


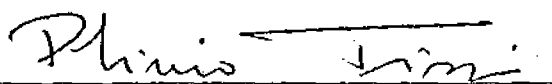


1. Publicação nº <i>INPE-4376-TDL/302</i>	2. Versão	3. Data <i>Out. 1987</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>PG/DEO</i>	Programa <i>FRH/SER</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>RADIOMETRIA PERMITIVIDADE COMPLEXA</i> <i>UMIDADE SOLOS</i> <i>MICROONDAS SENSORIAMENTO REMOTO</i>			
7. C.D.U.: <i>681.3.019</i>			
8. Título <i>INPE-4376-TDL/302</i> <i>CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DE SEIS SOLOS NA FAIXA-X DE MICROONDAS, ATRAVÉS DE MEDIÇÕES DA PERMITIVIDADE COMPLEXA</i>		10. Páginas: <i>266</i>	
		11. Última página: <i>D.37</i>	
		12. Revisada por  <i>Amauri Silva Montes</i>	
9. Autoria <i>Ulf Walter Palme</i>			13. Autorizada por  <i>Marco Antonio Raupp</i> Diretor Geral
Assinatura responsável 			
14. Resumo/Notas <p><i>A estimativa e o monitoramento da unidade atual de solos agrícolas em áreas extensas através de técnicas passivas (ou ativas) de sensoriamento remoto nas faixas de microondas, somente é possível a partir da compreensão do comportamento da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da unidade de solos. Através da medição de ϵ_r^* de amostras de material de solos em diferentes graus de umidade em laboratório, caracterizou-se dielectricamente seis solos de importância agrícola (PV_2, LV_3, LRd, LE_1, SAP, SC) na Faixa-X de microondas. As medições de ϵ_r^* permitiram, utilizando-se um modelo teórico e programas computacionais desenvolvidos, a estimativa das características emissivas destes solos que seriam esperadas com a utilização do Radiômetro de Microondas na Faixa-X desenvolvido pelo INPE. Os resultados encontrados, inéditos para solos de regiões tropicais, mostram que somente as características e propriedades físicas não são suficientes para explicar o comportamento de ϵ_r^* em função de umidade, havendo contribuição das propriedades químicas e/ou mineralógicas, e ainda que ϵ_r^* em função da umidade do solo depende da classe de solo.</i></p>			
15. Observações <i>Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em 17.12.86.</i>			

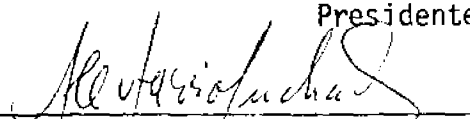
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Plínio Tissi




Presidente

Dr. Antonio Octavio Martins de Andrade



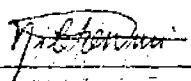
Orientador

Engº Amauri Silva Montes, Mestre



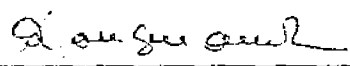
Co-Orientador

Dr. Nilton Curi



Membro da Banca
-convidado-

Prof. Pierre Kaufmann



Membro da Banca

Candidato: Ulf Walter Palme

São José dos Campos, 17 de dezembro de 1986

C I T A Ç Õ E S

"Não há nada em toda a natureza que seja mais importante ou mereça mais atenção do que o solo. Verdadeiramente, é o solo que faz o mundo ser um ambiente agradável e amigo para a humanidade. É o solo que nutre e prevê para toda a natureza, toda a Criação depende do solo que é o supremo alicerce da nossa existência."

Friedrich Albert Fallou, 1862

"When you can measure what you are speaking about and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager, unsatisfactory kind."

Lord Kelvin
1824-1907

À Yara, esposa, amiga, mãe, pelo
incansável apoio e carinho ao
longo destes anos, e ao nosso fi
lho André dedico este trabalho.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Doutor Antônio Octávio Martins de Andrade pela orientação e ensinamentos e pela amizade e interesse demonstrados durante as longas horas de atividades em laboratório aceitando o desafio de, pela primeira vez, medir e obter dados confiáveis da permitividade complexa de amostras de material de solos.

Em especial ao Engenheiro Amauri Silva Montes pela orientação, pelos valorosos ensinamentos, pela grande amizade e sobretudo pela grande lição de perseverança, acreditando sempre que um trabalho desta natureza deveria ser realizado por um Engenheiro Agrônomo.

Ao Doutor Nilton Curi pelos ensinamentos, pela amizade e por ter aceito com entusiasmo e dedicação participar do trabalho.

Ao Prof. Pierre Kaufmann, Chefe do Departamento de Radioastronomia, pelo incentivo e por ter colocado à disposição a infraestrutura existente no DRA, principalmente do ROI/ATIBAIA.

Ao Eng. Ricardo E. Schaal pelo interesse efetivo no desenvolvimento do Radiometro de Microondas, pela constante preocupação de aperfeiçoar o Radiometro, pelos valorosos ensinamentos quando da realização de testes e calibrações no ROI/ATIBAIA e sobretudo pela amizade.

A Doutor Plínio Tissi, Chefe do Departamento de Telecomunicações Espaciais, pelo interesse, ensinamentos e por ter permitido a participação de membros de seu Departamento - Eng. Carlos A.I. Miranda e Eng. Paulo M. Marshall - na construção e desenvolvimento de subsistemas para o Radiometro de Microondas, aos quais também agradeço.

Aos Físicos Francisco Rimoli Conde e Sebastião Claudino da Silva pelo constante incentivo, auxílio e interesse, e pela grande amizade demonstrada.

À Engª Eletrônica Cristiane Bouanain Georges e aos técnicos Edson L. Bortolossi e Robinson L. Falsarella pela manutenção do Radiometro e pelo grande auxílio durante as atividades no ROI/ATIBAIA e pela amizade.

Ao Físico José Luiz Homor pelo grande auxílio quando da elaboração dos programas computacionais e pela amizade.

Aos Doutores Hermann Kux e Mario Valério Filho pelo auxílio na coleta de amostras de material de solo.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais, na pessoa do Dr. Demétrio Bastos Netto, pelo suporte financeiro para a realização das medições junto ao IMT.

Ao DAEE/Pindamonhangaba (Campo de Pesquisas), na pessoa do Dr. Norberto Leite, por ter possibilitado a utilização de áreas da Fazenda Experimental Água Preta, bem como de sua infraestrutura, quando da realização de Missões de Campo com o RMO.

Às estatísticas Thelma Krug de Moraes e Corina da C. Freitas Yanasse pelo grande auxílio quando da análise estatística dos dados.

À Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), Departamento de Ciência do Solo, pelas análises físicas e químicas das amostras de material de solos.

À Desenhista Industrial Lourdes Beatriz Silva (Tatiza) pelo capricho na confecção do material ilustrativo do presente trabalho.

À Secretária Maria Auxiliadora Bonnafé (Dorô) pelo serviço de datilografia da versão preliminar e Luzia Galvão de Faria da versão final deste trabalho.

A todos aqueles que acreditaram e contribuíram para a conclusão do trabalho.

P R E F Á C I O

Cumprindo ao autor esclarecer que, por ser este o primeiro trabalho em Radiometria Passiva de Microondas aplicada à Agricultura no Brasil e por ser o público de maior interesse composto na sua grande maioria por pessoas da área agrícola, que não estão familiarizadas com as técnicas de sensoriamento remoto nas faixas de microondas, houve uma preocupação de reforçar certos trechos do trabalho no sentido de elucidar dúvidas que pudessem surgir.

A B S T R A C T

Estimating and monitoring up-to-date soil moisture conditions over extensive areas through passive (or active) microwave remote sensing techniques requires the knowledge of the complex relative permittivity (ϵ_r^*) in function of soil moisture. X-Band measurements of ϵ_r^* for different moisture conditions were made in laboratory for soil samples of six important Soils (PV₂, LV₃, LR_d, LE₁, SAP and Sc). Using a theoretical model and computational programmes developed, these measurements allowed estimates of the emissive characteristics of the soils that would be expected with the X-Band Microwave Radiometer build at INPE. The results, new, for soils from tropical regions, showed that only the physical characteristics and properties of the soils are not sufficient to explain the behaviour of ϵ_r^* in function of soil moisture, indicating that the chemical and/or mineralogical properties of the soils do have an important contribution. The results also showed that ϵ_r^* in function of soil moisture depends on soil class.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	11
2.1 - Teoria eletromagnética	11
2.1.1 - Dielétrico ideal	11
2.1.2 - Dielétrico com perdas	17
2.2 - Emissividade via permitividade complexa	21
2.3 - Emissividade via radiômetro de microondas - RMO	27
2.4 - Potência via permitividade complexa versus potência via radiômetro de microondas	38
2.5 - Emissividade hemisférica	41
2.6 - Propriedades dielétricas de solos	42
2.7 - Profundidade de penetração da radiação	52
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS</u>	57
3.1 - Descrição das classes de solo	57
3.1.1 - Solos da Quadricula de Campinas	57
3.1.2 - Solos da Bacia de Taubaté	66
3.2 - Coleta das amostras de material de solo	69
3.3 - Determinação da permitividade complexa dos solos	72
3.4 - Radiômetro de microondas - RMO	75
3.5 - Determinação do ângulo efetivo de resolução espacial da antena do RMO	81
3.6 - Modelos estatísticos utilizados	83
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISE</u>	91
4.1 - Resultados das medições de ϵ_F^* e cálculos das quantidades físicas de interesse	91
4.2 - Resultados da análise estatística	93

	<u>Pág.</u>
4.3 - Ângulo efetivo de resolução espacial da antena do RMO	146
4.4 - Análise dos resultados das medições de ϵ_r^* e quantidades físicas associadas	148
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	163
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
APÊNDICE A - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DE MATERIAL DE SOLOS	
APÊNDICE B - EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS ÀS QUANTIDADES FÍSICAS CONSIDERADAS EM FUNÇÃO DE U_V , PARA OS DIFERENTES SOLOS	
APÊNDICE C - PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PARA VERIFICAÇÃO DA VALIDADE DOS MODELOS ESTATÍSTICOS (EXEMPLO SOLO SAP)	
APÊNDICE D - ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS (EXEMPLO SOLO SAP)	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Efeitos das nuvens na transmissão das microondas	2
1.2 - Efeito da chuva na transmissão das microondas	3
1.3 - Atenuação atmosférica devido a gases, chuva e neblina	4
2.1 - Representação esquemática da emissividade espectral de um corpo real sem reflexões múltiplas internas	22
2.2 - Influência do ângulo de incidência na interação da radiação com um meio dielétrico homogêneo com perdas	25
2.3 - Comparação entre a lei de Planck e a lei de Rayleigh-Jeans.	29
2.4 - Relação entre a temperatura de antena (T_A), temperatura aparente (T_{Ap}) e temperatura de brilho (T_B)	32
2.5 - Representação esquemática para o cálculo da potência de ruído na entrada do receptor	34
2.6 - Relação entre T_B e T_A para visada nadir próxima do alvo ...	36
2.7 - Representação gráfica da fórmula de Debye em um plano	44
2.8 - Comportamento de ϵ_r' e ϵ_r'' de água destilada a 20°C, de 0,3 a 300 GHz	45
2.9 - Comportamento de ϵ_r' para solos argilosos e arenosos em função da umidade volumétrica do solo	50
2.10 - Representação esquemática do espessamento progressivo da película de água em um macroporo, da posição da água de coesão, higroscópica, capilar, gravitacional e das diversas constantes de umidade	52
3.1 - Parte do mapa de levantamento pedológico semidetalhado dos solos do estado de São Paulo - Quadrícula de Campinas (escala aproximada de 1:100 000), com indicação dos locais onde foram coletadas as amostras de material de solo	70
3.2 - Planta esquemática da fazenda Água Preta (estação experimental DAEE/Pindamonhangaba) com as classes de solos de ocorrência e indicação dos locais onde foram coletadas amostras de material dos solos SAP e SC	71
3.3 - Esquema do sistema de medição da permitividade complexa de amostras de material de solo	73
3.4 - Diagrama de radiação da antena circular corrugada em 10,62 GHz	80
3.5 - Gráfico da potência relativa em função do ângulo θ do diagrama de radiação da antena do RMO	81
3.6 - Gráficos de funções linearizáveis	86

	<u>Pág.</u>
3.7 - Plotagem dos quatro conjuntos de dados da Tabela 3.3 e suas respectivas retas de ajuste	88
3.8 - Gráficos de padrões da plotagem dos resíduos versus a variável independente	89
4.1 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade (U_V), para o solo PV ₂	110
4.2 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo PV ₂	111
4.3 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo PV ₂	112
4.4 - Gráfico da profundidade de penetração (P(e)) e de P(7e) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo PV ₂	113
4.5 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$), em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo PV ₂	114
4.6 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo PV ₂	115
4.7 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV ₃	116
4.8 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV ₃	117
4.9 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV ₃	118
4.10 - Gráfico da profundidade de penetração (P(e)) e de P(7e) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV ₃	119
4.11 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV ₃	120
4.12 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV ₃	121
4.13 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd	122
4.14 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd	123
4.15 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd	124
4.16 - Gráfico da profundidade de penetração (P(e)) e de P(7e) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd	125
4.17 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd	126
4.18 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd	127

	<u>Pág.</u>
4.19 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LE ₁	128
4.20 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LE ₁	129
4.21 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LE ₁	130
4.22 - Gráfico da profundidade de penetração ($P(e)$) e de $P(7e)$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LE ₁	131
4.23 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LE ₁	132
4.24 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LE ₁	133
4.25 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SAP	134
4.26 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SAP	135
4.27 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SAP	136
4.28 - Gráfico da profundidade de penetração ($P(e)$) e de $P(7e)$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SAP	137
4.29 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SAP	138
4.30 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SAP	139
4.31 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SC	140
4.32 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SC	141
4.33 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SC	142
4.34 - Gráfico da profundidade de penetração ($P(e)$) e de $P(7e)$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SC	143
4.35 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SC	144
4.36 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo SC	145
4.37 - Gráfico dos resultados encontrados para a potência relativa em função do ângulo θ do diagrama de radiação da antena do RMO. Média dos 6 solos e água	147

	<u>Pág.</u>
4.38 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo PV ₂ seco e com U _γ de 28,8%	155
4.39 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo LV ₃ seco e com U _γ de 30,0%	156
4.40 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo LRd seco e com U _γ de 31,0%	157
4.41 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo LE ₁ seco e com U _γ de 30,0%	158
4.42 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo SAP seco e com U _γ de 30,2%	159
4.43 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo SC seco e com U _γ de 29,9%	160
4.44 - Gráfico polar da emissividade direcional para a água	161

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Características técnicas do radiômetro com antena	77
3.2 - Valores normalizados de $F_n(\theta)$ da antena circular corrugada do RMO	78
3.3 - Quatro conjuntos de dados com mesma estatística sumária ...	88
4.1 - Caracterização das amostras e resultados encontrados para a classe de solo PV ₂	94
4.2 - e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_V para o solo PV ₂	95
4.3 - Caracterização das amostras e resultados encontrados para a classe de solo LV ₃	96
4.4 - e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_V para o solo LV ₃	97
4.5 - Caracterização das amostras e resultados encontrados para a classe de solo LRd	98
4.6 - e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_V para o solo LRd	99
4.7 - Caracterização das amostras e resultados encontrados para a classe de solo LE ₁	100
4.8 - e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_V para o solo LE ₁	101
4.9 - Caracterização das amostras e resultados encontrados para a classe de solo SAP	102
4.10 - e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_V para o solo SAP	104
4.11 - Caracterização das amostras e resultados encontrados para a classe de solo SC	105
4.12 - e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_V para o solo SC	107
4.13 - Caracterização da amostra e resultados encontrados para a água	108
4.14 - Modelos estatísticos utilizados para cada uma das quantidades físicas das diferentes classes de solo	109

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ef}	= Abertura efetiva da antena, m^2
B	= Banda de RF, Hz
B	= Brilho ou Brilhância, $W m^{-2} sr^{-1}$
B_{CN}	= Brilho do corpo negro, $W m^{-2} sr^{-1}$
B_f	= Brilho espectral do corpo negro, $W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$
c	= Velocidade da luz no meio de propagação, $m.s^{-1}$
c_o	= Velocidade da luz no vácuo, $2,99 \times 10^8 m.s^{-1}$
e	= Emissividade
e_{hem}	= Emissividade hemisférica
$e(\theta)$	= Emissividade direcional em θ
$e(0)$	= Emissividade para $\theta = 0$
$e(\bar{\theta})$	= Emissividade para o ângulo efetivo de resolução espacial da antena do RMO.
e_λ	= Emissividade espectral
f	= Frequência, Hz
F_n	= Padrão de ganho normalizado da antena do RMO
h	= Constante de Planck, $6,62 \times 10^{-34} J.s$
k	= Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$
k_λ	= Constante de absorção espectral do meio
K	= Fator de propagação no meio, m^{-1}
K_o	= Fator de propagação no vácuo, m^{-1}

L	= Espessura da amostra de material de solo, mm.
m_a	= Massa de água, g
m_s	= Massa de material de solo seco, g
n	= Índice de refração
n^*	= Índice de refração complexo
n_λ	= Índice de refração espectral do meio
P_{cn}	= Potência emitida pelo corpo negro, W
$P(e)$	= Profundidade de penetração da radiação, m
$P(7e)$	= Profundidade de penetração de 95% da radiação, m
P_i	= Potência incidente, W
$P(\bar{\theta})$	= Potência medida correspondente ao ângulo de resolução espacial efetiva da antena do RMO
r	= Refletividade
$r(\theta)$	= Refletividade direcional em θ
r_λ	= Refletividade espectral
S	= Sensibilidade do RMO, K
S_e	= Superfície específica, $m^2 \cdot g^{-1}$
T	= Temperatura absoluta, K
T_{AA}	= Emissão atmosférica ascendente na direção da antena, K
T_{AD}	= Emissão atmosférica descendente, K
T_{AP}	= Temperatura Aparente, K
T_B	= Temperatura de Brilho ou Temperatura de Brilhância, K

T_{ES}	= Radiação espalhada na direção da antena, K
T_R	= Temperatura do receptor, K
T_{sys}	= Temperatura de sistema, K
U_g	= Umidade gravimétrica do solo, $g.g^{-1}$
U_V	= Umidade volumétrica, $g.cm^{-3}$
V_S	= Voltagem de saída, V
α	= Coeficiente de absorção do meio, m^{-1}
$\alpha_{1,2}$	= Constante de absorção do meio 1 e 2, respectivamente, m^{-1}
α_λ	= Absortância espectral
β	= Constante de fase do meio
Γ	= Coeficiente de propagação complexo do meio
$tg\delta$	= Tangente de perda
ϵ	= Permitividade absoluta do meio, $F.m^{-1}$
ϵ_0	= Permitividade do vácuo, $8,85 \times 10^{-12} F.m^{-1}$
ϵ_r	= Permitividade relativa
ϵ^*	= Permitividade absoluta complexa, $F.m^{-1}$
ϵ_r^*	= Permittividade complexa relativa
ϵ'	= Constante dielétrica absoluta, $F.m^{-1}$
ϵ''	= Fator de perda absoluto, $F.m^{-1}$
ϵ'_r	= Constante dielétrica relativa
ϵ''_r	= Fator de perda relativo
ϵ'_∞	= Valor de ϵ' para $\omega\tau > 1$

ϵ'_S	= Valor de ϵ' para $\omega\tau < 1$
θ	= Ângulo zenital, rad.
$\bar{\theta}$	= Ângulo efetivo de resolução espacial da antena do RMO, rad.
κ_λ	= Coeficiente de extinção, m^{-1}
λ	= Comprimento de onda, μm
μ	= Permeabilidade magnética absoluta, $H.m^{-1}$
μ_0	= Permeabilidade magnética do vácuo, $4\pi \times 10^{-7} H.m^{-1}$
μ_r	= Permeabilidade magnética relativa
ν	= Freqüência, Hz
ρ_a	= Densidade aparente, $g.cm^{-3}$
ρ_λ	= Reflectância espectral
$\rho_{1,2}$	= Refletividade perpendicular e paralela ao plano de incidência da radiação, respectivamente
σ	= Condutividade elétrica, $S.m^{-1}$
ϕ	= Ângulo azimutal, rad.
Ω	= Ângulo sólido, sr.
Ω_p	= Ângulo sólido padrão, sr.
ω	= Freqüência angular, $rad.S^{-1}$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.

Nos últimos anos tem havido um interesse crescente na utilização das faixas de microondas em Sensoriamento Remoto. Historicamente, somente a partir da década de 1960 é que estas faixas começaram a ser utilizadas, quando já havia experiência no emprego de fotografias aéreas. Em 1973 com o advento do lançamento do primeiro satélite da série LANDSAT (ERTS-1) de avaliação de recursos naturais, deu-se início a uma nova era em Sensoriamento Remoto que compreendia a aquisição de imagens multiespectrais a nível orbital. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, no que se refere às resoluções espaciais, espectrais e radiométricas, dos sistemas atualmente em operação terem sido significativos, as faixas do espectro eletromagnético visível e infravermelho próximo, em que operam a maioria dos satélites atuais, apresentaram problemas sérios relativos à resolução temporal. As limitações impostas pela freqüente cobertura de nuvens, principalmente em regiões tropicais, fazem com que a freqüência efetiva de aquisição de dados seja baixa.

Este fato é sem dúvida um dos grandes motivos que levaram alguns países a intensificarem pesquisas em microondas, já que nestas faixas a absorção atmosférica é baixa. Nuvens de gelo, densas o suficiente para inutilizar a fotografia aérea convencional, bem como outros sistemas de sensoramento remoto (LANDSAT, SPOT) amplamente utilizados, são prati

camente transparentes em quase todas as frequências do espectro de microondas (ver Figura 1.1).

A atenuação das microondas no caso de chuva é mais pronunciada, sendo no entanto para comprimentos de onda maiores que 5cm menor que 10% (ver Figura 1.2).

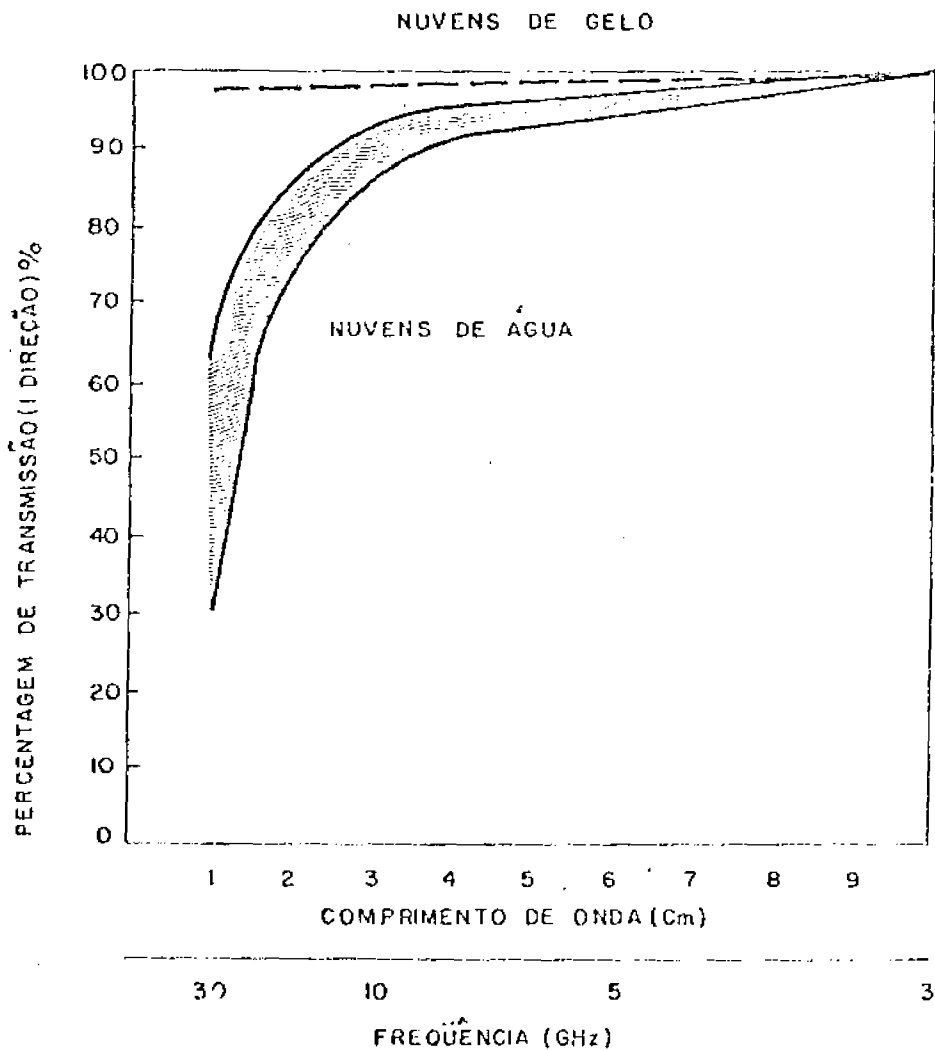


Fig. 1.1 - Efeitos das nuvens na transmissão das microondas (Ulaby, 1981).

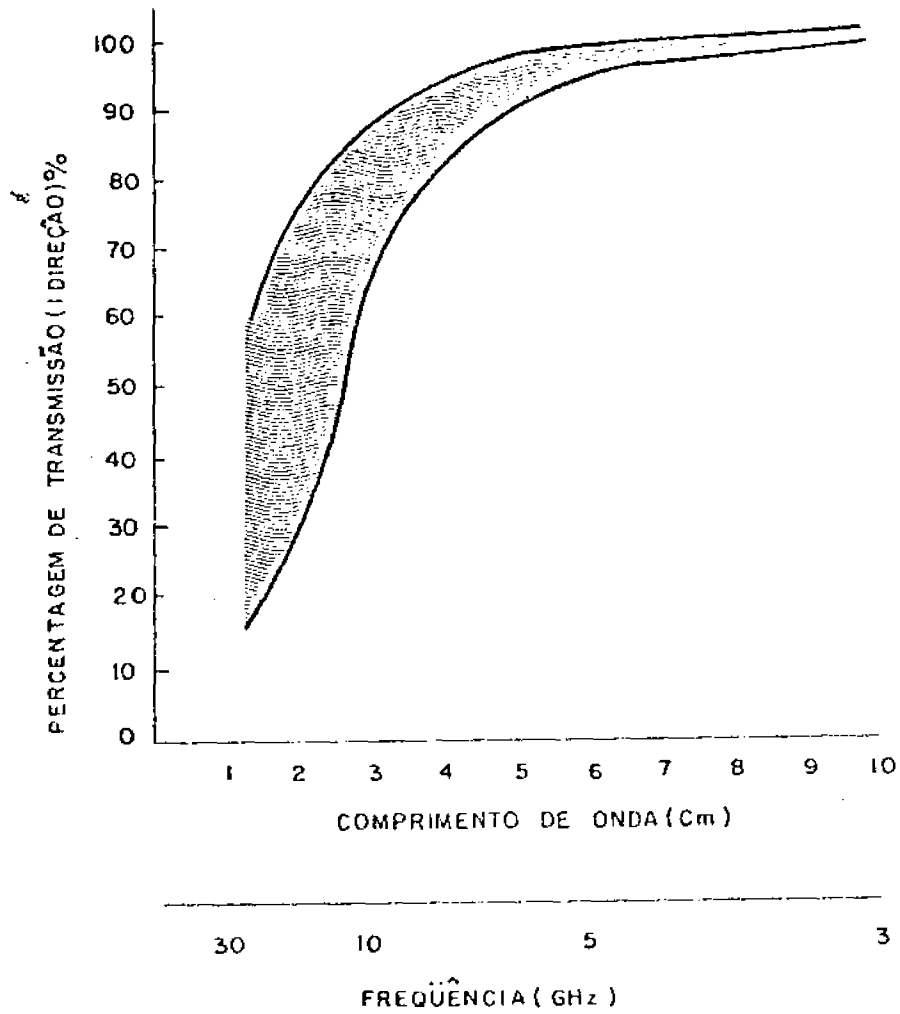


Fig. 1.2 - Efeito da chuva na transmissão das microondas (Ulaby, 1981).

A Figura 1.3 ilustra a atenuação atmosférica (dB/km) em função de frequência sob diversas condições de tempo e ga-

ses atmosféricos para parte do espectro de microondas, ondas submilimétricas, faixas do infravermelho e faixa do visível.

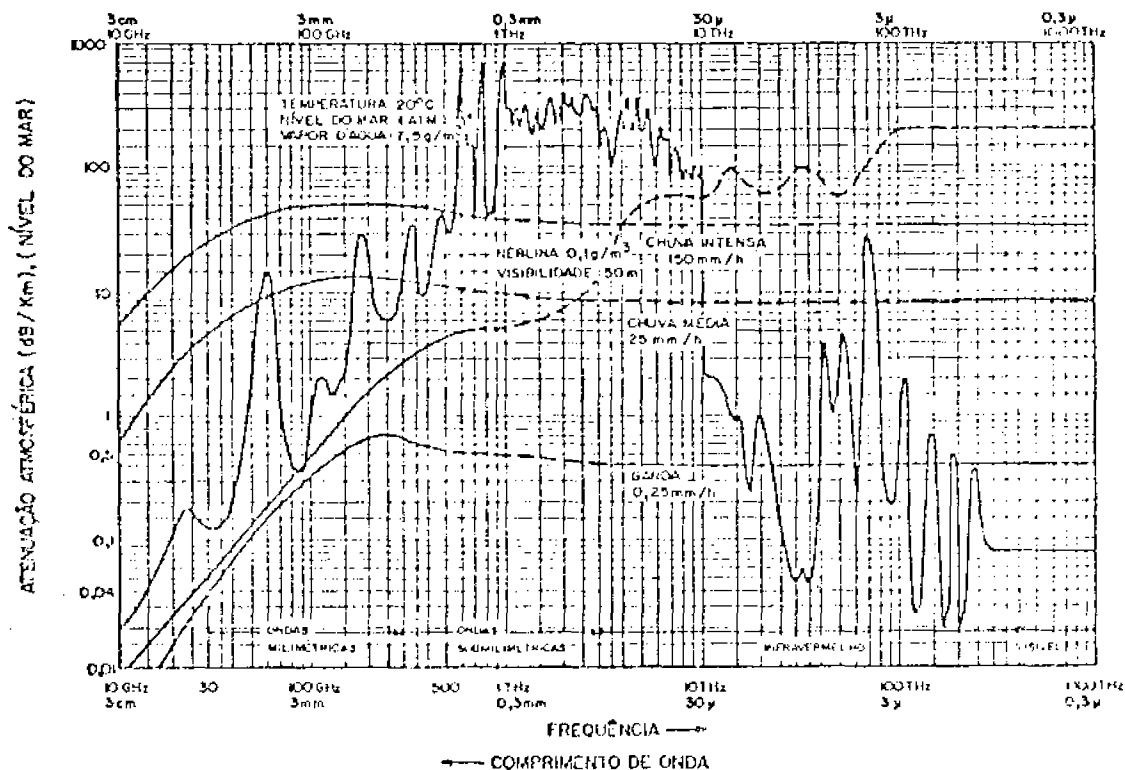


Fig. 1.3 - Atenuação atmosférica devido a gases, chuva e neblina (Keydel, 1980).

Uma vantagem adicional das microondas é sua capacidade de penetração em determinada superfície ou alvo. Esta capacidade de penetração depende essencialmente da permitividade complexa do meio em questão (Capítulo 2). De modo geral pode se afirmar que para muitas superfícies terrestres a penetração é diretamente proporcional à raiz quadrada do comprimento de onda. Para um comprimento de onda de 3cm tem-se portanto um fator de

100 vezes mais penetração que para um comprimento de onda de $3\mu\text{m}$ (infravermelho médio).

Além de aplicações industriais, biológicas, meteorológicas e mapeamentos cartográficos e geológicos convencionais através da utilização de radares aerotransportados, as áreas do conhecimento humano que tem-se beneficiado com técnicas nas faixas de microondas compreendem a Agricultura e a Hidrologia.

Especificamente em termos agrícolas, a estimativa da umidade e salinidade de solos em áreas extensas, através de técnicas nas faixas de microondas, tem demonstrado uma aplicação bastante promissora. Apesar de problemas complexos limitarem aplicações imediatas nestes contextos, os benefícios sociais advindos de metodologias seguras e operacionais de estimativa da umidade de solos são incalculáveis.

Na Agricultura, os dados de umidade do solo poderiam ser utilizados para auxiliar a determinação da severidade e extensão de períodos de seca como os que continuamente atingem partes do NE brasileiro, além de fornecer importantes subsídios para a otimização do recurso água, principalmente em regiões de pronunciado déficit. O monitoramento da umidade do solo seria de grande utilidade para modelos de previsão de safras, pois permitiria dados atualizados sobre as relações solo-água-planta.

No contexto de previsão de safras assume-se geralmente que a precipitação pluviométrica seja o fator determinante da produtividade agrícola. No entanto, se os dados de precipitação pluviométrica fossem substituídos pelo parâmetro umidade do solo, em modelos de previsão de safras, ter-se-iam pelo

menos três vantagens que segundo Idso et alii (1975) seriam:

- 1) Nem toda a precipitação pluviométrica pode ser utilizada pela cultura no campo, já que há perda por deflúvio e por percolação profunda. O parâmetro umidade do solo por si só, está portanto mais diretamente relacionado à produtividade agrícola que a precipitação pluviométrica.
- 2) A precipitação pluviométrica pode, em muitos casos, ser determinada com precisão apenas *in situ*, amostrando para este parâmetro apenas parte de uma área coberta com cultura agrícola que esteja inserida na área de influência de um pluviômetro. Convém salientar que tem havido avanços significativos neste aspecto, através da utilização de satélites meteorológicos ou dados de radares; no entanto, no Brasil a densidade de postos Meteorológicos é baixa dificultando a correlação dos dados orbitais com dados de campo. Por outro lado, toda área agricultável possui a potencialidade de ser avaliada em sua umidade do solo por técnicas de sensoriamento remoto.
- 3) A precipitação pluviométrica pode às vezes ser excessiva, afetando a produtividade agrícola; neste contexto, previsões baseadas em umidade do solo contornariam este efeito adverso da chuva.

De acordo com Schmutge et alii (1980) os métodos existentes para a determinação da umidade do solo compreendem:

- a) Métodos "in situ"
 - Técnicas Gravimétricas.
 - Técnicas Nucleares
 - Técnicas Eletromagnéticas
 - Técnicas Tensiométricas
 - Técnicas Higrométricas

- b) Modelos água-solo

- c) Técnicas de Sensoriamento Remoto
 - Infravermelho Termal
 - Microondas Passivo
 - Microondas Ativo

Os métodos "in situ" são sem dúvida os mais precisos, podendo alguns determinar valores absolutos da umidade do solo.

Apesar dos modelos agrometeorológicos fornecerem in formações temporais a respeito da umidade do solo sem a necesidade de visitas a campo, possuem a desvantagem de apresentar erros de estimativa.

As técnicas de sensoriamento remoto, embora geralmente não tão precisas quanto os métodos "in situ", tem a vantagem de informar não só, sobre a variação temporal da umidade do solo, mas sobretudo sobre a variação espacial da umidade do solo, através da geração de imagens.

O sensoriamento remoto da umidade do solo baseia-se na medida da energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície do solo. A variação na intensidade da radiação com a umidade do solo, depende além da geometria alvo-sensor considerada, essencialmente das propriedades dielétricas (índice

de refração) nas faixas de microondas e da temperatura do solo que pode ser determinada por técnicas no infravermelho termal.

Devido a água apresentar características extremas em suas propriedades termais e dielétricas, é que estas propriedades associadas ao solo tornam-se dependentes do teor de água (grau de umidade).

Autores como Grüner et alii (1983), Shutko (1982) e Schmugge (1983b) desenvolveram trabalhos fundamentais em Radiometria Passiva de Microondas em outros países, mostrando a potencialidade desta técnica em diversas aplicações como, monitoramento da eficiência de sistemas de irrigação, vazamento subterrâneo de canais de irrigação, estimativa da umidade na zona de raízes de certas culturas agrícolas, detecção de bolsões de umidade e água de subsolo, principalmente em regiões semi-áridas e áridas e detecção e monitoramento de processos de salinização de solos.

Segundo Burke et alii (1979), Newton et alii (1982) e Njoku et alii (1982) existem altas correlações entre a umidade de solos e a temperatura de brilho registrada por radiômetros de microondas, tanto em nível de campo como em sistemas aerotransportados. Além do mais as faixas de microondas apresentam maior contraste de temperatura entre alvos, quando comparadas com a faixa do infravermelho termal proporcionando maior poder de discriminação entre alvos.

A despeito de já existir um considerável acervo de trabalhos em Radiometria Passiva de Microondas, não são de conhecimento geral trabalhos desta natureza em solos das regiões tropicais.

Diante do que foi exposto anteriormente, os objetivos do presente trabalho compreendem:

- 1) Caracterização dielétrica de seis solos brasileiros (PV₂, LV₃, LR-d, LE-1, SAP e SC) em diferentes graus de umidade na faixa X de Microondas, através da determinação da permitividade complexa (ϵ^*) em laboratório.
- 2) Estimativas da emissividade e profundidade de penetração da radiação no solo, a partir da determinação da permitividade complexa das amostras de material de solo em diferentes graus de umidade e de um modelo teórico desenvolvido para este fim.
- 3) Determinação do ângulo efetivo de resolução espacial da antena do Radiômetro de Microondas (Faixa-X), desenvolvido pelo INPE.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - TEORIA ELETROMAGNÉTICA.

É objetivo deste item apresentar e discutir sucin-
tamente a fundamentação teórica existente em eletromagnetismo
e que será utilizada nos cálculos do índice de refração complexo
(n*) e emissividade (e) das amostras de material de solo, a
partir da determinação das permitividades complexas (ϵ^*) e das
condutividades elétricas (σ), em diversos graus de umidade.

A teoria eletromagnética está fundamentada essen-
cialmente em quatro equações diferenciais convencionalmente de-
nominadas equações de Maxwell, e que segundo Kruse (1963) são:

$$\text{div. } \vec{D} \equiv \nabla \cdot \vec{D} \equiv q_v = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$\text{div. } \vec{B} \equiv \nabla \cdot \vec{B} = 0 = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{rotacional } \vec{E} \equiv \nabla \times \vec{E} = & - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{u}_x \left\{ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right\} + \\ & + \vec{u}_y \left\{ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right\} + \vec{u}_z \left\{ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{rotacional } \vec{H} \equiv \nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} = \vec{u}_x \left\{ \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right\} + \\ &+ \vec{u}_y \left\{ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right\} + \vec{u}_z \left\{ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde:

- \vec{D} = deslocamento elétrico (Coulomb. m^{-2});
- q_v = carga elétrica elementar por volume (Coulomb. m^{-3});
- \vec{B} = indução magnética (Weber. m^{-2});
- \vec{E} = campo elétrico (volt. m^{-1});
- \vec{J} = densidade de corrente (Ampere. m^{-2});
- \vec{H} = intensidade magnética (Ampere. m^{-1});
- $\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z$ = vetores unitários nas direções x, y e z.

Para a maioria dos materiais e/ou substâncias as propriedades elétricas e magnéticas são constantes de ponto a ponto, sendo estes materiais e/ou substâncias então denominados de homogêneos. Se as propriedades físicas ainda forem as mesmas em todas as direções, estes materiais e/ou substâncias são denominados de isotrópicos. Nestes casos:

- o deslocamento elétrico é proporcional ao campo elétrico, ou seja,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

onde ϵ = permissividade absoluta do meio.

- a indução magnética é proporcional ao campo magnético, ou seja,

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

onde μ = permeabilidade absoluta do meio.

- a densidade de corrente é proporcional ao campo elétrico, ou seja,

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

onde σ = condutividade elétrica do meio.

