

AFONSO DECICO

Engenheiro-Agrônomo

CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS SOLOS

(Equações para o cálculo da condutividade térmica de alguns solos em função da densidade e umidade)

Tese apresentada para Doutorado na Cadeira de Física e Meteorologia, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo.

PIRACICABA - 1967

A minha mãe

A minha esposa

A meus sogros

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Admar Cervellini, pela orientação geral d'êste trabalho.

Ao Prof. Eneas Salati, pelas sugestões apresentadas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Instituto Brasileiro do Café, pelas valiosas doações, sem as quais seria impossível a realização d'êste trabalho.

INDICE

	<u>Página</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SÔBRE A TEORIA DO MÉTODO	3
4. MATERIAL E MÉTODO	7
4.1. Material	7
4.1.1. Constituição do sistema de deter <u>minação</u> da condutividade térmica .	7
4.1.1.a. Conjunto de teste de solo	8
4.1.1.b. Fonte de energia elétrica	9
4.1.1.c. Conjunto de refrigeração e aquecimento de água	9
4.1.1.d. Conjunto de medidores e regis <u>tradores</u> das temperaturas e me <u>didores</u> de corrente e tensão dos aquecedores	10
4.2. Solos	11
4.3. Método	12
4.3.1. Coleta e preparo das amostras	12
4.3.2. Ensaio <u>s</u> preliminares	13
4.3.2.a. Homogeneidade de compactação do solo no sistema de teste	13
4.3.2.b. Grandeza do êrro experimental ..	14
4.3.2.c. Valor máximo do gradiente de temperatura a ser utilizado	14
4.3.2.d. Se a condutividade térmica é função da temperatura no intervalo de 5 a 70°C	14
4.3.3. Equação utilizada no presente trabalho para o cálculo da condutividade térmica do solo	15
4.3.4. Equação para determinação da tem <u>peratura</u> das isoter <u>mas</u> do conjun <u>to</u> de testes de solo raio <u>r</u> , sen <u>do</u> $r_1 \leq r \leq r_2$	16

I N D I C E (Continuação)

	<u>Página</u>
5. DADOS OBTIDOS	17
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS	18
6.1. Efeito da densidade do solo sôbre a condutividade térmica	18
6.2. Efeito da umidade do solo sôbre a condutividade térmica	19
6.3. Equação para o cálculo da condutividade térmica em função da densidade e umida- de do solo	21
7. CONCLUSÃO	22
8. RESUMO	23
9. SUMMARY	23
10. LITERATURA CITADA E CONSULTADA	24

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se, experimentalmente, que a condutividade térmica dos materiais é uma constante para um determinado estado do material. Sendo um estado do solo descrito pelas suas coordenadas, temperatura (θ), densidade (ρ), umidade (μ), porosidade (e), composição mineral (m), etc, sua condutividade térmica será definida - por:

$$K = f(\theta, \rho, \mu, e, \dots m)$$

Não se conhece nenhuma dependência funcional entre as diversas coordenadas do solo e a sua condutividade térmica, motivo pelo qual procura-se no presente trabalho estabelecer relações entre a condutividade térmica e a umidade e densidade de alguns solos.

Desenvolve-se, preliminarmente, uma série de determinações a fim de se verificar a viabilidade do método e limitar o número de variáveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre os pesquisadores que estudaram a condutividade térmica, no seu aspecto metodológico, podemos citar: ALLOCO (1); GEMANTE (6); HOOPER (7); JACKSON (10); KERSTEN (12); MISENER (17); ONCHUKOV (19); ... VRIES (23); WIJK (25).

Nestes estudos dois princípios fundamentais foram utilizados. Em um deles (ALLOCO, 1), a condutividade térmica é determinada medindo-se a quantidade de calor absorvida por um corpo de capacidade calorífica conhecida, através de sua elevação de temperatura em um dado intervalo de tempo. No outro, GEMANTE (6), HOOPER (7), JACKSON (10), KERSTEN (12), MISENER (17), ONCHUKOV (19), VRIES (23), WIJK (25), a condutividade térmica é determinada medindo-se o fluxo de calor através de uma superfície em um processo em que existe equilíbrio dinâmico (steady-state) da temperatura. Este foi o método empregado no presente trabalho.

Outros pesquisadores entre os quais podemos destacar: DEACON (3); FISKELL (4); JACKSON (11); KULIK (13); MAKSHABANDI (15); TAYLOR (22); VRIES (24); WIJK (26); WIJK (27) e outros, relacionaram a condutividade térmica com balanço de energia e movimento de água no solo, em condições de campo e de laboratório.

Em nosso meio não existe nenhum trabalho sobre condutividade térmica do solo.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A TEORIA DO MÉTODO

Consideremos um elemento de volume dv - $(dx \, dy \, dz)$, localizado no seio de um material, no qual se processa condução de calor (fig. 1).

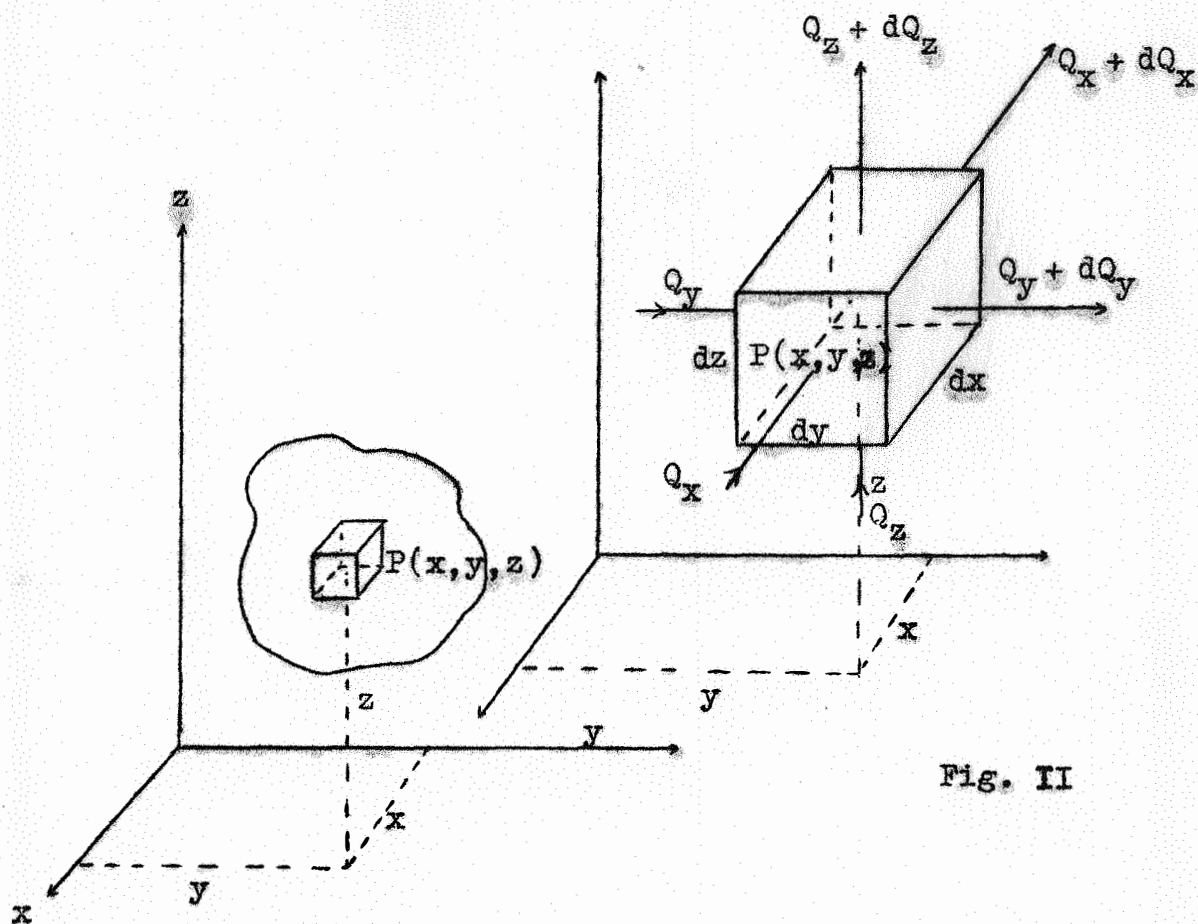


Fig. I

Fig. II

Sejam (fig. 2):

Q_x o fluxo de calor na direção \underline{x} através da área $(dy \, dz)$ do elemento de volume dv , na unidade de tempo .

$Q_x + dQ_x$ o fluxo de calor na face oposta, na mesma direção \underline{x} através da área $(dy \, dz)$ na unidade de tempo .

dQ_x a variação do fluxo na direção \underline{x} , na unidade de tempo .

θ a temperatura de um ponto localizado no centro do ele-

mento de volume, de coordenadas (x, y, z).

τ o tempo.

ρ a densidade do sólido.

c_p o calor específico do sólido, à pressão constante.

K_x, K_y, K_z a condutividade térmica do sólido nas direções x, y, z respectivamente.

O fluxo de calor na direção x é dado pela expressão $\frac{dQ}{d\tau} = -KA \frac{d\theta}{dx}$. Fazendo-se,

$$q_x = \frac{\frac{dQ}{d\tau}}{A}$$

teremos:

$$q_x = -K_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \dots \dots \dots (1)$$

logo, o fluxo de calor na direção x através da face (dy dz) do elemento de volume é:

$$Q_x = -K_x (dy dz) \frac{\partial \theta}{\partial x} \dots \dots \dots (2)$$

e o fluxo através da face oposta será:

$$Q_x + dQ_x = Q_x + \frac{\partial}{\partial x} (Q_x) dx \dots \dots \dots (3)$$

ou seja,

$$dQ_x = K_x (dx dy dz) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots \dots \dots (4)$$

Da mesma maneira, teremos para as direções y, z:

$$dQ_y = K_y (dx dy dz) \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \text{ na direção y } \dots \dots \dots (5)$$

$$dQ_z = K_z (dx dy dz) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \text{ na direção z } \dots \dots \dots (6)$$

A variação total do fluxo na unidade de

tempo no elemento de volume será dada pela soma algébrica:

$$dQ_x + dQ_y + dQ_z$$

A variação total do fluxo no elemento de volume é responsável pela variação de temperatura deste, diante do que podemos estabelecer a seguinte igualdade:

$$dQ_x + dQ_y + dQ_z = \rho c_p (dx dy dz) \frac{d\theta}{d\tau} \dots\dots\dots (7)$$

onde,

c_p = calor específico do sólido à pressão constante.

