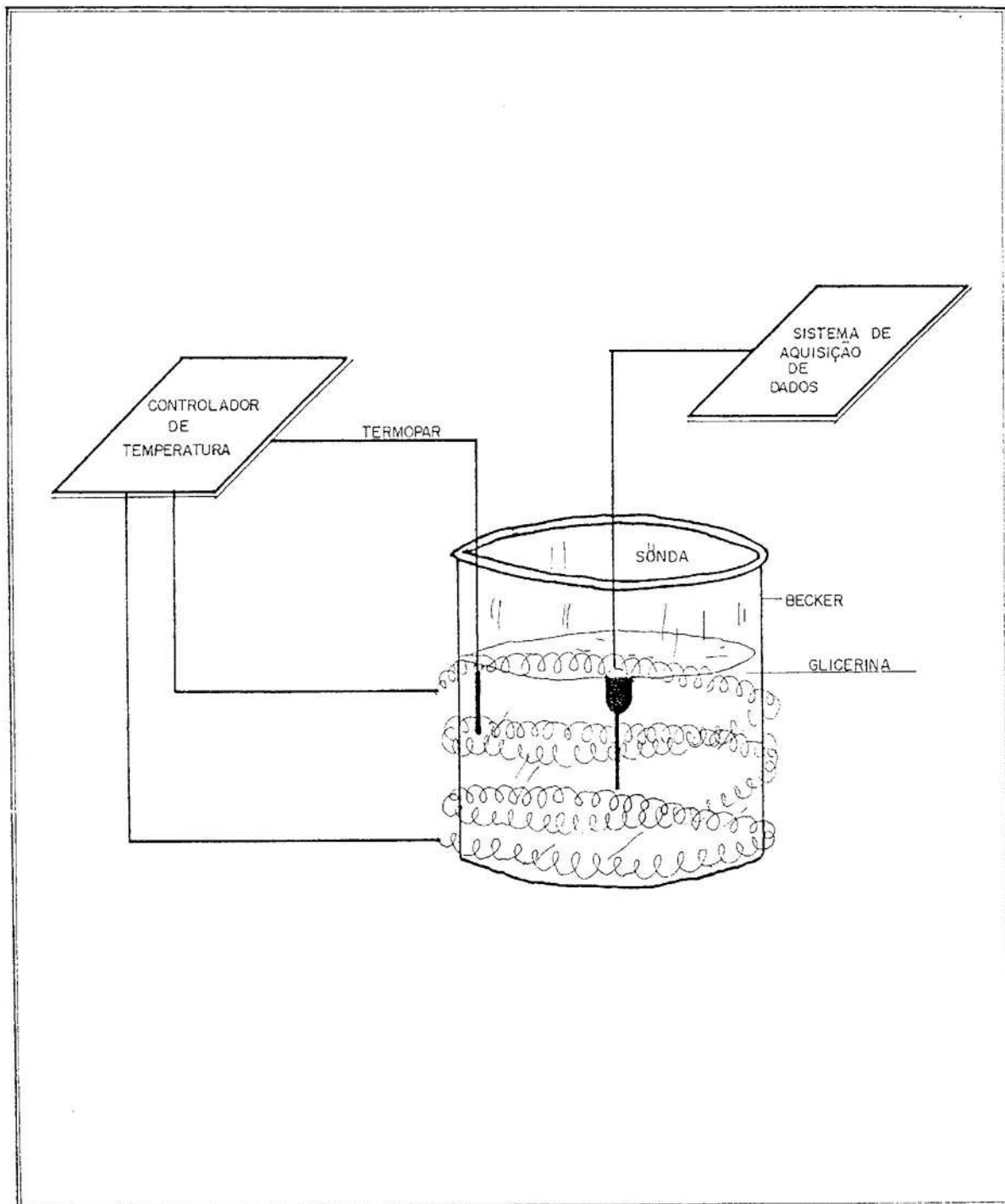


FIGURA 15 - Esquema da Montagem de Calibração da Sonda Miniatura Usada para Medir Condutividade Térmica

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Tempo de Eletrodeposição

O tempo de eletrodeposição obtido para os fluxímetros foi de 2,81 h para uma corrente de 25 mA e uma massa de cobre eletrodepositada de 83×10^{-6} kg.