Assim sendo pode-se reescrever as equações de Maxwell sob a forma:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = - \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial D}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.11)$$

Aplicando-se o rotacional em ambos os termos da equação (2.8), tem-se:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \times - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) = \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{B} \text{ utilizando a equação (2.6)}$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) = \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H})$$

Introduzindo-se a equação (2.9) e posteriormente as equações (2.5) e (2.7), tem-se finalmente que:

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

Analogamente pode-se obter:

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Denominam-se as equações (2.12) e (2.13) de equações de ondas eletromagnéticas.

2.1.1 - Dielétrico Ideal (Meio sem Absorção)

Neste caso tem-se:

$$\sigma = 0$$

$$\rho = 0 \text{ (não há acúmulo de cargas)}$$

$$q_v = 0 \rightarrow \nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\alpha = 0 \rightarrow \rho + \tau = 1$$

Então a equação

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

fica

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

Resolvendo-se a equação (2.15) na componente E_y obtêm-se

$$E_y = E_{y_0} \cdot e^{j\omega \left(t - \frac{x}{c}\right)} = E_{y_0} \cdot e^{j\left(\omega t - \frac{\omega x}{c}\right)} \quad (2.16)$$

onde:

$$j = \sqrt{-1}$$

$$\omega = 2\pi\nu \text{ (frequência angular em rad. s}^{-1}\text{)}$$

$$t = \text{tempo (s)}$$

$$x = \text{distância (m)}$$

$$c = \text{velocidade da luz no meio de propagação (m.s}^{-1}\text{)}$$

Pode-se ainda reescrever a equação acima sob a forma

$$E_y = E_{y_0} \exp j (\omega t - Kx) \quad (2.17)$$

onde

$$K = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.18)$$

é conhecido por fator de propagação do meio.

No vácuo tem-se analogamente

$$K_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2.19)$$

Define-se o índice de refração por

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.20)$$

onde

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \text{e} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (2.20a) \quad (2.20b)$$

vel. da luz
no meio de
propagação

vel. da luz
no vácuo

Pode-se ainda definir o índice de refração por

$$n = \frac{K}{K_0} \quad (2.21)$$

sendo:

K = fator de propagação no meio;

K_0 = fator de propagação no vácuo.

A partir da equação (2.21) pode-se afirmar que:

$$K = n \cdot K_0 \quad (2.22)$$

Voltando-se à equação (2.17) e utilizando-se a equação (2.22) tem-se:

$$E_y = E_{y_0} \exp \{j (\omega t - nK_0 x)\} \quad (2.23)$$

Finalmente a partir das equações (2.20a) e (2.20b), pode-se afirmar que:

$$n = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_0\epsilon_0}} = \sqrt{\mu_r\epsilon_r} \quad (2.24)$$

Como exceto para materiais ferromagnéticos $\mu = \mu_0$
tem-se:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.25)$$

onde:

ϵ_r = Permitividade relativa

Define-se a permitividade absoluta por:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

onde:

ϵ_0 permitividade do vácuo ($8,85 \times 10^{-12} \text{F.m}^{-1}$)

2.1.2 - Dielétrico com Perdas. (Meio com Absorção)

Neste caso tem-se:

$$\sigma \neq 0$$

$$q_v = 0 \quad e \quad \nabla^2 \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\rho = 0$$

Resolvendo-se novamente a equação (2.12) para a
componente E_y obtém-se:

$$E_y = E_{y_0} \exp \{j (\omega t - \Gamma x)\} \quad (2.27)$$

onde Γ é agora o coeficiente de propagação complexo do meio sendo dado por:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \{2\pi v j \mu \sigma - 4\epsilon \mu \pi^2 v^2\}^{1/2} = \\ &= 2\pi v \sqrt{\epsilon \mu} \left\{1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi v \epsilon}\right)^2\right\}^{1/4} \exp\left\{-\frac{j}{2} \left(\arctg\left(\frac{\sigma}{2\pi v \epsilon}\right)\right)\right\} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Analogamente ao caso anterior onde $K = nK_0$, tem-se agora que:

$$\Gamma = n^* k_0 \quad (2.29)$$

onde:

n^* é o índice de refração complexo do meio, e

$$n^* = n_\lambda - jk_\lambda \quad (2.29a)$$

onde:

n_λ = índice de refração do meio;

k_λ = constante de absorção do meio.

Pode-se escrever a equação (2.29) como:

$$\Gamma = \frac{2\pi v}{c_0} (n_\lambda - jk_\lambda) = K_0 (n_\lambda - jk_\lambda). \quad (2.30)$$

A parte real (n_λ) e imaginária (k_λ) de n^* são definidas a partir de (2.28), segundo Kruse (1963) por:

$$n_{\lambda} \equiv \left(\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0} \right)^{1/2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right)^2 \right)^{1/4} \cos \left\{ \frac{1}{2} \left(\arctg \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right) \right) \right\} \quad (2.30a)$$

$$k_{\lambda} \equiv \left(\frac{\epsilon \mu}{\epsilon_0 \mu_0} \right)^{1/2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right)^2 \right)^{1/4} \operatorname{sen} \left\{ \frac{1}{2} \left(\arctg \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right) \right) \right\} \quad (2.30b)$$

Novamente, como exceto para materiais ferromagnéticos $\mu = \mu_0$, tem-se:

$$n_{\lambda} \equiv \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right)^2 \right)^{1/4} \cos \left\{ \frac{1}{2} \left(\arctg \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right) \right) \right\} \quad (2.30c)$$

$$k_{\lambda} \equiv \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right)^2 \right)^{1/4} \operatorname{sen} \left\{ \frac{1}{2} \left(\arctg \left(\frac{\sigma}{2\pi \nu \epsilon_0} \right) \right) \right\} \quad (2.30d)$$

Por definição:

$$\epsilon_r^* = \frac{\Gamma^2}{K_0^2} \quad (2.31)$$

onde:

ϵ_r^* é a permitividade complexa relativa do meio, que também pode ser dada por:

$$\epsilon_r^* = \mu_r \epsilon_r' - j \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (2.32)$$

Assumindo-se novamente que $\mu = \mu_0$ tem-se:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (2.33)$$

onde:

ϵ_r' = constante dielétrica relativa

$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$ conhecido por fator de perda

A permitividade complexa é dada por:

$$\epsilon^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \quad (2.34)$$

Substituindo-se (2.34) em (2.33) obtém-se:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.35)$$

ou ainda

$$\epsilon^* = \epsilon' \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \right) \quad (2.36)$$

Muitos autores ainda referem-se a uma tangente de perda que pode, a partir das equações acima, ser dada por:

$$\text{tg } \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2.37)$$

Pode-se então reescrever a equação (2.36) sob a forma:

$$\epsilon^* = \epsilon' (1 - j \text{tg} \delta) \quad (2.38)$$

Finalmente, a partir das equações (2.29) e (2.31) pode-se concluir que:

$$n^* = \sqrt{\epsilon^*} = \sqrt{n_\lambda} - jk_\lambda \quad (2.39)$$

2.2 - EMISSIVIDADE VIA PERMITIVIDADE COMPLEXA.

A fórmula geral para a emissividade espectral de um corpo real sem reflexões múltiplas internas, conforme ilustra a Figura 2.1 é dada por:

$$e_\lambda = (1 - r_\lambda)(1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.40)$$

onde:

r_λ = refletividade espectral do alvo;

α = coeficiente de absorção do meio, m^{-1}

d = espessura da camada, m

Para o caso de dielétricos com fortes perdas (meio opaco) tem-se que:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad \text{ou} \quad e_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (2.41)$$

pois $\tau = 0$, (transmitância). O termo $(1 - r_\lambda)$ para incidência normal à superfície é dado por:

$$(1 - r_\lambda) = \frac{4n_\lambda}{(1 + n_\lambda)^2 + k_\lambda^2} \quad (2.42)$$

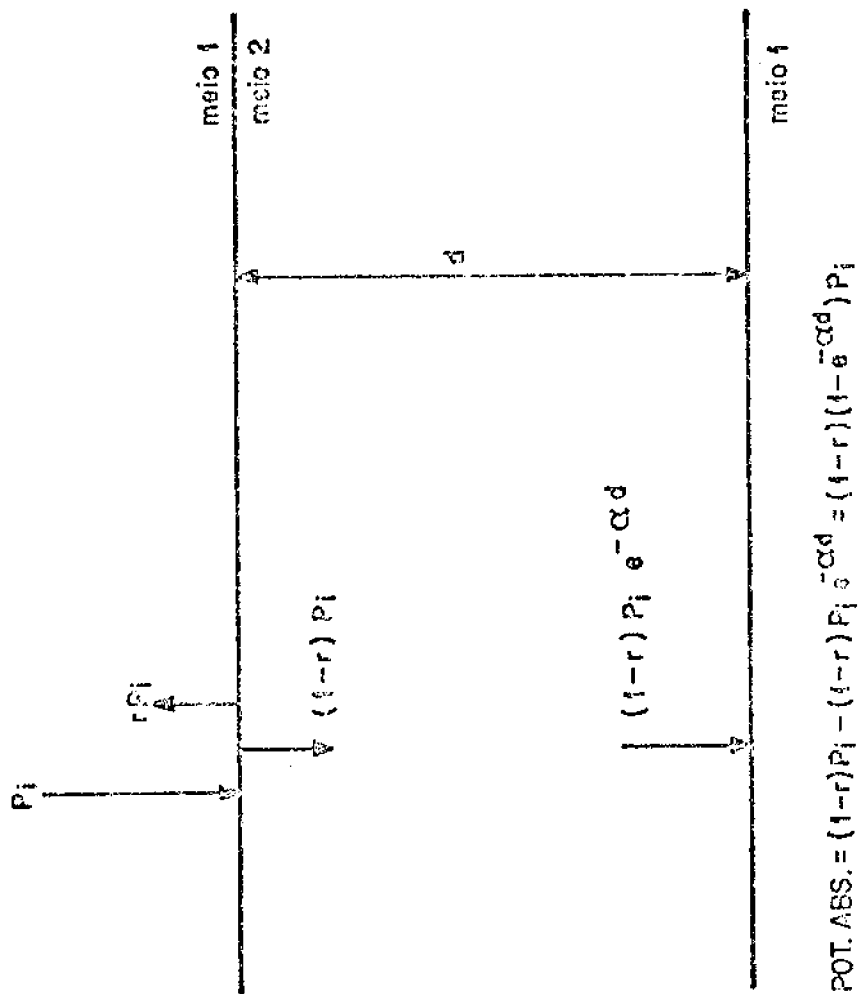


Fig. 2.1 - Representação esquemática da emissividade espectral de um corpo real sem reflexões múltiplas internas.

Os valores de n_λ e k_λ são respectivamente o índice de refração e a constante de absorção dados pelas equações (2.30c) e (2.30d) a partir de determinações da permissividade complexa e condutividade elétrica (n e k definem o índice complexo de refração -n*-equação (2.39).

O termo $e^{-\alpha d}$ assume valores distintos dependendo da espessura da camada considerada (d) e do coeficiente de absorção do meio (α).

Pode-se deduzir a expressão para o coeficiente de absorção (α) a partir da equação (2.27), que em regime estacionário fica:

$$E = E_0 e^{jn^*K_0 d} \quad (2.43)$$

onde: $x = d$

Como a emissividade refere-se ao fluxo de energia emitida (potência), a equação acima toma a forma:

$$E^2 = E_0^2 e^{2jn^*K_0 d} \quad (2.44)$$

Analisando-se somente o termo $e^{2jn^*K_0 d}$ tem-se que:

$$e^{2jn^*K_0 d} = e^{2jK_0(n_\lambda - jk_\lambda)d} = e^{2jK_0 n_\lambda d} \cdot e^{2K_0 k_\lambda d} \quad (2.45)$$

O 2º termo de (2.45), determina a absorção pelo meio, ou seja:

$$e^{-2K_0 k_\lambda d} = e^{-\alpha d} \quad (2.46)$$

Finalmente tem-se que:

$$\alpha = 2K_0 k_\lambda \quad \text{ou ainda} \quad \alpha = \frac{4\pi\nu}{c_0} k_\lambda \quad (2.47)$$

Alguns autores Ulaby et alii (1981) definem a partir de α o chamado coeficiente de extinção (k_λ) e a partir daí então o índice complexo de refração (n^*) como demonstra-se a seguir:

$$\alpha = \frac{4\pi\nu}{c_0} k_\lambda \quad \text{e como} \quad n = \frac{c_0}{c} \quad (2.20)$$

tem-se que:

$$\alpha = \frac{4\pi\nu}{c} \left(\frac{k_\lambda}{n_\lambda} \right) \rightarrow \alpha = \frac{4\pi\nu}{c} \cdot k_\lambda \quad (2.48)$$

onde

$$k_\lambda = \frac{k'_\lambda}{n_\lambda}$$

Analogamente à equação (2.29a) pode-se expressar n^* sob a forma

$$n^* = n_\lambda [1 - j\kappa_\lambda] \quad (2.49)$$

Portanto tem-se novamente:

$$n^* = \sqrt{\epsilon_r^*} \quad (2.39)$$

Pode-se a partir das equações (2.38) e (2.49) verificar que a tangente de perda ($\text{tg}\delta$) está relacionada ao coeficiente de extinção (κ):

$$\kappa_{\lambda} = \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}$$

A equação (2.42) que define o termo $(1 - r_{\lambda})$ é na realidade um caso específico, pois assume que o ângulo de incidência da radiação, ou seja, o ângulo θ , como mostra a Figura 2.2 abaixo é igual a zero (incidência normal à superfície):

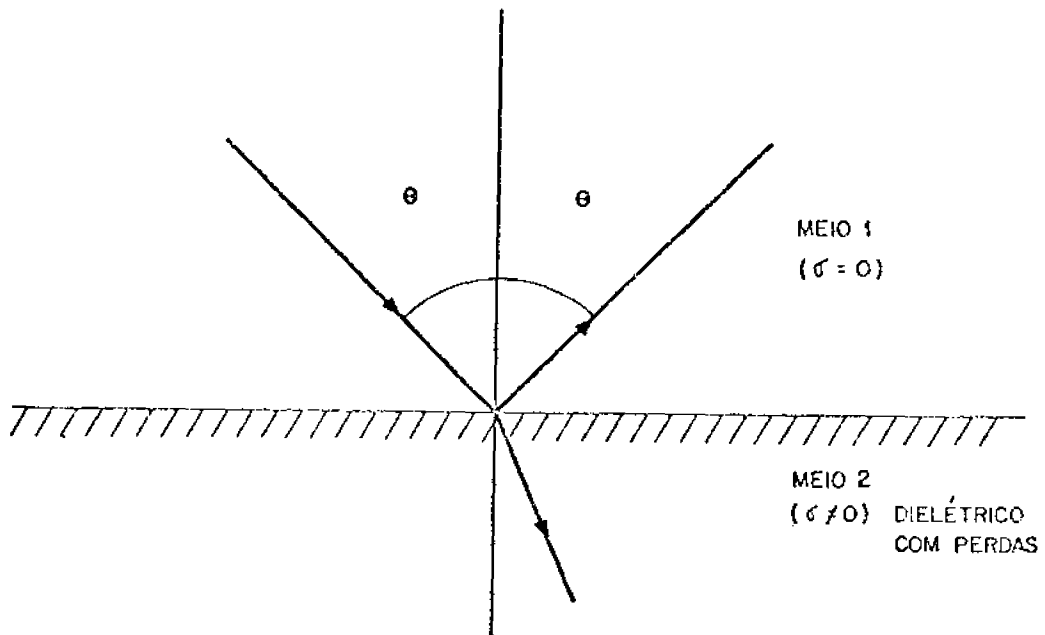


Fig. 2.2 - Influência do ângulo de incidência na interação da radiação com um meio dielétrico homogêneo com perdas.

Em um enfoque mais criterioso de $(1 - r_{\lambda})$ torna-se necessário avaliar o efeito do ângulo θ sob a refletividade e conseqüentemente sob a emissividade do alvo.

No caso geral a refletividade para a situação i lustrada pela Figura 2.1 é definida como sendo:

$$r_{\lambda}(\theta) = \frac{1}{2} [\rho_1^2 + \rho_{\parallel}^2] \quad (2.50)$$

sendo:

ρ_1^2 = refletividade perpendicular ao plano de incidência da radiação;

ρ_{\parallel}^2 = refletividade paralela ao plano de incidência da radiação.

e segundo Stratton (1941) dada por:

$$\rho_1^2 = \frac{(\mu_1 q - \mu_2 \alpha_1 \cos \theta)^2 + \mu_1 p^2}{(\mu_1 q + \mu_2 \alpha_1 \cos \theta)^2 + \mu_1 p^2} \quad (2.51)$$

$$\rho_{\parallel}^2 = \frac{[\mu_1 (\alpha_2^2 - \beta_2^2) \cos \theta - \mu_2 \alpha_1 q]^2 + [2\mu_1 \alpha_2 \beta_2 \cos \theta - \mu_2 \alpha_1 p]^2}{[\mu_1 (\alpha_2^2 - \beta_2^2) \cos \theta + \mu_2 \alpha_1 q]^2 + [2\mu_1 \alpha_2 \beta_2 \cos \theta + \mu_2 \alpha_1 p]^2} \quad (2.52)$$

com

$$q^2 = \frac{1}{2} \{ \alpha_2^2 - \beta_2^2 - \alpha_1^2 \sin^2 \theta + [4\alpha_2^2 \beta_2^2 + (\alpha_2^2 - \beta_2^2 - \alpha_1^2 \sin^2 \theta)^2]^{1/2} \} \quad (2.53)$$

$$p^2 = \frac{1}{2} \{ [4\alpha_2^2 \beta_2^2 + (\alpha_2^2 - \beta_2^2 - \alpha_1^2 \sin^2 \theta)^2]^{1/2} - [\alpha_2^2 - \beta_2^2 - \alpha_1^2 \sin^2 \theta] \} \quad (2.54)$$

onde:

μ = permeabilidade magnética do meio;

α = constante de atenuação do meio;

β = constante de fase do meio;

$$\beta = n_{\lambda} \cdot K_0$$

$$\alpha = k_{\lambda} \cdot K_0$$

A equação (2.40) fica então:

$$e_{\lambda}(\theta) = (1 - r_{\lambda}(\theta))(1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.55)$$

Para se computar a emissividade de dielétricos com perdas a partir do índice complexo de refração torna-se necessário portanto determinar a constante dielétrica complexa do material/alvo, bem como a condutividade elétrica, na frequência de interesse. A partir destes dados pode-se então avaliar a emissividade espectral, para diferentes valores de teta (θ).

2.3 - EMISSIVIDADE VIA RADIÔMETRO DE MICROONDAS (RMO)

A energia eletromagnética que incide na antena de um radiômetro de microondas é devida à radiação emitida e/ou refletida pelo alvo na direção da antena, além da emissão por parte da atmosfera.

Quando um alvo encontra-se em equilíbrio termodinâmico, a potência por ele emitida é função direta de sua temperatura (T).

Nas faixas de microondas a potência emitida pelo alvo é diretamente proporcional a T como afirma a Lei de

Rayleigh-Jeans, que pode ser deduzida a partir da Lei da Radiação de Planck.

A Lei da Radiação de Planck afirma que um corpo negro irradia energia eletromagnética uniformemente em todas as direções com uma brilhância espectral, B_f , dada por:

$$B_f = \frac{2hf^3}{c^2} \left(\frac{1}{e^{hf/kT} - 1} \right) \quad (2.56)$$

onde:

B_f = brilhância espectral do corpo negro
($Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}$);

h = constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ Joules.s);

f = frequência (s^{-1});

k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ Joules. K^{-1});

T = temperatura absoluta (K);

c = velocidade da luz ($\approx 3 \times 10^8$ ms^{-1}).

Se $\frac{hf}{kT} \ll 1$ pode-se através de uma expansão em série de Taylor afirmar que:

$$e^X - 1 = \left(1 + X + \frac{X^2}{2} + \dots \right) - 1 \approx X \quad p/X \ll 1$$

Desta maneira pode-se portanto simplificar a equação (2.56) para:

$$B_f = \frac{2f^2kT}{c^2} \quad (2.57)$$

A Figura 2.3 mostra que a aproximação dada pela Lei de Rayleigh-Jeans desvia-se muito pouco da Lei da Radiação de Planck, para as faixas de microondas.

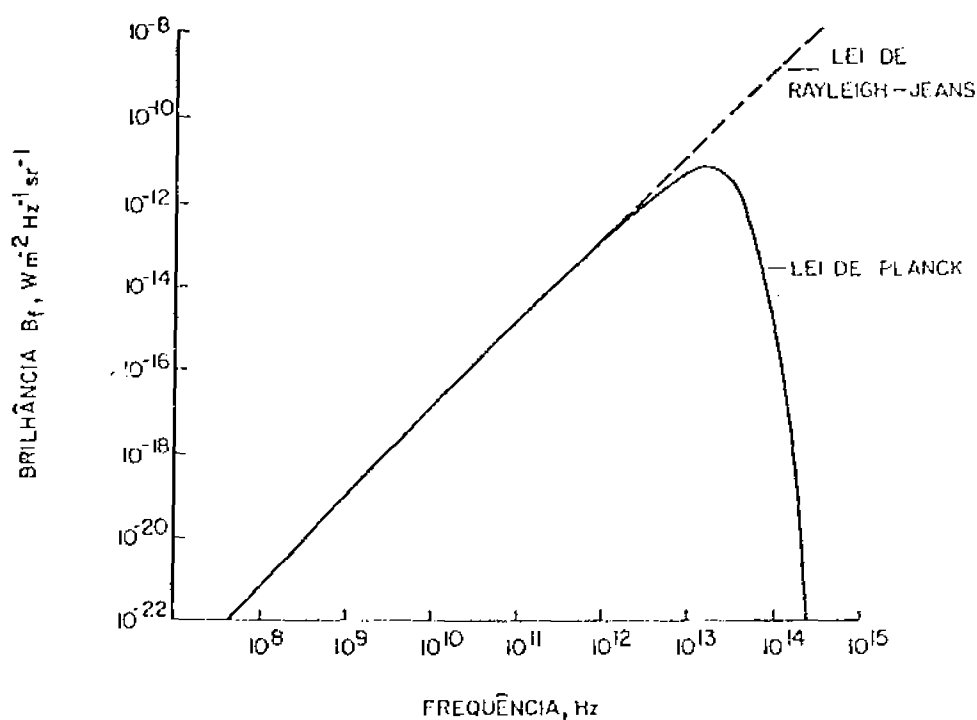


Fig. 2.3 - Comparação entre a lei de Planck e a lei de Rayleigh-Jeans.

A partir da lei de Rayleigh-Jeans pode-se portanto afirmar que colocando-se uma antena de um radiômetro de microondas no interior de uma cavidade com paredes compostas de um material perfeitamente absorvedor (corpo negro e portanto perfeitamente emissor) a potência recebida por esta antena é

$$P_{cn} = kT\Delta f \quad (2.58)$$

onde:

P_{cn} = potência emitida pelo corpo negro e recebida pela antena (W);

Δf = largura de banda do radiômetro (Hz).

Ainda para o corpo negro, pode-se definir a potência recebida como sendo:

$$P_{cn} = \frac{1}{2} A_{ef} \int_f^{f+\Delta f} \int_{4\pi} B_f F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (2.59)$$

onde:

A_{ef} = abertura efetiva da antena;

$F_n(\theta, \phi)$ = padrão de ganho normalizado da antena;

$d\Omega$ = ângulo sólido elementar (sr);

df = intervalo elementar de frequência (Hz);

ou ainda utilizando a equação (2.57)

$$P_{cn} = \frac{1}{2} A_{ef} \int_f^{f+\Delta f} \int_{4\pi} \frac{2f^2 kT}{c^2} F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (2.60)$$

O termo $\frac{1}{2}$ é introduzido nas equações acima devido ao fato de B_f ser não polarizada mas uma antena possuir polarização, detetando-se portanto somente metade da potência emitida pelo CN.

Se Δf for pequeno de modo que Bf seja constante sobre Δf ($\Delta f \ll f^2$) pode se afirmar que:

$$P_{cn} = kT\Delta f A_{ef} \frac{f^2}{c^2} \int_4 \int_{\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.61)$$

Como o ângulo sólido padrão (Ω_p) é definido por:

$$\Omega_p = \frac{\lambda^2}{A_{ef}} \quad (2.62)$$

ou

$$\Omega_p = \int_4 \int_{\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.63)$$

pode-se, introduzindo estas equações na equação (2.61), retornar à equação (2.58).

A partir da relação entre potência e temperatura descrita acima definem-se temperaturas radiométricas de modo a caracterizar-se a potência emitida e/ou recebida por alvos (corpos não negros).

Para corpos não negros a energia incidente sobre a antena de um radiômetro de microondas provém de diversas direções e, considerando-se uma direção específica, pode provir de várias fontes, conforme ilustra a Figura 2.4. As várias componentes que resultam na chamada Temperatura de Antena (T_A), que é proporcional a uma determinada potência nos terminais de saída da antena e por conseguinte a uma determinada voltagem de saída do radiômetro (V_s) são (Figura 2.5).

- T_{AD} = emissão atmosférica descendente (e refletida pelo terreno na direção da antena);
- T_{AA} = emissão atmosférica ascendente na direção da antena;
- T_{ES} = radiação espalhada na direção da antena;
- T_B = emissão do terreno na direção da antena (Temperatura de Brilho ou Temperatura de Brilhância).

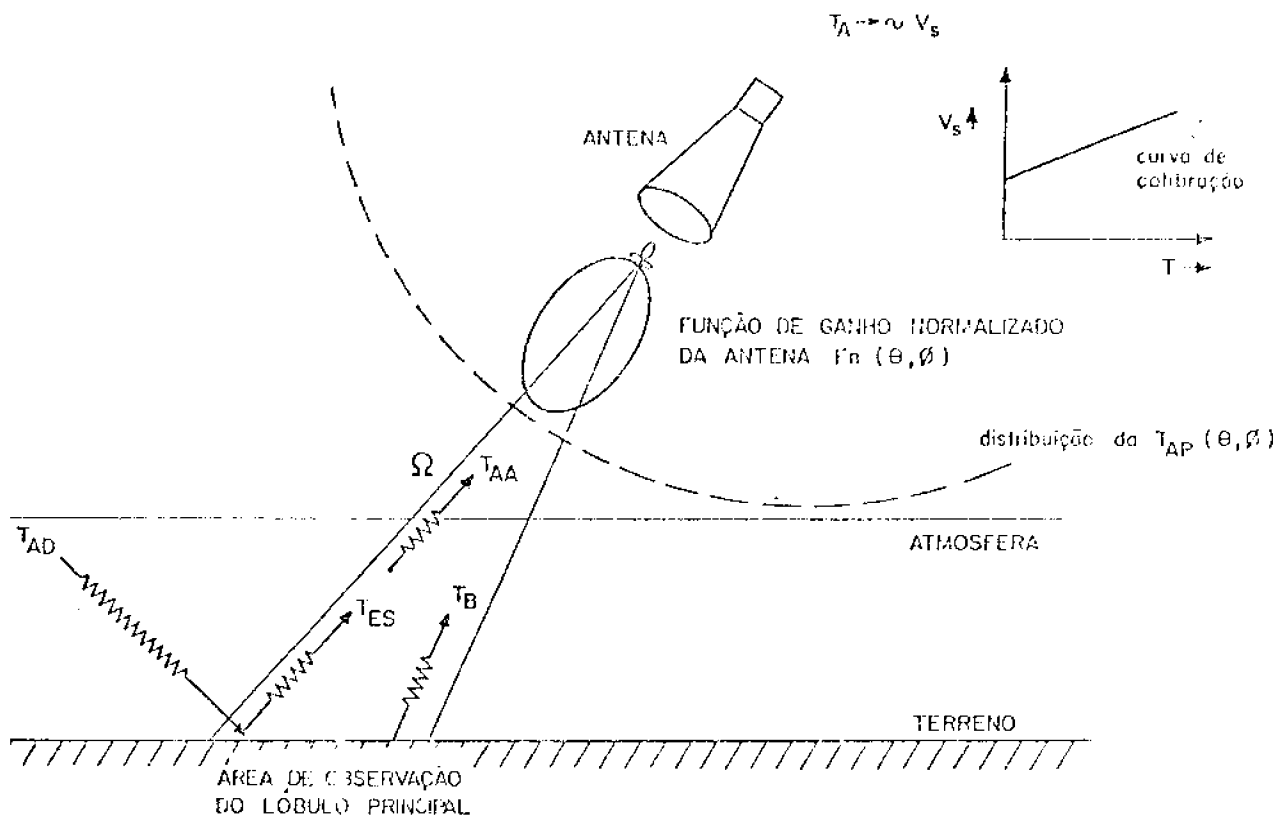


Fig. 2.4 - Relação entre a Temperatura de Antena (T_A), Temperatura Aparente (T_{AP}) e Temperatura de Brilho (T_B) (Ulaby, 1981).

Define-se a Temperatura Aparente (T_{AP}), que representa a energia que incide na antena do radiômetro, como sendo o somatório das componentes $T_{AA} + T_{ES} + T_B$.

$$T_{AP}(\theta, \phi) = T_{AA}(\theta, \phi) + T_{ES}(\theta, \phi) + T_B(\theta, \phi) \quad (2.64)$$

Pode-se defini-la também em função da brilhancia (Equação 2.57) sob a antena como:

$$B(\theta, \phi) = \frac{2k}{\lambda^2} T_{AP}(\theta, \phi) \Delta f \quad (2.65)$$

Em função ainda da potência recebida pela antena, tem-se que:

$$P_f = \frac{1}{2} A_{ef} \int_4 \int_{\pi} B_f(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.66)$$

ou ainda

$$P = \frac{1}{2} A_{ef} \int_4 \int_{\pi} \frac{2k}{\lambda^2} T_{AP}(\theta, \phi) \Delta f F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.67)$$

De modo que se possa associar a T_{AP} a T_A do radiômetro de M.O, torna-se necessário definir a função de transferência do receptor do radiômetro, que pode ser conseguida medindo-se a voltagem de saída (V_s) em função da temperatura absoluta de um resistor colocado na entrada do recep-tor no lugar da antena, como ilustra a Figura 2.5.

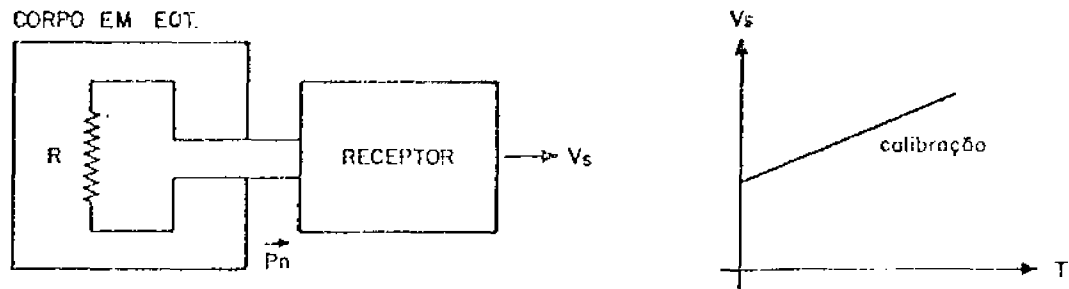


Fig. 2.5 - Representação esquemática para o cálculo da potência de ruído na entrada do receptor. (Ulaby, 1981).

Nyquist em 1928 demonstrou que a potência de ruído de um resistor é proporcional à sua temperatura cinética T , ou seja,

$$P_n = kT\Delta f \quad (2.68)$$

Esta formulação é semelhante à equação (2.58) que descreve a potência emitida por um corpo negro.

Pode-se portanto encontrar uma potência P fornecida pela antena ao receptor que seja equivalente a uma temperatura do resistor T_A , ou seja:

$$P_n = kT_A \Delta f = P \quad (2.69)$$

Igualando-se as equações (2.67) e (2.69) define-se T_A como sendo:

$$T_A = \frac{A_{ef}}{\lambda^2} \int_4 \int_{\pi} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.70)$$

que também pode ser interpretado como a temperatura radiométrica da antena.

Como ainda:

$$\int_4 \int_{\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega = \Omega_p \quad (2.63)$$

e

$$\Omega_p = \frac{\lambda^2}{A_{ef}} \quad (2.62)$$

pode-se expressar a equação (2.69) como:

$$T_A = \frac{\int_4 \int_{\pi} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\int_4 \int_{\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega} \quad (2.71)$$

A T_A é portanto igual à distribuição da $T_{AP}(\theta, \phi)$ integrada sob um ângulo sólido 4π sr de acordo com a função de ganho normalizado da antena, $F_n(\theta, \phi)$.

Considerando-se uma atmosfera sem perdas, ou operando-se o radiômetro de microondas em nível de campo (radiometria de campo), pode-se assumir que a única contribuição à T_{AP} é a energia emitida pelo terreno (alvo, superfície ou corpo em questão), ou seja a T_B . A Figura 2.6 ilustra esta si

tuação e que é a de interesse no presente trabalho. Nestes casos tem-se, portanto que a $T_B = T_{AP}$. Além do mais, na faixa de 1-10GHz (faixa de interesse) sob céu limpo, tem-se praticamente uma atmosfera sem perdas.

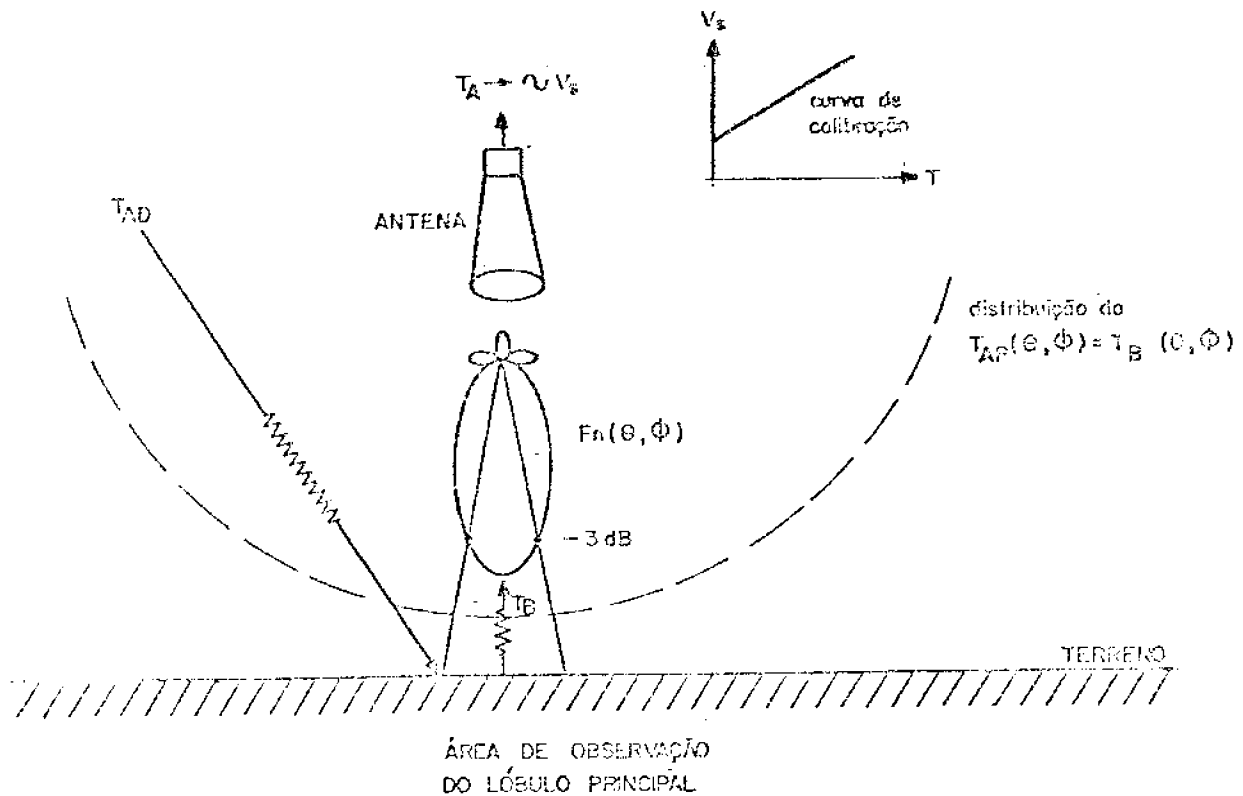


Fig. 2.6 - Relação entre T_B e T_A para visada nadir próxima do alvo.

A antena da Figura 2.6 está disposta, em relação ao terreno, de modo que se tenha máxima potência incidente.

O ângulo de abertura da antena do radiômetro (ângulo sólido) é definido teoricamente como sendo o ângulo, no diagrama de radiação da antena, onde $F_n(\theta, \phi) = 0,5$, ou seja,

onde o ganho tem valor igual à metade de seu máximo, também conhecido como nível de -3dB, ou feixe de meia potência.

A Temperatura de Antena medida pelo radiômetro que é calibrado com duas cargas resistivas sob diferentes temperaturas, é assumida como sendo um valor médio resultante de uma integração efetuada pelo próprio radiômetro (sob o feixe de meia potência).

Um enfoque mais criterioso é o de se assumir que a integração sob $F_n(\theta, \phi)$ deva ser até um ponto tal que o valor de T_A encontrado seja igual à precisão desejada. Neste caso o ângulo de abertura da antena poderá ser maior ou menor que aquele assumido para o nível -3dB.

A Temperatura de Brilho é característica do alvo e pode ser inferida a partir da T_A , $F_n(\theta, \phi)$ e eficiência da antena.

A T_B pode ser definida a partir da equação (2.58) como sendo:

$$T_B = \frac{P}{k \cdot \Delta f} \quad (2.72)$$

Considerando-se que o alvo da cena é homogêneo e que possui temperatura absoluta constante e igual a T, define-se a emissividade para o caso da Figura 2.6 como:

$$e = \frac{T_B}{T} \quad (2.73)$$

Variando-se θ e ϕ tem-se que

$$e(\theta, \phi) = \frac{B(\theta, \phi)}{B_{cn}} = \frac{T_B(\theta, \phi)}{T} \quad (2.74)$$

sendo

$$B(\theta, \phi) = \frac{2f^2 k}{c^2} T_B(\theta, \phi) \Delta f \quad (2.75)$$

e

$$B_{cn} = \frac{2f^2 k}{c^2} T \Delta f = Bf \Delta f \quad (2.76)$$

Como pode-se observar das equações acima, tem-se sempre que $T_B \leq T$ ou seja que $e \leq 1$ já que $B(\theta, \phi) \leq B_{cn}$.

2.4 - POTÊNCIA VIA PERMITIVIDADE COMPLEXA V.S. POTÊNCIA VIA RADIÔMETRO DE MICROONDAS.

Discute-se a seguir a potência emitida pelo alvo via permitividade complexa e que deveria ser registrada pelo radiômetro de microondas, com a potência que efetivamente é registrada pelo equipamento.

Como visto anteriormente no item Emissividade Via Radiômetro de Microondas define-se a potência emitida pelo corpo negro por:

$$P_{cn} = \frac{1}{2} A_{ef} \int_f^{f+\Delta f} \int_{\Omega} Bf F_n(\theta, \phi) d\Omega df \quad (2.59)$$

Assumindo-se que Bf não varia em Δf tem-se:

$$P_{cn} = Aef \Delta f \frac{f^2 k T}{c^2} \int_0^{\theta} \int_{\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (2.61)$$

Se o corpo não for negro a potência será dependente direcionalmente em θ e ϕ . Considerando-se que não há variação em ϕ tem-se:

$$P(\theta) = P_{cn} e(\theta) \cos\theta \quad (2.77)$$

Introduzindo-se a equação (2.77) na equação (2.61) obtém-se:

$$P_1(\bar{\theta}) = Aef \Delta f \frac{f^2 k T}{c^2} 2\pi \int_0^{\bar{\theta}} e(\theta) \cos\theta F_n(\theta) \sin\theta d\theta \quad (2.78)$$

sendo:

- T = temperatura absoluta do alvo (K);
- e(θ) = emissividade calculada pela equação (2.55);
- Δf = largura da banda do radiômetro (Hz);
- Aef = área efetiva da antena do radiômetro (m²).