$\frac{d\theta}{d\tau}$ = variação da temperatura do elemento de volume na unidade de tempo.

Substituindo as expressões (4), (5) e (6) em (7), e simplificando, teremos:

$$\left[K_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] = \rho c_p \frac{d\theta}{d\tau} \dots\dots (8)$$

Para um corpo homogêneo, isotrópico:

$K_x = K_y = K_z$ e a expressão (8) fica:

$$K \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] = \rho c_p \frac{d\theta}{d\tau}$$

fazendo,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$$

podemos escrever:

$$\boxed{K \nabla^2 \theta = \rho c_p \frac{d\theta}{d\tau}} \dots\dots\dots (9)$$

No presente trabalho foi utilizado um fluxo radial de calor numa geometria cilíndrica, tornando-se por isso, mais adequado o uso de coordenadas cilíndricas para a equação (9).

Para tanto, basta transformar o operador Laplaciano (∇^2) para o sistema de coordenadas cilíndricas, isto é:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \dots\dots\dots (10)$$

portanto, a equação de condução para este sistema será:

$$K \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] = \rho c_p \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots (11)$$

Como o processo envolveu equilíbrio dinâmico, a expressão (11) para esse caso particular fica:

$$\boxed{\frac{d^2 \theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} = 0} \dots\dots\dots (12)$$

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1. Material

4.1.1. Constituição do sistema de determinação da condutividade térmica

Em vista geral do sistema de determinação está indicado na Fig. I e para efeito de descrição, dividimo-lo em quatro partes:

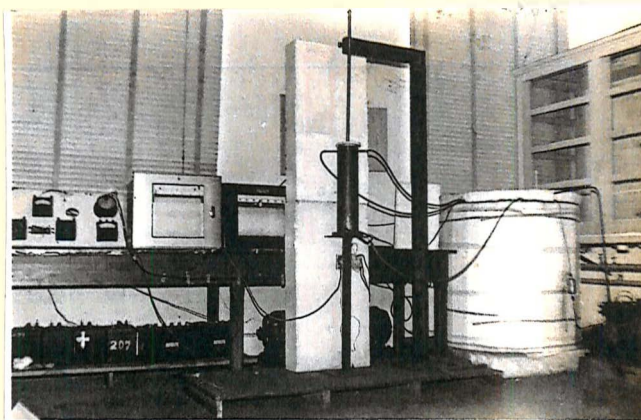
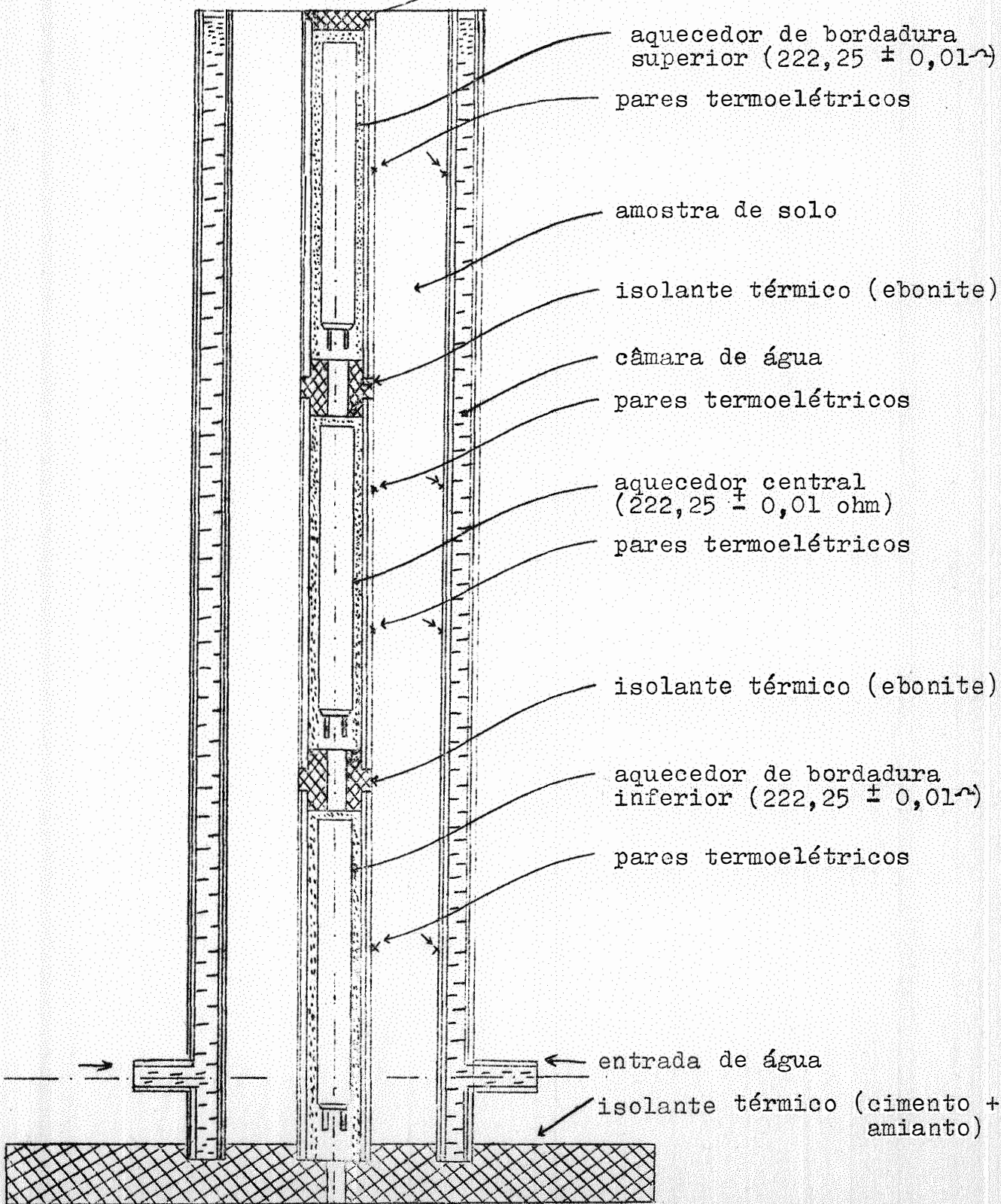
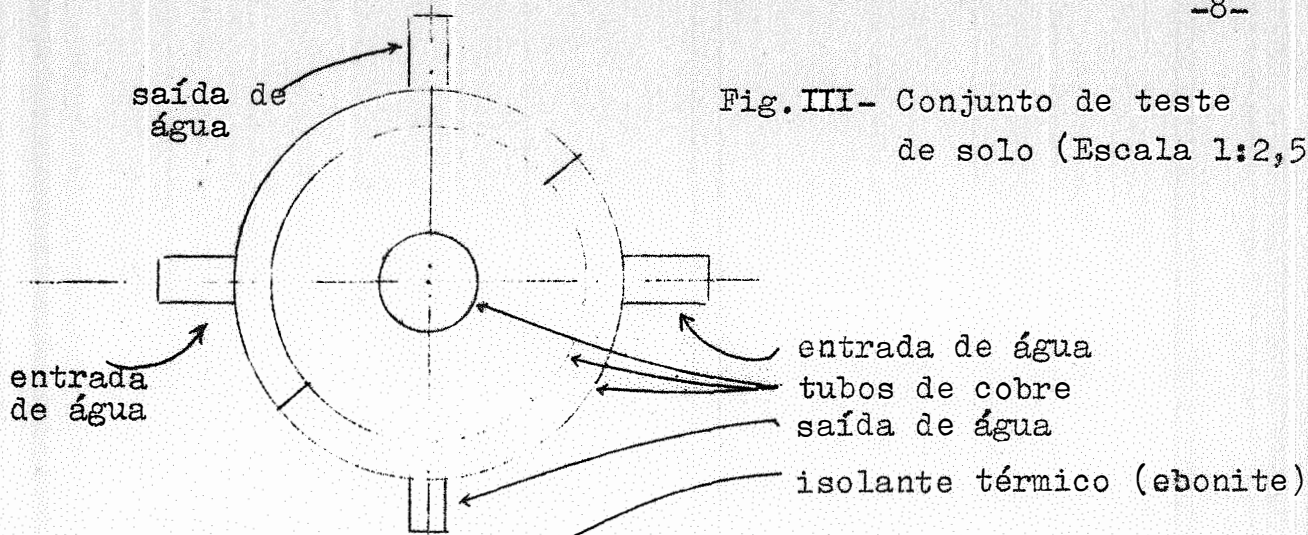
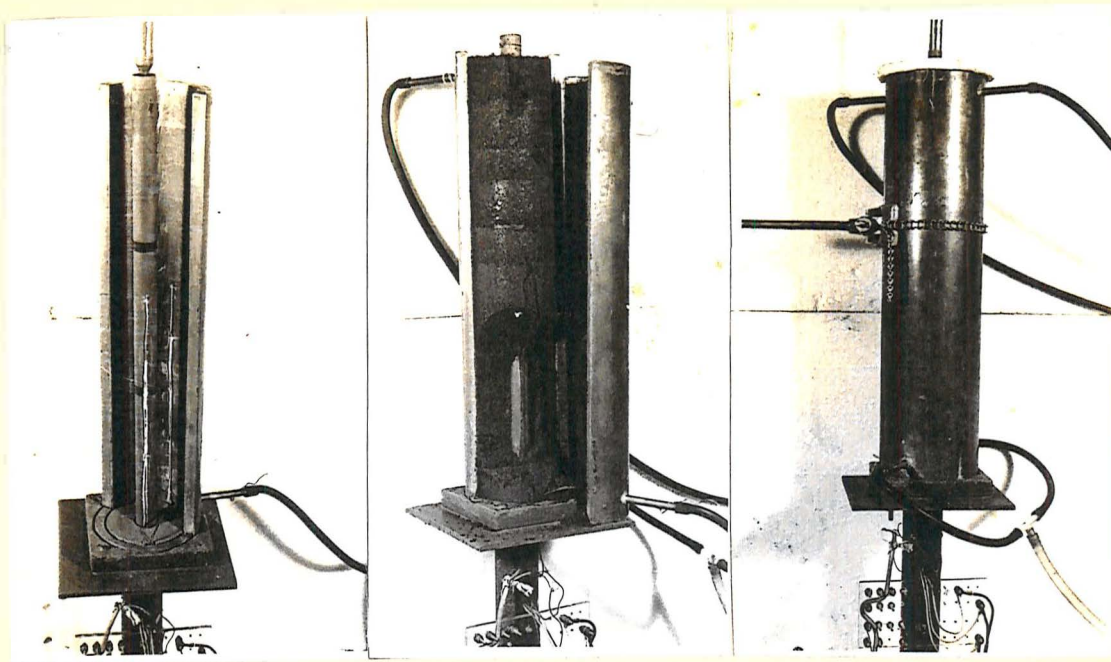


Fig. I

- a) conjunto de teste de solo. (Figs. III, IV, V e VI).
- b) fonte de energia elétrica.
- c) conjunto de refrigeração e aquecimento de água.
- d) conjunto de medidores e registradores das temperaturas e medidores de corrente e tensão dos aquecedores.