4.2. Calibração dos Fluxímetros

A Figura 16 mostra a curva de calibração de um dos fluxímetros, obtida contra a placa de fluxo da REBS. Note-se que, nesta Figura, adotamos o sinal negativo para o fluxo de

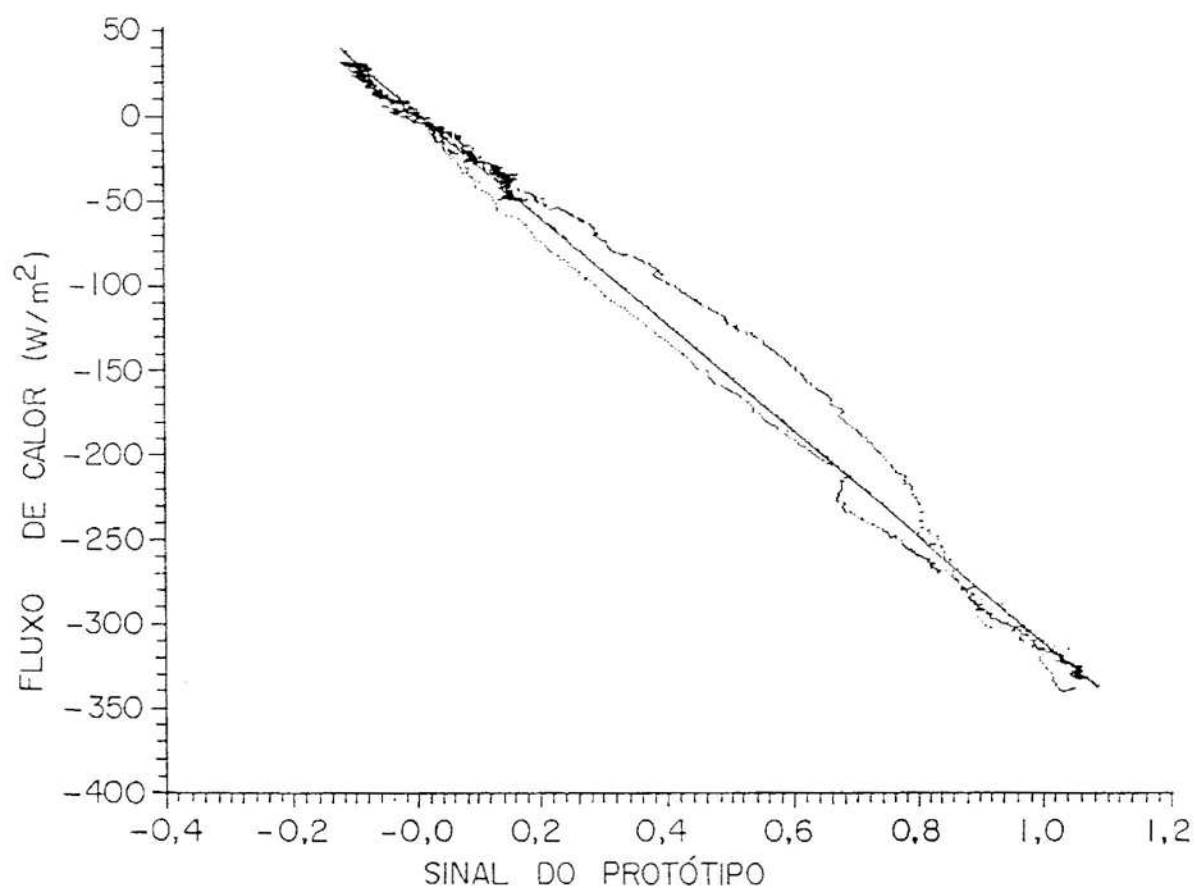


FIGURA 16 - Curva de Calibração do Fluxímetro

calor penetrando no solo, de acordo com a convenção adotada por OLIVEIRA e SAKAI (1991).