Pode-se por outro lado definir a potência em função da Temperatura de Brilho registrada pelo radiômetro a partir das equações (2.75) e (2.61) ou seja, (considerando-se que não há variação em ϕ e que Bf é cte. em Δf)

$$P_2(\bar{\theta}) = Aef \Delta f \frac{f^2 k}{c^2} 2\pi \int_0^{\bar{\theta}} T_B(\theta) \cos\theta F_n(\theta) \sin\theta d\theta \quad (2.79)$$

onde:

$$\int_0^{\bar{\theta}} T_B(\theta) \cos\theta \operatorname{Fn}(\theta) \operatorname{sen}\theta \, d\theta \text{ é o resultado que o radiômetro fornece quando se efetua uma medida.}$$

Convém salientar que os limites de integração das equações (2.78) e (2.79) são geralmente considerados como sendo 0 e $\pi/2$, mas que dependendo do diagrama de radiação da antena o limite superior pode ser menor, ou seja, um limite a partir do qual não há mais um incremento significativo de sinal (de acordo com a resolução radiométrica do sistema).

Pode-se afirmar que $P_1(\bar{\theta}) = P_2(\bar{\theta})$, ou seja, que

$$T \int_0^{\bar{\theta}} e(\theta) \cos\theta \operatorname{Fn}(\theta) \operatorname{sen}\theta \, d\theta = \int_0^{\bar{\theta}} T_B(\theta) \cos\theta \operatorname{Fn}(\theta) \operatorname{sen}\theta \, d\theta \quad (2.80)$$

já que segundo (2.74)

$$e(\theta, \phi) = \frac{T_p(\theta, \phi)}{T}$$

e no presente caso então

$$e(\theta, \phi) = \frac{T_B(\bar{\theta})}{T} \quad (2.81)$$

Assim sendo pode-se, também, afirmar que

$$T_B(\bar{\theta}) = T_B \cos\theta \quad (2.82)$$

$$e(\bar{\theta}) = \frac{T_B(\bar{\theta})}{T} = \frac{\int_0^{\bar{\theta}} e(\theta) F_n(\theta) \sin\theta \cos\theta \, d\theta}{\int_0^{\bar{\theta}} F_n(\theta) \sin\theta \, d\theta} \quad (2.83)$$

2.5 - EMISSIVIDADE HEMISFÉRICA

A partir da permitividade complexa pode-se também determinar a emissividade hemisférica (e_{hem}), que representa a emissividade integrada do alvo, sendo definida por:

$$e_{\text{hem}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} e(\theta) \sin\theta \cos\theta \, d\theta \quad (2.84)$$

Considerando-se que não ocorra variação em ϕ tem-se:

$$e_{\text{hem}} = 2 \int_0^{\pi/2} e(\theta) \sin\theta \cos\theta \, d\theta \quad (2.85)$$

onde:

$e(\theta)$ é calculado a partir da equação (2.55).

Convém lembrar que enquanto $e(\theta)$ é uma razão entre radiâncias, e_{hem} representa uma razão entre emitâncias.

A abordagem aqui descrita permite, portanto, o confronto entre a potência registrada a partir da determinação

da permitividade complexa e a potência registrada a partir de medições da temperatura de brilho dos alvos em questão. Este confronto apesar de se restringir a algumas condições dos alvos como, temperatura absoluta constante e homogênea, alvos não rugosos e a não existência de gradientes da permitividade complexa é de fundamental importância na compreensão dos fenômenos que afetam a radiação nesta faixa de microondas.

2.6 - PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE SOLOS.

As faixas de microondas permitem o monitoramento do parâmetro umidade do solo devido à relaxação dipolar das moléculas de água, resultando este fenômeno em uma absorção de energia em microondas. Decorre daí o grande contraste existente entre as propriedades dielétricas da água no estado líquido e as propriedades dielétricas do solo seco. A própria permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) assume neste contexto uma importância fundamental, visto ser o parâmetro que descreve as características de propagação de uma onda eletromagnética em um meio, determinando as propriedades emissivas deste meio nas faixas de microondas.

Conceitualmente define-se ϵ_r^* como sendo a relação entre a permitividade do meio e a permitividade do vácuo, e em outras palavras ϵ_r^* informa sobre a relação entre o comprimento de onda da radiação no meio e no vácuo, para meios não magnéticos (como visto anteriormente no item 2.1). Para que o solo possa ser considerado como sendo um dielétrico torna-se necessário também que ϵ_r^* não seja muito maior que $2\pi ev$,

que seria o caso para metais.

De acordo com Sch mugge (1983a) as propriedades dielétricas da água em função da frequência são descritas por um espectro de relaxação de Debye dado por:

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon_\infty' + \frac{\epsilon_s' - \epsilon_\infty'}{1 + j\omega\tau} \quad (2.86)$$

onde:

$$j = \sqrt{-1};$$

ω = frequência angular;

ϵ_s' = valor de ϵ' para o limite inferior de frequência ($\omega\tau < 1$);

ϵ_∞' = valor de ϵ' para o limite superior de frequência ($\omega\tau > 1$);

τ = tempo de relaxação.

Para a água os valores de ϵ_s e ϵ_∞ estão próximos a 80 e 3,5, respectivamente. O tempo de relaxação representa uma medida do tempo requerido para que uma molécula de água se alinhe quando da aplicação de um campo elétrico. Para a água sob forma líquida $1/\tau = 10^{10}$ Hz, enquanto que para o gelo $1/\tau \approx 10^3$ Hz.

Se a frequência de oscilações do campo elétrico for muito alta não haverá alinhamento dos momentos dipolo da água, resultando em uma contribuição dielétrica de valor igual a ϵ_∞ .

Plotando-se a fórmula de Debye em um plano ob-

têm-se um semi-círculo, que representa os valores de ϵ_r^* em função de freqüência (ver Figura 2.7).

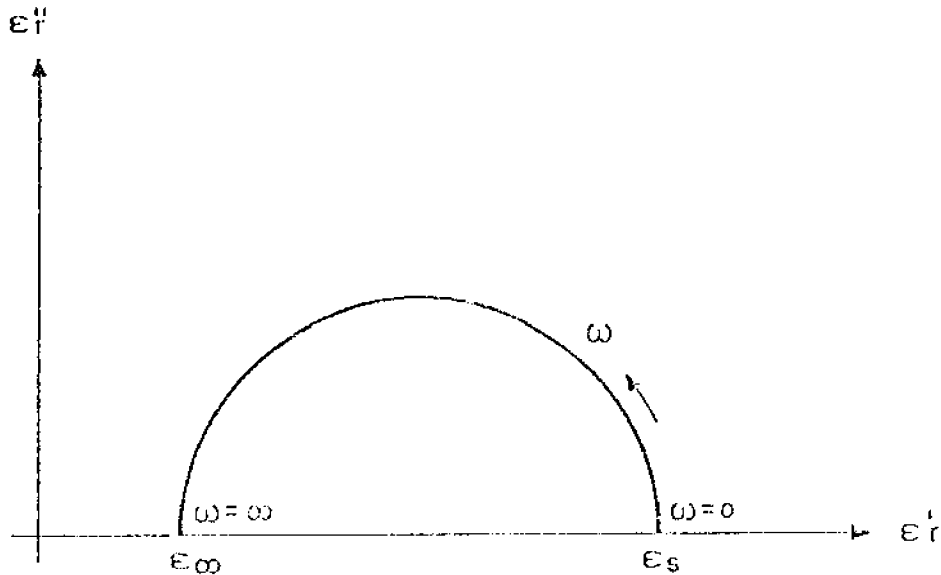


Fig. 2.7 - Representação gráfica da fórmula de Debye em um plano.

A Figura 2.8 mostra o comportamento da água destilada a 20°C em função da freqüência. Pode-se verificar que para comprimentos de onda maiores que 1cm , de interesse em estudos de umidade de solos, a constante dielétrica relativa (parte real) possui valores altos em torno de 60 a 80. Esta alta constante dielétrica faz com que o índice de refração da água nestas freqüências, segundo Jackson (1975), seja também alto - por volta de 8 a 9 - e a emissividade da água baixa (0,30 a 0,40).

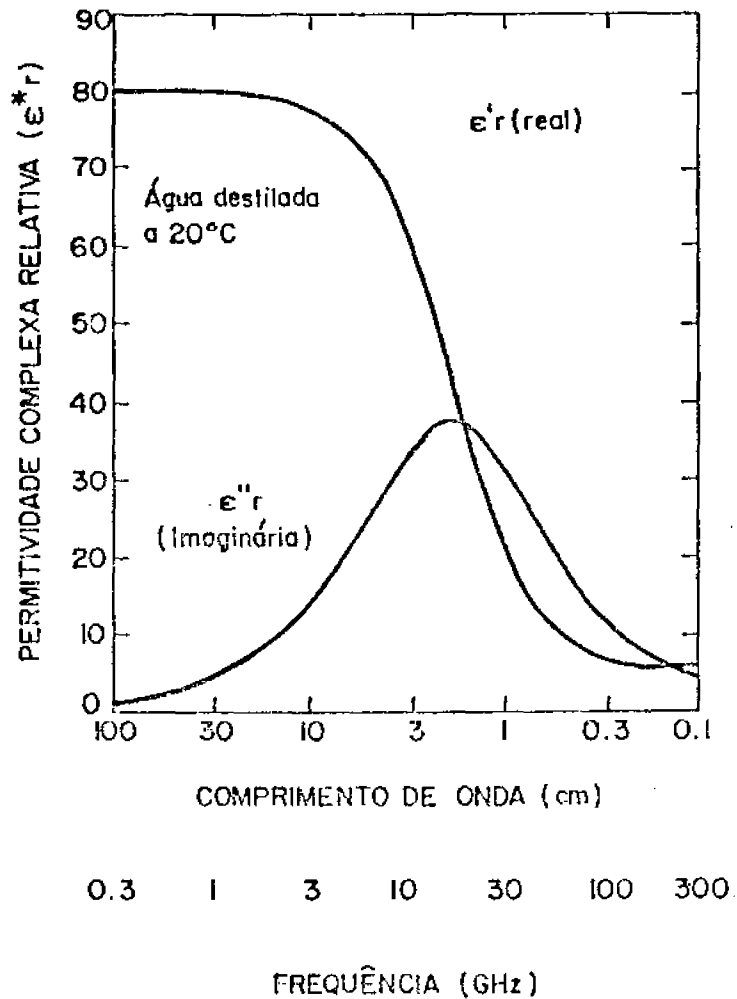


Fig. 2.8 - Comportamento de ϵ'_r e ϵ''_r de água destilada a 20°C, de 0,3 a 300 GHz.

Segundo Dobson (1986) a constante dielétrica relativa de solos secos independe da frequência nas faixas de microondas, sendo função direta da densidade aparente do solo.

Esta conclusão é compartilhada por Shutko (1982a) e Hallikainen et alii (1985) que afirmam ainda ter a constante dielétrica relativa de solos secos valores próxi-

mos a 3. Conseqüentemente a emissividade para solos secos é alta estando entre 0,90 e 1.

O solo seco e a água são portanto os dois casos limites para a constante dielétrica, havendo para misturas, ou seja, solos úmidos, uma ampla gama de variações da constante dielétrica e conseqüentemente da emissividade.

Eletromagneticamente os solos são, em geral, uma mistura dielétrica de quatro componentes, a saber:

- ar;
- massa do solo;
- água presa,
- + água livre.

Os conceitos de água presa e água livre derivam da Teoria da Dupla Camada, desenvolvida por Stern-Goyu e de conhecimento geral em Física do Solo, onde:

- Água presa: refere-se às moléculas de água nas primeiras camadas moleculares, presas às partículas do solo devido às forças matriciais e osmóticas.
- Água livre: refere-se à água que pode mover-se livremente no meio, onde as forças matriciais, que decrescem rapidamente com o aumento da distância à partícula do solo, já não mais exercem sua influência.

A quantidade de água presa em um determinado grau

de umidade é função direta da superfície específica (Se) do solo, que por sua vez é função da textura e mineralogia (incluindo grau de cristalinidade, substituição isomórfica, tamanho de cristalitos, etc.).

Devido à grande intensidade das forças que atuam sobre a molécula de água presa, impedindo que ela possa girar livremente e alinhar seus dipólos, sua interação com uma onda eletromagnética incidente dá-se de modo bastante distinto da de uma molécula de água livre, a ponto de autores como Wang et alii (1980) considerarem que a água presa possui comportamento dielétrico semelhante ao gelo.

Segundo Dobson et alii (1985) pode-se calcular as frações de volume de água presa (V_{ap}) e volume de água livre (V_{al}) em uma determinada unidade volumétrica do solo por:

$$V_{ap} = m_v \leq d_\delta \text{ Se } \rho_a \times 10^{-4} \text{ gcm}^{-3} \quad (2.87)$$

$$V_{al} = m_v > d_\delta \text{ Se } \rho_a \times 10^{-4} \text{ gcm}^{-3} \quad (2.88)$$

$$U_v = \rho_a \frac{m_a}{m_s} \quad (2.89)$$

onde:

d_δ = espessura da camada de água presa (Å);

Se = superfície específica do solo ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);

ρ_a = densidade aparente do solo (gcm^{-3});

m_a = massa de água (g);

m_s = massa de material de solo seco (g)

U_v = unidade volumétrica do solo (gcm^{-3}).

Assume-se que exista uma camada máxima de água presa de espessura uniforme (d_s), e que os teores iniciais de água adicionada ao solo seco tornem-se efetivamente água presa.

Os valores de ϵ_r^* da água presa e da água livre são função de:

- frequência em que é realizada a medida de ϵ_r^* ;
- temperatura;
- salinidade do solo;
- salinidade da água.

Por outro lado os valores de ϵ_r^* para solos são função de:

- frequência em que é realizada a medida de ϵ_r^* ;
- temperatura;
- salinidade do solo;
- unidade volumétrica do solo;
- frações relativas de água presa e água livre;
- densidade aparente do solo;
- formato das partículas do solo;
- formato das inclusões de água.

A Figura 2.9 ilustra o comportamento dielétrico de dois solos genéricos distintos em uma dada frequência, sendo o solo A um solo arenoso e o solo B de natureza argilosa.

Segundo Wang e Schlugge (1980) a constante dielétrica de solos aumenta gradativamente com graus iniciais de umidade, a partir do solo seco, até atingir um determinado grau de umidade denominado de umidade de transição (UT). A partir deste ponto há um aumento acentuado da constante dielétrica com o aumento de umidade. O grau de umidade relativo à umidade de transição varia a classe de solo ou textura, sendo menor para solos arenosos que para solos argilosos, (como mostra a Figura 2.9). Isto ocorre devido à maior superfície específica dos solos argilosos e conseqüente maior quantidade de água presa em um dado grau de umidade em relação a solos arenosos, havendo menos contribuição às propriedades dielétricas do solo.

As curvas de constante dielétrica de solos VS. graus de umidade mostram duas regiões distintas, quais sejam:

- abaixo da umidade de transição ($U_m \leq U_t$);
- acima da umidade de transição ($U_m > U_t$).

A umidade de transição representa portanto ponto de transição entre a água presa e a água livre.

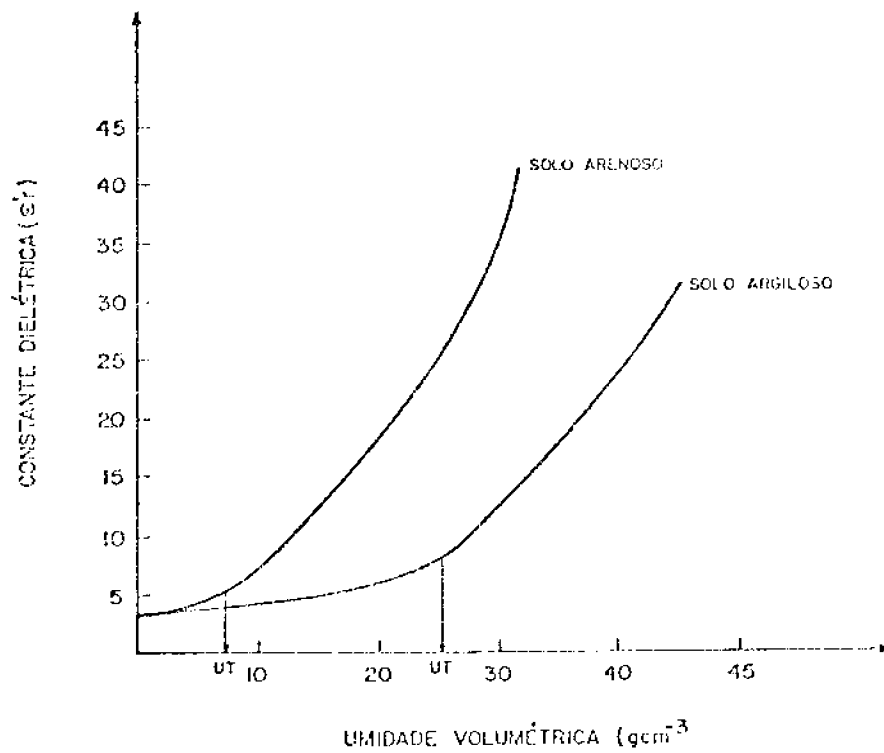


Fig. 2.9 - Comportamento de ϵ'_r para solos argilosos e arenosos em função da umidade volumétrica do solo.

Resultados de Wang e Schragge (1980) e Schragge (1984) mostram ha

ver alta correlação entre a umidade de transição e o ponto de murcha (PM) de solos, e conseqüentemente com a textura de solos. É de se esperar portanto que o comportamento da constante dielétrica em diferentes graus de umidade seja dependente da textura e da classe de solo.

Em física do solo o PM representa um teor de água onde a tensão do solo é da ordem de 15 atm. Para graus de umidade abaixo do PM torna-se extremamente difícil para as plantas extraírem água do solo. A água retida à temperatura de até 105°C (tensão de 31 atm) é denominada de água higroscópica, sendo considerada por muitos autores parte da estrutura mineral do solo.

A capacidade de campo (CC), de acordo com Medina (1972) representa a máxima quantidade de água que um solo é capaz de reter em condições normais de campo. Entre o PM e a CC, a água é retida nos poros por adsorção e capilaridade, sendo esta uma parte da água denominada de livre pelo modelo de dupla camada e que afeta significativamente a constante dielétrica de solos. A Figura 2.10 ilustra de modo esquemático o sistema água-solo com as diferentes "constantes" de umidade do solo.

Convém salientar que, como afirmam Bernardo (1982) e Hillel (1980), há controvérsia no que diz respeito à capacidade de campo, principalmente em solos de textura fina, admitindo-se ser a CC um conceito relativo.

A água no solo é atualmente aceita como dinâmi

ca, estando sempre em movimento, atendendo a um gradiente do potencial total (Curi et alii, 1986).

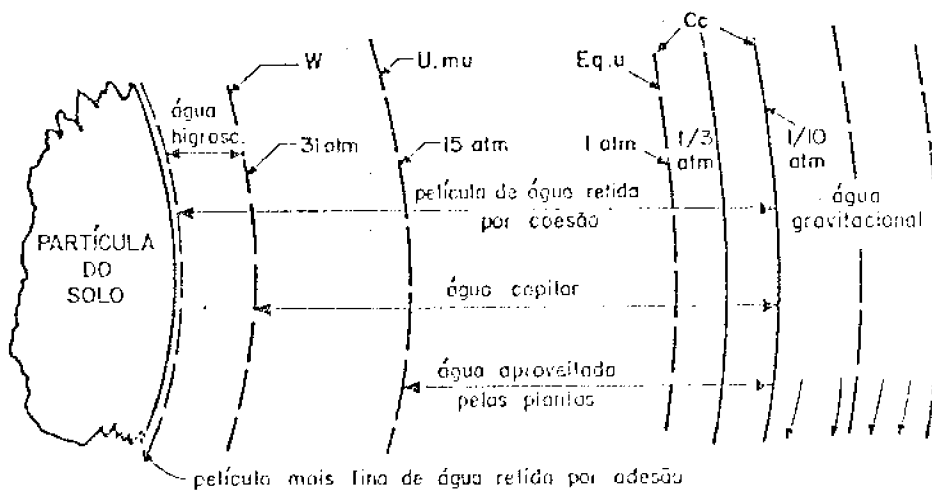


Fig. 2.10 - Representação esquemática do espessamento progressivo da película de água em um macroporo, da posição da água de adesão, de coesão, higroscópica, capilar, gravitacional e das diversas constantes de unidade. (Medina, 1972).

2.7 - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO.

A partir das medições da permitividade complexa das amostras de material de solo pode-se computar a penetração

tração da radiação no alvo, ou seja, de que profundidade provém a radiação detetada pelo radiômetro de microondas. O parâmetro penetração é de suma importância em estudos de Radiometria de Microondas, já que informa a respeito da espessura do alvo que está efetivamente contribuindo para o sinal detetado. A penetração depende essencialmente da freqüência e das propriedades dielétricas do alvo em questão.

Analisando-se a equação (2.46), onde:

$$e^{-2K_0 k_\lambda d} = e^{-\alpha d}$$

e a equação (2.47), onde:

$$\alpha = 2K_0 k_\lambda = \frac{4\pi v}{c_0} \cdot k_\lambda$$

e que estão relacionadas à absorção da radiação pelo meio, pode-se deduzir que, a expressão $e^{-\alpha d}$, associada à penetração, tende a zero quando "d" é infinito, decrescendo assinto-ticamente. Como o valor de α depende da freqüência e da permitividade complexa, sendo fixo para uma determinada condição, torna-se necessário estabelecer um critério que fixe um determinado valor para "d". Um critério comumente utilizado é o da profundidade de penetração, correspondente a um valor "d" para o qual a potência decresça para 1/e ou 0,37. Este critério no entanto, não satisfaz o presente trabalho, já que a precisão desejada no confronto entre a emissividade via permitividade complexa e a emissividade via radiômetro de microondas está em torno de 95%, ou seja, deseja-se que 95% da ra

radiação detectada pelo Radiômetro de Microondas seja proveniente do alvo em questão, sendo o mesmo praticamente opaco. Torna-se necessário portanto adotar um valor "d" para o qual a potência, decresça para 1/7e ou 0,05. Em outras palavras:

$$e^{-2\alpha d} = e^{-3} \quad (2.90)$$

Uma maneira rápida de se computar a profundidade de penetração da radiação é a utilização da equação:

$$\alpha = k \left[\frac{1}{2} (\sqrt{1 + \epsilon_r^2 \delta^2} - 1) \right]^{1/2} \quad (2.91)$$

que pode ser deduzida a partir da equação (2.47) e ser simplificada para:

$$\alpha = 1,48 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot [\epsilon_r \cdot (\sqrt{1 + \epsilon_r^2 \delta^2} - 1)]^{1/2}, \text{ m}^{-1} \quad (2.92)$$

Como para a profundidade de penetração

$$e^{-2\alpha d} = e^{-1} \quad e$$

para a profundidade considerada no presente trabalho

$$e^{-2\alpha d} = e^{-3}$$

tem-se que

$$P(e) = \frac{1}{2 \cdot \alpha}, \text{ m} \quad (2.93)$$

$$P(7e) = \frac{3}{2. \alpha}, m$$

(2.94)

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - DESCRIÇÃO DAS CLASSES DE SOLO.

A seguir faz-se uma descrição sucinta das classes de solo utilizadas no presente trabalho. A descrição dos solos PV₂, LV₃, LR-d e LE-1, baseia-se no levantamento pedológico semidetalhado dos solos do Estado de São Paulo-quadrícula de Campinas, Oliveira et alii (1979), enquanto que os solos Série Água Preta e Série Coruputuba constam do levantamento a nível de reconhecimento realizado por Verdade et alii (1961).

Procurou-se, apesar dos levantamentos terem sido realizados em níveis de detalhe distintos, agrupar as informações a princípio importantes.

3.1.1 - Solos da Quadrícula de Campinas.

a) PV₂ - Podzólico Vermelho-Amarelo álico, A moderado, relevo suave ondulado.

"Typic Paleudult (USA)"

Características gerais: apresentam horizonte A moderado, arenoso, sobre B textural, profundo, com textura média; solos muito ácidos com baixos valores de soma e saturação em base e com alumínio trocável ao longo do perfil.

Horizonte A: subdivide-se em geral em A₁ ou

A_p e A₂, textura arenosa; < 40cm; consistência ligeiramente dura, friável, não plástica e não pegajosa; estrutura granular pequena e/ou média fraca e cor bastante variável desde bruno-avermelhado-escura (5YR) até bruno-escura (10 YR 3/3); as cores mais escuras estão associadas com a presença de A moderado.

pH : solos muito ácidos apresentando valores médios da camada superficial em torno de 5,0.

Carbono: provavelmente devido à textura arenosa, os teores de carbono são pouco elevados; camada superficial com teores médios de 1%.

Soma de bases: valor médio na camada superficial igual a 1,5e.mg/100g TFSA.

Al Trocável: na superfície, devido a corretivos, os valores são em média iguais a 0,6 e.mg/100g TFSA; saturação em Al apresenta valores mais elevados em profundidade (valor médio = 57%) — Solos Alicó.

CTC: valores na camada superficial são muito baixos devido à pequena contribuição da fração argila, matéria orgânica e mineralogia (constituintes de baixa atividade coloidal) ; para 100g de argila a CTC apresenta valor médio de 37,2 e.mg na camada superficial.

Retenção de Cátions: em 54 pontos analisados

os valores são superiores a 1,5 e.mg/100g de argila.

Saturação em Bases: é baixa ao longo do perfil; camada superficial apresenta valores médios de 29%.

Granulometria: horizonte A apresenta textura fina arenosa (60% de areia fina e 14% argila).

Ferro "Total": perfil 1202 apresenta na camada superficial 0,6%.

Relevo de Ocorrência: suave ondulado e ondulado.

Utilização mais Freqüente: citrus, cana-de-açúcar, culturas anuais, pastagens, reflorestamento.

Observações: raízes finas e abundantes nas quatro primeiras camadas; poros pequenos e médios abundantes ao longo do perfil.

Digestão H_2SO_4 1:1 (amostra de 0-13cm de prof.).

Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)
2,6	0,6

b) LV₃ - Latossolo Vermelho Amarelo álico, A moderado, textura média, relevo suave ondulado.

"Typic Haplorthox (USA)"

Características Gerais: solos com textura mé
dia ao longo do perfil apresentando horizonte
A moderado, assente sobre um B latossólico, es
peso, apédico, de coloração vermelho-amarela
da; muito ácidos, com soma e saturação de ba
ses muito baixas e com Al trocável em teores
relativamente elevados ao longo do perfil.

Horizonte A: apresenta sub-horizontes A_1 ou
 A_p e A_3 ; coloração bruno-avermelhada-escura ,
seguida de bruno avermelhada ambas centradas
no matiz 5 YR; estrutura granular pequena ou
média fraca e consistência ligeiramente dura
ou mais branda, friável, ligeiramente plásti-
ca a plástica e ligeiramente pegajosa a pega
josa; espessura inferior a 30cm.

pH: solos bastante ácidos com camada superfi
cial apresentando valor médio de 5,0.

Carbono: teores baixos com valor médio na ca
mada superficial de 0,8%.

Soma de Bases: valor médio na camada superfi
cial de 1,2 e.mg/100g TFSA.

Al Trocável: valores em torno de 1,0 e.mg/100g
TFSA, saturação em Al > 50% → Solos Álicos.

CTC: devido aos baixos valores de C e Soma de

Bases, a CTC é baixa mesmo na camada superficial, 27,2 e.mg/100g argila.

Retenção de Cátions: valores superiores a 1,5 e.mg/100g argila.

Saturação em Bases: 23% na camada superficial; elevado estágio de dessaturação.

Granulometria: textura média sendo areia fina a fração mais abundante com valor médio de 48%; somatório de areia fina mais areia grossa atinge geralmente valores superiores a 70%.

Ferro "Total" : valores inferiores a 4%.

Relevo de Ocorrência: suave ondulado.

Utilização mais freqüente: citrus, algodão, reflorestamento e pastagem.

Observações: raízes finas abundantes nas camadas a, b e c.

Digestão H_2SO_4 1:1 (amostra de 0-20 de prof.)

Al_2O_3 (%)

7,5

Fe_2O_3 (%)

2,3

c) LR-d - Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado.

"Typic Haplorthox, include Typic Acrorthox (USA)"

Características Gerais: solos argilosos, espessos, friáveis e porosos; horizonte B apédico, de cor bruno-avermelhada-escura ou vermelho muito escura; apresentam elevados teores de ferro total os quais devido à alta contribuição de magnetita podem ser estimados no campo com emprego de inãs; solos ácidos com soma e saturação em bases baixas, porém com baixos teores de alumínio trocável ao longo do perfil.

pH : solos ligeiramente ácidos, com valores mêdios de 5,0; os valores de pH em H₂O são bastante próximos dos valores em cloreto de potássio, denotado a presença de complexo coloidal com reduzida carga, sendo este fato ratificado pelos dados de retenção de cátions cujos valores inferiores a 1,5 e.mg/100g argila identificam um solo altamente intemperizado.

Carbono: teores relativamente elevados de C em superfície, havendo decréscimo ao longo do perfil.

Soma de Bases: teores baixos com valores médios de 1,4 e.mg/100g.

Al Trocável: valores baixos não atingindo em mêdia 0,5 e.mg/100g TFSA na camada subsuperficial (abaixo de 50% — solos não álicos).

CFC: valores médios inferiores a 10 e.mg/100g argila denotando baixa atividade do complexo coloidal.

Retenção de Cátions: valores médios de 3 e.mg/100g de argila.

Saturação em Bases: valor médio para a camada subsuperficial de 12% qualificando o solo como distrófico.

Granulometria: textura argilosa com valores médios de 60% em profundidade; fração mais importante depois da argila é a areia fina (média de 22%); teores de areia grossa inferiores a 10%.

Ferro "Total": valores em média superiores a 22%.

Relevo de Ocorrência: ondulado.

Utilização mais freqüente: cana-de-açúcar, algodão, citrus.

Digestão H_2SO_4 1:1 (amostra de 0-21cm de prof.)

Al_2O_3 (%)

17,5

Fe_2O_3 (%)

23,9

- d) LE-1 - Latossolo Vermelho-Escuro álico, A moderado, textura argilosa, relevo aplainado ou suave ondulado.

"Typic Haplorthox, inclue Acrorthox (USA)".

Características Gerais: solos profundos, bem drenados, porosos, de coloração vermelha-escura ou vermelha e textura argilosa ao longo do perfil; apresentam A moderado assente sobre um B latossólico friável, espesso e com grande homogeneidade vertical sendo normalmente difícil após a camada superficial a identificação de sub-horizontes; soma de bases baixa a muito baixa, baixa saturação em bases e com alumínio trocável ao longo do perfil.

Horizonte A: A_p ou A_1 e A_3 espessura em torno de 30cm; textura argilosa; estrutura do A_1 quando preservada é granular pequena ou média fraca; nas áreas intensamente agricultadas como cana-de-açúcar há degradação da estrutura original, havendo formação de blocos médios e pequenos, sem superfície de fraqueza definida, duros, os quais acham-se misturados à massa do solo constituída por agregados que lembram uma estrutura granular pequena; a consistência varia de ligeiramente dura a dura, friável, plástica e pegajosa e o horizonte A_3 , em geral, apresenta estrutura subangular média fraca; porosidade é elevada ao longo do perfil.

pH : solos muito ácidos ou ácidos com valores médios de 5,1 para a camada superficial; pH em

KCl, determinado no perfil 1205, é inferior ao pH em H₂O, indicando predominância de cargas negativas no complexo coloidal.

Carbono: teores baixos na camada superficial com média de 1,4%.

Soma de Bases: valor médio na camada superficial de 2.60 e.mg/100g TFSA, havendo grande variabilidade.

Al Trocável: teores médios de 0,8 e.mg/100g TFSA na camada superficial; saturação de 33%; valor médio próximo a 50% na camada subsuperficial levou os autores a considerar o solo como sendo álico.

CTC: valores baixos em torno de 8,0 e.mg/100g TFSA; recalculado para 100g de argila é de 20,3 e.mg.

Retenção de Cátions: de 109 pontos amostrados, apenas 4 com valor na camada subsuperficial menores que 1,5 e.mg/100g de argila.

Saturação em Bases: 31% na camada superficial, distrófico.

Granulometria: textura argilosa, areia grossa em geral inferior a 15%; a fração areia fina com valor médio de 28% no horizonte B, é a fração mais abundante depois da argila.

Ferro "Total": média de 10% ao longo do perfil.

Relevo de Ocorrência: suave ondulado.

Utilização mais Freqüente: cana-de-açúcar, algodão.

Observações: poros pequenos e médios abundantes ao longo do perfil.

Digestão H_2SO_4 1:1 (amostra de 0-25cm de prof.)

Al_2O_3 (%)

16,9

Fe_2O_3 (%)

7,7

3.1.2 - Solos da Bacia de Taubaté.

- Características Gerais.

Formam os mais baixos terrenos das várzeas do Rio Paraíba (SP). Resultam no acúmulo de M.O., recoberta por uma camada variável de argila sem mica; em profundidade apresentam lençol de argila "cor de chumbo", formada em condições altamente redutoras; topografia é plana sendo os solos de mal a muito mal drenados; os mesmos solos estão se desenvolvendo nos antigos meandro do rio.

Nas camadas argilosas a massa específica aparente é ao redor de $0,8 \text{ g.cm}^{-3}$ (bem estruturados) decrescendo para $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$ nas camadas de Muck; porosidade de cerca de 65% nas camadas de argila e 85% nas de Muck.

Solos muito ácidos, com altos teores de M.O. e

Nitrogênio, mesmo para as camadas argilosas; quantidades de Fósforo e de Potássio trocáveis são de médias e altas; teores de Cálcio e Magnésio são muito baixos; solos possuem alta CTC e baixíssimo índice de saturação.

Nas camadas mais profundas reinam condições altamente redutoras havendo desprendimento do gás sulfídrico, proveniente da evolução dos compostos sulfurados das plantas.

Estes solos revelam contração quando submetidos à secagem, chegando alguns a serem irreversíveis.

a) Série Água Preta (SAP)

Características Gerais: camada profunda de argila, cortada por um lençol de turfa; Muck a 1 metro; presença de raízes finas no horizonte A.

Camada de 0-30cm: argilosa, muito plástica e pegajosa, firme, de estrutura granular bem desenvolvida, de cor grísea e grísea rosácea, com mosqueamento.

Perfil 744: Campo de Pesquisas de Água Preta (DAEE)
Pindamonhangaba (em 9.10.1956).

Fatores de Formação: deposição de aluvião argiloso sem mica sobre a formação Bog; solo que corresponde ao aterramento do Bog por sedimentos recentes de aluvião; relevo plano, de várzea, drenagem imperfeita e má; terreno cultivado com arroz.

0-30cm: horizontes A₁ e A₃; cor.seca superficial 5 YR

7/1 a 8/1, com mosqueamento 7,5 YR 6/8; cor úmida 5 YR 6/2 a 6/1 com mosqueamento; textura argilosa com alto teor de matéria orgânica; estrutura angular grossa, forte (aração); estrutura fundamental é granular média e fina, forte, que a aração deixa completamente solta; consistências de muito plástica, muito pegajosa, firme e dura; todas as raízes finas estão nesta camada; limite abrupto; porosidade de 67,2%.

b) Série Coruputuba (SC)

Características Gerais: argila sobre Muck que cobre a argila "cor de chumbo", estes solos ocorrem nas partes mais baixas das várzeas.

Camada de 0 a 20cm: argilosa de cor grísea a grísea leve, com estrutura granular na superfície e sub-angular nas partes inferiores; muito plástica e muito pegajosa; camada bastante mosqueada.

Perfis 746-747: Campo de Pesquisas de Água Preta (DAEE) Pindamonhangaba (em 10.10.1956, respectivamente).

Fatores de Formação: deposições de sedimentos argilosos de aluvião sobre a formação Bog; solo representa um entulhamento de aluvião sobre uma bacia de Bog; relevo é plano, de várzea, com solo de drenagem má a imperfeita; cultura de arroz.

0-15cm: horizonte A_{1p} e A₃; cor seca 10 YR 5/1 a 6/1 ,

com mosqueamento 7,5 YR 5/8, comum, fino distinto (nos canais das raízes); textura é argilosa; estrutura é granular, média e fina, forte, cava em sub-angular até granular; consistências de muito plástica, muito pegajosa, friável e dura; contém 85% das raízes finas; limite abrupto; camada é argilosa; porosidade de 60,8% e 65,7%, respectivamente.

3.2 - COLETA DAS AMOSTRAS DE MATERIAL DE SOLO.

As amostras de material de solo referentes aos solos da Quadrícula de Campinas foram coletadas nos pontos indicados na Figura 3.1, e o Vale do Paraíba nos locais assinalados conforme consta da Figura 3.2. Coletaram-se amostras de material de solos apenas na camada de 0-30cm e as amostras foram posteriormente encaminhadas para análises físicas e químicas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura de Lavras (ESAL), constando os resultados destas análises no Apêndice A. No caso específico da determinação da densidade aparente (ρ_a) das amostras, empregou-se o método do anel de volume conhecido, utilizando-se média de seis repetições. Os demais parâmetros foram determinados por métodos convencionais de laboratório.



Fig. 3.1 - Parte do mapa do levantamento pedológico semidetalhado dos solos do Estado de São Paulo-Quadrícula de Campinas (escala aproximada 1:100.000), com indicação dos locais (.) onde foram coletadas as amostras de material de solo (Oliveira et alii, 1979).

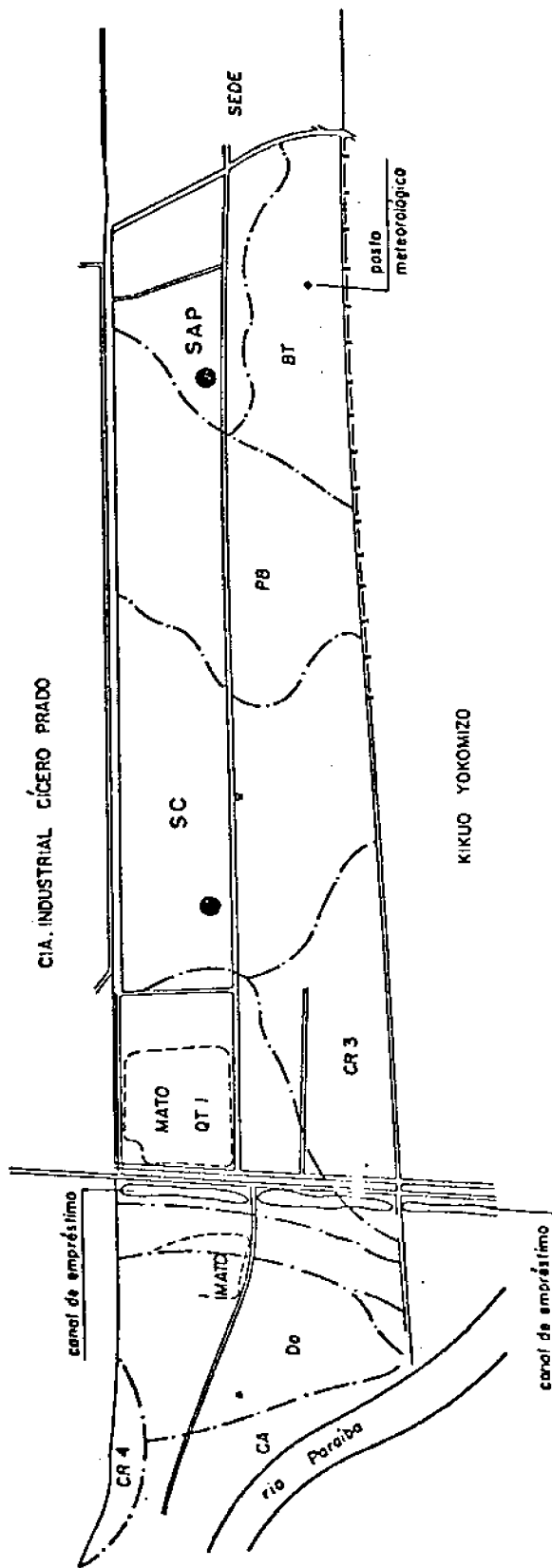


Fig. 3.2 - Planta esquemática da Fazenda Água Preta (Estação Experimental DAEE/Pindamonhangaba) com as classes de solos de ocorrência e indicação dos locais onde foram coletadas amostras de material dos solos (.) SAP e SC.