Fig.III- Conjunto de teste de solo (Escala 1:2,5)





Figs. IV, V e VI

4.1.1.b) Fonte de Energia Elétrica

O fornecimento de uma corrente elétrica estabilizada para os aquecedores é de importância capital para se obter um fluxo de calor constante; por isso utilizou-se como fonte de energia uma série de 10 baterias de 12 volts.

Essas baterias eram recarregadas automaticamente por um conjunto motor gerador de 1,5 Kw de potência.

4.1.1.c) Conjunto de Refrigeração e Aquecimento de Água

Para se obter temperaturas estabilizadas na parede "fria" do conjunto de teste de solo, utilizou-se de um fluxo de água que provinha de um reservatório - com capacidade igual a 300 litros.

O resfriamento da água era realizado com auxílio de um compressor refrigerador de 3/4 HP, e para aquecimento da mesma utilizou-se de um aquecedor tubular

de 2.500 watts.

Um termostato instalado no reservatório mantinha a temperatura da água no valor desejado.

Em circuito fechado, reservatório-conjunto de teste, instalou-se uma bomba centrífuga com vazão igual a 3 litros/min.

Uma vista do sistema de refrigeração e aquecimento de água é indicado pela Fig. VII.

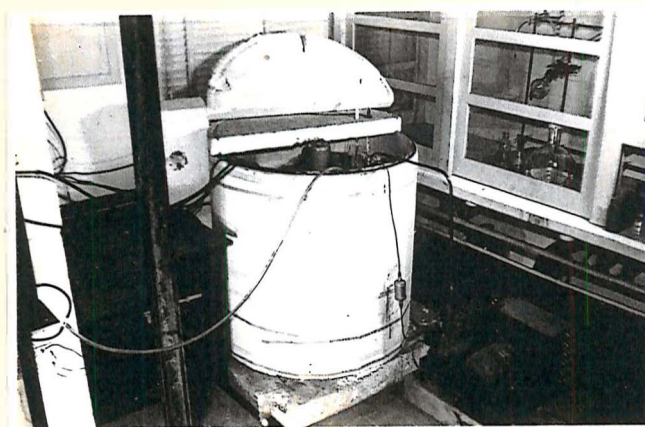


Fig. VII

4.1.1.d) Conjunto de Medidores e Registradores das Temperaturas das Faces Quente e Fria do Solo

A não homogeneidade da temperatura ao longo das faces fria e quente do solo pode dar origem a fluxos não radiais de calor. A fim de verificar a existência desses fluxos não radiais de calor, instalou-se, ao longo dessas faces, pares termoelétricos, sendo as temperaturas registradas por um potenciômetro marca Honeywell, de 12 canais. Estes mesmos pares termoelétricos eram utilizados para verificar as temperaturas nas faces quente e fria do solo.

Após estabilização completa das temperaturas em ambas as faces, estas passavam a ser lidas com au

xílio de um potenciômetro marca Cambridge, de fundo de escala 0 a 100 mV, de precisão igual a $\pm 0,001$ mV.

A tensão e corrente elétrica nos aquecedores eram lidas em aparelhos de marca Siemens.

Uma vista do conjunto de medidores e registradores é indicado na Fig. VIII.

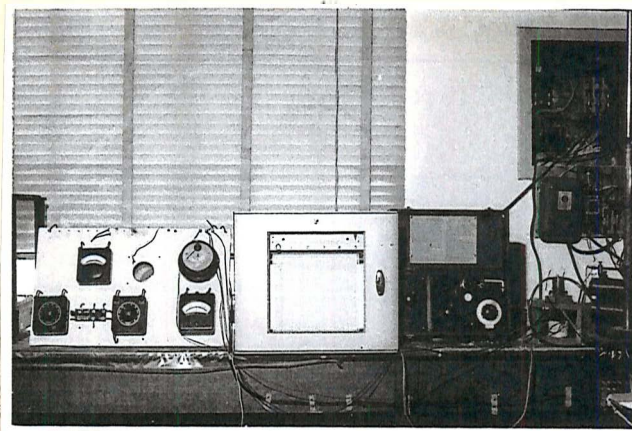


Fig. VIII

4.2. Solos

As amostras de solo utilizadas para este trabalho provém de horizontes A_p , das séries de solo identificadas por RANZANI et al (20).

a) Latosol roxo, Série Iracema, RANZANI (20), amostras fornecidas pelo Centro de Estudos de Solos da ESALQ.

b) Latosol vermelho-Escuro-Orto, Série Luiz de Queiroz, RANZANI (20), obtidas nas proximidades do aeroporto "Pedro Morganti".

c) Podzólico vermelho-amarelo, variedade Laras, Série Quebra-Dente, RANZANI (20), obtida no Bairro Quebra-Dente, região de Tupí.

d) Areia de quartzo, fornecida pelo Centro de Estudos de Solos da ESALQ.

No Quadro 1 são apresentados os teores de

argila, limo, areia, matéria orgânica e total de ferro, alumínio e sílica, das séries de solos que foram utilizadas neste trabalho.

Quadro 1 - Análise física e química dos solos

Solo (Série)	Areia (%)	Limo (%)	Argila (%)	M.O. (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)
Iracema	21,64	11,0	67,0	2,26	20,96	24,44	37,8
Luiz de Queiroz	33,9	27,5	38,4	1,30	19,0	14,0	53,52
Quebra-Dente	79,0	19,1	4,9	0,98	3,04	7,50	85,2
Areia do solo	---	---	---	---	0,48	2,04	97,0

4.3. Método

4.3.1. Coleta e Preparo das Amostras

Para cada uma das séries de solo indicadas no Quadro 1, foi obtida uma amostra representativa, pela união de várias delas coletadas no horizonte A_p em uma área de aproximadamente 2.000 m²; estas amostras foram secadas em estufa a 105°C e peneirada em peneira de 2 mm (inclusive esqueleto do solo).

Os diferentes teores de umidade expresso em gramas de água por grama de solo, foram obtidos adicionando-se água à terra "seca em estufa", tomando-se o cuidado de se obter uma homogeneidade completa; os teores de umidade foram determinados em estufa a 105°C antes e depois dos referidos testes.

As diferentes densidades (massa de solo pelo volume do aparelho de teste), foram obtidas pelo processo de compactação por percussão e sua homogeneidade ficou assegurada pela técnica empregada (4.3.4.a).

Neste trabalho quando se referir à densi-

dade, subentende-se que se trata de densidade do solo secado em estufa a 105°C .

4.3.2. Ensaio Preliminares

Foram executados ensaios preliminares a fim de verificar:

- a) homogeneidade de compactação do solo no sistema de teste.
- b) grandeza do erro experimental.
- c) valor máximo do gradiente de temperatura a ser utilizado.
- d) se a condutividade térmica é função da temperatura no intervalo de 5 a 70°C .

Chegou-se às seguintes conclusões:

a) Que com a técnica de compactação utilizada, qual seja a queda de um pêso de massa igual a 800 gramas, caindo de uma altura constante de 50 cm, foi obtida uma densidade homogênea. A verificação foi feita pelo método proposto por REICHARDT (21), sendo que os dados acham-se indicados na Fig. IX.

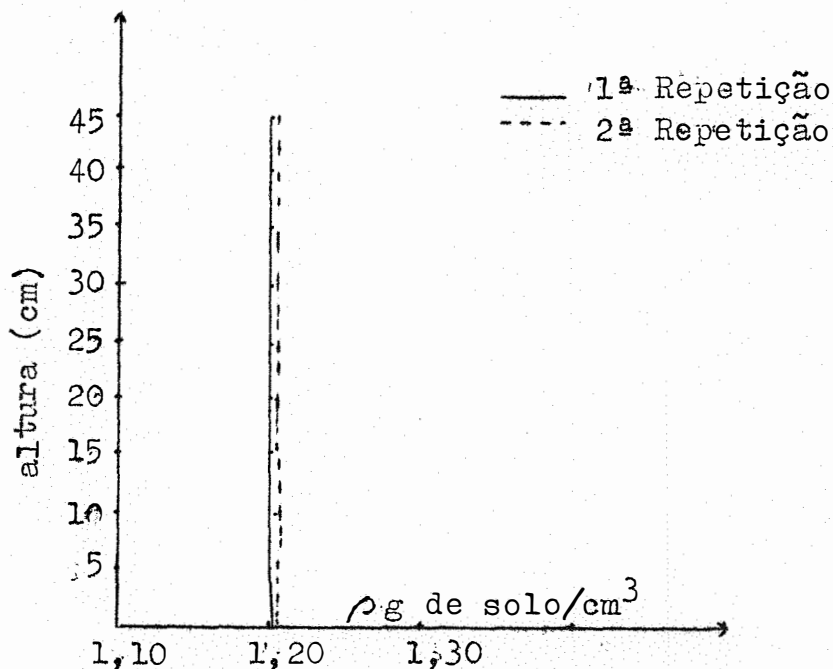


Figura IX

b) Numa série de cinco repetições em ensaios realizados com "areia do solo" com dez medidas em cada repetição, os valores obtidos para a condutividade térmica foram os seguintes:

Quadro 2 - Grandeza do Erro experimental

Repetições	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5
K	0,00052 ± 0,000004	0,00052 ± 0,000004	0,00052 ± 0,000003	0,00052 ± 0,000003	0,00052 ± 0,000005

Verifica-se, pois, que o coeficiente de variação é da ordem de 0,07%.

c) Nos ensaios preliminares com solos úmidos, verificamos a existência de um fluxo horizontal de água devido à diferença de temperatura entre as duas faces do solo. Procurou-se então, estabelecer qual o valor do gradiente de temperatura, que reduzisse este fluxo a um valor mínimo, de tal forma que o mesmo não influísse no equilíbrio dinâmico. Numa série de seis repetições constatou-se que, com um gradiente de 1°C/cm, o efeito do fluxo de água sobre o equilíbrio dinâmico é desprezível.

d) Como em nossas condições climáticas a temperatura do solo raramente é menor que 5°C e maior que 70°C, procurou-se determinar se a condutividade térmica seria uma função da temperatura naquele intervalo. Os dados obtidos encontram-se no Quadro 3 e demonstram que a condutividade térmica não é função da temperatura no intervalo de 3,33°C a 118,27°C.