O valor da milivoltagem do fluxímetro foi correlacionado com o fluxo de calor medido pela placa da REBS, através de uma regressão linear, que forneceu o valor da constante de calibração do fluxímetro:

$$Q = - 310,75 v + 0,3579 \quad (r^2 = 0,9940), \quad (13)$$

em que Q é o fluxo de calor em W/m^2 e v é o sinal indicado pelo protótipo, em milivolts.

A constante de calibração deste fluxímetro pode ser tomada como $3,22 \mu V/(Wm^{-2})$, mediante inversão do coeficiente angular fornecido pela equação 13.

4.3. Determinação do Tempo de Resposta dos Fluxímetros

A Figura 17 mostra o gráfico da variação do sinal de um dos fluxímetros construídos em função do tempo. Após atingir o equilíbrio, observa-se uma certa flutuação do sinal do protótipo (representada pela abertura da curva), flutuação esta que pode ser atribuída às correntes de convecção no local.

O tempo de resposta obtido foi de 19,8 s, e a constante de tempo foi de 12,5 s, da mesma ordem de grandeza que as indicadas em catálogos de fabricantes de placas de fluxo.

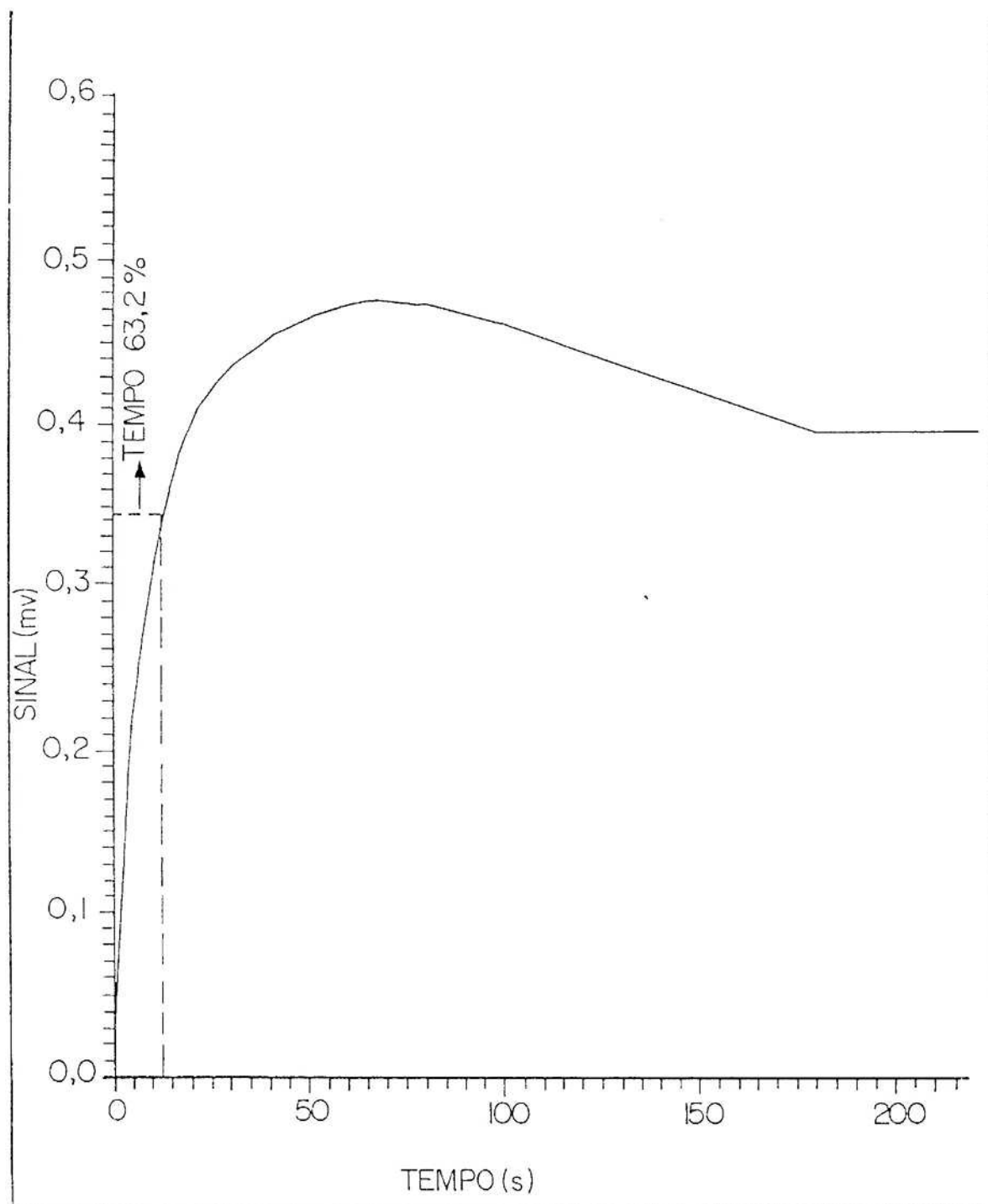


FIGURA 17 - Curva de Obtenção do Tempo de Resposta do Fluxímetro.

4.4. Medidas de Campo

O balanço de energia sobre uma superfície horizontalmente homogênea pode ser expresso da seguinte maneira:

$$R_n = -H - LE + Q, \quad (14)$$

em que R_n (W/m^2) é a irradiância líquida, H (W/m^2) é o fluxo vertical turbulento de calor sensível, LE (W/m^2) é o fluxo vertical turbulento de calor latente e Q é o fluxo de calor no solo. A irradiância e os fluxos turbulentos de calor e o fluxo de calor no solo positivos correspondem aos fluxos no sentido do solo para a atmosfera, ou de baixo para cima OLIVEIRA e SAKAI (1991). Os fluxos verticais turbulentos de calor sensível e latente foram determinados a partir das covariância entre flutuações de velocidade vertical (medida com o anemômetro sônico), de temperatura (medida com o termômetro de arame fino) e da densidade do vapor de água (medida com o higrômetro de Krypton), de acordo com as expressões seguintes:

$$H = \rho_a c_p (\overline{\theta'w'}) , \quad (15)$$

$$LE = L_v (\overline{q'w'}) , \quad (16)$$

em que ρ_a (kg/m^3) é a massa específica do ar, c_p ($J kg^{-1}K^{-1}$) é o calor específico à pressão constante, L_v (J/kg) é

o calor latente de evaporação, $(\overline{\theta'w'})$ é a covariância entre a temperatura e velocidade vertical ($K m s^{-1}$); e $(\overline{q'w'})$ é a covariância entre a densidade do vapor de água e a velocidade vertical ($kg m^{-2} s^{-1}$).

O gráfico apresentado na Figura 18 fornece os valores dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) para o ar, do fluxo de calor no solo (Q) medido com um dos fluxímetros desenvolvidos neste trabalho, da radiação líquida (Rn), do balanço de energia calculado pela soma dos fluxos ($Q - H - LE$), e do resíduo = $Rn - (Q - H - LE)$, medidos ao longo do dia 16 de março de 1991.

Pode-se verificar que há uma pequena diferença (cerca de 15 %) entre o balanço de energia calculado pela soma dos fluxos e o balanço medido pelo radiômetro líquido. Essa diferença, denominada "Resíduo", na Figura 18, pode ser atribuída a uma propagação de erros nas medidas com os diferentes sensores (OLIVEIRA e SAKAI, 1991).

4.5. Medida da Condutividade Térmica de Solos

A Tabela 3 relaciona os valores da constante de calibração da sonda para diferentes temperaturas da glicerina. Como não houve uma diferença significativa entre os valores obtidos para a constante de calibração da sonda, em função da temperatura, optou-se por utilizar o valor da média das