3.3 - DETERMINAÇÃO DA PERMITIVIDADE COMPLEXA DOS SOLOS.

De modo a caracterizar-se as seis classes de solos dielétricamente em diversos graus de umidade, na faixa X de microondas, tornou-se necessário determinar a permitividade complexa destes solos. Esta determinação forneceu como resultados a constante dielétrica relativa (ϵ_r'), o fator de perda relativo (ϵ_r''), a tangente de perda ($\text{tg } \delta$) e a condutividade elétrica (σ) das diferentes amostras.

Realizou-se a determinação da permitividade complexa das amostras no laboratório de microondas do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) - Centro de Pesquisas. Apesar de o IMT já possuir vasta experiência em estudos da permitividade de diferentes materiais e/ou substâncias, fez-se necessário desenvolver uma metodologia própria visto ser o estudo dielétrico de solos um assunto inédito no Brasil, e o fato de os solos serem considerados misturas dielétricas fazendo com que a obtenção de medidas confiáveis da permitividade complexa torne-se mais crítica.

Empregou-se o método de guias de onda com curto fixo, sendo a frequência a de 10,62GHz, coincidente com a frequência central de operação do Radiômetro de Microondas (RMO) desenvolvido pelo INPE, e com o diagrama de radiação da antena circular corrugada do mesmo radiômetro. A Figura 3.3 ilustra esquematicamente a montagem do sistema de medição utilizado.

Peneirou-se previamente às medidas todas as amostras de solo em uma peneira 2,0mm. Procedeu-se em seguida uma nova determinação da densidade aparente dos solos.

A preparação propriamente dita das amostras para o processo de medição constitui de:

- 1) Secagem da amostra em estufa a $105-110^{\circ}\text{C}$, 24-28 horas.
- 2) Pesagem de uma amostra de material de solo seco de 12,00g.
- 3) Adição de um peso conhecido de água à amostra de material de solo seco.
- 4) Homogeneização da umidade na amostra.
- 5) Introdução da amostra úmida em três guias de onda previamente calibrados, obtendo-se três amostras de um mesmo material de solo igual grau de umidade, porém com espessuras diferentes, quais sejam: 15mm, 10mm e 5mm.
- 6) Verificação da frequência do gerador de sinal.
- 7) Medição com três repetições para cada espessura de amostra.

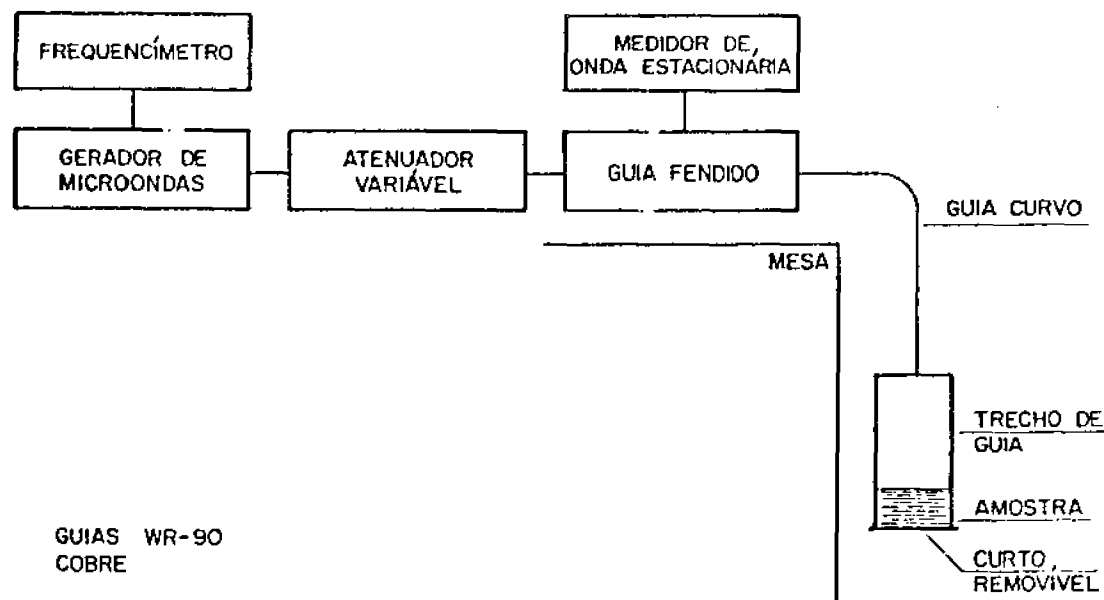


Fig. 3.3 - Esquema do sistema de medição da permitividade complexa de amostras de material de solo.

Efetuu-se os cálculos necessários à obtenção de ϵ_R' , ϵ_R'' , $\text{tg}\delta$ e σ a partir das medições em 10,62GHz, utilizando-se um programa computacional desenvolvido por Nelson et alii (1974), que encontra-se implementado em um microcomputador pertencente ao IMT, onde os princípios do método de medição são:

Na utilização deste método, a determinação das componentes real e imaginária da permitividade relativa complexa ($\epsilon_R^* = \epsilon_R' - j\epsilon_R'' = \epsilon_R' (1 - \text{tg}\delta)$) da amostra requer medições da taxa de onda estacionária (S) e da posição dos mínimos de tensão, sem e com a amostra na extremidade curto-circuitada do guia de onda. Os valores da constante dielétrica (ϵ_R') e do fator de perda (ϵ_R'') são obtidos a partir das seguintes equações:

$$\epsilon_R' - j\epsilon_R'' = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 - \left(\frac{\gamma_2 d \lambda_0}{2\pi d}\right)^2 \quad (3.1)$$

$$\frac{\tanh \gamma_2 d}{\gamma_2 d} = - \frac{j\lambda_g}{2\pi d} \cdot \frac{1 - j S \tan\left(\frac{2\pi z_0}{\lambda_g}\right)}{S - j \tan\left(\frac{2\pi z_0}{\lambda_g}\right)} \quad (3.2)$$

onde:

λ_0 = comprimento de onda do espaço livre na frequência em que está sendo realizada a medição.

λ_c = comprimento de onda de corte do guia utilizado.

$\gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$ = constante de propagação complexa na amostra no guia.

z_0 = distância da interface amostra-ar ao primeiro mínimo de tensão fora da amostra.

$\lambda_g = \lambda_1$ = comprimento de onda no guia no trecho sem amostra.

S = taxa de onda estacionária (TOE) com a amostra no guia.

Os valores de $\text{tg} \delta$ e σ são derivados diretamente das equações (2.33) e (2.37).

De início determinou-se as permitividades complexas dos materiais de solos secos e da água. Posteriormente preparou-se, para cada classe de solo, amostras com diferentes graus de umidade, conforme descrito anteriormente.

Utilizou-se então os resultados destas determinações para caracterizar o comportamento da permitividade complexa em função do grau de umidade e da classe de solo. Também através do uso de programas computacionais desenvolvidos utilizando equações do Capítulo 2, integração numérica de Simpson 3ª ordem, e os valores normalizados do diagrama de radiação da antena do RMO (Tabela 3.3), estimou-se a emissividade integrada dos solos em 10,62GHz, determinando-se ainda o ângulo efetivo de resolução espacial do RMO. Finalmente estimou-se a emissividade hemisférica e profundidade de penetração da radiação no solo em função da umidade e classe de solo.

3.4 - RADIÔMETRO DE MICROONDAS - RMO.

Através de um esforço conjunto de alguns Departamentos do INPE, iniciou-se em 1984 o desenvolvimento de um

radiômetro na faixa X de microondas para aplicações em Sensoriamento Remoto, tendo sido vários de seus sub-sistemas (antena, oscilador local, entre outros) construídos e desenvolvidos no próprio Instituto.

O radiômetro entrou em operação no final de 1985 quando foram efetuados os primeiros testes de estabilidade e calibração nas dependências do INPE/SJC e INPE/ATIBAIA.

Ainda no final de 1985 realizaram-se três missões de campo em áreas agrícolas pertencentes ao Campo de Pesquisas do DAEE - Pindamonhangaba.

Diante da falta de informações sobre o comportamento, principalmente da permitividade complexa, de solos das regiões tropicais em função do grau de umidade, inviabilizando a correta interpretação dos dados coletados nas missões, optou-se pela estratégia de somente retornar ao campo após a conclusão de estudos que envolvessem:

- Medição da permitividade complexa de solos de importância agrônômica.
- Estimativas, a partir destas medições da T_B e emissividade que deveriam ser registradas pelo RMO no campo.
- Estimativas da condutividade elétrica e profundidade de penetração da radiação.

A Tabela 3.1 mostra as especificações técnicas do radiômetro. A Tabela 3.2 apresenta os valores normalizados de $F_n(\theta)$ da antena circular corrugado do RMO em 10,62GHz, em função de θ e ϕ .

A Figura 3.4 mostra o diagrama de radiação da antena circular corrugada em 10,62GHz.

TABELA 3.1

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO RADIÔMETRO COM ANTENA

RADIÔMETRO DE MICROONDAS (DESENVOLVIDO NO INPE)	
TIPO	DICKE NÃO BALANCEADO
Frequência (GHz)	10,62
Banda de RF (GHz)	1,0
Tempo de integração (ms)	1000 e 100
Temperatura do receptor (K)	~ 2000
Sensibilidade RMS (K)	0,6 e 2,0
Polarização	Linear
Ângulo de abertura(-3dB) (graus)	24

TABELA 3.2

VALORES NORMALIZADOS DE $F_n(\theta)$ DA ANTENA CIRCULAR CORRUGADA DO RMO

θ	$\phi=0$	$\phi=45$	$\phi=90$	VALORES MÉDIOS DE $F_n(\theta)$
0	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,977	0,978	0,978	0,978
4	0,913	0,914	0,915	0,914
6	0,814	0,816	0,818	0,816
8	0,692	0,695	0,699	0,695
10	0,560	0,565	0,569	0,565
12	0,430	0,435	0,441	0,435
14	0,313	0,318	0,324	0,318
16	0,214	0,219	0,224	0,219
18	0,137	0,142	0,146	0,142
20	0,082	0,085	0,088	0,085
22	0,045	0,047	0,049	0,047
24	0,022	0,023	0,025	0,023
26	0,010	0,011	0,011	0,011
28	0,004	0,005	0,005	0,005
30	0,002	0,002	0,002	0,002
32	0,002	0,002	0,002	0,002
34	0,002	0,002	0,002	0,002
36	0,002	0,002	0,002	0,002
38	0,002	0,002	0,002	0,002
40	0,002	0,002	0,002	0,002
42	0,001	0,001	0,001	0,001
44	0,001	0,001	0,001	0,001
46	$4,475E^{-4}$	0,001	0,001	0,001
48	$2,217E^{-4}$	$2,647E^{-4}$	$3,131E^{-4}$	$2,665E^{-4}$
50	$1,000E^{-4}$	$1,195E^{-4}$	$1,468E^{-4}$	$1,221E^{-4}$
52	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
54	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
56	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$

(continua)

Continuação da Tabela 3.2.

θ	$\phi=0$	$\phi=45$	$\phi=90$	VALORES MÉDIOS DE $F(\theta)$
58	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
60	$1,203E^{-4}$	$1,085E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,096E^{-4}$
62	$1,338E^{-4}$	$1,250E^{-4}$	$1,166E^{-4}$	$1,251E^{-4}$
64	$1,376E^{-4}$	$1,325E^{-4}$	$1,274E^{-4}$	$1,325E^{-4}$
66	$1,335E^{-4}$	$1,318E^{-4}$	$1,301E^{-4}$	$1,318E^{-4}$
68	$1,239E^{-4}$	$1,251E^{-4}$	$1,264E^{-4}$	$1,251E^{-4}$
70	$1,111E^{-4}$	$1,146E^{-4}$	$1,181E^{-4}$	$1,146E^{-4}$
72	$1,000E^{-4}$	$1,023E^{-4}$	$1,074E^{-4}$	$1,032E^{-4}$
74	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
76	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
78	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
80	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
82	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
84	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
86	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
88	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$
90	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$	$1,000E^{-4}$

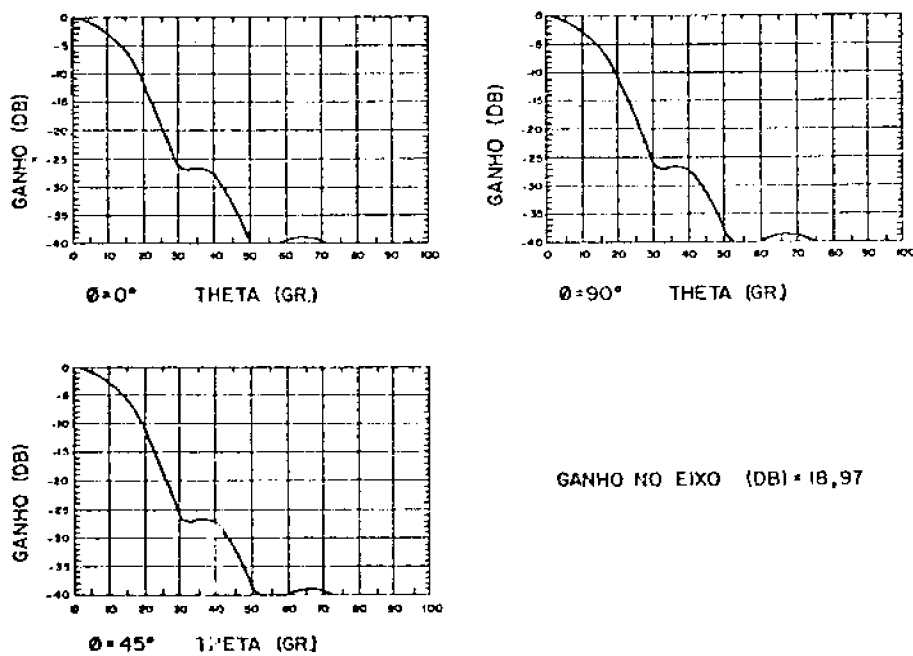


Fig. 3.4 - Diagrama de radiação da antena circular corrugada em 10,62GHz.

3.5 - DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO EFETIVO DE RESOLUÇÃO ESPACIAL DA ANTENA RMO.

Define-se teoricamente o ângulo de resolução espacial de uma antena como o ângulo compreendido pelas pontas de nível -3dB no diagrama de radiação da antena.

No presente trabalho, foi necessário definir o ângulo $\bar{\theta}$, a partir do diagrama de radiação e cálculos da potência registrada pelo RMO via permitividade complexa, como sendo o ângulo máximo de "visão" em função da sensibilidade do radiômetro. Alvos de mesma T_B , situados a ângulos maiores que $\bar{\theta}$ tem contribuição radiométrica inferior à sensibilidade do radiômetro (Fig. 3.5).

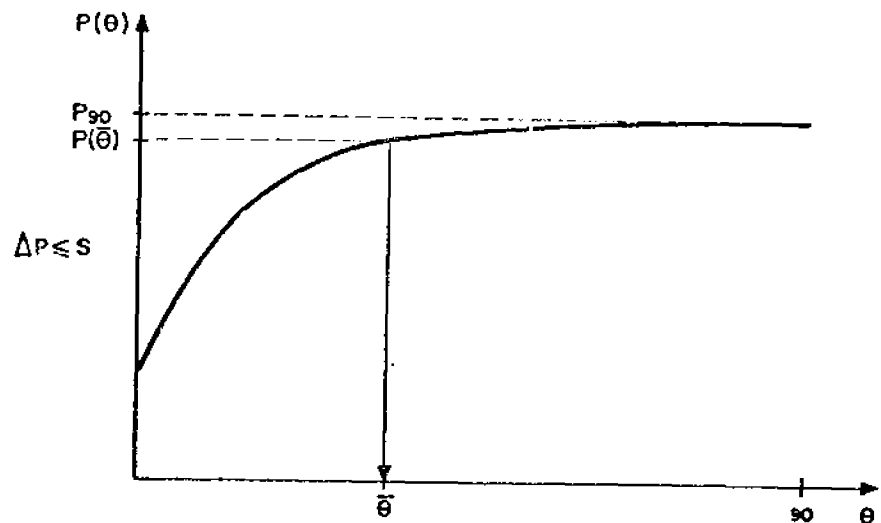


Fig. 3.5 - Gráfico da potência relativa em função do ângulo θ do diagrama de radiação da antena do RMO.

A sensibilidade de um radiômetro é função da figura de ruído do receptor, banda equivalente de ruído, constante de tempo de integração na saída e imunidade a interferências. Normalmente é definida em graus Kelvin, estabelece o valor de menor contribuição radiométrica que se pode medir. Deseja-se determinar a partir de que valor de θ , $\Delta P \leq S$ (onde S representa a sensibilidade do RMO).

Para um radiômetro a sensibilidade é definida em função do ruído nos terminais de saída. O valor eficaz do ruído de saída de um radiômetro é dado por:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{SYS}}}{\sqrt{B \cdot \tau}} \text{ K, (RMS)} \quad (3.3)$$

onde:

$$T_{\text{sys}} = T_R + T_A$$

B = banda de RF

τ = tempo de integração.

O critério adotado para a determinação de $\bar{\theta}$ estipula que:

$$\Delta P = P_{90} - P_{\bar{\theta}} \leq S \quad (3.4)$$

onde:

$$S = k \cdot \Delta T \text{ (sensibilidade do RMO)}$$

$$P_{90} = k \cdot T \text{ (potência proporcional a T)}$$

$$T = T_B \text{ média do alvo.}$$

então

$$(k.T) - \frac{P_{\bar{\theta}}}{\bar{\theta}} = k.\Delta T$$

dividindo-se ambos os termos por P_{90} obtém-se:

$$\frac{(P_{90} - \frac{P_{\bar{\theta}}}{\bar{\theta}})}{P_{90}} = \frac{k.\Delta T}{k.T}$$

Finalmente

$$P_{\bar{\theta}} = (1 - \frac{\Delta T}{T}) \cdot P_{90} \quad (3.5)$$

3.6 - MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS.

Utilizou-se uma análise de regressão para se estabelecer a relação estatística entre as variáveis. A hipótese padrão feita na análise foi a de linearidade do modelo que descreve os dados. Assim o modelo relacionando y e x , pode ser expresso por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + u_i \quad (3.6)$$

onde β_0 e β_1 representam os parâmetros do modelo de regressão e u_i um distúrbio aleatório. Esses parâmetros foram estimados pelo método dos mínimos quadrados (minimização da soma dos quadrados dos resíduos).

Admitiu-se que na amplitude das observações a equação estabelecida forneceu uma aproximação aceitável da verdade.

deira relação entre as variáveis. Desta forma y foi assumida ser uma função linear de x e a discrepância desta aproximação dada por u .

Assumiu-se também que para cada valor fixo de x os u 's fossem quantidades aleatórias independentes, normalmente distribuídas com média zero e variância comum denotada por σ^2 .

O atendimento às restrições impostas ao modelo foi verificado através de uma análise de resíduos, a qual será devidamente explorada mais adiante neste capítulo.

Nos casos onde o modelo linear não pareceu adequado tentou-se então ajustes por modelos de regressão envolvendo funções do tipo exponencial, logarítmica ou potência.

Essas funções, todavia, são linearizáveis através de transformações apropriadas.

Desta forma gráficos do tipo a e b da Figura 3.6 são exemplos de funções de regressão do tipo $y = \alpha \cdot x^\beta \cdot u$ que podem ser linearizadas pela transformação $y' = \ln y$ e $x' = \ln x$, $u' = \ln u$, $\alpha' = \ln \alpha$ fornecendo a forma linear do modelo:

$$y' = \alpha' + \beta x' + u' \quad (3.7)$$

α' e β podem ser estimados através do método dos mínimos quadrados.

Da mesma forma gráficos do tipo c e d são representativos de funções de regressão do tipo $y = \alpha \text{ EXP}(\beta x) \cdot u$, linearizáveis através da transformação $y' = \ln y$, $u' = \ln u$, $\alpha' = \ln \alpha$ fornecendo a forma linear $y' = \alpha' + \beta x + u'$.

Já os gráficos do tipo e e f representam funções do tipo $y = \alpha + \beta \log x + u$ que através da transformação $x' = \log x$ transforma-se em funções lineares do tipo $y = \alpha + \beta x' + u$.

Após a obtenção dos estimadores de α , β e σ^2 avaliou-se o ajuste dos modelos aos dados observados. Inicialmente, o índice utilizado para este fim foi o coeficiente de determinação, R^2 , que pode ser interpretado como a proporção da variabilidade total em y explicada por x .

Para examinar se x explicava uma quantidade significativa da variação em y , testou-se a hipótese $H_0: \rho = 0$ contra a alternativa $H_1: \rho \neq 0$ (onde ρ é o coeficiente de correlação na população) ao nível de significância de 5%, através da estatística

$$t = \frac{|R| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (3.8)$$

onde t é um valor da variável t de Student com $n-2$ graus de liberdade.

Pelo fato de os resultados obtidos serem válidos somente se as hipóteses relativas aos resíduos forem verdadeiras é que se investigou a estrutura dos mesmos em gráficos apropriados. Manteve-se em mente que um valor alto de r^2 (próximo de 1) ou uma estatística t significativa não necessariamente garantem um bom ajuste aos dados. Anscombe (1973) apresenta um exemplo que ilustra este fato: são fornecidos 4 conjuntos de dados com diferentes padrões mas apresentando mesma estatística sumária (Tabela 3.3, Figura 3.7). Uma análise baseada somente no exame dessas estatísticas sumárias não seria

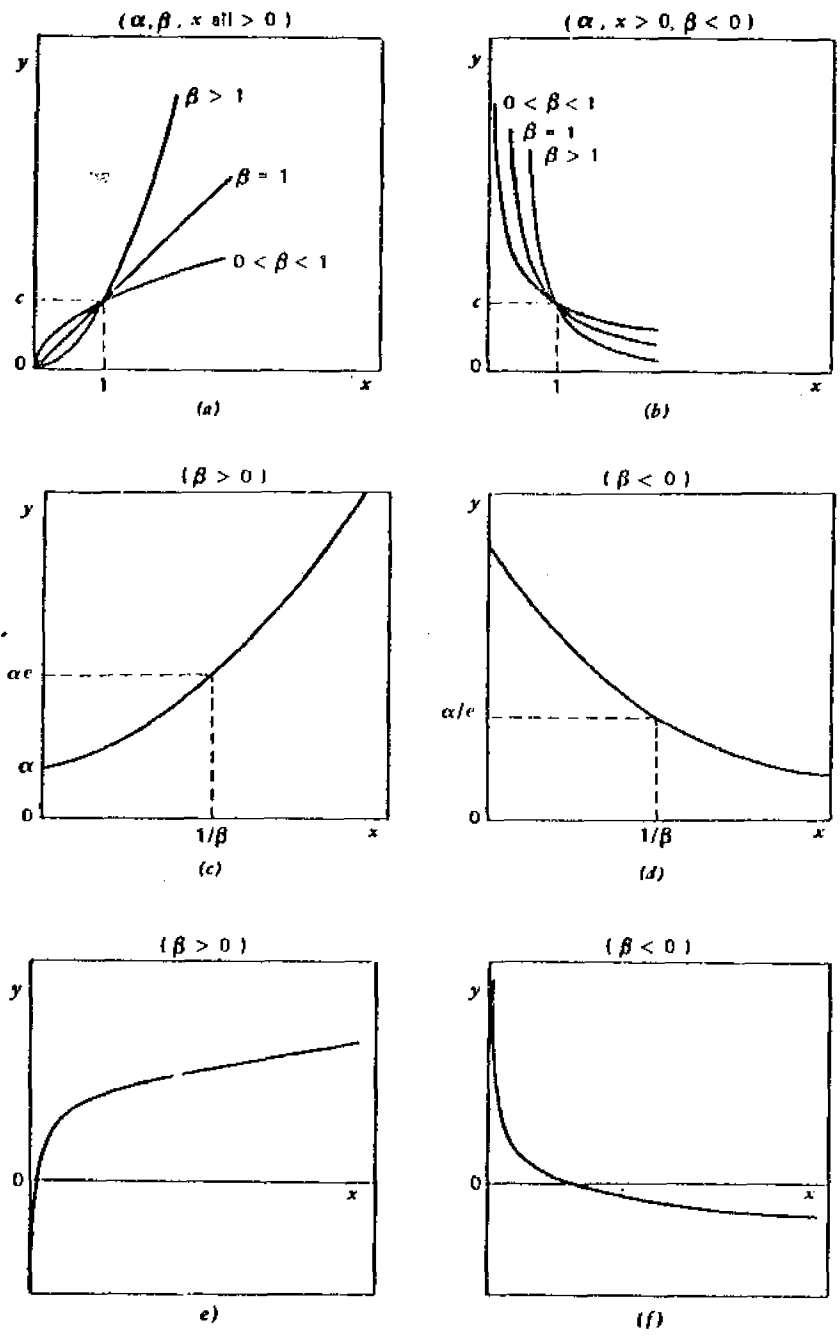


Fig. 3.6 - Gráficos de funções linearizáveis.

capaz de detetar as diferenças em padrões produzindo, conseqüentemente, uma análise incorreta.

O exame dos resíduos permite investigar se as hipóteses impostas ao modelo estão sendo respeitadas. Essas hipóteses, já salientadas anteriormente dizem respeito à:

- 1) Normalidade dos resíduos.
- 2) Independência e aleatoriedade dos resíduos.
- 3) Homocedasticidade.

Para verificar a normalidade dos resíduos utiliza-se um gráfico probabilístico normal cuja característica é a de que uma distribuição perfeitamente normal no mesmo se apresenta como uma linha reta. Assim os resíduos padronizados da distribuição sendo investigada devem se situar próximos à reta traçada para uma curva normal com média zero e desvio padrão 1. Desvios substanciais desta condição são indicadores de que a distribuição sob investigação não é normal.

A aleatoriedade e independência dos resíduos pode ser verificada plotando-se tanto os resíduos padronizados versus os valores da variável independente, quanto os valores dos resíduos padronizados versus os valores estimados da variável dependente. Os valores dos resíduos padronizados devem-se concentrar entre -2 e +2 variando de forma aleatória ao redor do valor zero. A distribuição dos resíduos não deve apresentar um padrão discernível, isto é, não deve mudar de forma sistemática com os valores da variável independente e dos valores estimados da variável independente.

Um gráfico dos resíduos versus a variável independe

TABELA 3.3

QUATRO CONJUNTOS DE DADOS COM MESMA ESTATÍSTICA SUMÁRIA

	<u>X1</u>	<u>Y1</u>	<u>X2</u>	<u>Y2</u>	<u>X3</u>	<u>Y3</u>	<u>X4</u>	<u>Y4</u>
001	10	8,04	10	9,14	10	7,46	8	6,58
002	8	6,95	8	8,14	8	6,77	8	5,76
003	13	7,58	13	8,74	13	12,74	8	7,71
004	9	8,81	9	8,77	9	7,11	8	8,84
005	11	8,33	11	9,26	11	7,81	8	8,47
006	14	9,96	14	8,10	14	8,84	8	7,04
007	6	7,24	6	6,13	6	6,08	8	5,25
008	4	4,26	4	3,10	4	5,39	19	12,50
009	12	10,84	12	9,13	12	8,15	8	5,56
010	7	4,82	7	7,26	7	6,42	8	7,91
011	5	5,68	5	4,74	5	5,73	8	6,89

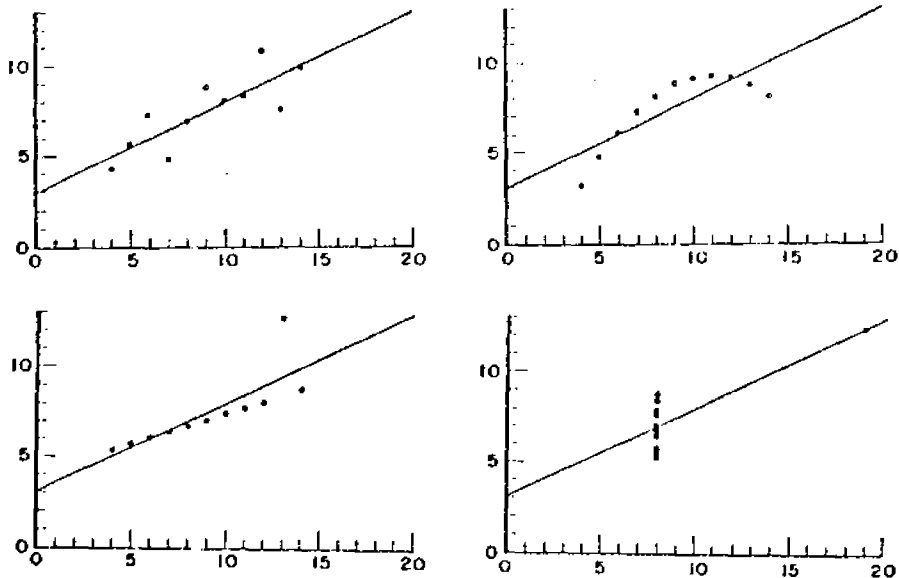


Fig. 3.7 - Plotagem dos quatro conjuntos de dados da Tabela 3.4 e suas respectivas retas de ajuste.

te não só é útil na verificação da linearidade da função de regressão, como também na detecção da heterocedasticidade. Se este gráfico apresentar os resíduos contidos entre duas bandas paralelas ao eixo x então não há evidência de heterocedasticidade. Entretanto caso os resíduos tenderem a se concentrar em uma banda que diverge ao longo do eixo x, ou seja, torna-se mais larga ou mais estreita, então deve-se suspeitar que a condição de estabilidade (constância de variância do erro) não está sendo satisfeita (Ver Figura 3.8).

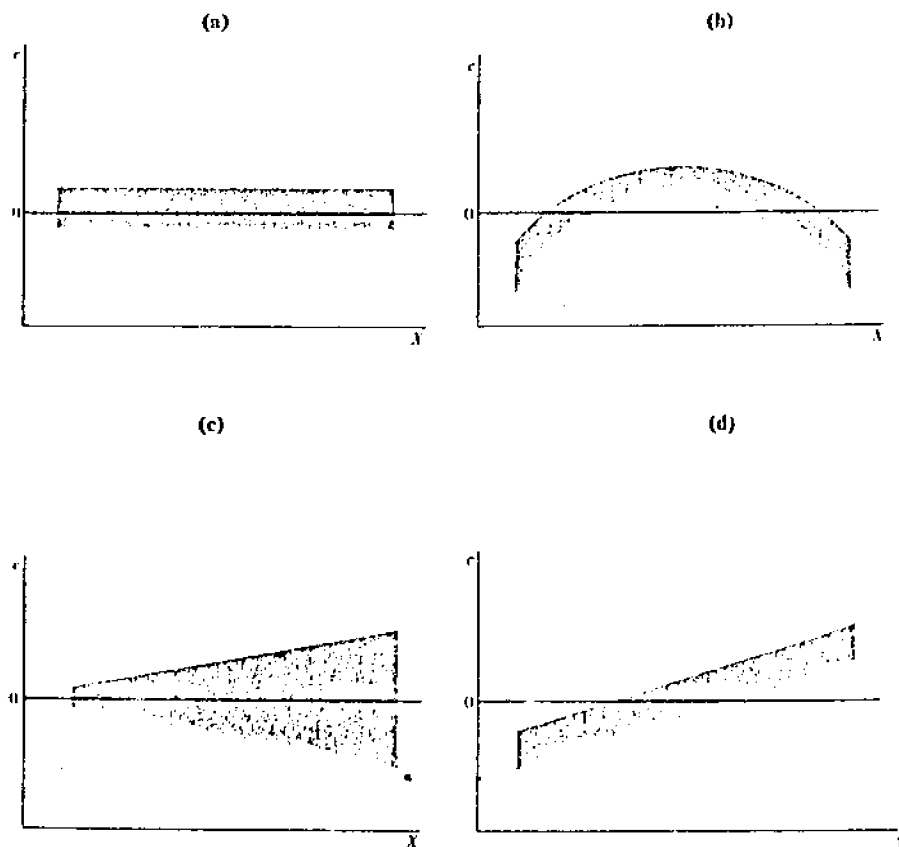


Fig. 3.8 - Gráficos de padrões da plotagem dos resíduos versus a variável independente.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE ϵ_r^* E DOS CÁLCULOS DAS QUANTIDADES FÍSICAS DE INTERESSE.

As Tabelas 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11 mostram os resultados obtidos relativos à permitividade complexa das amostras de material de solo em função de umidade. Os resultados estão agrupados por classe de solo, tendo sido efetuado para cada amostra, uma série de cálculos computacionais visando obterem-se os parâmetros de interesse.

Caracterizou-se as amostras, quando das medições, pelos parâmetros:

- L = espessura da amostra de material de solo (mm);
- Ug = umidade gravimétrica da amostra de material de solo ($g.g^{-1}$);
- ρ_a = densidade aparente da amostra (gcm^{-3});
- Uv = umidade volumétrica da amostra ($cm^3.cm^{-3}$);
- T = temperatura da amostra ($^{\circ}C$);

Os programas computacionais forneceram como resultado:

- ϵ_r' = constante dielétrica relativa da amostra;
- ϵ_r'' = fator de perda relativo da amostra;

- $tg\delta$ = tangente de perda relativo da amostra;
- σ = condutividade elétrica da amostra ($mmho.cm^{-1}$);
- n_λ = índice de refração da amostra;
- k_λ = constante de absorção da amostra;
- $e(\theta)$ = emissividade da amostra para $\theta=0$;
- $P(e)$ = profundidade de penetração da radiação na amostra (cm);
- $P(7e)$ = profundidade de penetração de 95% da radiação na amostra (cm);
- e_{hem} = emissividade hemisférica, $e(\bar{\theta})$ = emissividade para o ângulo efetivo de resolução da antena do RMO.

O programa computacional que calcula ϵ'_R , ϵ''_R , $tg\delta$ e σ exige como um dos dados de entrada a estimativa de ϵ'_R , visto serem as equações necessárias para estes cálculos equações transcendentais. Os valores de ϵ'_R estimados para cada grupo de 3 ou 2 amostras com igual grau de umidade, constam da coluna observações nas Tabelas 4.1 a 4.11. Para cada grupo de amostras com mesmo grau de umidade apresenta-se também a média e desvio padrão obtidos para cada um dos parâmetros.

As Tabelas 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 e 4.12 apresentam os valores encontrados para e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ em função de U_v para as diferentes classes de solo.

A Tabela 4.13 mostra os resultados encontrados para a água.

4.2 - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA.

Através de uma análise gráfica verificou-se a tendência dos dados comportarem-se segundo um dos modelos estatísticos descritos anteriormente. A Tabela 4.14 sumariza essa tendência, segundo classes de solos e as quantidades físicas consideradas.

As Figuras 4.1 a 4.36 apresentam a plotagem dos pontos e as respectivas curvas de regressão ajustadas a eles, conforme os modelos da Tabela 4.14, por classe de solo e quantidade física considerada. As equações de regressão ajustadas para cada uma das curvas são apresentadas no Apêndice B. O Apêndice C apresenta a plotagem dos resíduos para verificação da validade dos modelos estatísticos (normalidade, independência, aleatoriedade e homocedasticidade dos resíduos) tomando como exemplo o solo SAP. O Apêndice D apresenta uma análise dos resultados estatísticos para o solo SAP.

TABELA 4.1

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A CLASSE DE SOLO PV-2 .