Quadro 3 - Condutividade térmica em função da temperatura.

$\theta_1 - \theta_2$	118,27°C	78,28°C	46,00°C	16,09°C	3,33°C
K	0,00083 ± 0,000005	0,00081 ± 0,000008	0,00082 ± 0,000006	0,00078 ± 0,000009	0,00082 ± 0,000003

onde,

θ_1 é a temperatura da face quente do solo.

θ_2 é a temperatura da face fria do solo.

4.3.3. Equação Utilizada no Presente Trabalho -- para o Cálculo da Condutividade Térmica do Solo

A partir da expressão $\frac{dQ}{d\tau} = -KA \frac{d\theta}{dx}$ podemos exprimir o valor da condutividade térmica K, assim:

$$K = \frac{\frac{dQ}{d\tau} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L(\theta_1 - \theta_2)}$$

onde,

r_1 — raio da face quente do solo = 1,270 cm.

r_2 — raio da face fria do solo = 4,763 cm.

L — comprimento do aquecedor central = 16,0 m.

θ_1 — temperatura da face quente do solo.

θ_2 — temperatura da face fria do solo.

$\frac{dQ}{d\tau}$ — quantidade de calor dissipada no aquecedor central = 0,24 EI calorias/s, onde E representa a tensão em volts e I a corrente elétrica em ampères.

Podemos então escrever que:

$$K = \frac{0,24 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L} \frac{EI}{(\theta_1 - \theta_2)} \dots\dots\dots (13)$$

fazendo,

$$H = \frac{0,24 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L}$$

e substituindo os valores de r_1 , r_2 , L e π , obteve-se a

constante do aparelho:

$$H = 0,0031$$

que substituída na equação (13) nos vai dar:

$$K = 0,0031 \frac{EI}{(\theta_1 - \theta_2)} \quad \frac{\text{cal cm}}{\text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}} \quad \dots \quad (14)$$

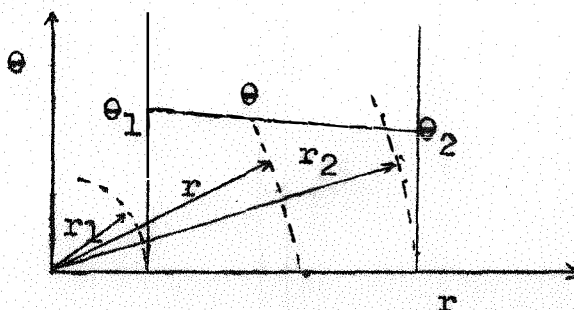
que foi utilizada no presente trabalho.

4.3.4. Equação para Determinação da Temperatura das Isotermas no Conjunto de Testes do Solo de raio r, sendo $r_1 \leq r \leq r_2$.

Para a geometria adotada nas medidas do presente trabalho, isto é, fluxo radial em equilíbrio dinâmico, $\frac{dQ}{dr} = 0$, a equação $\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} = 0$ que resolvida para os limites r_1, r_2, θ_1 e θ_2 resulta,

$$\theta = \frac{(\theta_2 - \theta_1) \ln r + \theta_1 \ln r_2 - \theta_2 \ln r_1}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (15)$$

Substituindo-se na expressão (15) os valores para $r_1 = 1,270 \text{ cm}$, $r_2 = 4,763 \text{ cm}$, $\theta_1 = 22,0^\circ\text{C}$ e ... $\theta_2 = 18,5^\circ\text{C}$ e, resolvendo para diferentes valores de r do intervalo $r_1 \leq r \leq r_2$, colocando os valores calculados em sistema de eixo ortogonais r, θ , pode-se visualizar a variação contínua da temperatura ao longo do raio no conjunto de teste que foi utilizado no presente trabalho, figura abaixo.



5. DADOS OBTIDOS

Os dados obtidos experimentalmente encontram-se nos Quadros abaixo, sendo K expresso em $\frac{\text{cal cm}}{\text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}}$, ρ em g/cm^3 e μ em por cento em peso de água.

5.1. Dados Experimentais da Série Iracema

Quadro 4 - Condutividade térmica em função da densidade

u	0,0%		11,30%		20,00%		30,20%		34,10%	
	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴
	0,91	3,2	0,97	5,8	0,98	11,6	0,92	16,2	0,95	21,0
	1,00	3,6	1,07	8,0	1,08	14,7	0,96	19,2	1,08	29,3
	1,09	4,3	1,15	9,6	1,16	17,8	1,16	31,2	1,17	35,0
	1,17	4,9	1,21	11,8	1,24	24,0	1,25	41,2	1,22	48,2

5.2. Dados Experimentais da Série Luiz de Queiroz

Quadro 5 - Condutividade térmica em função da densidade

u	0,0%		6,75%		10,68%		22,34%		26,18%		29,73%	
	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴
	1,00	3,6	0,98	4,3	0,98	6,1	0,94	10,0	0,99	13,0	1,02	14,7
	1,06	4,2	1,08	5,2	1,08	7,5	1,10	14,9	1,09	17,0	1,07	17,2
	1,16	5,0	1,18	7,0	1,17	9,8	1,19	18,8	1,18	21,0	1,22	24,0
	1,29	6,2	1,31	9,4	1,32	14,0	1,35	27,0	1,31	29,5	1,33	32,0

5.3. Dados Experimentais da Série Quebra-Dente

Quadro 6 - Condutividade térmica em função da densidade

u	0,0%		4,38%		8,68%		11,52%		13,80%	
	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴	ρ	K.10 ⁴
	1,12	3,9	1,12	5,7	1,09	12,7	1,04	12,3	1,13	21,0
	1,25	4,7	1,22	7,2	1,20	18,8	1,15	21,8	1,18	24,4
	1,32	5,7	1,30	8,5	1,26	23,0	1,22	27,0	1,26	29,8
	1,43	6,6	1,44	10,8	1,35	29,4	1,41	43,4	1,34	45,1

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS

Os testes realizados com as três séries de solos foram conduzidos de tal maneira que se pudesse obter informações à respeito da variação da condutividade térmica em função da densidade e da umidade do solo, sabendo-se que, no intervalo de temperatura adotado, a condutividade térmica não é uma função da temperatura, conforme foi visto no capítulo 4.3.4.d.

Cabe ressaltar ainda, a dificuldade de repetições de densidade e umidade para as diferentes séries de solos.

Para a série Iracema, solo essencialmente argiloso, conseguiu-se testar as amostras entre o intervalo de densidade 0,91 a 1,22 g/cm³ e a umidade desde sêco em estufa até aproximadamente 35%.

No solo da série Luiz de Queiroz (barro arenoso), conseguiu-se testar as amostras entre o intervalo de densidade 0,94 a 1,35 g/cm³ e a umidade desde sêco em estufa até 30%.

No solo da série Quebra Dente (areia barrenta), conseguiu-se testar as amostras entre o intervalo de densidade 1,04 a 1,44 g/cm³ e a umidade desde sêco em estufa até 14%.

6.1. Efeito da Densidade do Solo Sobre a Condutividade Térmica

Verificou-se em todos os testes realizados, que um aumento na densidade resultou num aumento da condutividade térmica, para qualquer umidade experimental da. Os Quadros 4, 5 e 6 e as curvas das figuras X, XI e XII representam os dados obtidos experimentalmente e demonstram a existência de uma função crescente entre a densidade e a condutividade térmica.

Nota-se que as curvas das figuras X, XI e XII, em gráfico semi-logarítmico, possuem o mesmo coeficiente angular (as curvas que representam solos úmidos)

indicando existir uma relação constante entre um aumento da densidade e o correspondente aumento percentual em condutividade térmica.

Uma análise dos dados obtidos, Quadros 4, 5 e 6, permitem estabelecer a relação analítica entre a condutividade térmica (K) e a densidade (ρ) do solo ; assim:

$$\text{Solo Série Iracema} \quad K = 10^{-4} \left[a (10)^{1,192\rho} \right] \dots\dots (16)$$

$$\text{Solo Série Luiz de Queiroz} \quad K = 10^{-4} \left[a_1 (10)^{1,071\rho} \right] \dots\dots (17)$$

$$\text{Solo Série Quebra-Dente} \quad K = 10^{-4} \left[a_2 (10)^{1,365\rho} \right] \dots\dots (18)$$

Nas equações (16), (17) e (18) o coeficiente angular é um coeficiente angular médio e o coeficiente linear (a) é uma função da umidade.

As equações das curvas que representam a condutividade térmica em função da densidade, encontram-se no Quadro 7.

6.2. Efeito da Umidade do Solo Sôbre a Condutividade Térmica

O estudo do efeito da umidade sôbre a condutividade térmica é limitado experimentalmente pela dificuldade de se manter a quantidade de massa sêca de solo constante e variar sômente a umidade. Por isso, os valores com que foram obtidas as relações da condutividade térmica em função da umidade, foram obtidos por resoluções das equações (16), (17) e (18), nos diferentes teores de umidades experimentados, mantendo-se três valores de densidade constante.

Para solo da série Iracema, equação (16) as densidades foram 1,0 ; 1,10 e 1,20.