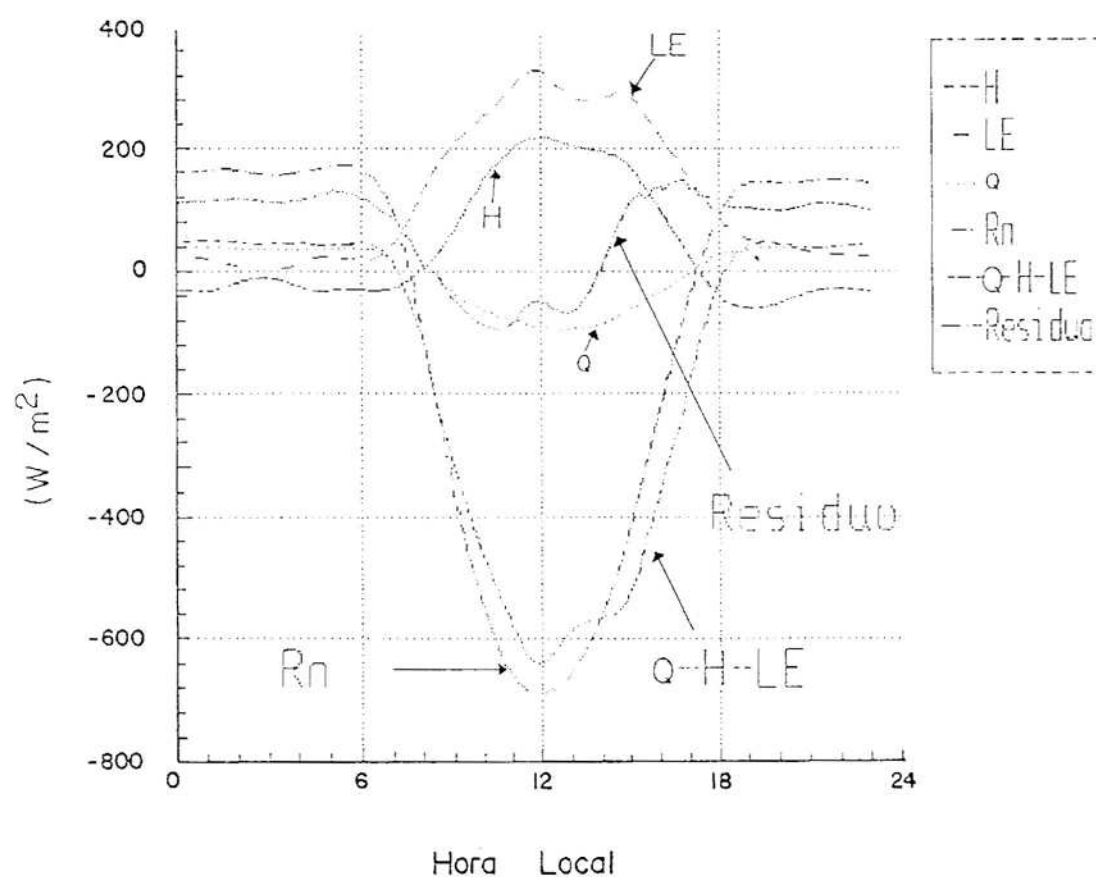


FIGURA 18 - Valores dos Fluxos de Calor Sensível (H) e Calor Latente (LE) para o Ar, do Fluxo de Calor no Solo (Q), Medido com o Fluxímetro, da Radiação Líquida (R_n), do Balanço de Energia ($Q - H - LE$), e do Resíduo = $R_n - (Q - H - LE)$, Medidos ao Longo do Dia 16 de Março de 1991

constantes de calibração da sonda para as medidas de condutividade.

QUADRO 3 - Valores Obtidos para a Constante de Calibração da Sonda Miniatura, Usada nas Medidas de Condutividade Térmica, em Função da Temperatura

Temperatura °C	Constante de Calibração da Sonda (kt/km)
23,65	0,925
41,91	0,910
58,93	0,918
84,82	0,939
Média	0,923 $\pm$ 0,009
D.P.	0,012
C.V.	1,33%

No Quadro 4 são mostrados os valores da condutividade térmica de alguns tipos de solo secos, determinados com o método da sonda miniatura, classificados de acordo com a sua textura. Cada valor apresentado representa uma média de quatro medições, realizadas em dias diferentes, e que o coeficiente de variação apresentado refere-se à média destas quatro medições. No entanto, cada uma destas medições constou de dez

repetições, cujo coeficiente de variação em torno da média foi sempre inferior a um por cento.