L	Ug	oa	Uv	T°C	e'r	e''r	tgδ	σ	n _λ	k _λ	e(0)	P(e)	P(7e)	OBSERVAÇÕES
14	seco	1,13	seco	26,5	2,8	7E-3	3E-3	4E-2	1,7	2E-3	0,94	88,7	268,0	determinações em 1L; média de 5 repetições; e'r estimada do=3
15	5,3	1,13	6,0	22,0	3,7	0,5	0,1	3,1	1,9	0,1	0,90	2,3	7,0	e'r estimado=3
10	5,3	1,13	6,0	22,0	3,7	0,6	0,2	3,3	1,9	0,2	0,90	1,2	3,5	
5	5,3	1,13	6,0	22,0	3,4	0,5	0,1	2,9	1,8	0,1	0,91	2,4	7,3	
				\bar{x}	3,6	0,5	0,1	3,1	1,9	0,1	0,90	2,0	5,9	
				s	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,01	0,7	2,1	
18	12,4	1,13	14,0	22,0	4,0	0,3	0,1	1,9	2,0	0,1	0,89	2,2	6,7	L=14 errado e'r estimado=5
7	12,4	1,13	14,0	22,0	3,7	0,9	0,2	5,6	1,9	0,2	0,89	1,2	3,5	
				\bar{x}	3,9	0,6	0,2	3,8	2,0	0,2	0,89	1,7	5,1	
				s	0,2	0,4	0,1	2,6	0,1	0,1	--	0,7	2,3	
18	24,8	1,13	28,0	22,0	12,2	0,6	0,1	3,5	3,5	0,1	0,69	1,3	3,9	L=7 errado e'r estimado=10
14	24,8	1,13	28,0	22,0	12,1	1,0	0,1	6,3	3,5	0,2	0,69	1,3	3,9	
				\bar{x}	12,2	0,8	0,1	4,9	3,5	0,2	0,69	1,3	3,9	
				s	0,1	0,3	--	2,0	--	0,1	--	--	--	
18	39,8	1,13	45,0	22,0	17,9	0,8	5E-2	4,4	4,2	0,1	0,62	2,1	6,4	L=7 errado e'r estimado=15
14	39,8	1,13	45,0	22,0	19,6	0,9	5E-2	5,0	4,4	0,1	0,60	2,0	6,1	
				\bar{x}	18,8	0,9	5E-2	4,7	4,3	0,1	0,61	2,1	6,3	
				s	1,2	0,1	--	0,4	0,1	--	0,01	0,1	0,2	

TABELA 4.2

e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ EM FUNÇÃO DE U_V PARA O SOLO PV₂

U_V	e_{hem}	$e(\bar{\theta})$
seco	0,88	0,94
6,0	0,85	0,90
6,0	0,85	0,90
6,0	0,86	0,91
14,0	0,84	0,89
14,0	0,84	0,89
28,0	0,68	0,69
28,0	0,68	0,69
45,0	0,62	0,62
45,0	0,60	0,60

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A CLASSE DE SOLO: IV-3

L	Ug	Pa	Uv	T _{OC}	ε'r	ε''r	tgδ	σ	n _λ	k _λ	e(0)	P(e)		P(7e)	OBSERVAÇÕES
												95,8	289,4		
17	seco	1,35	seco	26,5	2,4	6E-3	3E-3	4E-2	1,6	2E-3	0,95	95,8	289,4		determinações em 1L; média de 5 repetições; estimativa de ε'r=3
15	4,5	1,35	6,0	25,0	3,9	0,5	0,1	3,2	2,0	0,1	0,89	2,3	6,8		ε'r estimado = 3
10	4,5	1,35	6,0	25,0	4,1	0,5	0,1	3,1	2,0	0,1	0,89	2,2	6,7		
5	4,5	1,35	6,0	25,0	3,7	0,4	0,1	2,5	1,9	0,1	0,89	2,3	7,0		
				\bar{x}	3,9	0,5	0,1	2,9	2,0	0,1	0,89	2,3	6,8		
				s	0,2	0,1	-	0,4	0,1	-	-	0,1	0,2		
15	8,9	1,35	12,0	24,5	7,0	1,4	0,2	8,2	2,7	0,3	0,79	0,9	2,6		ε'r estimado = 7
10	8,9	1,35	12,0	24,5	8,0	1,3	0,2	7,5	2,8	0,2	0,77	0,8	2,4		
5	8,9	1,35	12,0	24,5	6,7	1,7	0,3	9,7	2,6	0,3	0,80	0,6	1,8		
				\bar{x}	7,2	1,5	0,2	8,5	2,7	0,3	0,79	0,8	2,3		
				s	0,7	0,2	0,1	1,1	0,1	0,1	0,02	0,2	0,4		
15	13,3	1,35	18,0	24,5	9,9	2,1	0,2	12,4	3,2	0,3	0,73	0,7	2,1		ε'r estimado = 10
10	13,3	1,35	18,0	24,5	11,0	2,7	0,2	16,2	3,3	0,4	0,70	0,7	2,0		
5	13,3	1,35	18,0	24,5	11,8	3,4	0,3	20,2	3,5	0,5	0,69	0,4	1,3		
				\bar{x}	10,9	2,7	0,2	16,3	3,3	0,4	0,71	0,5	1,8		
				s	1,0	0,7	0,1	3,9	0,2	0,1	0,02	0,2	0,4		
15	17,0	1,35	23,0	23,7	16,2	1,4	0,1	8,7	4,0	0,2	0,64	1,1	3,3		ε'r estimado = 15 L = 15 pode estar errado
10	17,0	1,35	23,0	23,7	13,8	3,6	0,3	21,4	3,8	0,5	0,66	0,4	1,2		
5	17,0	1,35	23,0	23,7	13,6	3,4	0,3	20,2	3,7	0,5	0,66	0,4	1,2		
				\bar{x}	14,5	2,8	0,2	16,8	3,8	0,5	0,65	0,5	1,9		
				s	1,4	1,2	0,1	7,0	0,2	0,2	0,01	0,4	1,2		
15	22,2	1,35	30,0	23,5	22,6	2,5	0,1	14,6	4,8	0,3	0,57	0,9	2,8		ε'r estimado = 20 L = 5 considerado errado
10	22,2	1,35	30,0	23,5	21,2	1,3	0,1	7,8	4,6	0,1	0,59	1,0	2,9		
5	22,2	1,35	30,0	23,5	(14,3)	(3,7)	(0,3)	(21,7)	(3,8)	(0,5)	(0,55)				
				\bar{x}	21,9	1,9	0,1	11,2	4,7	0,2	0,58	1,0	2,9		
				s	1,0	0,8	-	4,8	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1		

TABELA 4.4

e_{hem} E $e(\bar{\theta})$ EM FUNÇÃO DE U_V PARA O SOLO LV₃

U_V	e_{hem}	$e(\bar{\theta})$
seco	0,90	0,95
6,0	0,84	0,89
6,0	0,84	0,89
6,0	0,85	0,90
12,0	0,76	0,79
12,0	0,74	0,77
12,0	0,77	0,81
18,0	0,70	0,73
18,0	0,68	0,70
18,0	0,67	0,69
23,0	0,63	0,64
23,0	0,65	0,66
23,0	0,65	0,66
30,0	0,58	0,57
30,0	0,59	0,59

TABELA 4.5

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A CLASSE DE SOLO: LR-d

L	Ug	oa	Uv	Toc	ε'r	ε''r	tge	σ	nλ	kλ	e(U)	P(e)	P(ε)	OBSERVAÇÕES
18	seco	1,07	seco	25,0	2,8	0,4	0,1	2,1	1,7	0,1	0,94	2,7	8,0	determinações em 1l; média de 5 repetições ε'r estimado=3
15	2,8	1,07	3,0	25,0	2,8	0,3	0,1	1,8	1,7	0,1	0,93	2,7	8,0	ε'r estimado = 3
10	2,8	1,07	3,0	25,0	3,0	0,2	0,1	1,4	1,7	0,1	0,93	2,5	7,8	
5	2,3	1,07	3,0	25,0	2,7	0,3	0,1	1,5	1,7	0,1	0,94	2,7	8,2	
				\bar{x}	2,3	0,3	0,1	1,6	1,7	0,1	0,93	2,7	8,0	
				s	0,2	0,1	-	0,2	-	-	0,01	0,1	0,2	
15	9,3	1,07	10,0	25,0	4,8	0,8	0,2	4,5	2,2	0,2	0,86	1,0	3,1	ε'r estimado = 4
10	9,3	1,07	10,0	25,0	4,3	0,5	0,1	4,5	2,1	0,1	0,88	2,2	6,5	
5	9,3	1,07	10,0	25,0	4,6	0,9	0,2	5,0	2,2	0,2	0,86	1,0	3,2	
				\bar{x}	4,6	0,8	0,2	4,4	2,2	0,2	0,87	1,4	4,3	
				s	0,3	0,2	0,1	0,6	0,1	0,1	0,00	0,7	1,9	
15	14,0	1,07	15,0	25,0	5,3	0,9	0,2	5,4	2,3	0,2	0,84	1,0	2,9	ε'r estimado = 5,0
10	14,0	1,07	15,0	25,0	5,0	0,8	0,2	4,7	2,2	0,2	0,85	1,0	3,0	
5	14,0	1,07	15,0	25,0	5,2	1,0	0,2	5,3	2,3	0,2	0,84	1,0	3,0	
				\bar{x}	5,2	0,9	0,2	5,3	2,3	0,2	0,84	1,0	3,0	
				s	0,2	0,1	-	0,5	0,1	0,0	0,01	-	0,1	
15	19,6	1,07	21,0	25,0	5,7	1,0	0,2	6,0	2,4	0,2	0,83	0,9	2,8	ε'r estimado = 6,0
10	19,6	1,07	21,1	25,0	5,2	1,2	0,2	7,0	2,3	0,3	0,84	1,0	3,0	
5	19,6	1,07	21,0	25,0	5,5	1,5	0,3	8,7	2,4	0,3	0,83	0,6	1,9	
				\bar{x}	5,5	1,2	0,2	7,2	2,4	0,3	0,83	0,8	2,6	
				s	0,3	0,3	0,1	1,4	0,1	0,1	0,01	0,2	0,5	
15	29,0	1,07	31,0	24,3	8,3	1,4	0,2	8,1	2,9	0,2	0,76	0,8	2,3	L = 5 considerado errado ε'r estimado = 10
10	29,0	1,07	31,0	24,3	8,0	2,0	0,3	11,5	2,9	0,4	0,76	0,5	1,6	
5	29,0	1,07	31,0	24,3	(5,6)	(3,2)	(0,6)	(9,1)	(2,5)	(0,7)	(0,79)			
				\bar{x}	8,3	1,7	0,3	9,9	2,9	0,3	0,76	0,7	2,0	
				s	0,4	0,4	0,1	2,5	-	0,1	-	0,2	0,5	

TABELA 4.6

e_{hem} E $e(\bar{\theta})$ EM FUNÇÃO DE U_v PARA O SOLO LRd

U_v	e_{hem}	$e(\bar{\theta})$
seco	0,88	0,93
3,0	0,88	0,94
3,0	0,87	0,93
3,0	0,89	0,94
10,0	0,81	0,86
10,0	0,83	0,88
10,0	0,82	0,86
15,0	0,80	0,84
15,0	0,81	0,85
15,0	0,80	0,84
21,0	0,79	0,83
21,0	0,80	0,84
21,0	0,78	0,83
31,0	0,73	0,76
31,0	0,73	0,76

TABELA 4.7

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A CLASSE DE SOLO: LE-1

L	Ug	pa	Uv	TOC	ε'r	ε''r	tgδ	σ	nλ	kλ	e(0)	P(e)	P(ε)	OBSERVAÇÕES
17	seco	1,07	seco	25,0	2,5	0,1	4E-2	0,5	1,6	3E-2	0,95	7,0	21,3	determinações em 1L; media de 5 repetições; ε'r estimado = 3
15	9,3	1,07	10,0	23,4	5,7	0,4	0,1	2,5	1,9	0,1	0,90	2,3	7,0	ε'r estimado = 3
10	9,3	1,07	10,0	23,2	4,0	0,6	0,2	3,6	2,0	0,2	0,89	1,1	3,4	
5	9,3	1,07	10,0	23,2	4,5	0,3	0,1	1,9	2,1	0,1	0,87	2,1	6,3	
				\bar{x}	4,1	0,4	0,1	2,7	2,0	0,1	0,89	1,8	5,6	
				s	0,4	0,2	0,1	0,9	0,1	0,1	0,02	0,5	1,9	
15	14,0	1,07	15,0	23,0	5,3	1,0	0,2	6,1	2,3	0,2	0,84	1,0	2,9	ε'r estimado = 5
10	14,0	1,07	15,0	23,0	5,4	1,0	0,2	5,0	2,3	0,2	0,84	1,0	2,9	
5	14,0	1,07	15,0	23,0	5,7	1,2	0,2	7,2	2,4	0,3	0,83	0,9	2,8	
				\bar{x}	5,5	1,1	0,2	6,4	2,3	0,2	0,84	1,0	2,9	
				s	0,2	0,1	-	0,7	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	
15	18,7	1,07	20,0	23,0	7,8	2,0	0,3	11,9	2,8	0,4	0,77	0,5	1,6	L=5 considerado errado ε'r estimado=8
10	18,7	1,07	20,0	23,0	8,1	2,3	0,3	13,7	2,9	0,4	0,76	0,5	1,6	
5	18,7	1,07	20,0	23,0	(12,2)	(3,0)	(0,2)	(17,5)	(3,5)	(0,4)	(0,68)	-	-	
				\bar{x}	5,0	2,2	0,3	12,8	2,9	0,4	0,77	0,5	1,6	
				s	0,2	0,2	-	1,3	0,1	-	0,01	-	-	
15	23,4	1,07	25,0	22,8	10,5	1,9	0,2	11,3	3,3	0,3	0,72	0,7	2,1	L=5 deve estar errado ε'r estimado = 10
10	23,4	1,07	25,0	22,8	11,8	2,6	0,2	15,6	3,5	0,4	0,69	0,7	2,0	
5	23,4	1,07	25,0	22,8	(12,5)	(5,0)	(0,4)	(29,4)	(3,6)	(0,7)	(0,57)	-	-	
				\bar{x}	11,2	2,3	0,2	13,5	3,4	0,4	0,71	0,7	2,1	
				s	0,9	0,5	-	3,0	0,1	0,1	0,02	-	0,1	
15	28,0	1,07	30,0	22,7	17,5	2,4	0,1	14,2	4,2	0,3	0,62	1,1	3,2	L=5 "pode" estar certo ε'r estimado=15
10	28,0	1,07	30,0	22,7	14,2	2,8	0,2	16,4	3,8	0,4	0,66	0,6	1,8	
5	28,0	1,07	30,0	22,7	(17,7)	(4,0)	(0,2)	(24,0)	(4,2)	(0,5)	(0,51)	-	-	
				\bar{x}	16,5	3,1	0,2	18,2	4,0	0,4	0,64	0,9	2,5	
				s	2,0	0,8	0,1	5,1	0,3	0,1	0,03	0,4	1,0	

TABELA 4.8

e_{hem} E $e(\bar{\theta})$ EM FUNÇÃO DE U_V PARA O SOLO LE₁.

U_V	e_{hem}	$e(\bar{\theta})$
seco	0,90	0,95
10,0	0,85	0,90
10,0	0,84	0,89
10,0	0,82	0,87
15,0	0,80	0,84
15,0	0,80	0,84
15,0	0,79	0,83
20,0	0,74	0,77
20,0	0,73	0,76
25,0	0,70	0,72
25,0	0,68	0,69
30,0	0,62	0,62
30,0	0,65	0,66

TABELA 4.9

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A CLASSE DE SOLO: SÉRIE ÁGUA PRETA

(SAP)

L	Ug	ca	Uv	T _{OC}	s'r	s''r	t _{SS}	c	n _A	k _A	e(0)	P(e)	P(7e)	OBSERVAÇÕES
16	seco	0,78	seco	26,5	2,4	1E-2	4E-3	5E-2	1,5	3E-3	0,96	71,9	217,1	determinações em 1L; média de 5 repetições; ε'r estimado = 3
15	0,4	0,78	5,0	25,0	2,3	0,3	0,1	1,9	1,7	1E-2	0,93	2,0	7,9	ε'r estimado = 3
10	6,4	0,78	5,0	25,0	3,0	0,3	0,1	1,8	1,7	1E-2	0,93	2,6	7,8	
5	6,4	0,78	5,0	25,0	3,1	0,3	0,1	1,9	1,8	1E-2	0,92	2,5	7,6	
				\bar{x}	3,0	0,3	0,1	1,9	1,7	1E-2	0,93	2,6	7,8	
				s	0,1	-	-	0,1	0,1	-	0,01	0,1	0,2	
15	12,8	0,78	10,0	22,5	3,5	0,4	0,1	2,6	1,9	0,1	0,90	2,4	7,2	ε'r estimado = 5
10	12,8	0,78	10,0	22,5	3,9	0,7	0,2	4,0	2,0	0,2	0,89	1,1	3,4	
5	12,8	0,78	10,0	22,5	3,8	0,5	0,1	3,2	2,0	0,1	0,89	2,3	6,9	
				\bar{x}	3,7	0,5	0,1	3,3	2,0	0,1	0,89	1,9	5,8	
				s	0,2	0,2	0,1	0,7	0,1	0,1	0,01	0,7	2,1	
15	19,2	0,78	15,0	23,0	4,7	0,8	0,2	4,9	2,2	0,2	0,86	1,0	3,1	ε'r estimado = 5
10	19,2	0,78	15,0	23,0	4,8	0,8	0,2	4,6	2,2	0,2	0,86	1,0	3,1	
5	19,2	0,78	15,0	23,0	5,0	0,8	0,2	5,0	2,2	0,2	0,85	1,0	3,0	
				\bar{x}	4,8	0,8	0,2	4,8	2,2	0,2	0,86	1,0	3,1	
				s	0,2	-	-	0,2	-	-	0,01	-	0,1	
15	32,1	0,78	25,0	22,3	6,7	2,6	0,4	13,1	2,5	0,5	0,78	0,4	1,3	ε'r estimado = 5
10	32,1	0,78	25,0	22,3	7,0	2,4	0,3	13,9	2,7	0,4	0,78	0,6	1,7	
5	32,1	0,78	25,0	22,3	7,5	2,3	0,3	13,8	2,8	0,4	0,77	0,6	1,7	
				\bar{x}	7,1	2,4	0,3	14,3	2,7	0,4	0,78	0,5	1,6	
				s	0,4	0,2	0,1	0,7	0,1	0,1	0,01	0,1	0,2	
15	38,7	0,78	30,2	21,0	(8,8)	(1,8)	(0,2)	(0,5)	(3,0)	(0,3)	(0,75)	0,3	0,9	L=19 errado ε'r estimado = 10
10	38,7	0,78	30,2	21,0	13,8	4,9	0,4	29,0	3,8	0,6	0,65	0,4	1,1	
5	38,7	0,78	30,2	21,0	16,2	5,0	0,3	29,7	4,1	0,6	0,62	0,4	1,1	
				\bar{x}	15,0	5,0	0,4	29,4	4,0	0,6	0,64	0,4	1,0	
				s	1,7	0,1	0,1	0,5	0,2	-	0,02	0,1	0,1	

(continua)

L'	Ug	pa	Uv	T°C	e'r	e''r	tgδ	σ	n _λ	k _λ	e(0)	P(e)	P(7e)	OBSERVAÇÕES
15	51,2	0,78	39,9	21,3	14,1	1,9	0,1	11,1	3,8	0,3	0,66	1,2	3,6	L=5 errado e'r estimado = 15
10	51,2	0,78	39,9	21,3	16,4	3,5	0,2	20,7	4,1	0,4	0,63	0,6	1,7	
5	51,2	0,78	39,9	21,3	(6,7)	(2,3)	(0,3)	(13,9)	(2,6)	(0,4)	(0,78)			
				\bar{x}	15,3	2,7	0,2	15,9	4,0	0,4	0,65	0,9	2,7	
				s	1,6	1,1	0,1	6,8	0,2	0,1	0,02	0,4	1,3	

(Conclusão da Tabela 4.9)

TABELA 4.10

e_{hem} E $e(\bar{\theta})$ EM FUNÇÃO DE U_v PARA O SOLO SAP

U_v	e_{hem}	$e(\bar{\theta})$
seco	0,90	0,95
5,0	0,88	0,93
5,0	0,87	0,93
5,0	0,87	0,92
10,0	0,85	0,91
10,0	0,84	0,89
10,0	0,84	0,89
15,0	0,81	0,86
15,0	0,81	0,86
15,0	0,81	0,85
25,0	0,75	0,78
25,0	0,75	0,78
25,0	0,74	0,77
30,2	0,64	0,65
30,2	0,62	0,62
39,9	0,65	0,66
39,9	0,62	0,63

TABELA 4.11

CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS E RESULTADOS ENCONTRADOS PARA A CLASSE DE SOLO: SÉRIE CORUPUTUBA

(SC)

L	Ug	pa	Uv	T ^o C	ε'r	ε''r	tgδ	σ	nλ	kλ	e(0)	P(e)	P(7e)	OBSERVAÇÕES
25,5	seco	0,74	seco	25,0	2,5	0,1	4E-2	0,6	1,6	3E-2	0,95	7,0	21,3	ε'r estimado = 3
29	seco	0,74	seco	25,0	2,3	0,2	0,1	1,0	1,5	6E-2	0,96	2,9	8,9	
23	seco	0,74	seco	25,0	2,8	0,1	4E-2	0,5	1,7	3E-2	0,94	6,7	20,1	
	\bar{x}				2,5	0,1	0,1	0,7	1,6	4E-2	0,95	5,5	16,8	
	s				0,3	0,1	4E-2	0,3	0,1	2E-2	0,91	2,3	6,8	
15	13,5	0,74	10,0	25,0	3,5	0,3	0,1	3,0	1,9	0,1	0,90	2,4	7,2	ε'r estimado = 3
10	13,5	0,74	10,0	25,0	3,7	0,5	0,1	2,9	1,9	0,1	0,90	2,3	7,0	
5	13,5	0,74	10,0	25,0	3,6	0,5	0,1	2,8	1,9	0,1	0,90	2,4	7,1	
	\bar{x}				3,6	0,5	0,1	2,9	1,9	0,1	0,90	2,4	7,1	
	s				0,1	-	-	0,1	-	-	-	0,1	0,1	
15	20,3	0,74	15,0	25,0	4,4	0,8	0,2	4,9	2,1	0,2	0,87	1,1	3,2	ε'r estimado = 5
10	20,3	0,74	15,0	25,0	4,3	0,7	0,2	4,2	2,1	0,2	0,87	1,1	3,3	
5	20,3	0,74	15,0	25,0	4,0	0,6	0,2	3,7	2,0	0,1	0,89	1,1	3,4	
	\bar{x}				4,2	0,7	0,2	4,3	2,1	0,2	0,88	1,1	3,3	
	s				0,2	0,1	-	0,6	0,1	0,1	0,01	-	0,1	
15	25,7	0,74	19,0	25,0	5,6	0,7	0,1	4,3	2,4	0,1	0,83	1,9	5,7	ε'r estimado = 5
10	25,7	0,74	19,0	25,0	5,6	1,1	0,2	6,5	2,4	0,2	0,83	1,0	2,9	
5	25,7	0,74	19,0	25,0	5,1	1,0	0,2	7,7	2,3	0,2	0,85	1,0	3,0	
	\bar{x}				5,4	0,9	0,2	6,2	2,4	0,2	0,84	1,3	3,9	
	s				0,3	0,2	0,1	1,7	0,1	0,1	0,01	0,5	1,6	
15	33,8	0,74	25,0	25,0	5,8	1,4	0,2	8,2	2,4	0,3	0,82	0,9	2,8	ε'r estimado = 5
10	33,8	0,74	25,0	25,0	5,8	1,8	0,3	10,4	2,4	0,4	0,82	0,6	1,9	
5	33,8	0,74	25,0	25,0	6,6	2,2	0,3	13,2	2,6	0,4	0,79	0,6	1,8	
	\bar{x}				6,1	1,8	0,3	10,6	2,5	0,4	0,81	0,7	2,2	
	s				0,5	0,4	0,1	2,5	0,1	0,1	0,02	0,2	0,6	
15	40,4	0,74	29,9	24,7	9,0	1,5	0,2	3,8	3,0	0,3	0,75	0,8	2,3	L=3 errado ε'r estimado =10
10	40,4	0,74	29,9	24,7	9,6	2,3	0,2	9,6	3,1	0,4	0,73	0,7	2,2	
	\bar{x}				9,3	1,9	0,2	9,2	3,1	0,4	0,74	0,8	2,3	
	s				0,4	0,6	-	0,6	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	

(Conclusão da Tabela 4.11)

L	Ug	pa	UV	T ₀ C	ε'r	ε''r	tgδ	σ	n _λ	K _λ	e(θ)	P(e)	P(7e)	OBSERVAÇÕES
15	50,0	0,74	37,0	24,2	8,9	1,6	0,2	9,7	3,0	0,3	0,75	0,8	2,3	L=5 errado ε'r estimado = 10
10	50,0	0,74	37,0	24,2	8,0	2,1	0,3	12,4	2,9	0,4	0,76	0,5	1,6	
				\bar{x}	8,5	1,9	0,3	11,1	3,0	0,4	0,76	0,7	2,0	
				s	0,6	0,4	0,1	1,9	0,1	0,1	0,01	0,2	0,5	
15	52,7	0,74	39,0	24,0	8,3	1,0	0,1	5,0	2,9	0,2	0,76	1,5	4,7	ε'r estimado = 10 L=5 provavelmente errado
10	52,7	0,74	39,0	24,0	8,5	1,7	0,2	10,0	2,9	0,3	0,75	0,75	2,3	
15	52,7	0,74	39,0	24,0	(6,6)	(3,0)	(0,5)	(17,6)	(2,6)	(0,6)	(0,76)			
				\bar{x}	8,4	1,4	0,2	8,0	2,9	0,3	0,76	1,2	3,5	
				s	0,1	0,5	0,1	2,8	-	0,1	0,01	0,5	1,7	
15	54,1	0,74	40,0	24,0	8,9	1,5	0,2	9,3	3,0	0,3	0,75	0,8	2,3	ε'r estimado = 10 L=5 errado
10	54,1	0,74	40,0	24,0	9,7	2,8	0,3	16,0	3,1	0,4	0,72	0,5	1,5	
				\bar{x}	9,3	2,2	0,3	7,7	3,1	0,4	0,74	0,7	1,9	
				s	0,6	0,8	0,1	2,3	0,1	0,1	0,02	0,2	0,6	

TABELA 4.12

e_{hem} E $e(\bar{\theta})$ EM FUNÇÃO DE U_V PARA O SOLO SC .

U_V	e_{hem}	$e(\bar{\theta})$
seco	0,90	0,95
seco	0,90	0,96
seco	0,88	0,94
10,0	0,85	0,91
10,0	0,85	0,90
10,0	0,85	0,90
15,0	0,82	0,87
15,0	0,83	0,87
15,0	0,84	0,89
19,0	0,79	0,83
19,0	0,79	0,83
19,0	0,80	0,85
25,0	0,78	0,82
25,0	0,78	0,82
25,0	0,76	0,79
29,9	0,72	0,75
29,0	0,71	0,73
37,0	0,72	0,75
37,0	0,73	0,76
39,0	0,73	0,76
39,0	0,73	0,75
40,0	0,72	0,75
40,0	0,70	0,72

TABELA 4.13

ÁGUA

L	Ug	pa	UV	T°C	$\epsilon'r$	$\epsilon''r$	tg	σ	n_λ	k_λ	$e(0)$	P(e)	P(7e)	OBSERVAÇÕES
2,6	-	-	-	22,5	51,3	25,8	0,5	152,9	7,4	1,8	0,40	0,1	0,4	determinação em \bar{L} ; média de 5 repetições; estimativa de $\epsilon'r = 63$

TABELA 4.14

MODELOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA CADA UMA DAS QUANTIDADES FÍSICAS DAS DIFERENTES CLASSES DE SOLO.

CLASSES DE SOLO						
	PV ₂	LV ₃	LRd	LE ₁	SAP	SC
ϵ_r'	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP
ϵ_r''	POT	POT	EXP	EXP	POT	POT
α	POT	POT	LIN	EXP	POT	POT
α	POT	POT	LIN	POT	POT	POT
P(e)	LN	POT	EXP	LN	POT	LN
P(7c)	LN	POT	EXP	LN	POT	LN
e(0)	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN
e_{hem}	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN
e(0)	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN

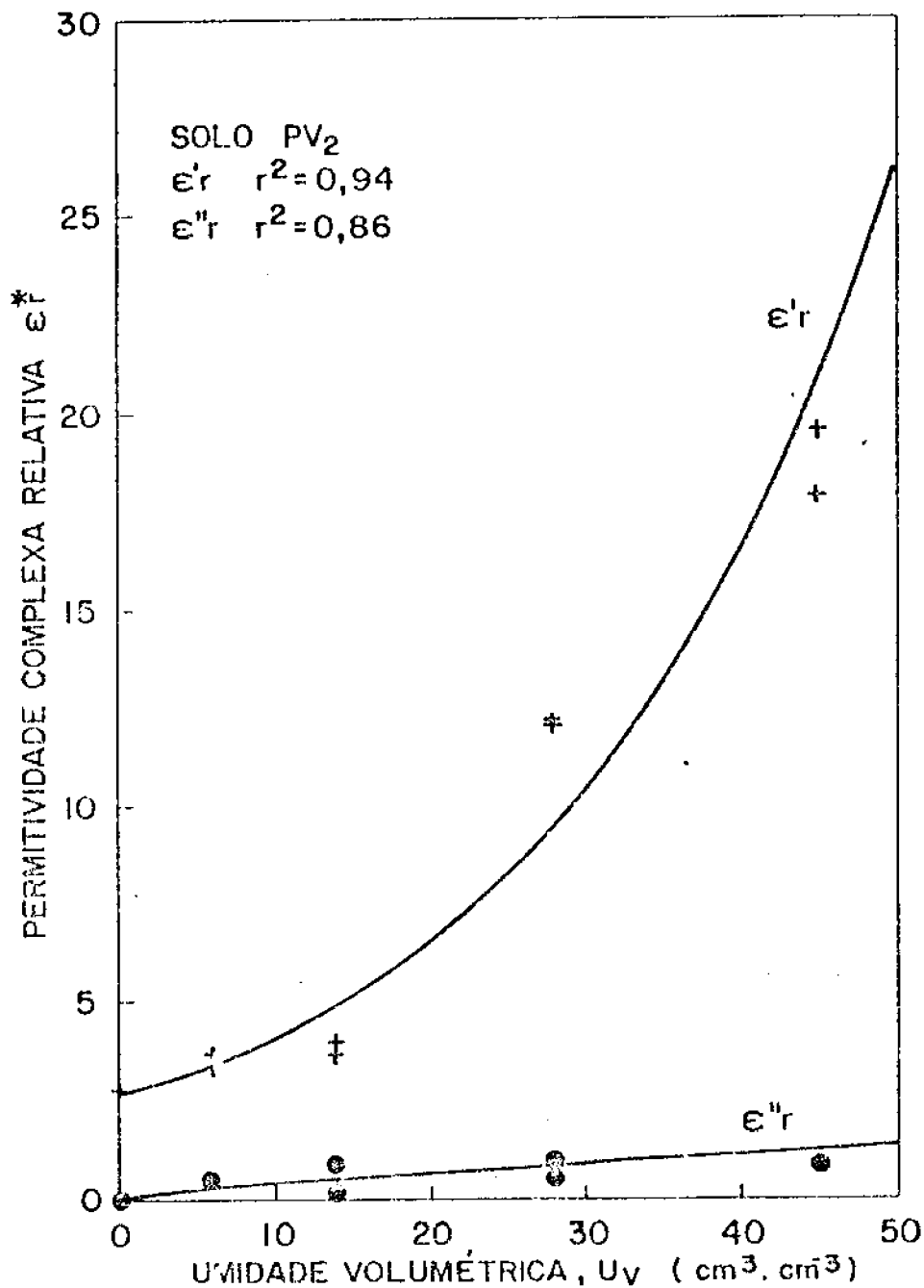


Fig. 4.1 - Gráfico de permitividade complexa relativa (ϵ^*_r) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo PV₂.

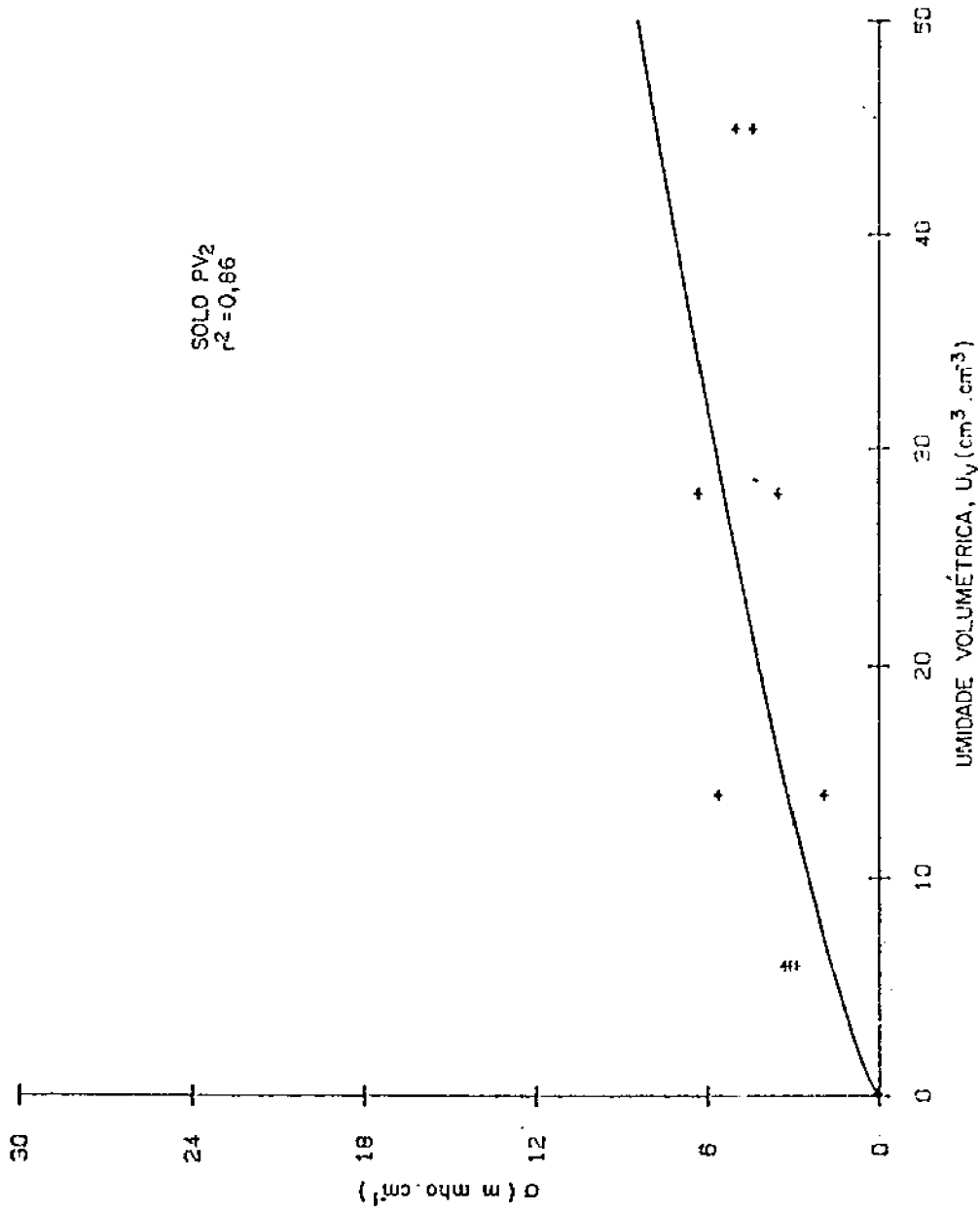


Fig. 4.2 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_v), para solo PV₂.

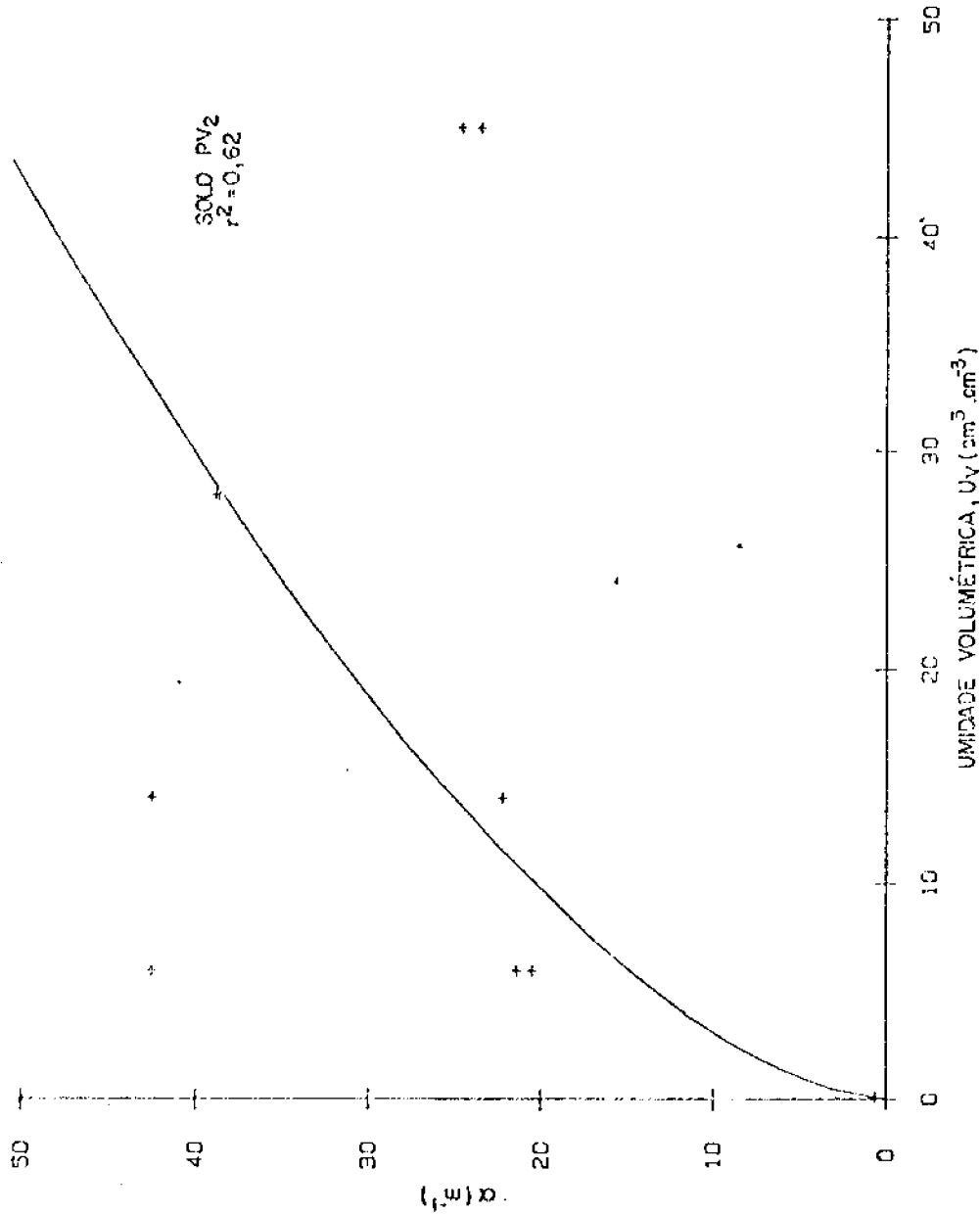


Fig. 4.3 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo PV₂

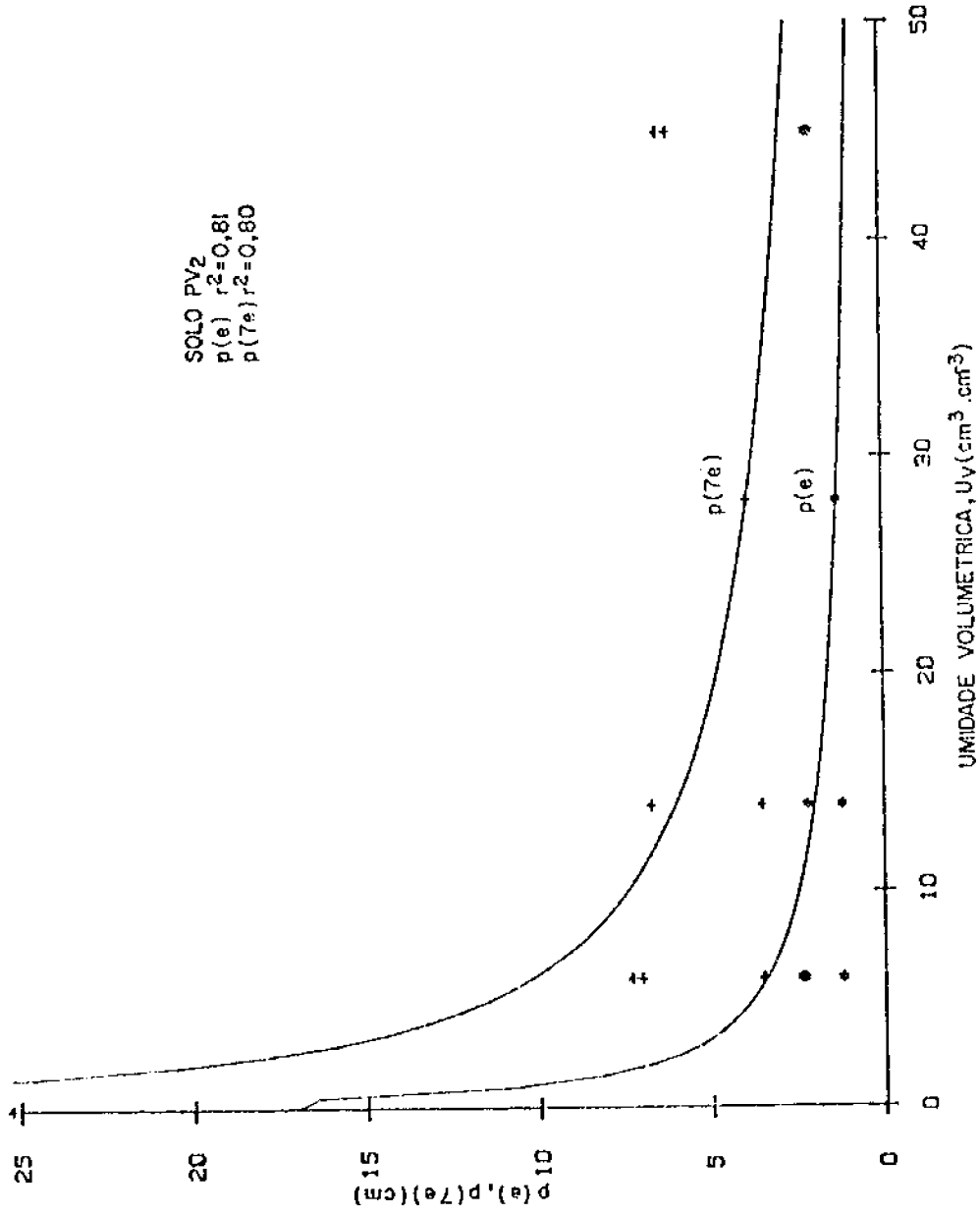


Fig. 4.4 - Gráfico da profundidade de penetração ($P(e)$) e de $P(7e)$ em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo PV2.