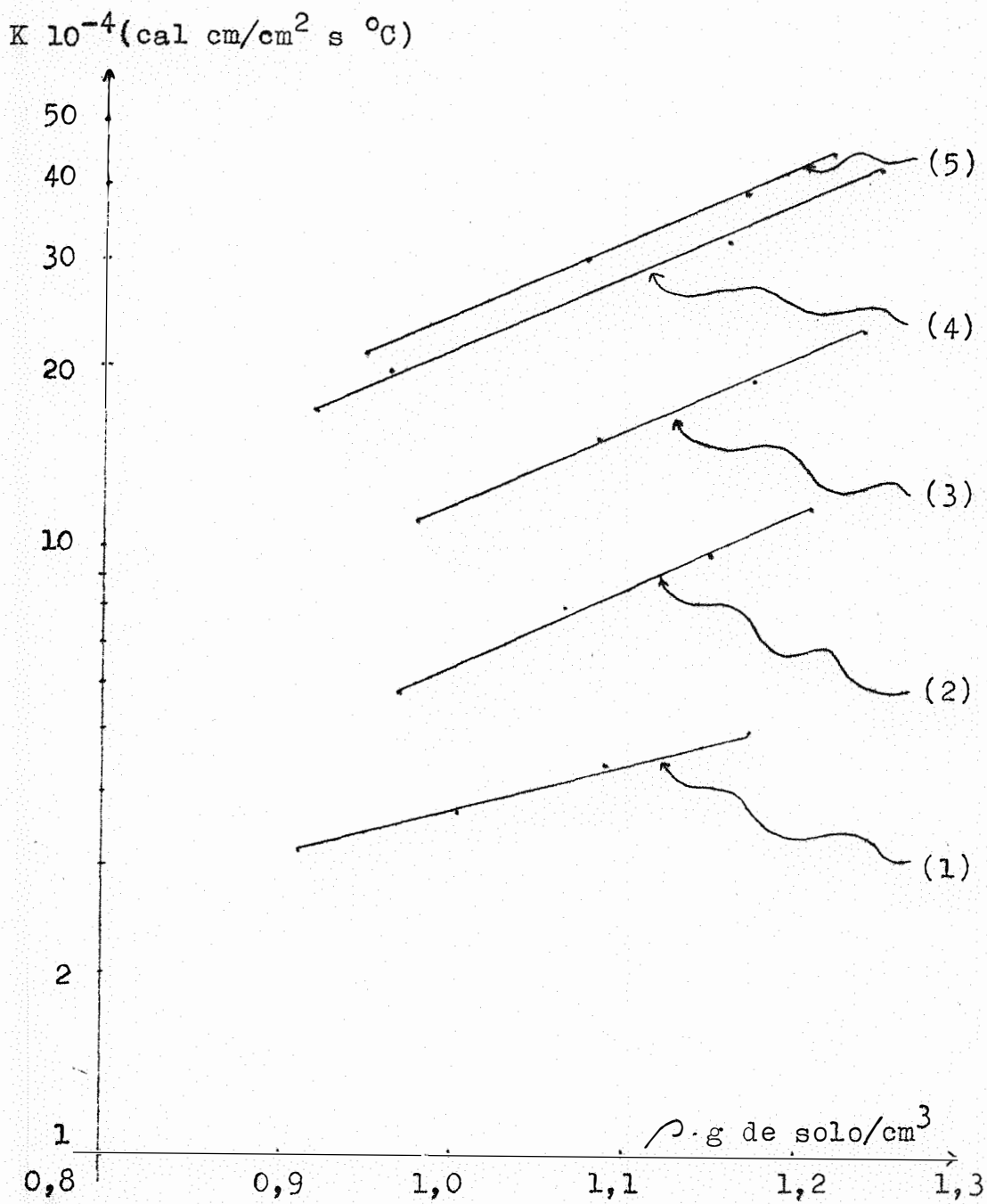


Fig. X - Variação da condutividade térmica em função da densidade (Solo Iracema).

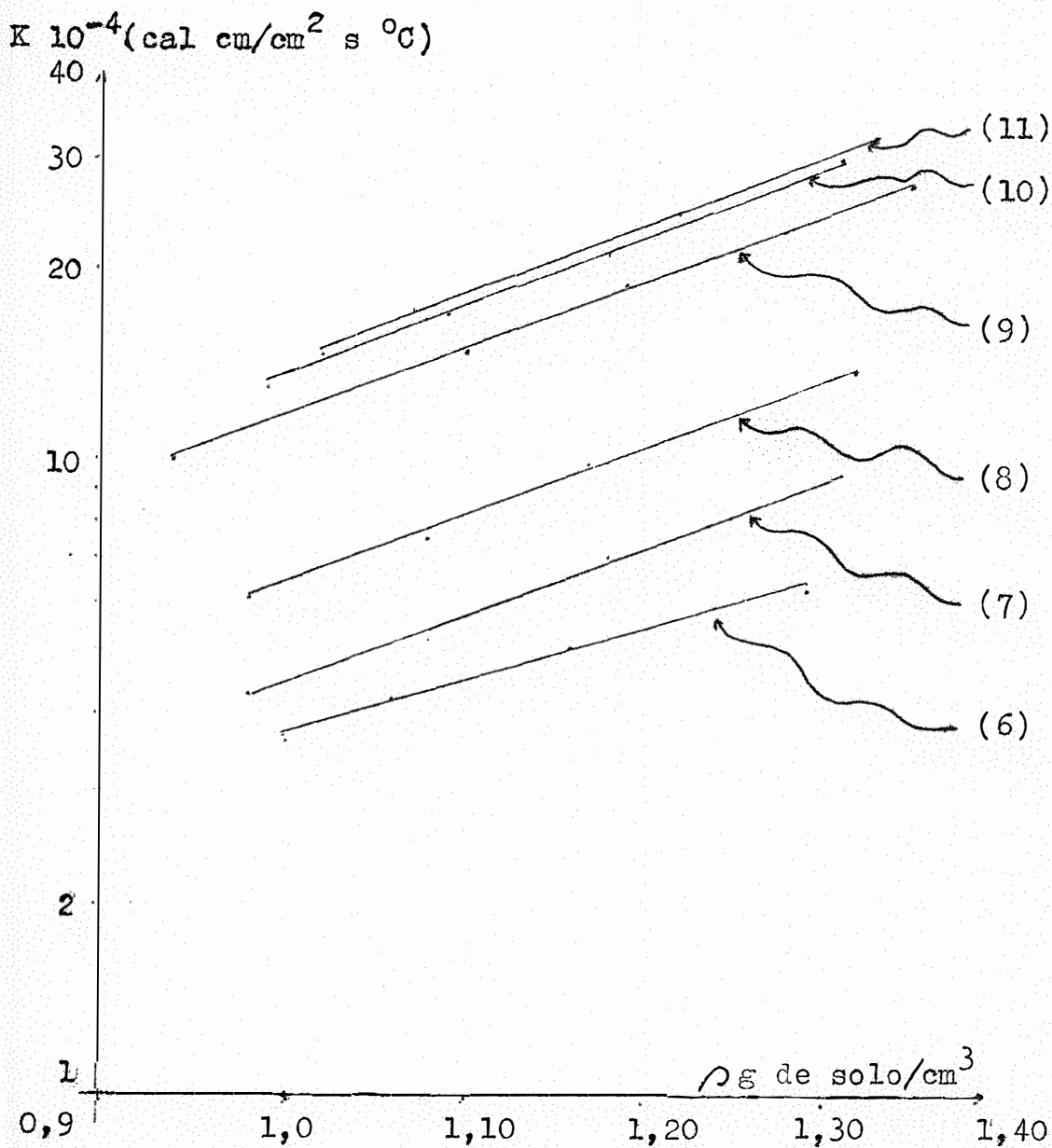


Fig. XI - Variação da condutividade térmica em função da densidade (Solo Luiz de Queiroz).

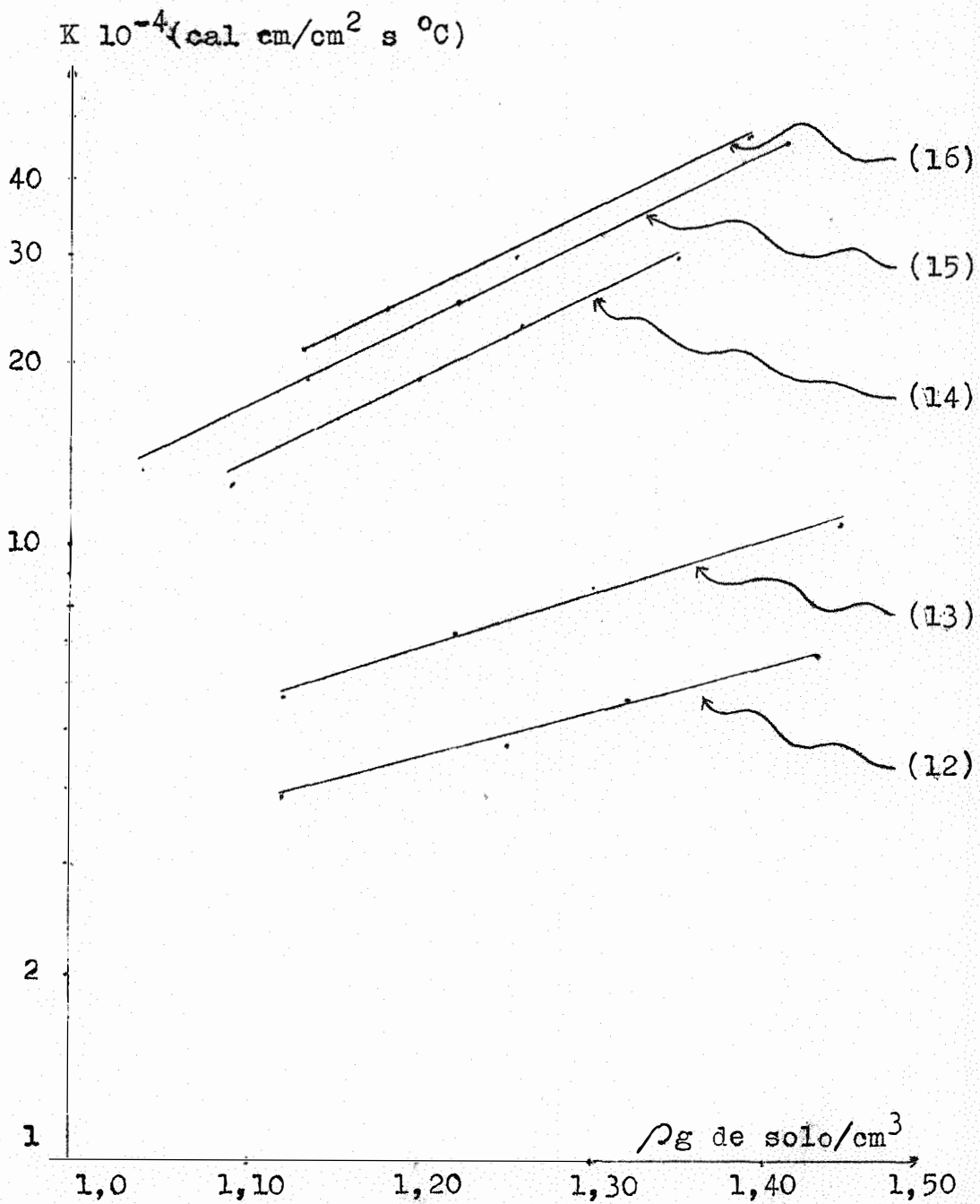


Fig. XII - Variação da condutividade térmica em função da densidade (Solo Série Quebra-Dente).