QUADRO 4 - Valores da Condutividade Térmica de Alguns Tipos de Solo Secos, Determinados com o Método da Sonda Miniatura

Amostra	Silte %	Argila %	Areia Fina %	Areia Grossa %	Classifica- ção Textural	k W/(mk)	D.P. %
1	10	63	24	03	Muito Argi- loso	0,080	7,8
2	52	37	02	09	Franco Argi- loso Siltoso	0,067	4,9
3	10	01	60	29	Areia	0,144	5,7
4	11	47	28	14	Argila	0,091	7,4
5	04	02	54	40	Areia	0,138	2,7
6	21	19	21	39	Franco Are- noso	0,112	5,6

Comparando-se as areias (amostras 3 e 5) com os materiais de argila (amostras 1 e 4), os resultados mostraram maior condutividade térmica para a areia do que para o material de argila, o que está de acordo com os dados de Geiger, citado por BAYER et alli (1982).

O gráfico da Figura 19 relaciona a condutividade térmica de um solo franco arenoso (57 % de areia grossa, 17 %

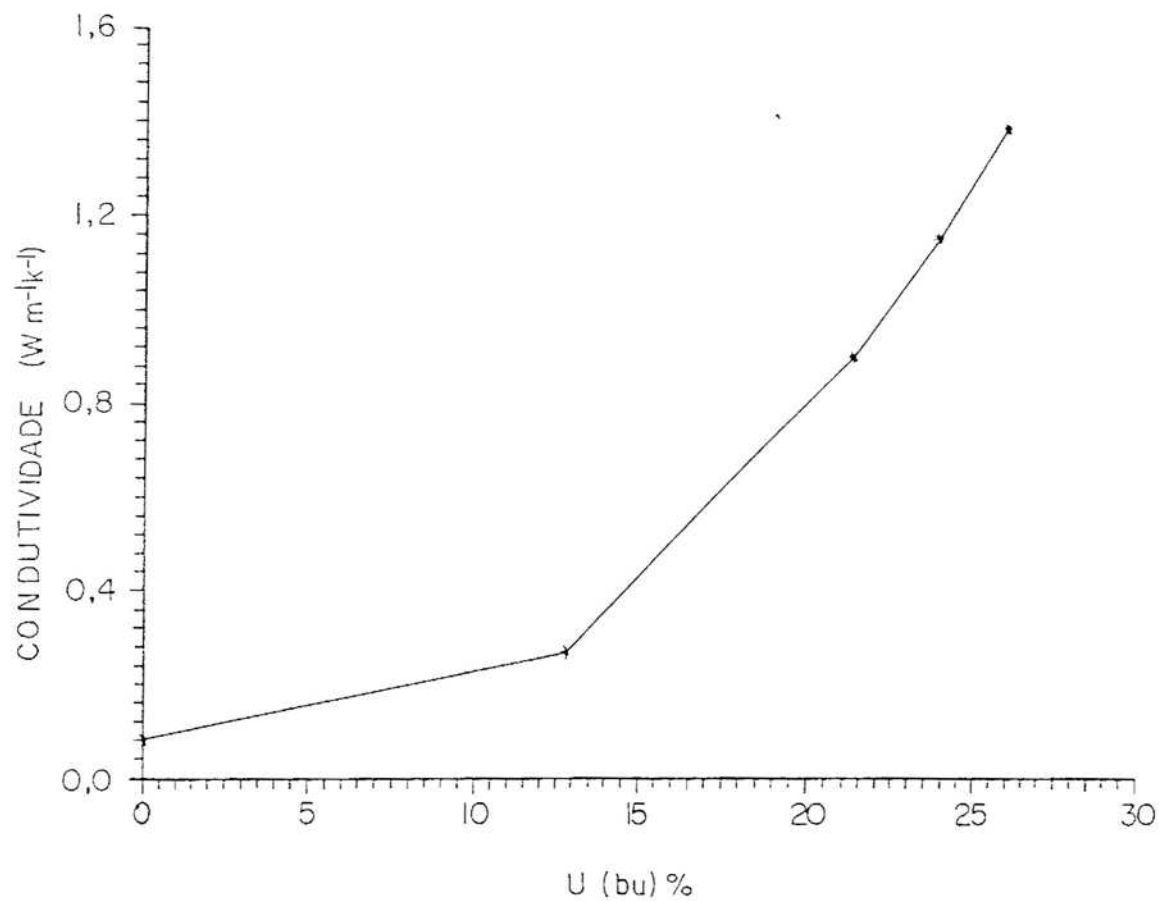


FIGURA 19 - Condutividade Térmica de um Solo Franco Arenoso, em Função de Sua Umidade