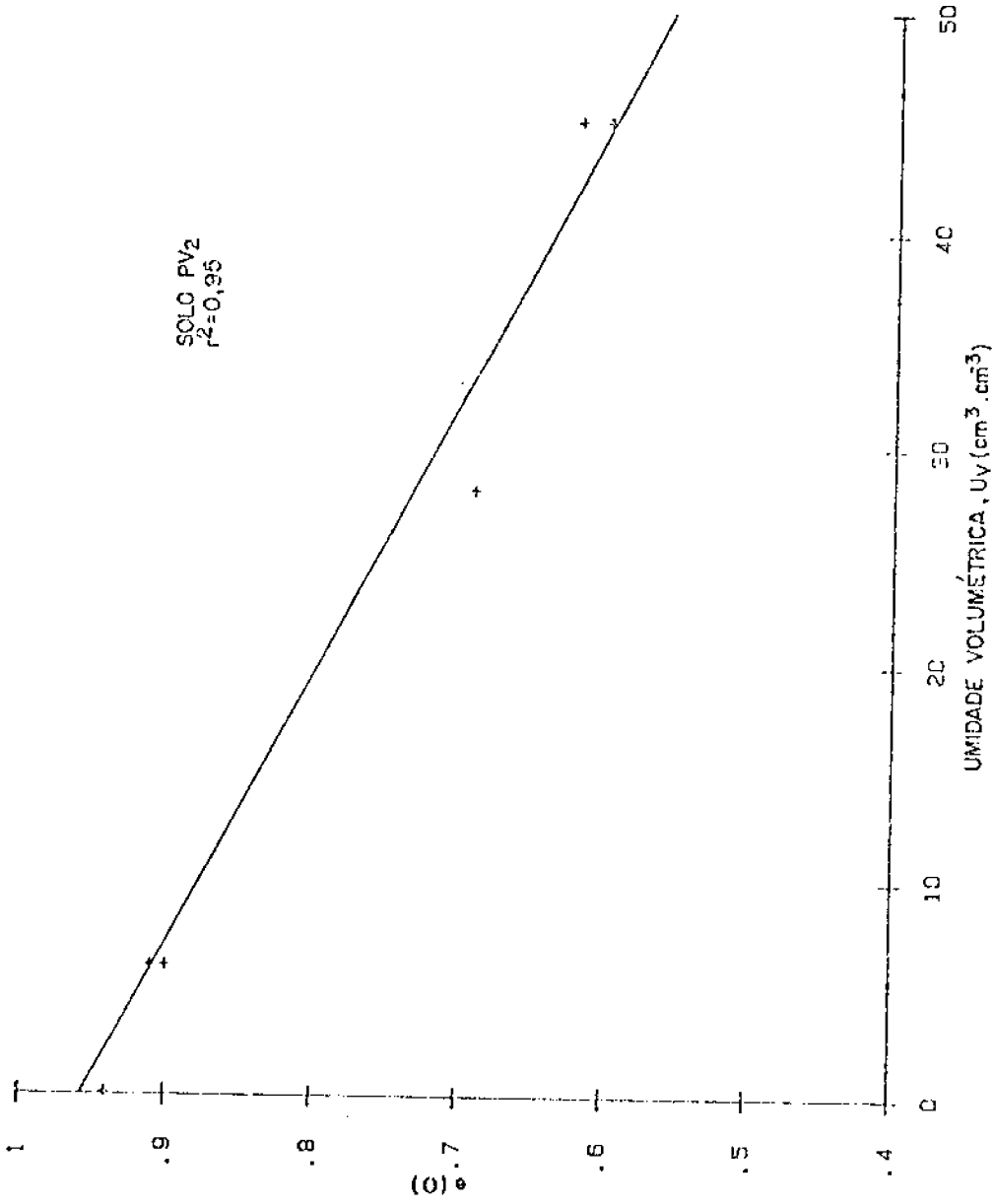


Fig. 4.5 - Gráfico da emissividade para $e = 0(e(0))$, em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo PV₂.

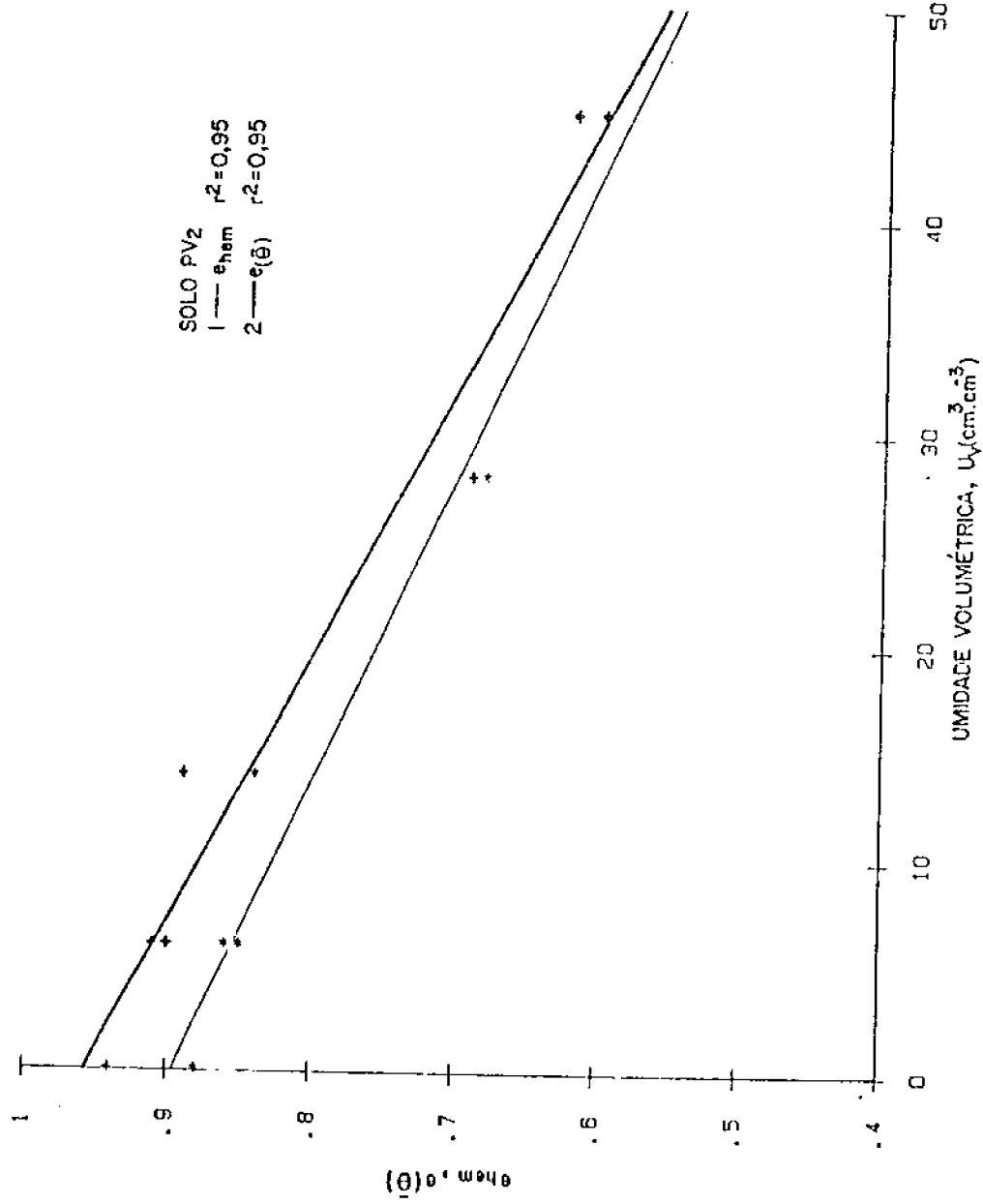


Fig. 4.6 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\theta)$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo PV₂.

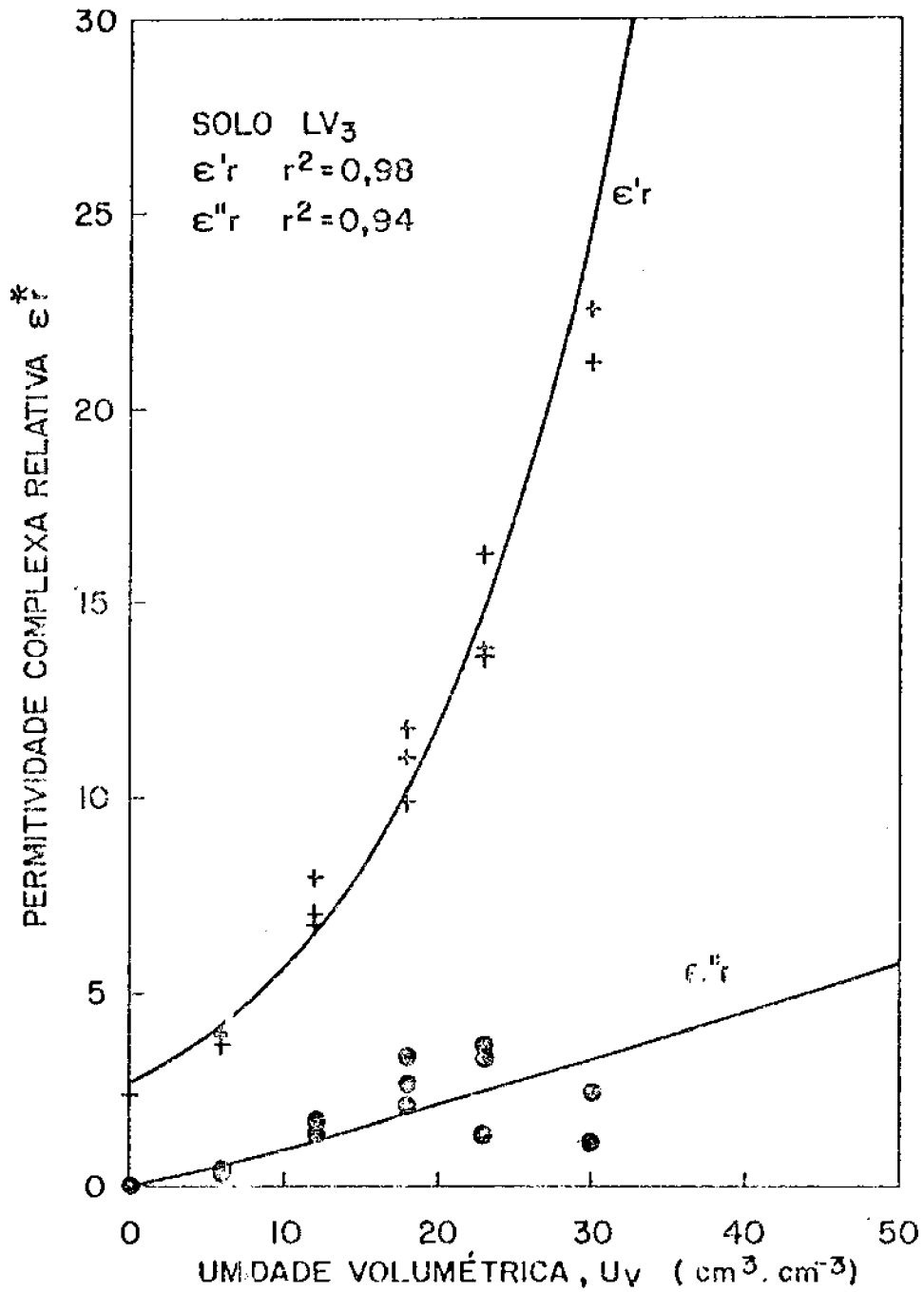


Fig. 4.7 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV₃

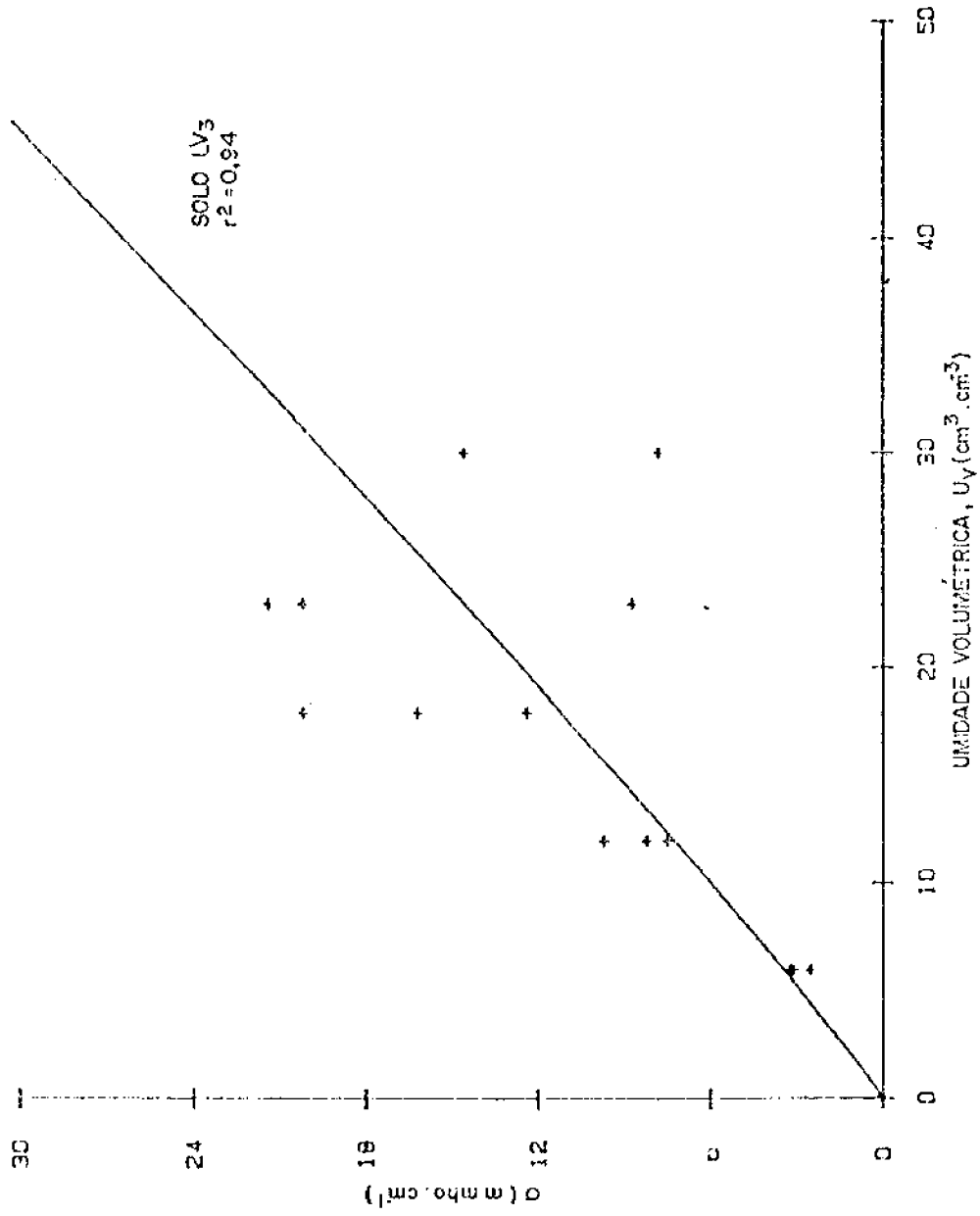


Fig. 4.8 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LV₃.

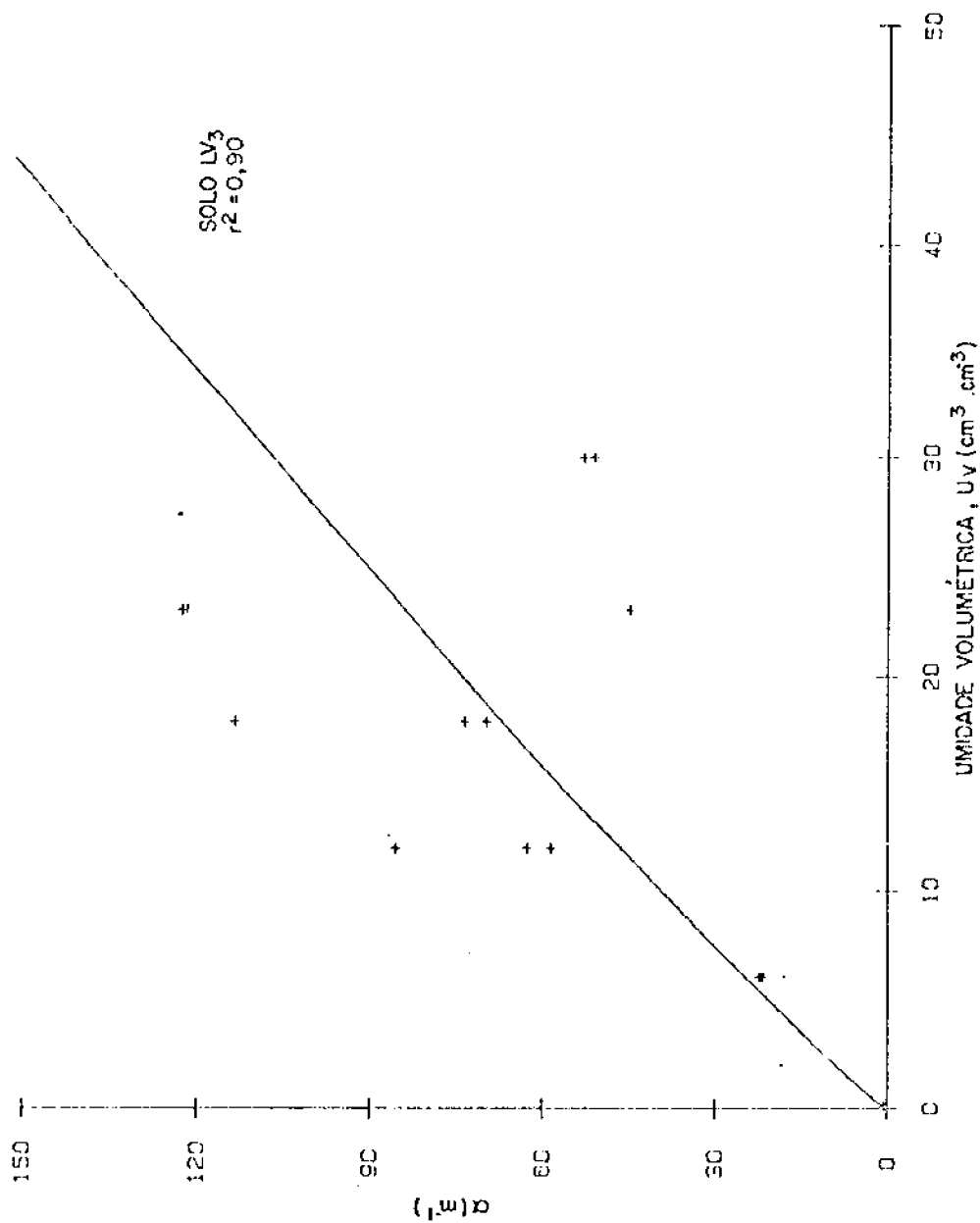


Fig. 4.9 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LV₃.

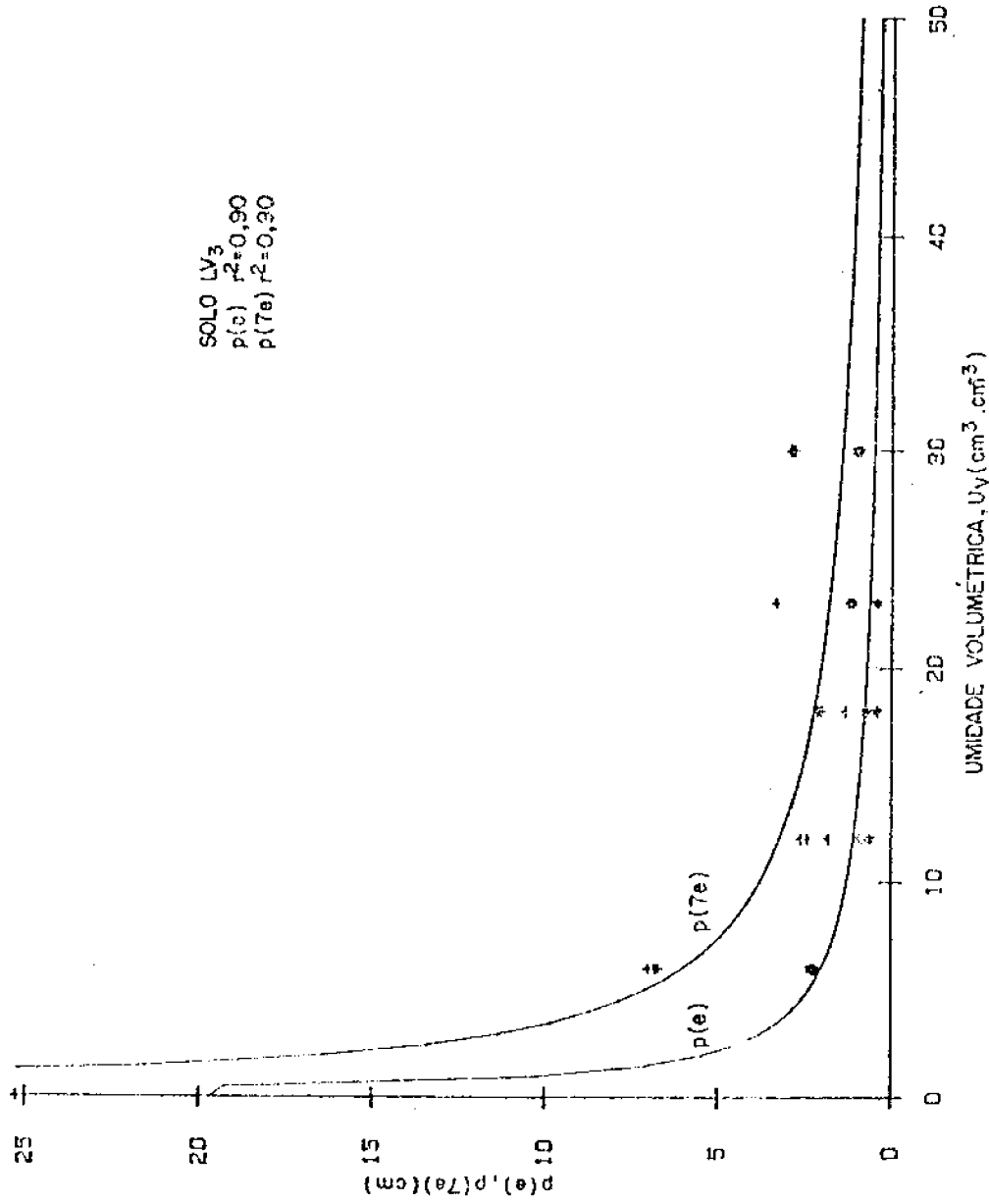


Fig. 4.10 - Gráfico da profundidade de penetração (P(e)) e de P(7e) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LV₃.

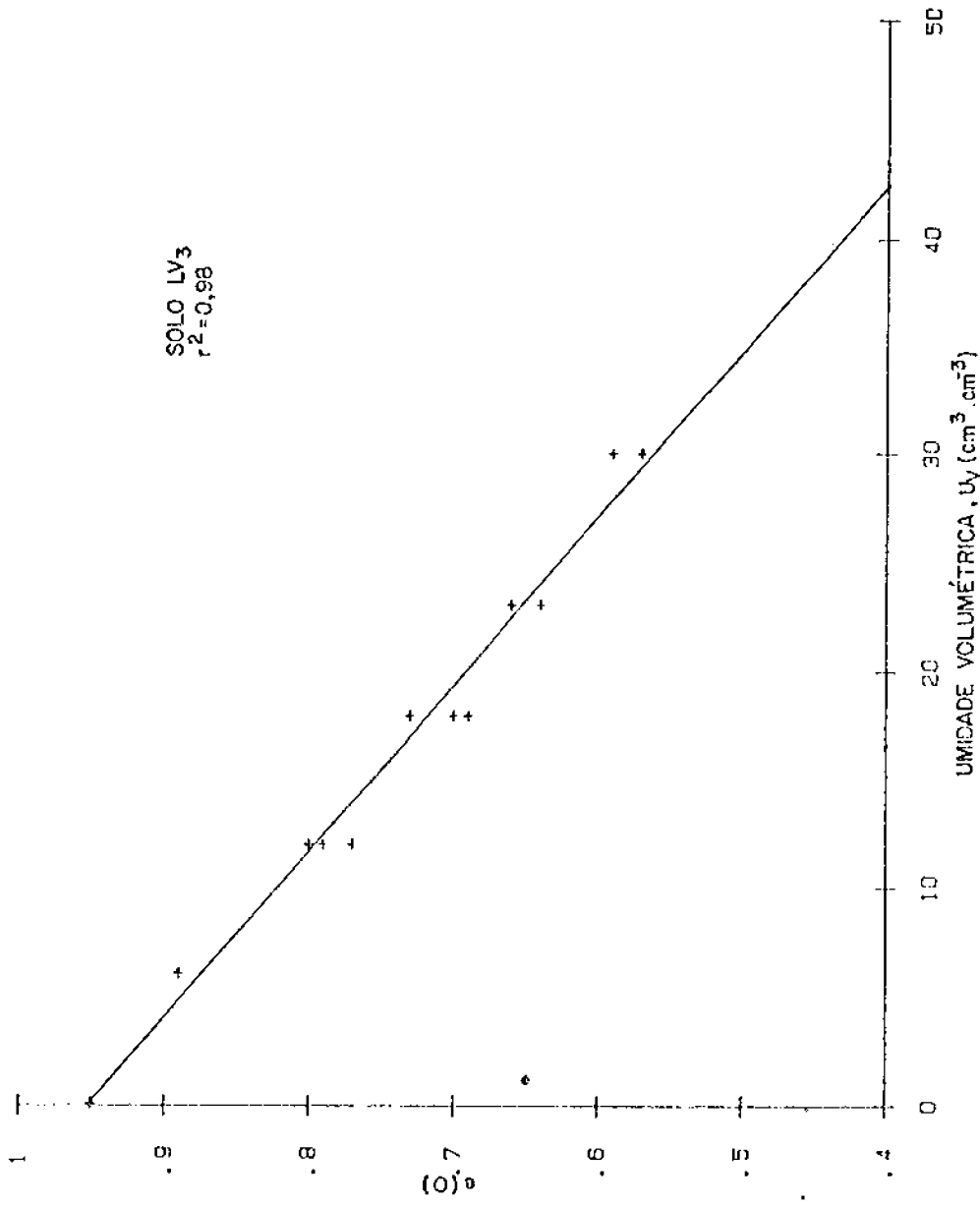


Fig. 4.11 - Gráfico da emissividade para $\theta = (e(0))$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LV3.

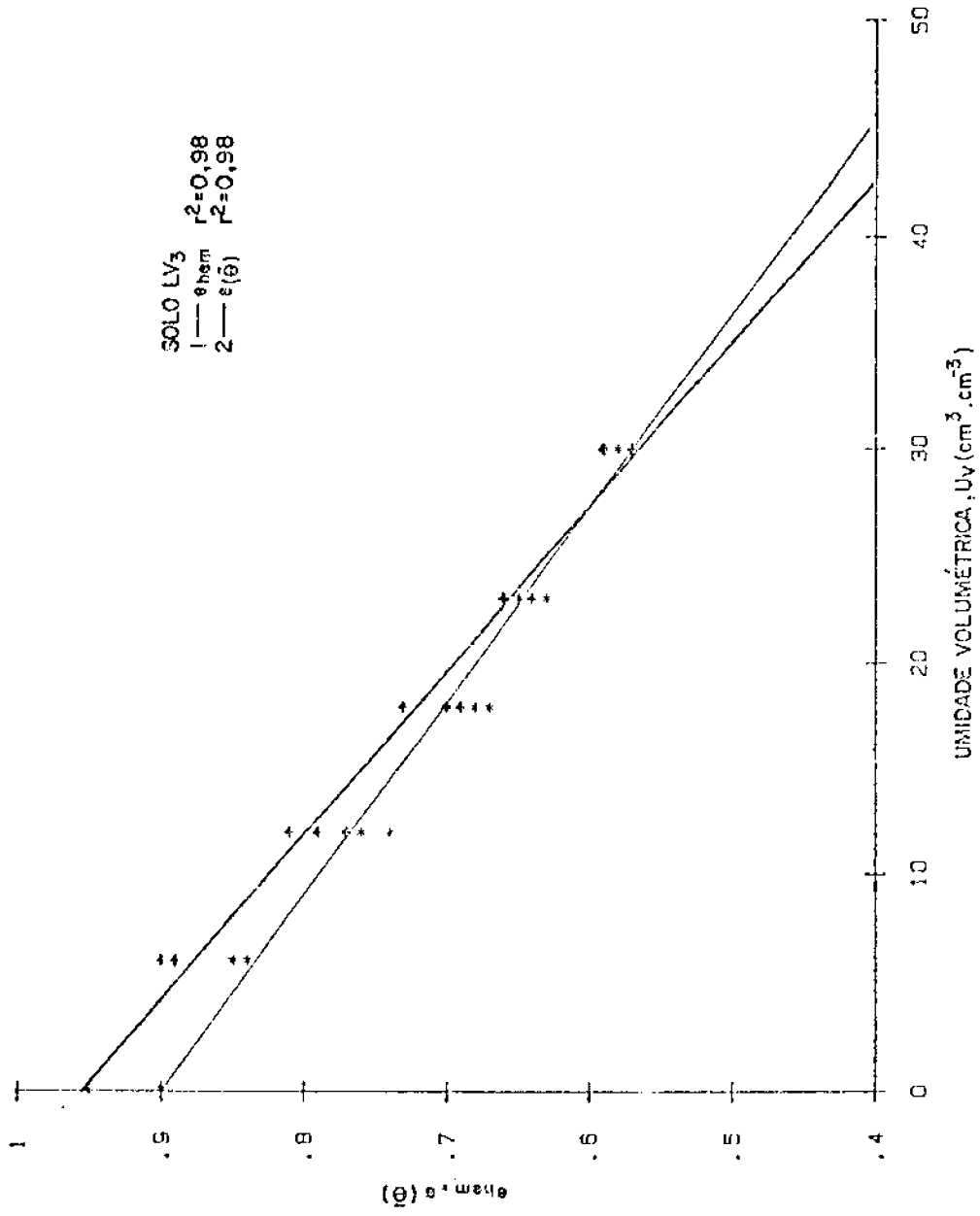


Fig. 4.12 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\theta)$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LV3.

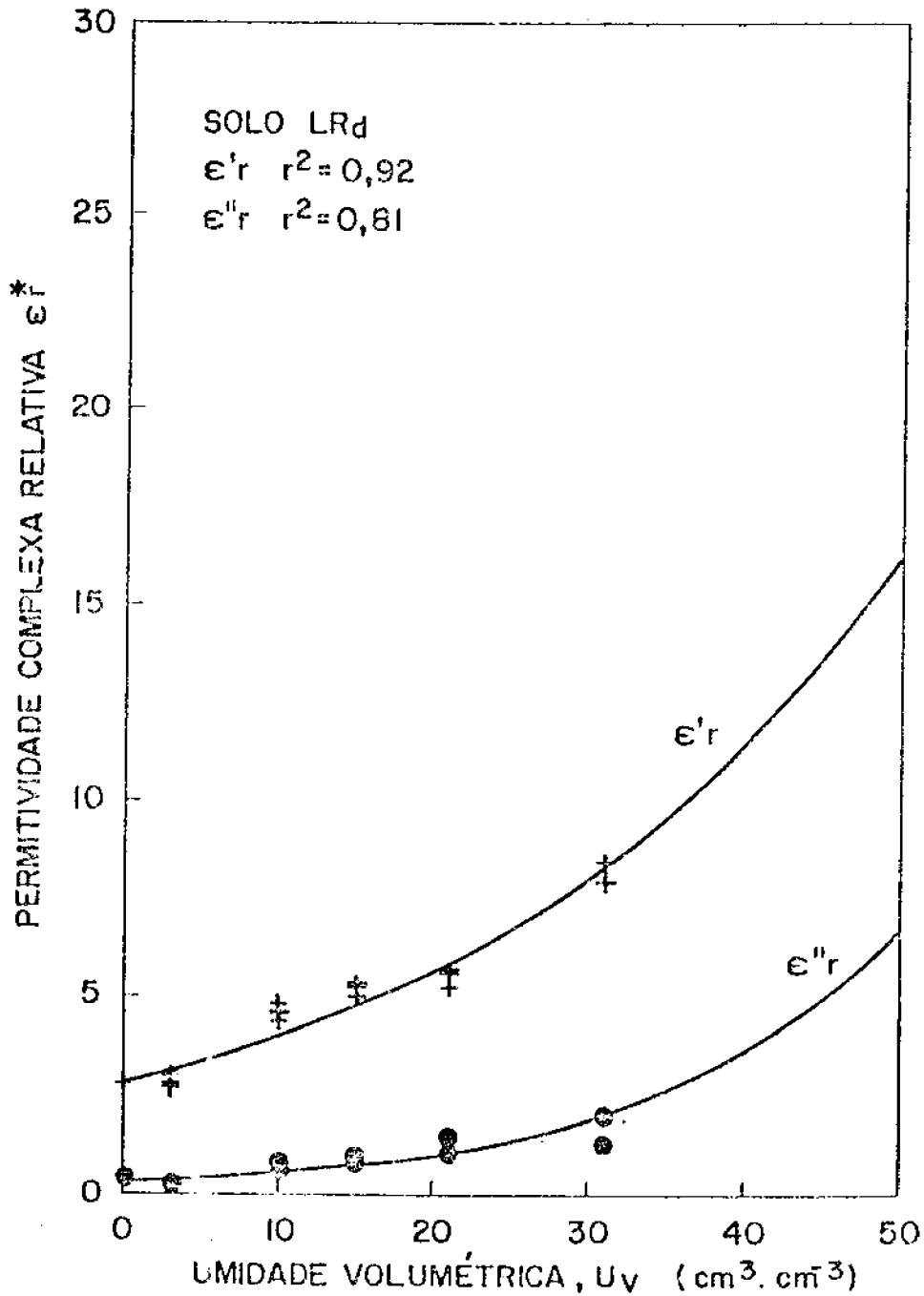


Fig. 4.13 - Gráfico da permissividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LRd.

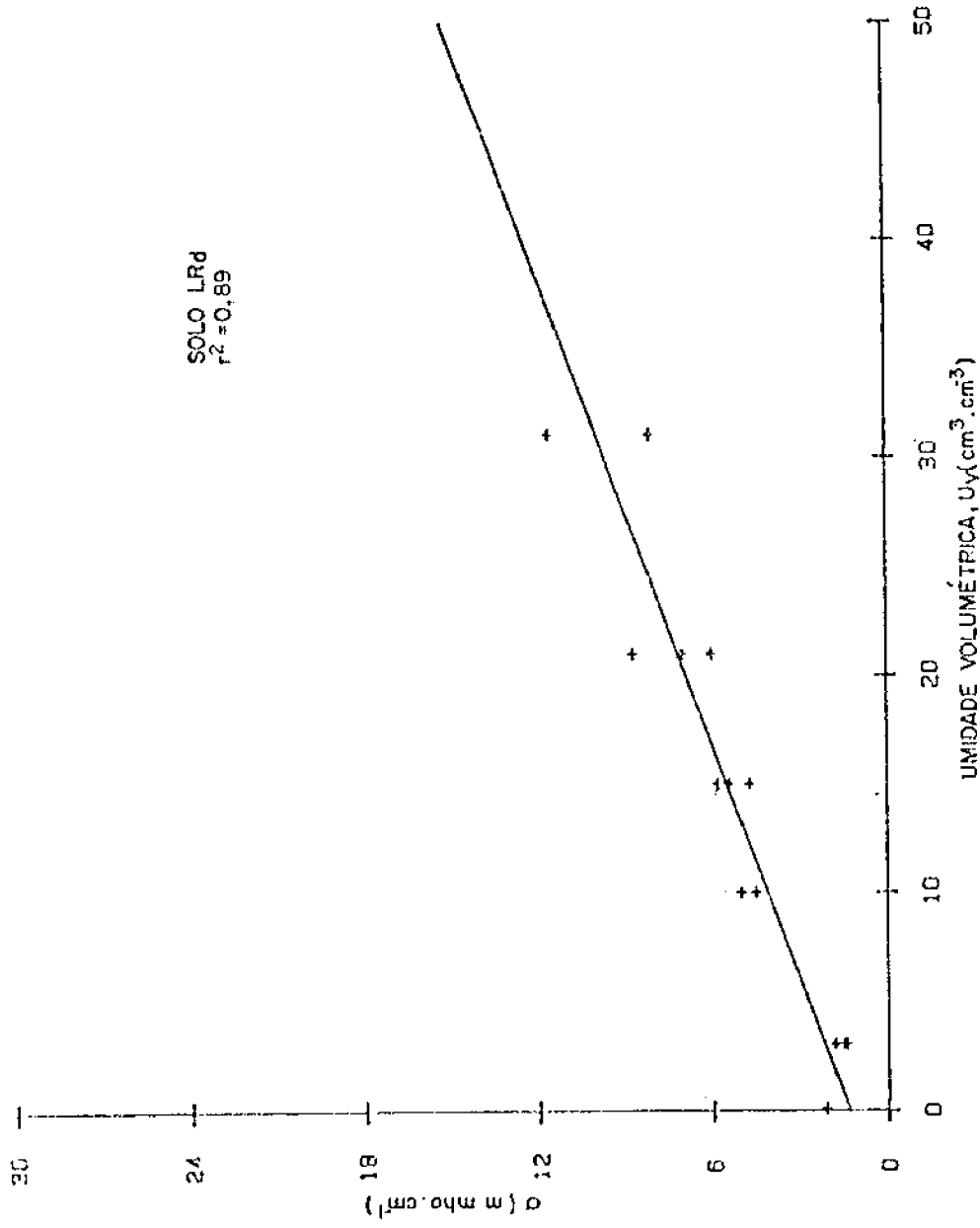


Fig. 4.14 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo LRD.