Para solo da série Luiz de Queiroz, equação (17), as densidades foram 1,10 ; 1,20 e 1,30.

Para solo da série Quebra-Dente, equação (18), as densidades foram 1,20 ; 1,30 e 1,40.

Os dados assim obtidos, analisados e colocados em gráfico semi-logarítmico para as séries de solo Luiz de Queiroz, Quebra-Dente (Figs. XIII e XIV) e log-log para a série Iracema (Fig. XV), permitiram estabelecer as relações analíticas entre condutividade térmica e umidade, sendo para as séries Luiz de Queiroz e Quebra Dente uma expressão da forma:

$$K = f(\log \mu)$$

e para a série Iracema uma expressão da forma:

$$K = f(10^b \log \mu)$$

sendo que para a série Iracema o coeficiente angular b é um coeficiente angular médio.

Cabe ainda ressaltar que as relações encontradas entre a condutividade térmica e a umidade, são válidas a partir de um certo teor de umidade, dependendo das propriedades do solo; assim, para solos da série - Quebra-Dente, as relações são válidas a partir de 4% de umidade; para solos da série Luiz de Queiroz, as relações são válidas a partir de 6,5% de umidade e para solos da série Iracema as relações são válidas a partir de 8,5% de umidade.

O efeito da água na condutividade térmica do solo em quantidades inferiores aos limites citados - acima, são insignificantes e a condutividade destes pode ser calculada a partir da expressão de solo sêco em estufa, isto é:

$$\text{Série Iracema} \quad K = 10^{-4} \left[0,870(10)^{0,726\rho} \right]$$

$$\text{Série Luiz de Queiroz} \quad K = 10^{-4} \left[0,503(10)^{0,853 \rho} \right]$$

$$\text{Série Quebra-Dente} \quad K = 10^{-4} \left[0,147(10)^{0,686 \rho} \right]$$

As equações das curvas que representam a condutividade térmica em função da densidade, encontram-se no Quadro 7.

6.3. Equação para Cálculo da Condutividade Térmica em Função da Densidade e Umidade do Solo

Com auxílio das expressões que permitem obter os valores de $K = f(\rho)$ e $K = h(\mu)$, procurou-se verificar a existência de uma expressão que correlacionasse $K = g(\rho, u)$.

Para tal, colocou-se num gráfico os valores da relação $\frac{K}{f(\rho)}$ nos eixos das ordenadas e $h(\mu)$ no eixo das abcissas (Figs. XVI, XVII e XVIII). Analizando-se os dados, verificou-se a existência de uma correlação linear ao nível de 1% entre $\frac{K}{f(\rho)}$ e $h(\mu)$ o que permitiu estabelecer as seguintes expressões:

$$\text{Solo Série Iraema} \quad K = 10^{-4} \left[0,0182(10)^{1,209 \log \mu} - 0,00216 \right] 10^{1,192 \rho}$$

$$\text{Solo Série Luiz de Queiroz} \quad K = 10^{-4} \left[1,275 \log \mu - 0,710 \right] 10^{1,071 \rho}$$

$$\text{Solo Série Quebra-Dente} \quad K = 10^{-4} \left[0,945 \log \mu - 0,445 \right] 10^{1,365 \rho}$$

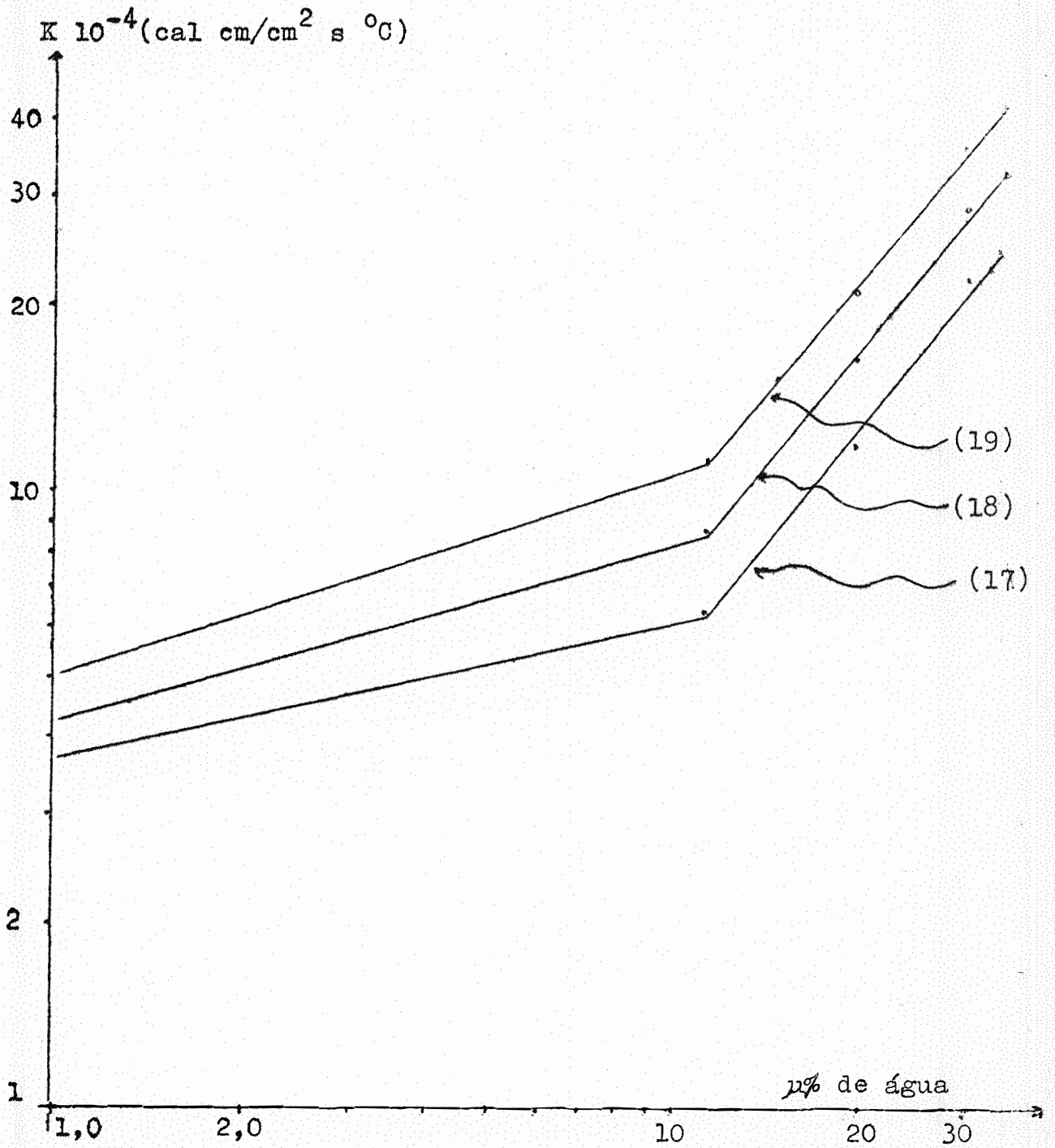


Fig. XV - Variação da condutividade térmica em função da umidade (Solo Iracema).

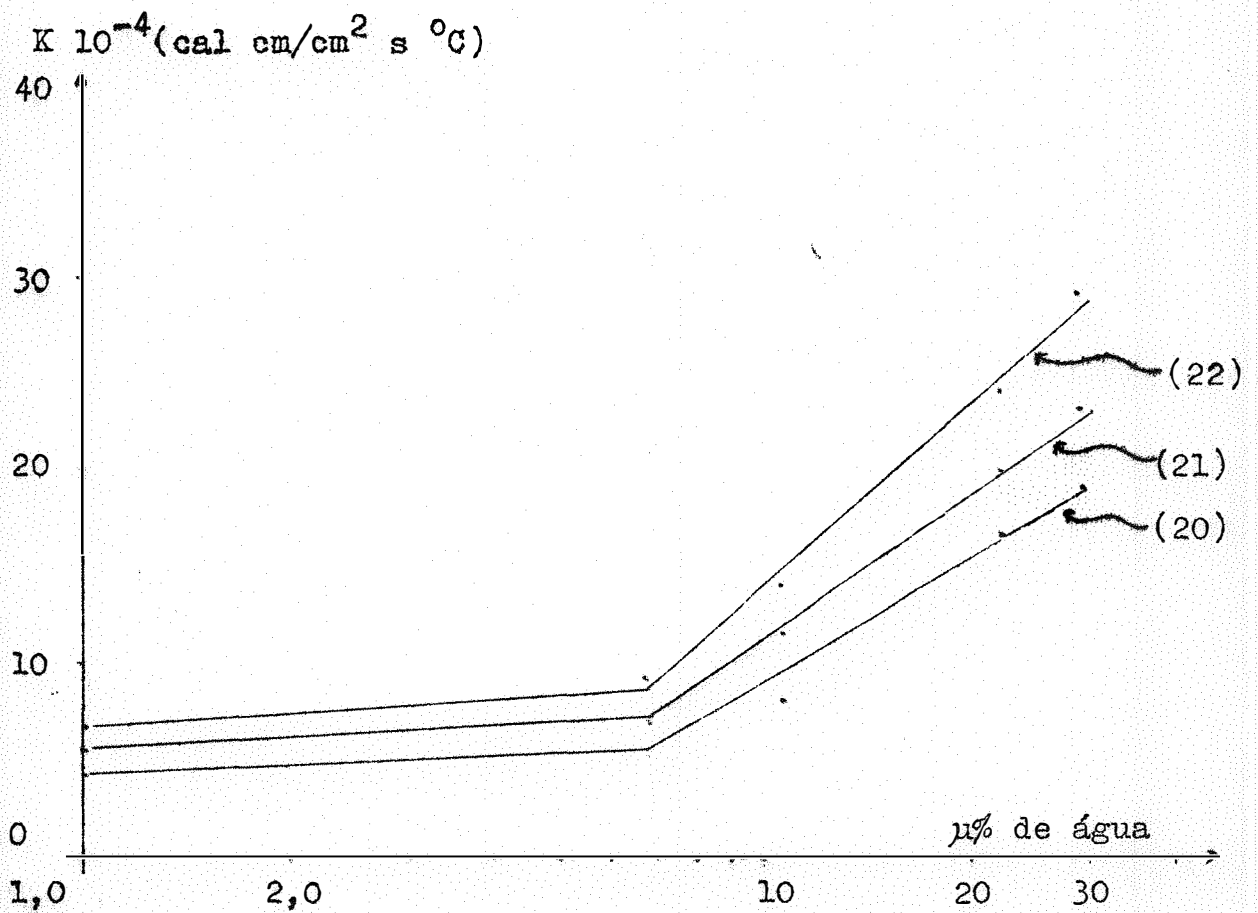


Fig. XIII- Variação da condutividade térmica em função da umidade ("Solo Luiz de Queiroz").