de areia fina, 14 % de silte e 12 % de argila), Quadro 5, em função de sua umidade. Pode-se verificar através desse gráfico que a condutividade térmica do solo varia drasticamente com a umidade.

QUADRO 5 - Valores da Condutividade Térmica de um Solo Franco Arenoso, em Função de Sua Umidade

$k \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$	Umidade (b.u.)
1,382	26,1%
1,146	24,0%
0,897	21,4%
0,268	12,8%
0,085	0,0%

Formando na equação 5 $G = 0,83$ e $k_s = 0,293 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e os valores extremos de condutividade do solo fornecidos pela Tabela 5 ($k_m = 1,382$ e $k_m = 0,085 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), obtém-se para o solo seco $Q_s/Q_m = 1,137$ e para o solo encharcado $Q_s/Q_m = 0,613$. Estes valores mostram a importância de se levar em conta a perturbação ocasionada pelo sensor quando da

utilização de placas de fluxo. Naturalmente o erro na indicação da placa de fluxo será tanto maior quanto maior for a diferença entre k_s e k_m . Note-se, ainda, que a curva de Q_s/Q_m , em função de k_s/k_m , Figura 11, não apresenta simetria em relação ao valor de $k_s/k_m = 1,0$.

Valores de condutividade térmica, para solos encharcados superiores à condutividade térmica da água, mostram que a condutividade térmica do material de que são constituídos os grãos é bem superior à da água.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho envolveu a construção de fluxímetros termoelétricos, a calibração dos mesmos e a determinação de seu tempo de resposta. A condutividade térmica de vários tipos de solos foi determinada, inclusive em função do teor de umidade, de forma a poder quantificar os erros ocasionados pela distorção do fluxo de calor introduzida pela presença do fluxímetro.

Os fluxímetros aqui apresentados, de baixo custo e fácil construção, apresentaram boa linearidade e constante de tempo (12,5 segundos) da mesma ordem de grandeza da constante de tempo de fluxímetros importados. A constante de calibração obtida para o fluxímetro foi igual a $3,22 \mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$. Em testes de campo, os fluxímetros apresentaram bom desempenho e durabilidade.

A condutividade térmica de diferentes tipos de solos foi determinada, encontrando-se valores na faixa de 0,07 a 0,14 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. A condutividade térmica das areias estudadas foi superior a dos materiais argilosos, o que está de acordo com a literatura.

A condutividade térmica de uma amostra de solo foi determinada em função do teor de umidade, apresentando uma variação de 0,085 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (solo seco) a 1,382 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (solo encharcado).

BIBLIOGRAFIA

- ANDRETTA, A.; BARTOLI, B.; CUOMO, V.; DE STEFANO, S. Simple heat flux meter. *R. Sci. Instrum.*, 52(2):233-4, 1981.
- APTHORP, D.M. & BLIGH, T.P. Modeling of heat flux distortion around heat flux sensors. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers*, ASTM STP 885. Philadelphia, ASTM, 1985. p. 45-64.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. *Soil Physics*, 4 ed. New York, John Wiley, 1972. 498 p.
- BLIGH, T.P. & APTHORP, D.M. Heat flux sensor calibration technique. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers*, ASTM STP 885. Philadelphia, ASTM, 1985. p. 25-44.
- CARSON, J.E. & MOSES, H. The annual and diurnal heat-exchange cycles in upper layers of soil. *J.A. Meteorology*, 2:397-406, 1963.