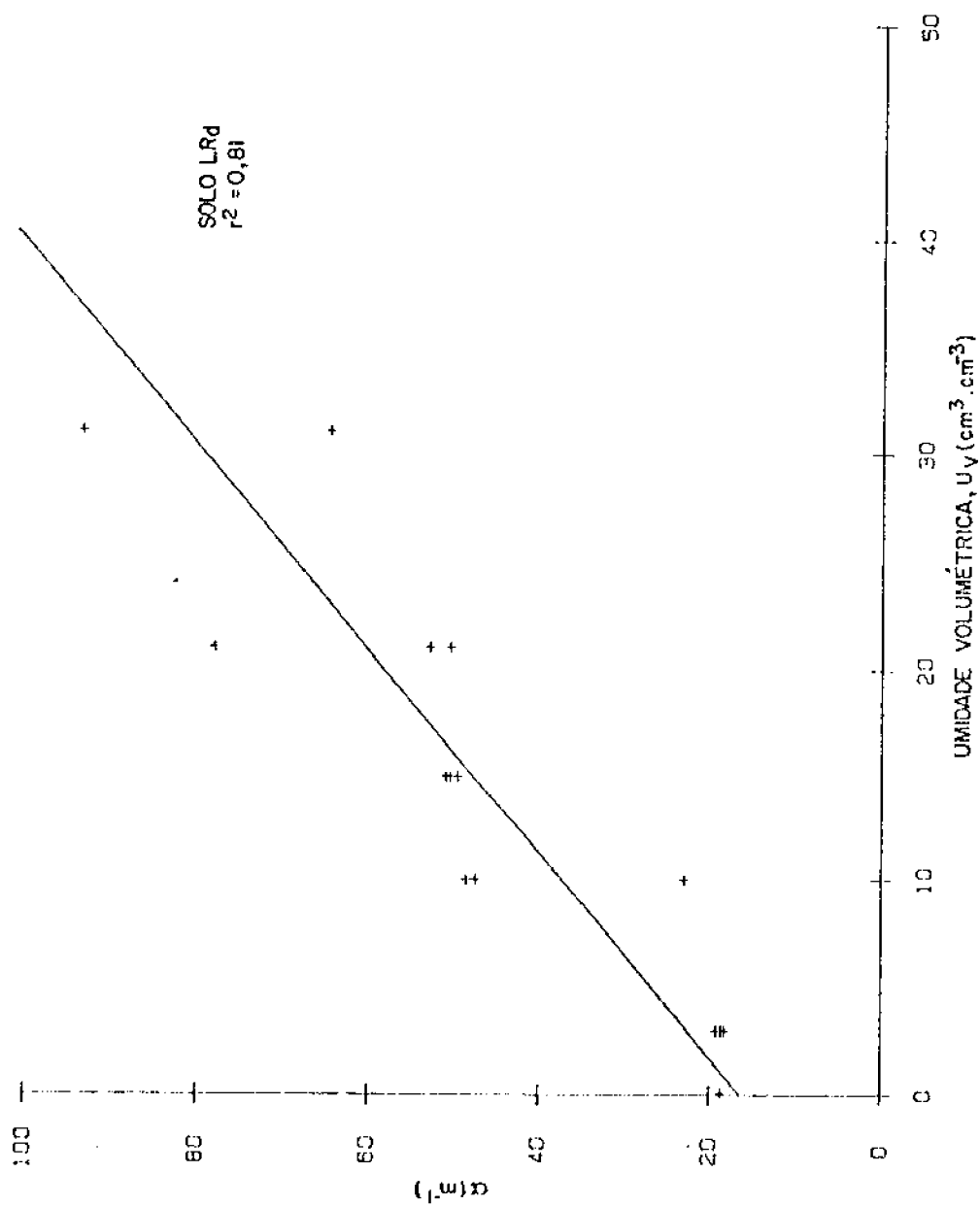


Fig. 4.15 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da umidade volumétrica (U_V), para o solo LRd.

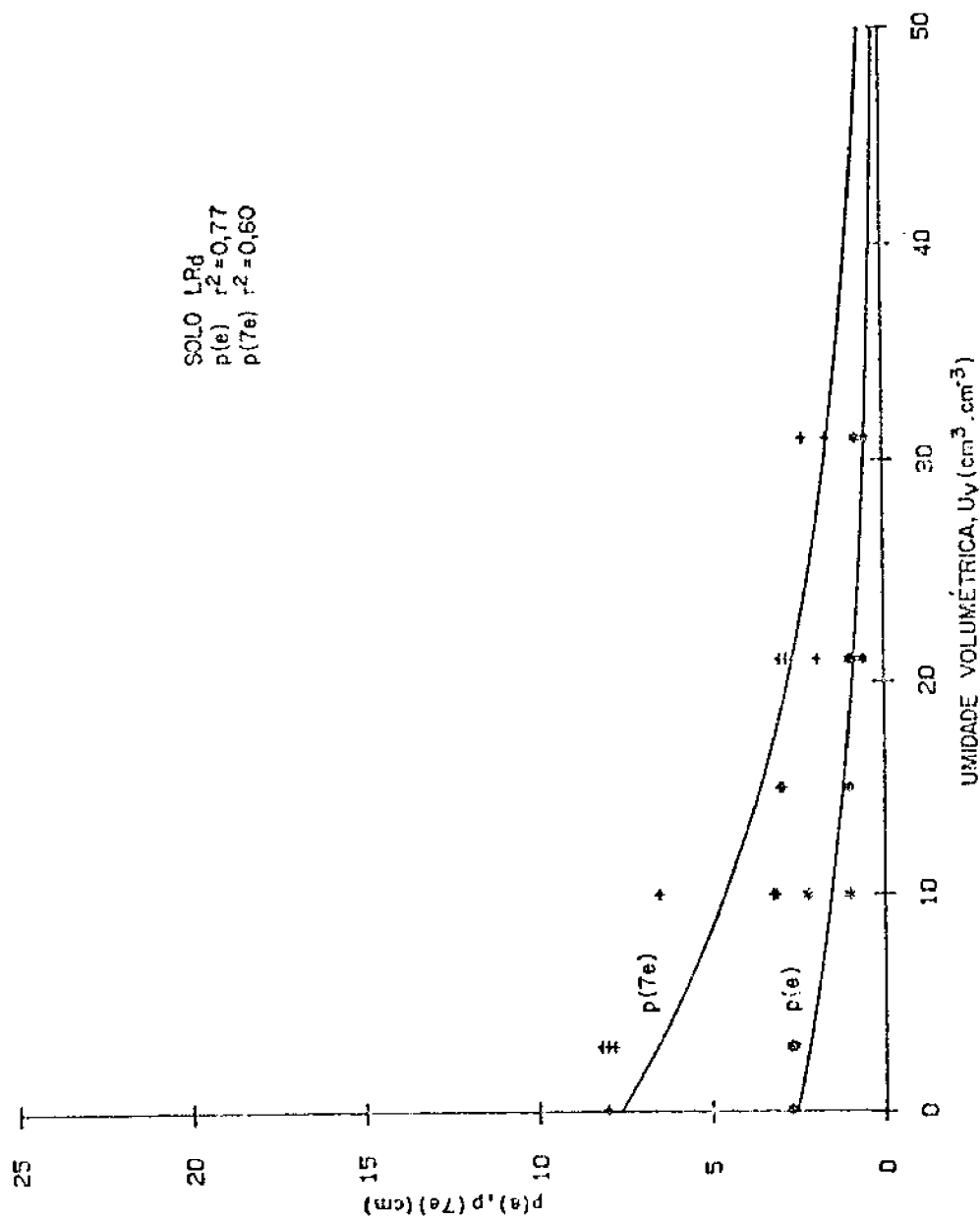


Fig. 4.16 - Gráfico da profundidade de penetração ($P(e)$) e de $P(7e)$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LRd.

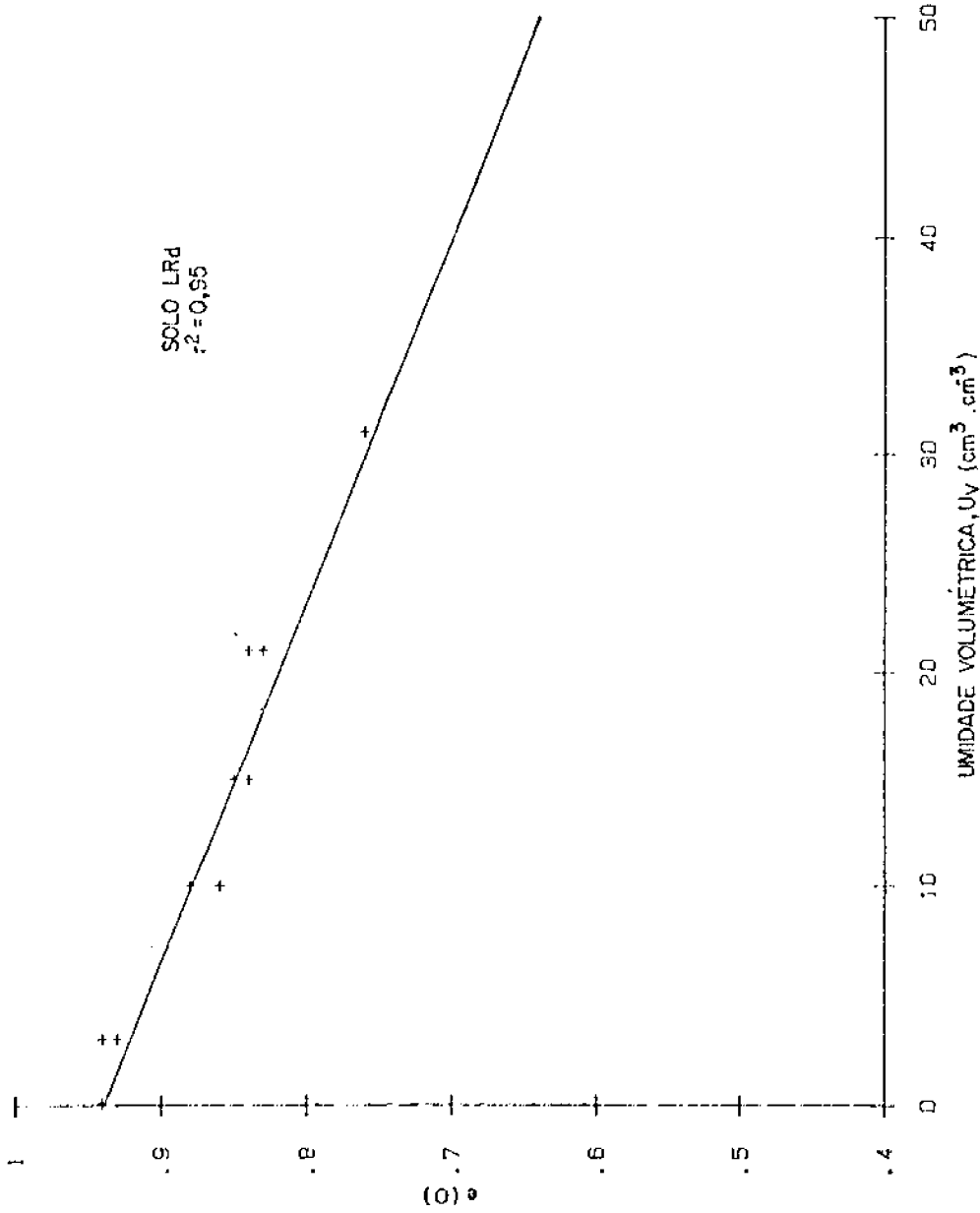


Fig. 4.17 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0$ ($e(0)$) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LRd.

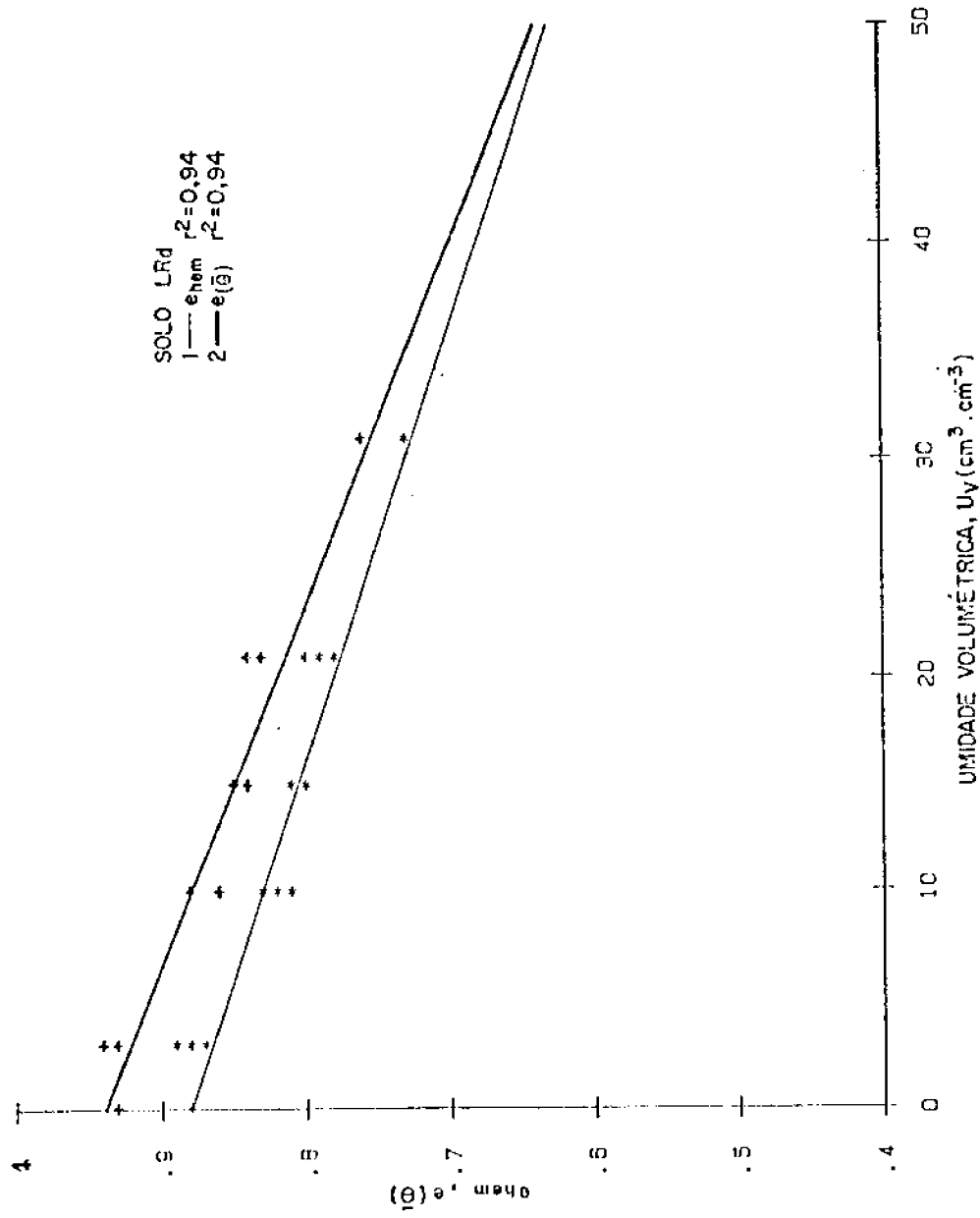


Fig. 4.18 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo LRd.

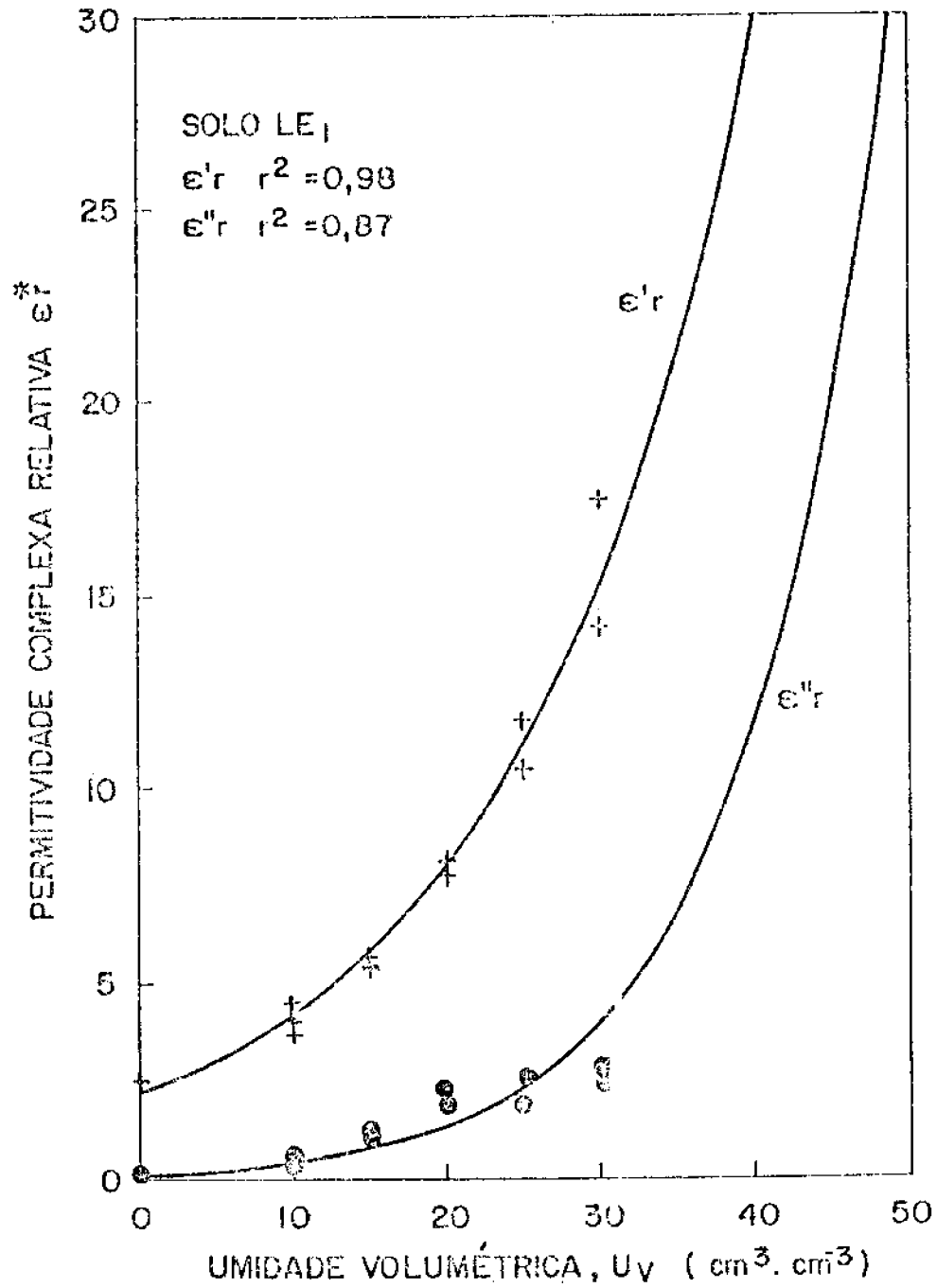


Fig. 4.19 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LE₁.

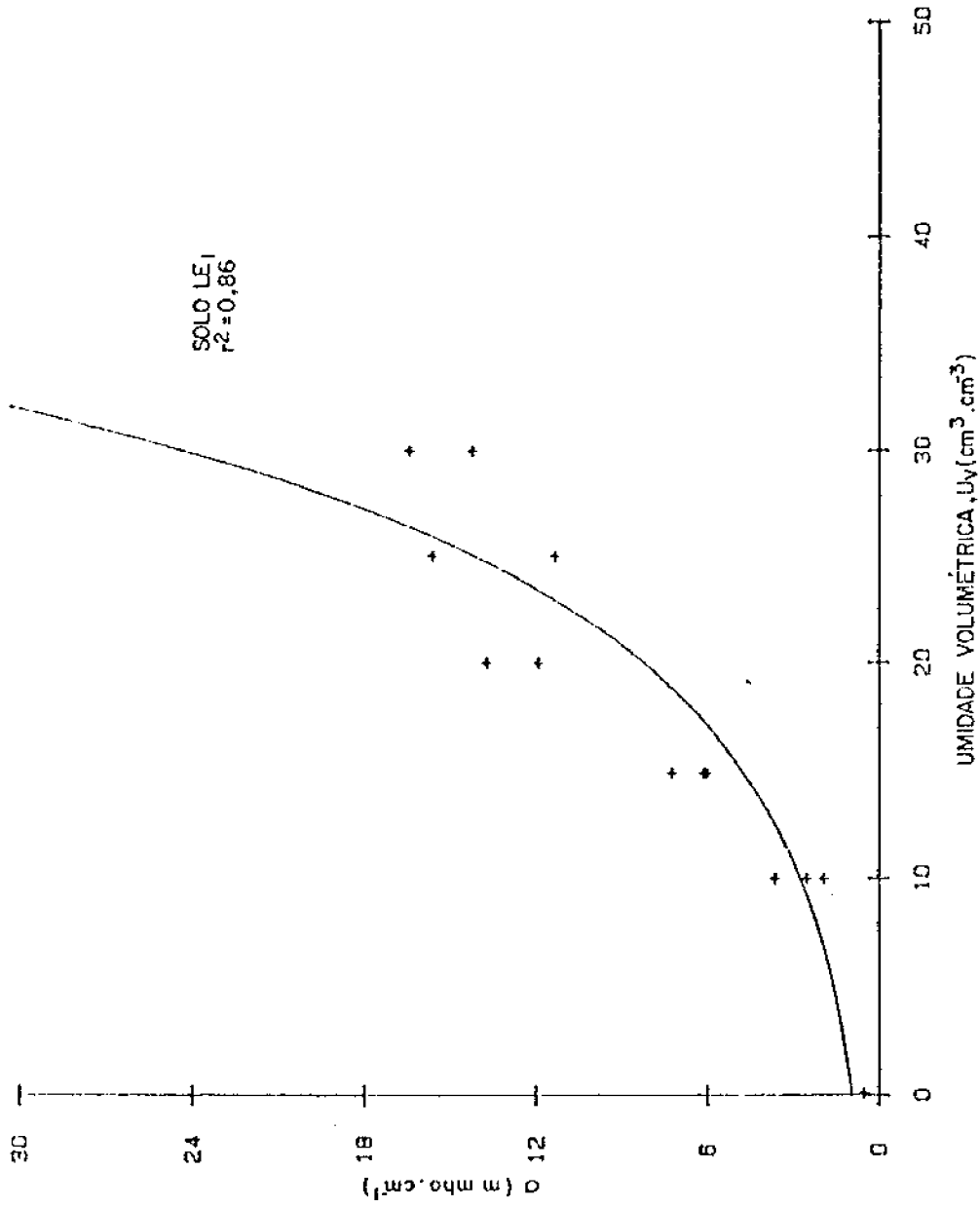


Fig. 4.20 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LE₁.

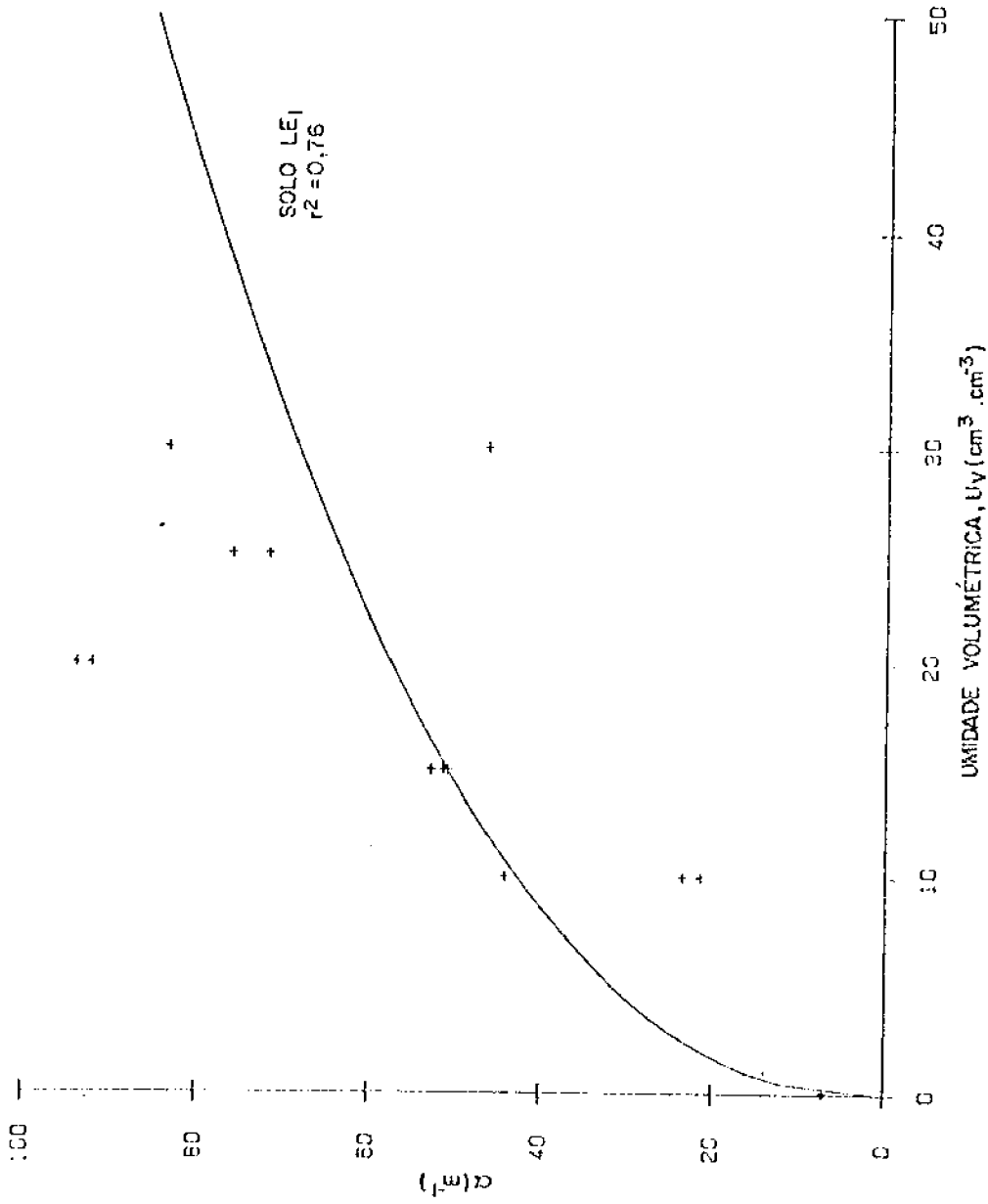


Fig. 4.21 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da unidade volumétrica (U_V), para o solo LE1.

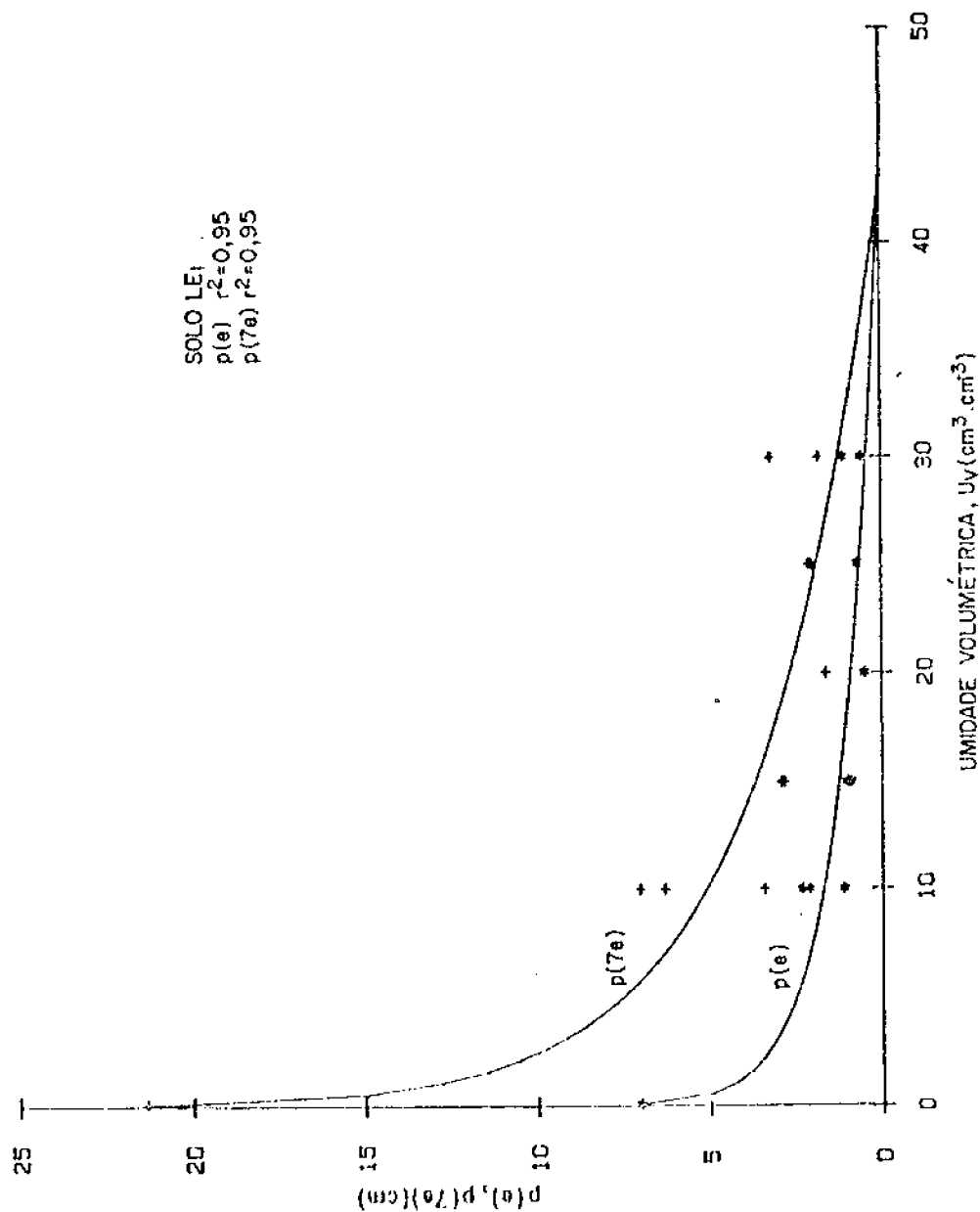


Fig. 4.22 - Gráfico da profundidade de penetração (P(e)) e de P(7e) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LE₁.

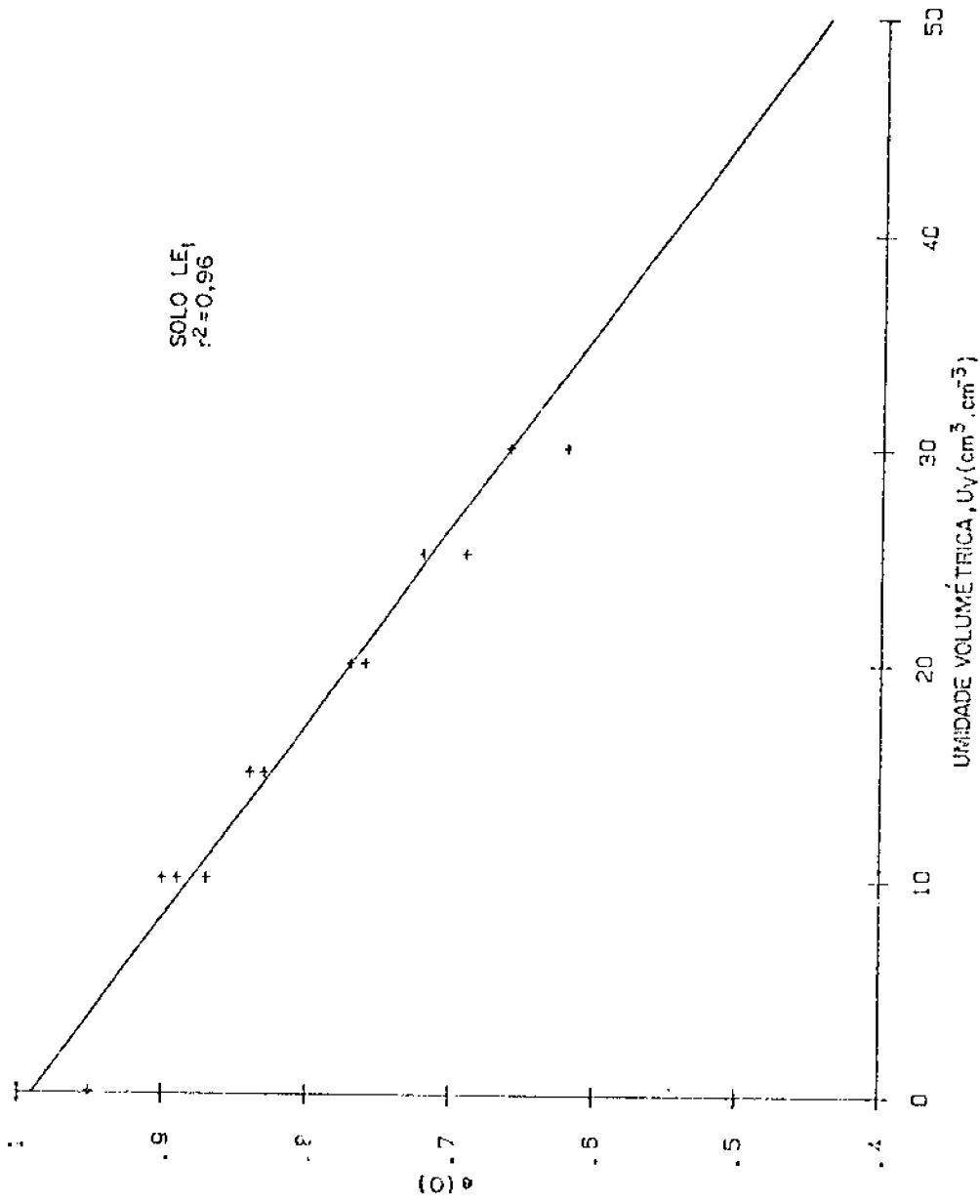


Fig. 4.23 - Gráfico da emissividade para $\theta = 0(e(0))$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo LE₁.

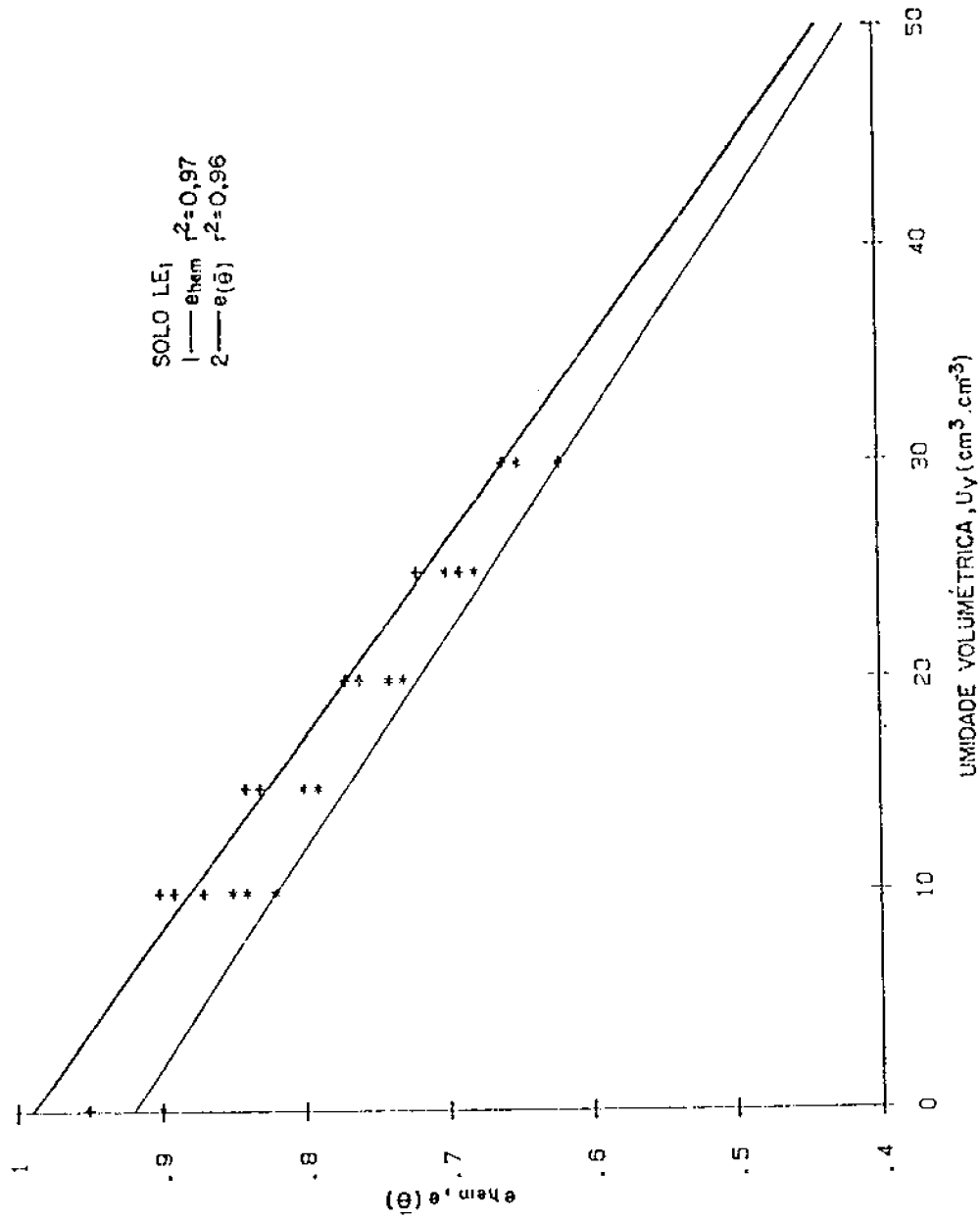


Fig. 4.24 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo LE1.

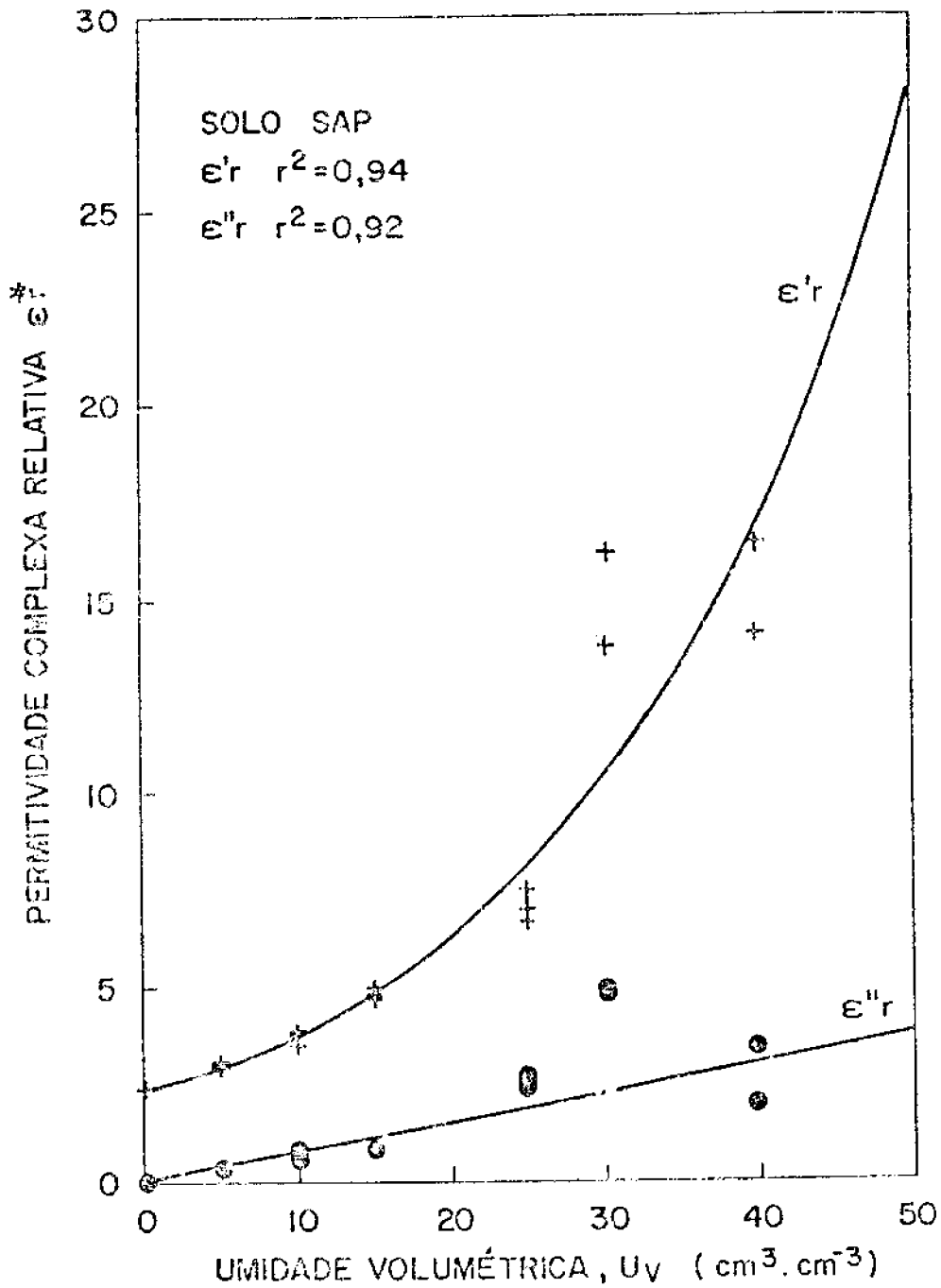


Fig. 4.25 - Gráfico da permissividade complexa relativa (ϵ^*_r) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo SAP.