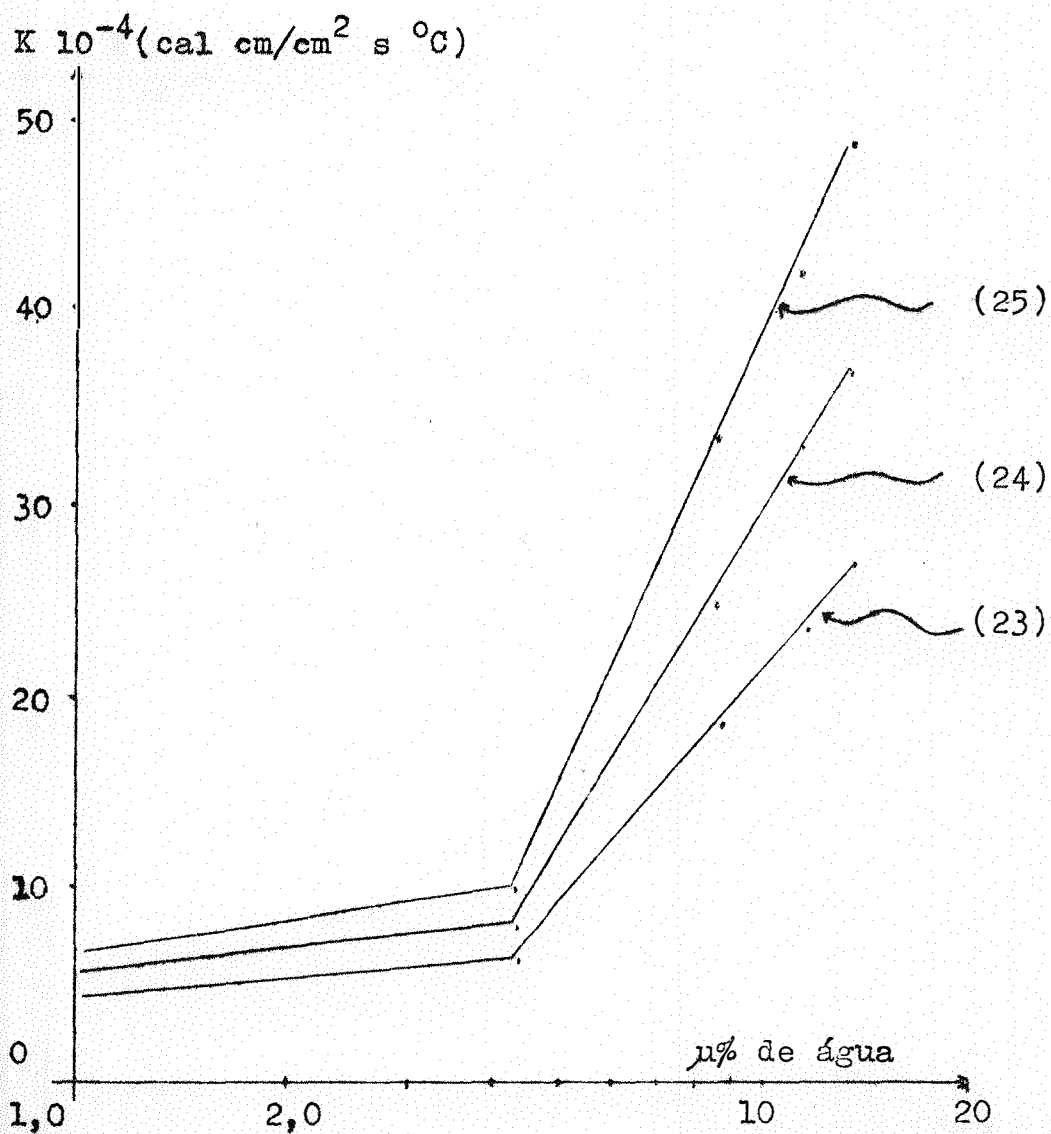


Fig. XIV - Variação da condutividade térmica em função da umidade (Solo Quebra-Dente).

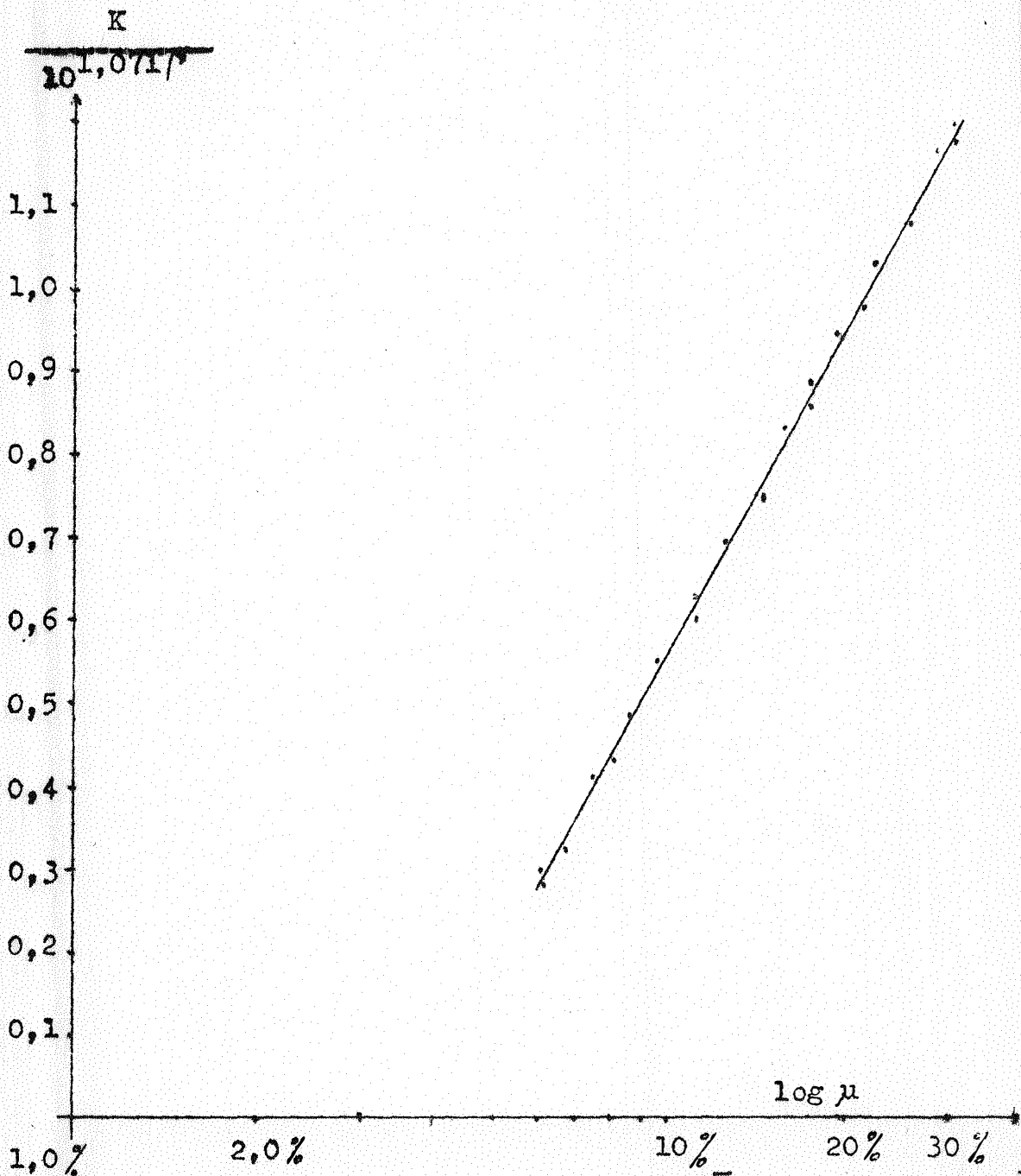


Fig. XVII - Gráfico da função: $K = [1,275 \log \mu - 0,710] 10^{1,0717}$
 (Solo Luiz de Queiroz)