- DEGENNE, M. & KLARSFELD, S. A. New type of heat flowmeter for application and study of insulation and systems. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers*. Philadelphia, ASTM STP 885, 1985. p.163-71.
- FLANDERS, S.N. Heat flow sensors on walls-what can we learn?. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers*. Philadelphia, ASTM STP 885, 1985. p. 140-159.
- HEARD, C.L. & WARD, I.C. The design and use of low-cost heat flux plates for the measurement of building heat transfer rates. *Building and Environment*, 17(3):229-33, 1982.
- MARUR, C.J. *Desenvolvimento e estudo comparativo de sensores para radiação*. Campinas, Instituto de Biologia da Unicamp, 1982. 69 p. (Tese M.S.).
- OLIVEIRA, A.P. & SAKAI, R.K. *Relatório técnico do projeto dinâmica da camada limite planetária em latitudes tropicais e sub-tropicais*. São Paulo, SP, Dept. de Ciências atmosféricas, IAG, USP, 1991. 91 p.
- OLIVER, S.A., OLIVER, H.R.; ROBERTS, A.M. Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate. *Agric. For. Meteorol.*, 39:257-69, 1987.
- ORLANDI, R.D.; DERDERIAN, G.D.; SHU, L.S.; SIADAT, B. Calibration of heat flux transducers. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers*, ASTM STP 885. Philadelphia, ASTM, 1985. p. 65-78.
- PASSOS, E.F.; FORTES, M.; MELLO, J.C. Condutividade térmica da pasta de mandioca. *Revista Ceres*, 29(162):222-31, 1982.
- PASSOS, E.F.; GIANOLA, J.C.; STÖRI, C. Mise au point d'un banc d'essais de mesure de la conductivité thermique des matériaux biologiques et des liquides. *R. Gen. Therm.*, 287:811-3, 1985.

- RAO, T.V.R. & VIANELLO, R.L. *Características térmicas do solo de Cachoeira Paulista-SP*. São José dos Campos, INPE, 1977. 21 p. (Relatório-INPE-1106-PE/080).
- SANDANIELO, A. *Estudo do ciclo diário do regime térmico do solo de Viçosa-MG, sob três condições de cobertura*. Viçosa, MG, Impr. Univ. UFV, 1983. 79 p. (Tese M.S.).
- SELLERS, W.D. *Physical climatology*. Chicago, The University of Chicago, 1965. 272 p.
- SHIPP, P.H. Heat flux sensor applications below-grade energy studies. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers, ASTM STP 885*. Philadelphia, ASTM, 1985. p. 107-21.
- STÖRI, C. *Stand d'essai de mesure de la conductivité thermique*. Lansanne, Escola Politécnica Federal de Lansanne, 1984. n.p.
- SWEAT, V.E. A miniature thermal conductivity probe for foods. In: ASME-AICHE HEAT TRANSFER CONFERENCE, St. Louis, MO., 1976. *Ann. h. transf. conf.* St. Louis, ASME-AICHE, 1976. p. 9-11.
- SWEAT, V.E. & HAUGH, C.G. A thermal conductivity probe for small food samples. *Trans. ASAE*, 17(1):56-8, 1974.
- TRETHOWEN, H.A. Engineering application of heat flux sensors in buildings-the sensor and its behavior. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G. E., eds. *Building applications of heat flux transducers, ASTM STP 885*. Philadelphia, ASTM, 1985. p. 9-24.
- TRETHOWEN, H. Measurement errors with surface-mounted heat flux sensors. *Build. Environ.*, 21(1):41-56, 1986.
- VAN DER GRAAF, F. Research in calibration and application errors of heat flux sensors. In: Bales, E.; Bomberg, M.; Courville, G.E., eds. *Building applications of heat flux transducers, ASTM STP 885*. Philadelphia, ASTM, 1985. p. 79-96.

VERLAG, E.G.L. *Galvanotécnica prática*. Tradução FÖLDES, P.A.
São Paulo, Editora da USP, 1973. V. 1.

VIANELLO, R.L.; RAD, T.V.R.; NOGUEIRA, J.M. *Comportamento
térmico do solo de Viçosa-MG, ciclo anual, 1971*. São José
dos Campos, INPE, 1977. 26p. (Relatório-INPE-1107-PE/081).