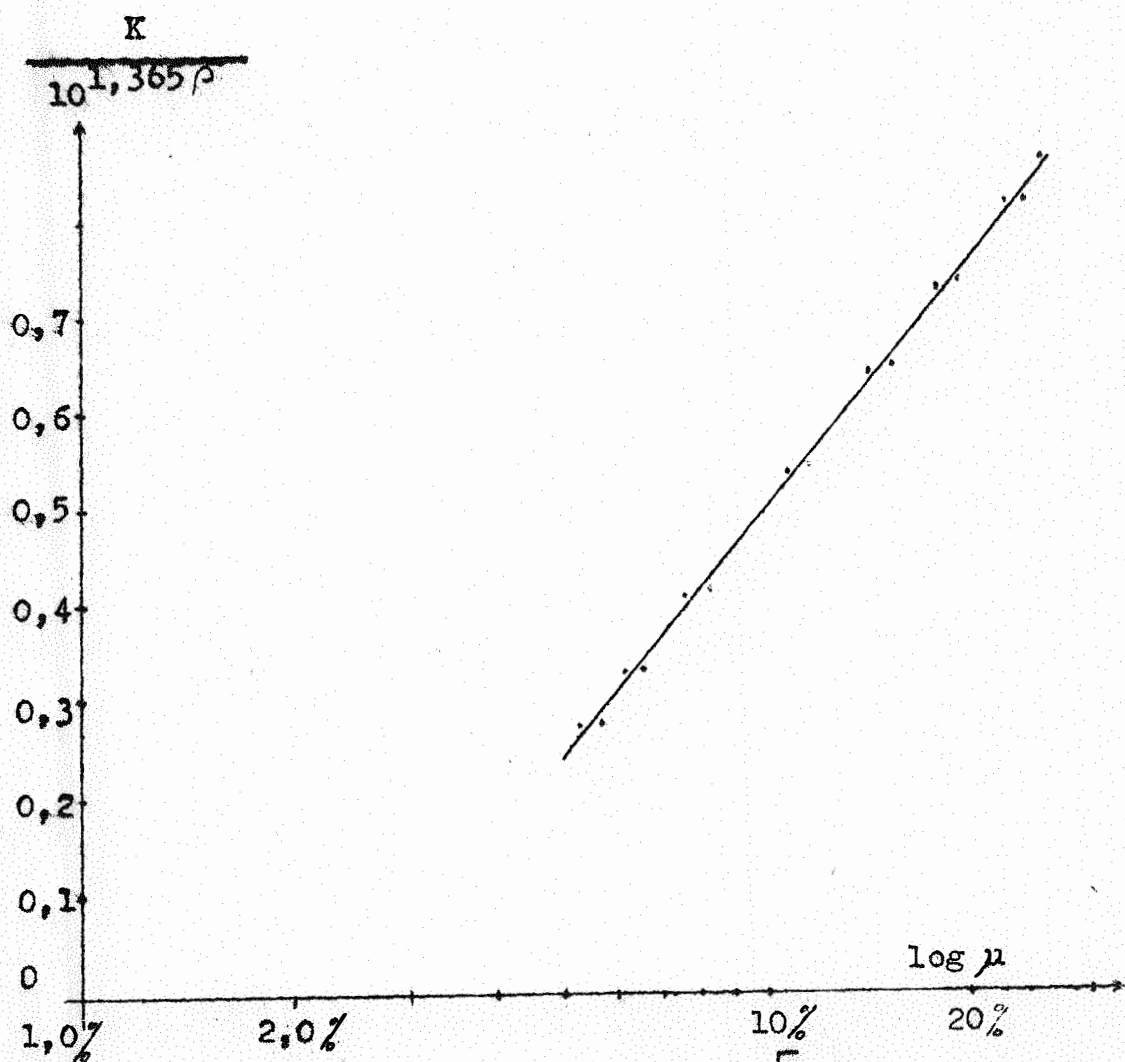


Fig. XVIII Gráfico da função: $K = [0,945 \log \mu - 0,445] 10^{1,365 \mu}$
 (Solo Quebra-Dente)

Quadro 7 - Equações das Curvas das Figs. X, XI, XII, XIII, XIV e XV.

Equações para o cálculo da condutividade térmica em função da densidade.

Série Iracema - Curvas		u
(1)	$K = 0,870(10)^{0,726\rho}$	0,0%
(2)	$K = 0,354(10)^{1,255\rho}$	11,30%
(3)	$K = 0,769(10)^{1,192\rho}$	20,00%
(4)	$K = 1,410(10)^{1,162\rho}$	30,20%
(5)	$K = 1,650(10)^{1,191\rho}$	34,10%
Série Luiz de Queiroz		
(6)	$K = 0,503(10)^{0,853\rho}$	0,0%
(7)	$K = 0,393(10)^{1,052\rho}$	6,75%
(8)	$K = 0,528(10)^{1,078\rho}$	10,68%
(9)	$K = 1,027(10)^{1,055\rho}$	22,34%
(10)	$K = 1,130(10)^{1,105\rho}$	26,18%
(11)	$K = 1,224(10)^{1,064\rho}$	29,73%
Série Quebra-Dente		
(12)	$K = 0,147(10)^{0,686\rho}$	0,0%
(13)	$K = 0,159(10)^{0,863\rho}$	4,38%
(14)	$K = 0,266(10)^{1,410\rho}$	8,68%
(15)	$K = 0,223(10)^{1,410\rho}$	11,52%
(16)	$K = 0,266(10)^{1,536\rho}$	13,80%
Equações para o cálculo da condutividade térmica em função da unidade.		
Série Iracema		
(17)	$K = 0,315(10)^{1,229 \log \mu}$	1,00
(18)	$K = 0,447(10)^{1,214 \log \mu}$	1,10
(19)	$K = 0,620(10)^{1,186 \log \mu}$	1,20
Série Luiz de Queiroz		
(20)	$K = 20,64 \log \mu - 11,78$	1,10
(21)	$K = 24,38 \log \mu - 13,23$	1,20
(22)	$K = 34,16 \log \mu - 20,85$	1,30
Série Quebra-Dente		
(23)	$K = 35,44 \log \mu - 16,25$	1,20
(24)	$K = 50,31 \log \mu - 24,20$	1,30
(25)	$K = 63,98 \log \mu - 31,33$	1,40

7. CONCLUSÃO

-22-

1) As equações para calcular o valor da condutividade térmica em função da umidade e densidade do solo são:

$$\text{Solo Série Iracema} \quad K = 10^{-4} \left[0,0182(10)^{1,209 \log \mu} - 0,00216 \right] 10^{1,192 \rho}$$

$$\text{Solo Série Luiz de Queiroz} \quad K = 10^{-4} \left[1,275 \log \mu - 0,710 \right] 10^{1,071 \rho}$$

$$\text{Solo Série Quebra-Dente} \quad K = 10^{-4} \left[0,945 \log \mu - 0,445 \right] 10^{1,365 \rho}$$

2) As equações para calcular o valor da condutividade térmica do solo em função da densidade são:

$$\text{Série Iracema:} \quad K = 10^{-4} \left[0,870(10)^{0,726 \rho} \right]$$

$$\text{Série Luiz de Queiroz:} \quad K = 10^{-4} \left[0,503(10)^{0,853 \rho} \right]$$

$$\text{Série Quebra-Dente:} \quad K = 10^{-4} \left[0,147(10)^{0,686 \rho} \right]$$

onde a condutividade térmica é expressa em $\frac{\text{cal cm}}{\text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}}$
e umidade em $\frac{\text{g de água}}{\text{g de solo}} \times 100$ e a densidade em g/cm^3 .

8. SUMÁRIO

No presente trabalho estudou-se a condutividade térmica do solo como uma função de sua densidade e de sua umidade. São apresentadas as equações que relacionam a condutividade térmica com a densidade e umidade para três tipos de solo de características físicas e químicas diferentes.

Para as determinações da condutividade térmica do solo utilizou-se de um fluxo radial de calor, em equilíbrio dinâmico.

9. SUMMARY

The thermal conductivity of soils as a function of soil moisture and soil density are the main subject of the studies performed by the author in this research project.

As a result of those studies the author developed equations showing the relation of thermal conductivity with moisture and density for three types of soils with different physical and chemical characteristics.

A radial heat flux in a steady state system were used for the soil heat conductivity determinations.

10. LITERATURA CITADA E CONSULTADA

- 1) ALOCCO, 1945 - Física Prática. IV edição. Riccardo Zannoni, Padova.
- 2) BAVER, L.D., 1956 - Soil Physics. Third edition.
- 3) DEACON, F.L., 1950 - The measurement and recording of the flow into the soil. Roy. Met. Soc.
- 4) FISKEL, R.L., 1964 - Differential thermal analysis of some clays and Florida soil clays. Soil Crop.
- 5) GEBHART, B., 1964 - Heat transfer. Mc Graw-Hill Book Company, Inc.
- 6) GEMANTE, A.A., 1950 - Thermal conductivity of soils. J. Appl. Phys. 21:750-752.
- 7) HOOPER, F.C., 1952 - Thermal proprieties of soil. - Prob. Council.
- 8) HSU, S.T., 1963 - Engineering heat transfer. D.Van Nostrand Company, Inc.
- 9) IBELE, W., 1963 - Modern developments in heat transfer. Academic Press, New York and London.
- 10) JACKSON, R.D., 1963 - Temperature and soil-water diffusivity. Soil Sci. Soc. Amer. p.363-366.
- 11) _____, 1965 - Heat transfer. Agronomy.
- 12) KERSTEN, 1952 - Thermal proprieties of soil. Bulletin of the University of Minnesota, nº 28.

- 13) KULIK, N.F., 1964 - Effects of thermal gradients in redistribution of water vapor in soils. Soviet Soils Science.
- 14) LAW, C. & JAEGER, J.C., 1952 - Conduction of heat in solids. Oxford at the Charendon Press.
- 15) MAKS BANDI, 1965 - The effect of moisture tension and other physical properties on thermal conductivity and diffusivity of soil. Diss. Abs.
- 16) MIKHEJER - Fundamentals of heat transfer.
- 17) MISENER, A.D., 1952 - An absolute method of determining thermal conductivity of soil. Natl. Res. Council.
- 18) OBERT, E.F. & YOUNG, R.L., 1962 - Thermodynamics and heat transfer. Mac Graw-Hill Book Company, Inc.
- 19) ONCHUKOV, D.N., 1963 - Laboratory studies of the transfer of heat and water in soil. Soviet Soil Science.
- 20) RANZANI, G., 1966 - Carta de solos do município de Piracicaba.
- 21) REICHARDT, K., 1965 - Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo. Tese de doutoramento.
- 22) TAYLOR, S.A., 1964 - Linear equation for the flow of matter and energy in a continuous soil system. Soil Sci. Soc. Amer. proc. 28(2), 167-172.

- 23) VRIES, 1952 - Some results of field determination of the moisture of soil from measurement. Soil Sci. Soc. Amer.
- 24) ———, 1963 - Thermal properties of soil. Physics of plant environment. p. 210-235.
- 25) WIJK, W.R., 1963 - General temperature variation in homogeneous soil. Physics of plant environment. p. 144-170.
- 26) ———, 1964 - Determination of thermal conductivity and heat capacity of soil near surface. Soil Sci. Amer. proc. 28(4), 461-464.
- 27) ———, 1967 - New method for measuring heat flux density at surface of soil on of other bodies. Nature 213 (5072).