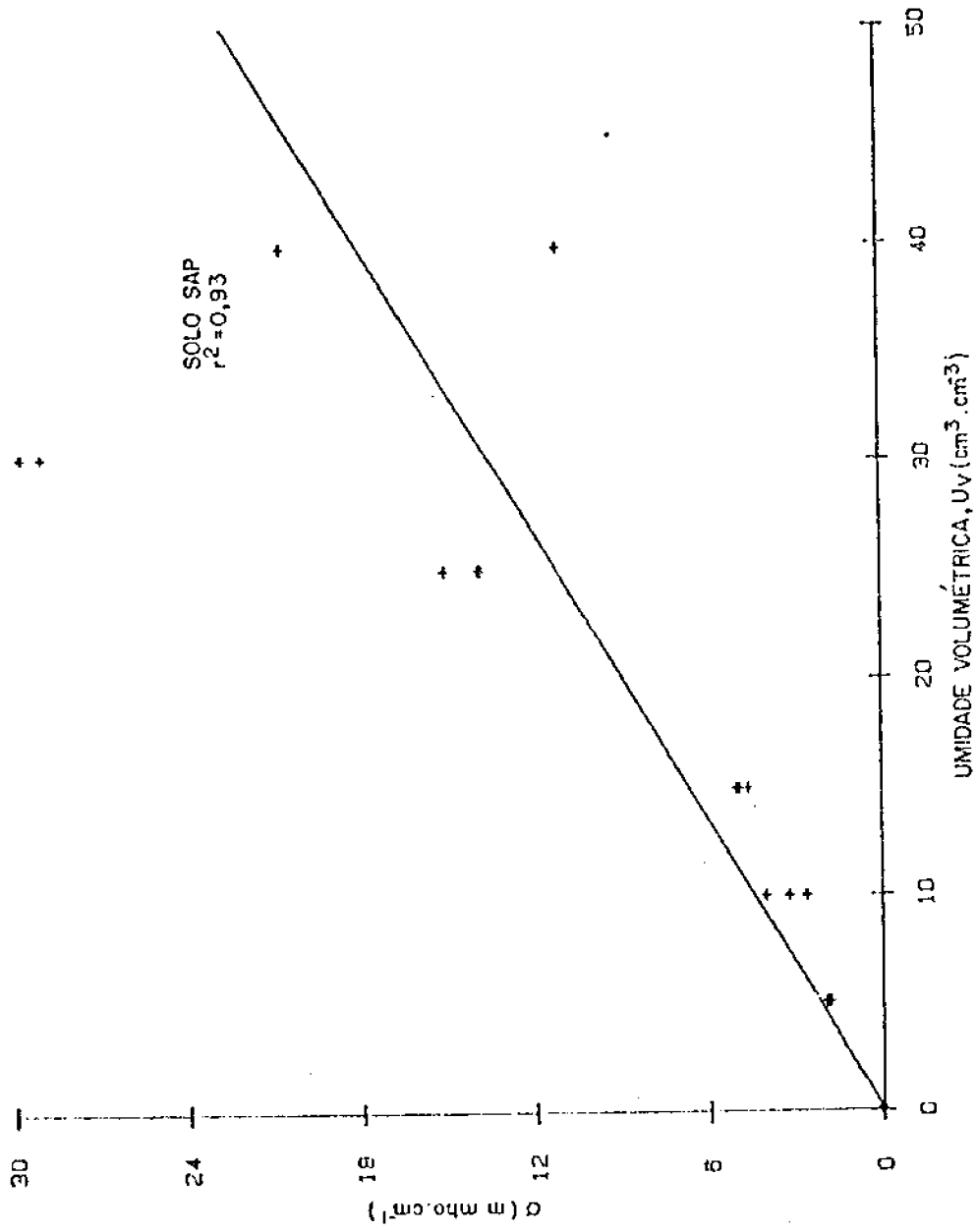


Fig. 4.26 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo SAP.

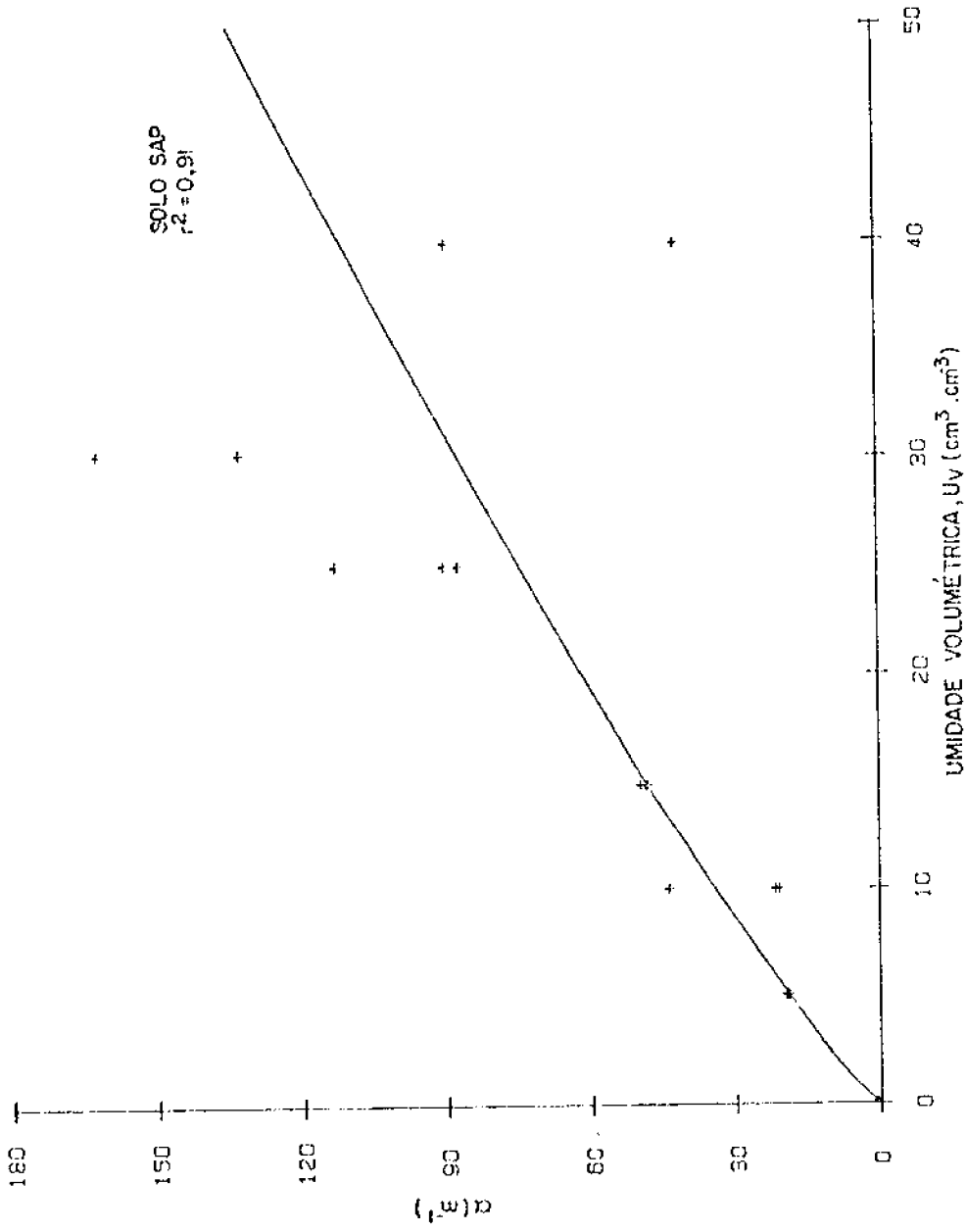


Fig. 4.27 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo SAP.

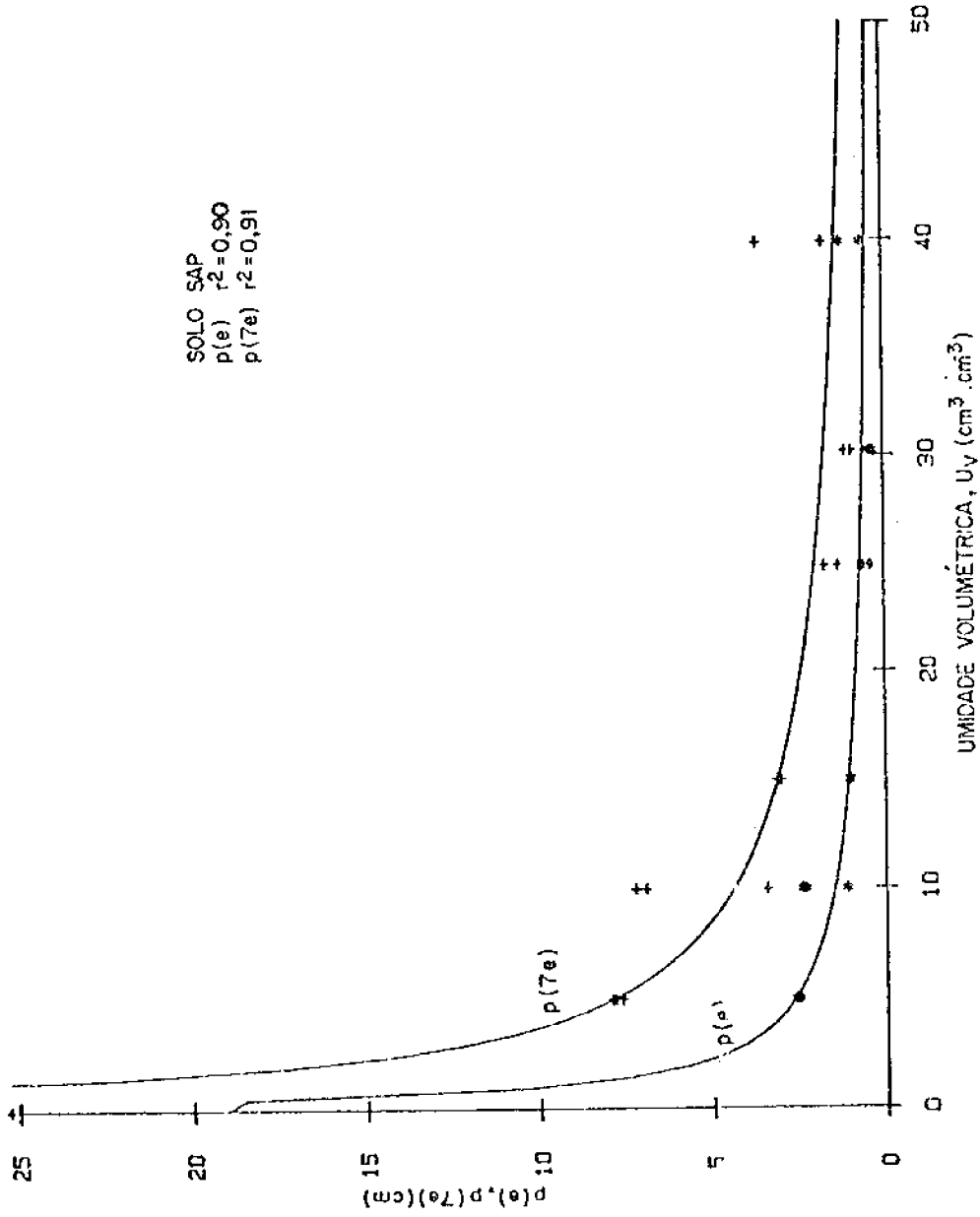


Fig. 4.28 - Gráfico da profundidade de penetração $P(e)$ e de $P(7e)$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo SAP.

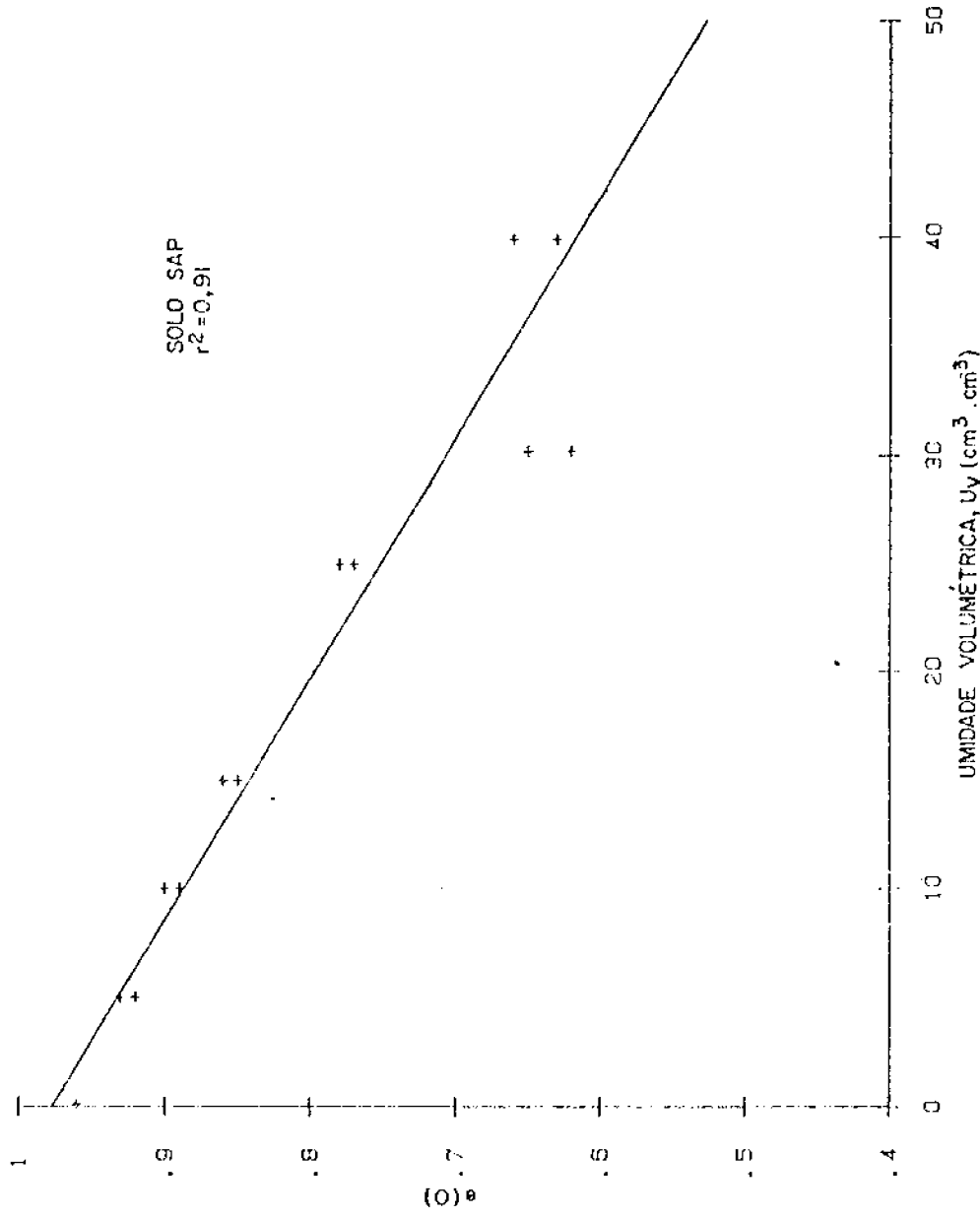


Fig. 4.29 - Gráfico da emissividade para $e = 0(e(0))$ em função da unidade volumétrica U_v , para o solo SAP.

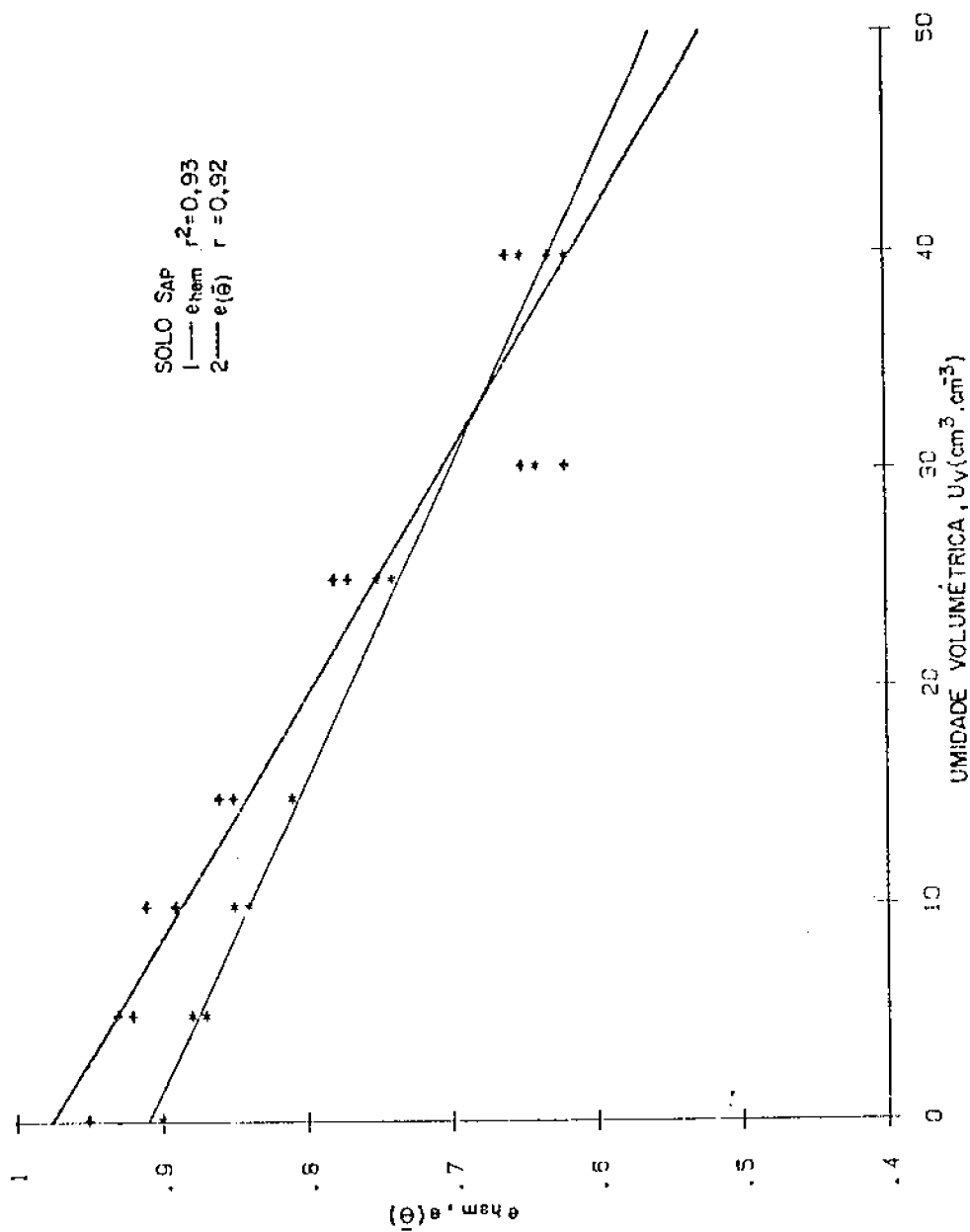


Fig. 4.30 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\bar{\theta})$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo SAP.

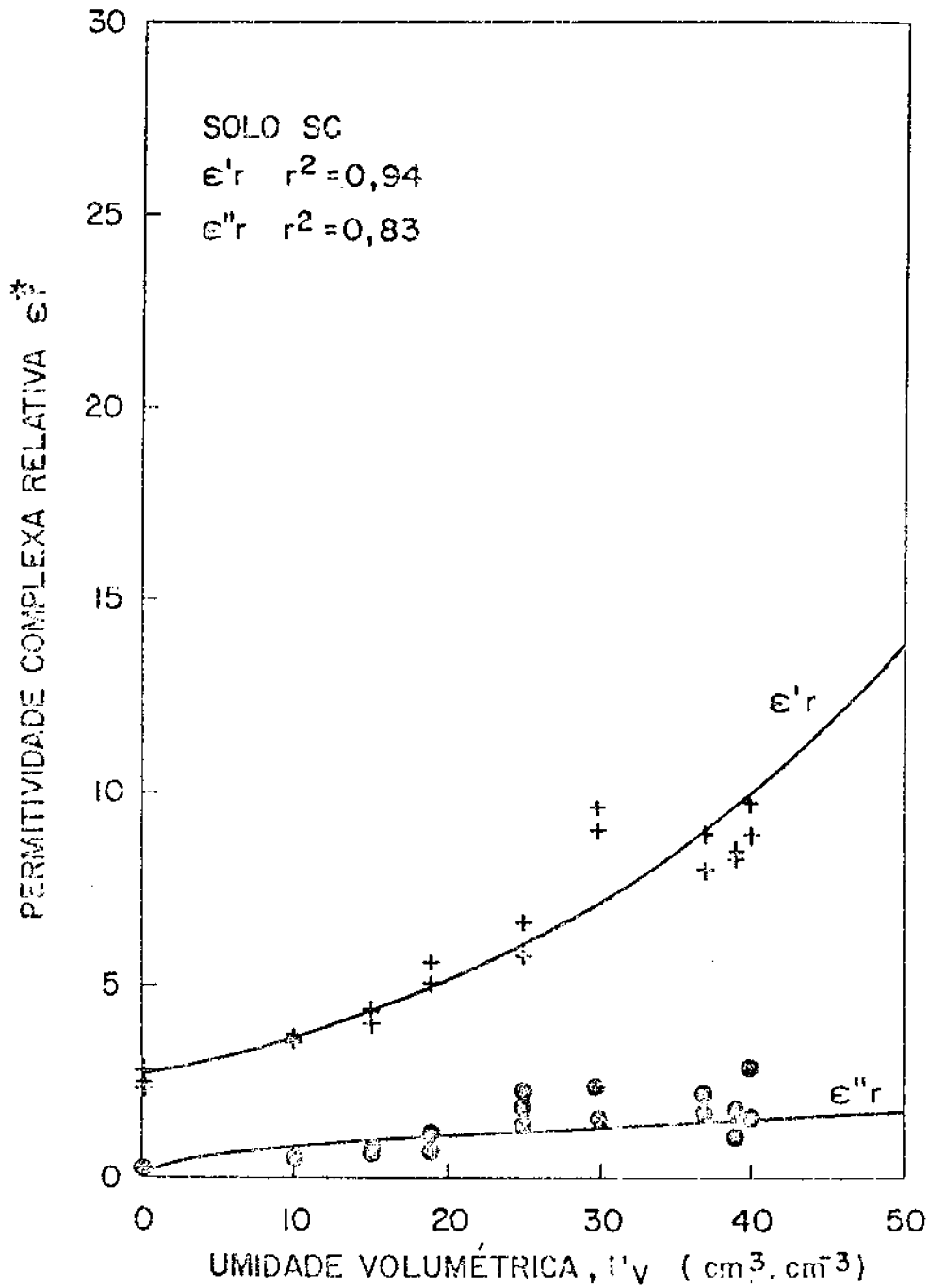


Fig. 4.31 - Gráfico da permitividade complexa relativa (ϵ_r^*) em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo SC.

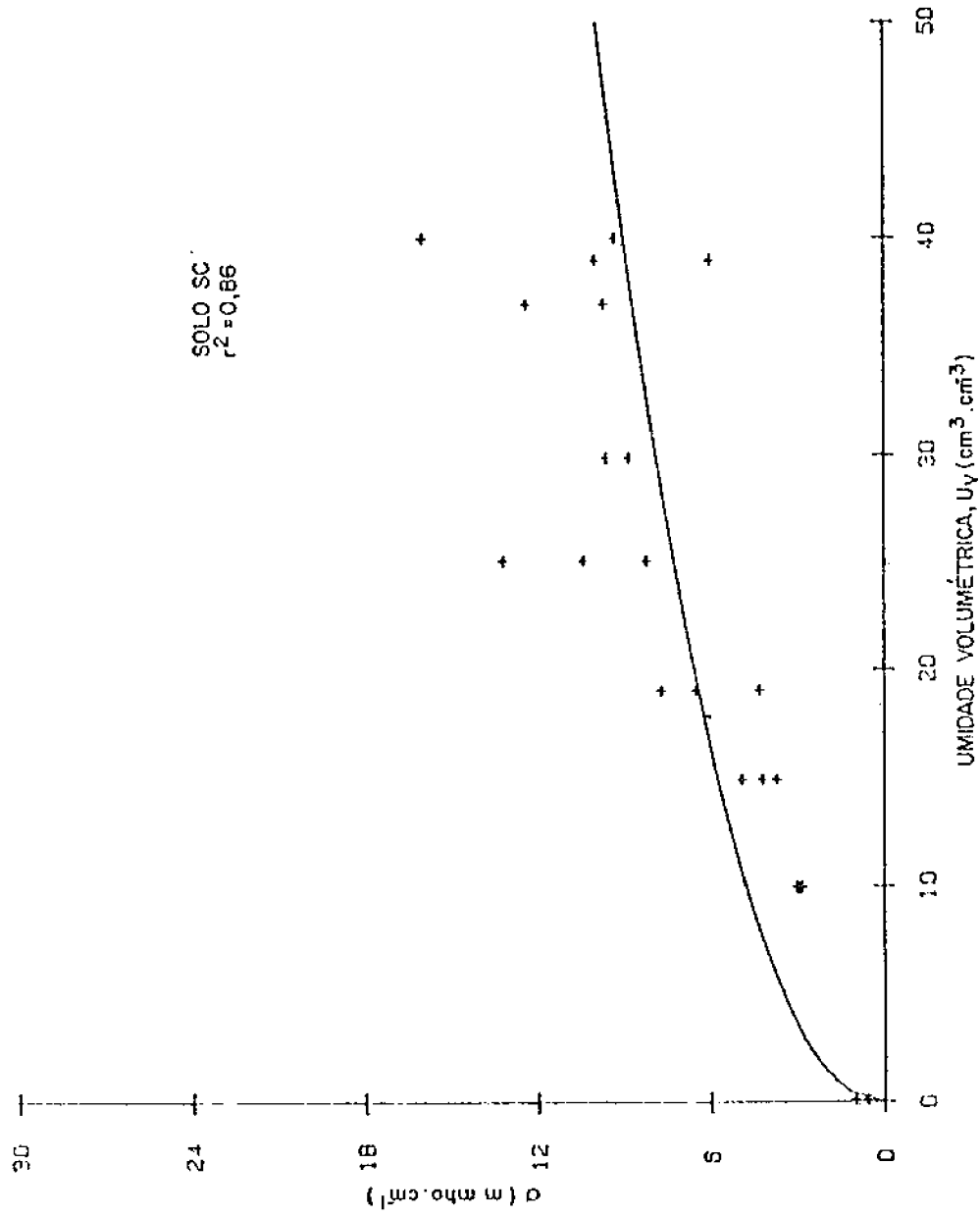


Fig. 4.32 - Gráfico da condutividade elétrica (σ) em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo SC.

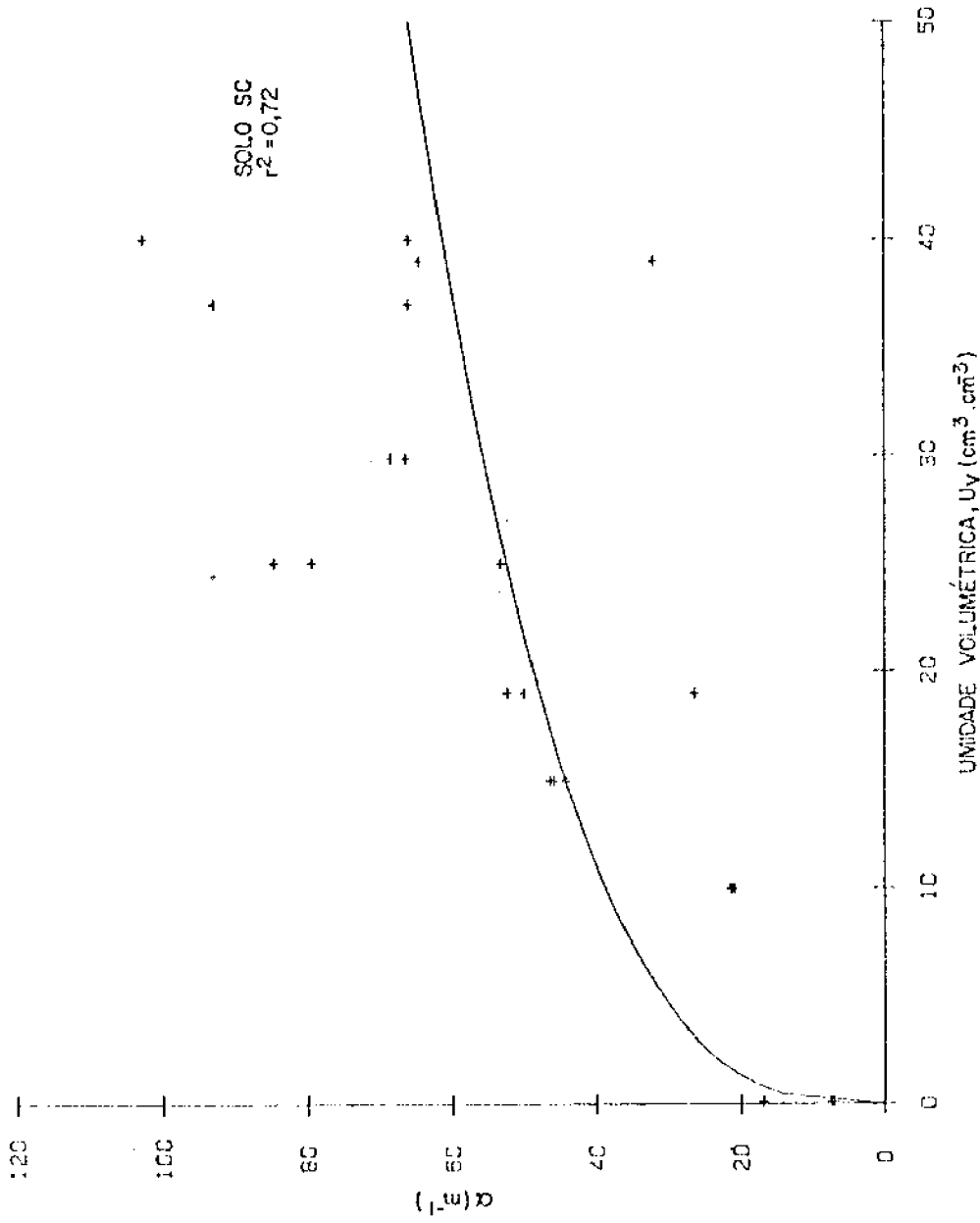


Fig. 4.33 - Gráfico do coeficiente de absorção (α) em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo SC.

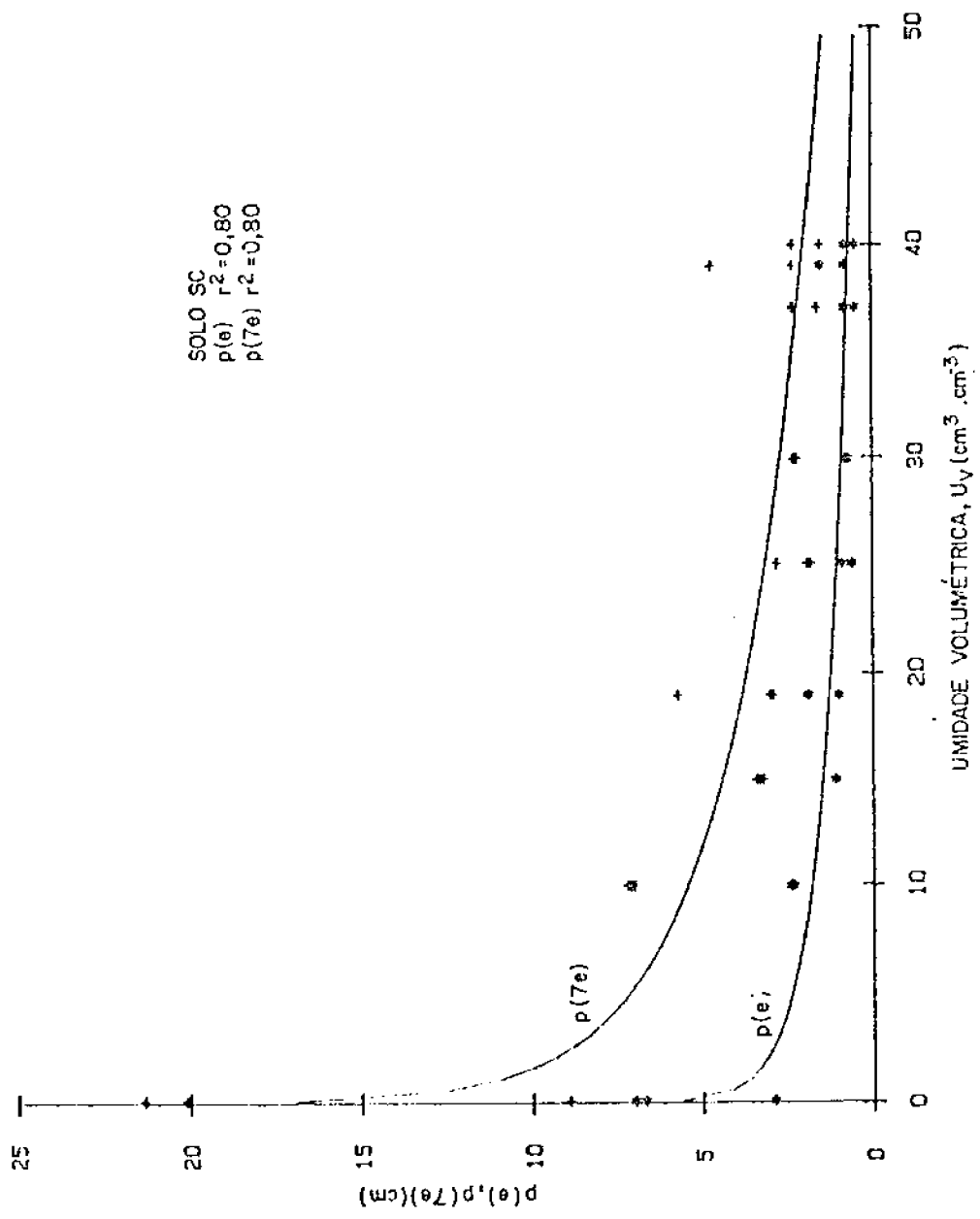


Fig. 4.34 - Gráfico da profundidade de penetração ($P(e)$) e de $P(7e)$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo SC.

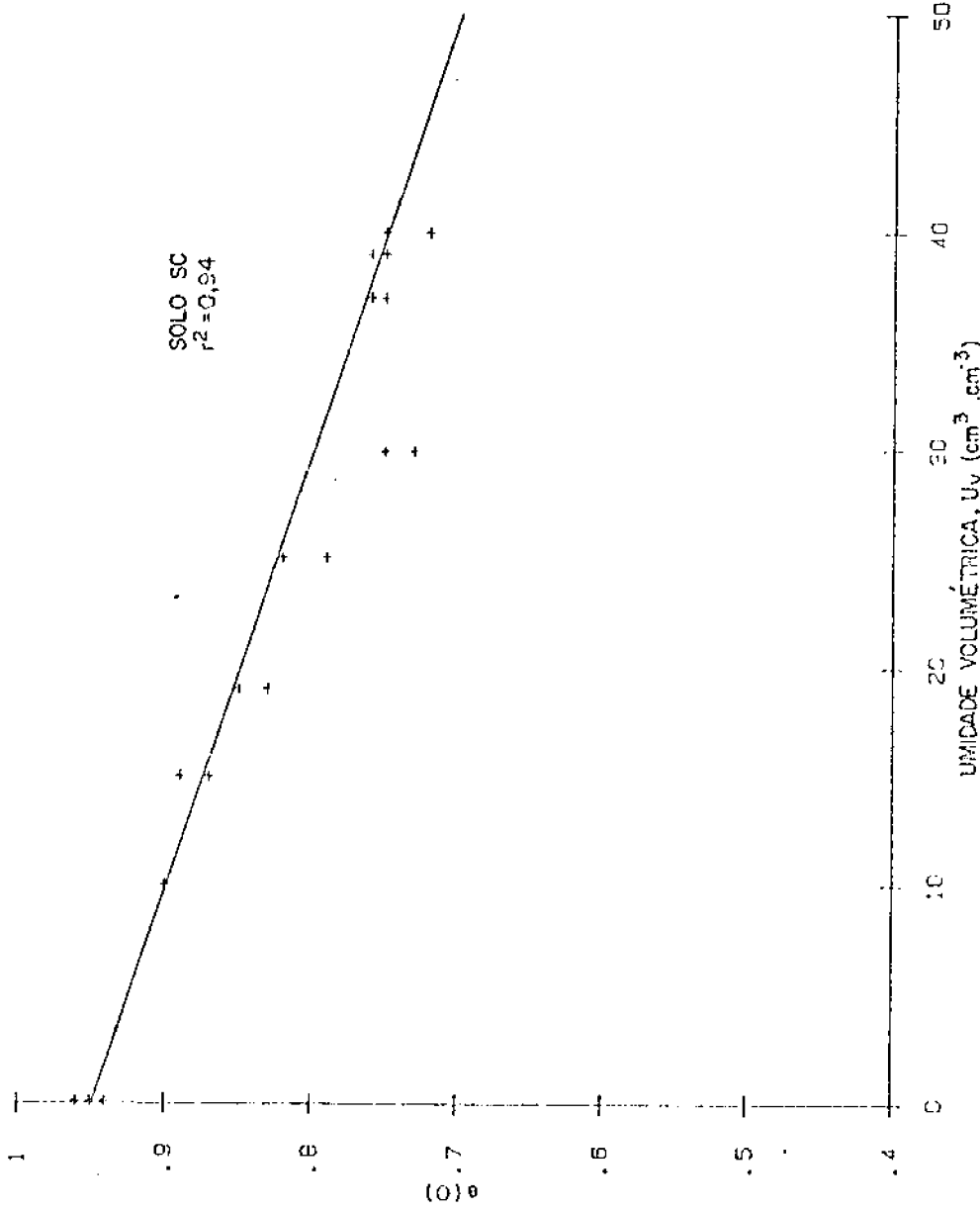


Fig. 4.35 - Gráfico da emissividade para $e = 0(e(0))$ em função da umidade volumétrica (U_v), para o solo SC.

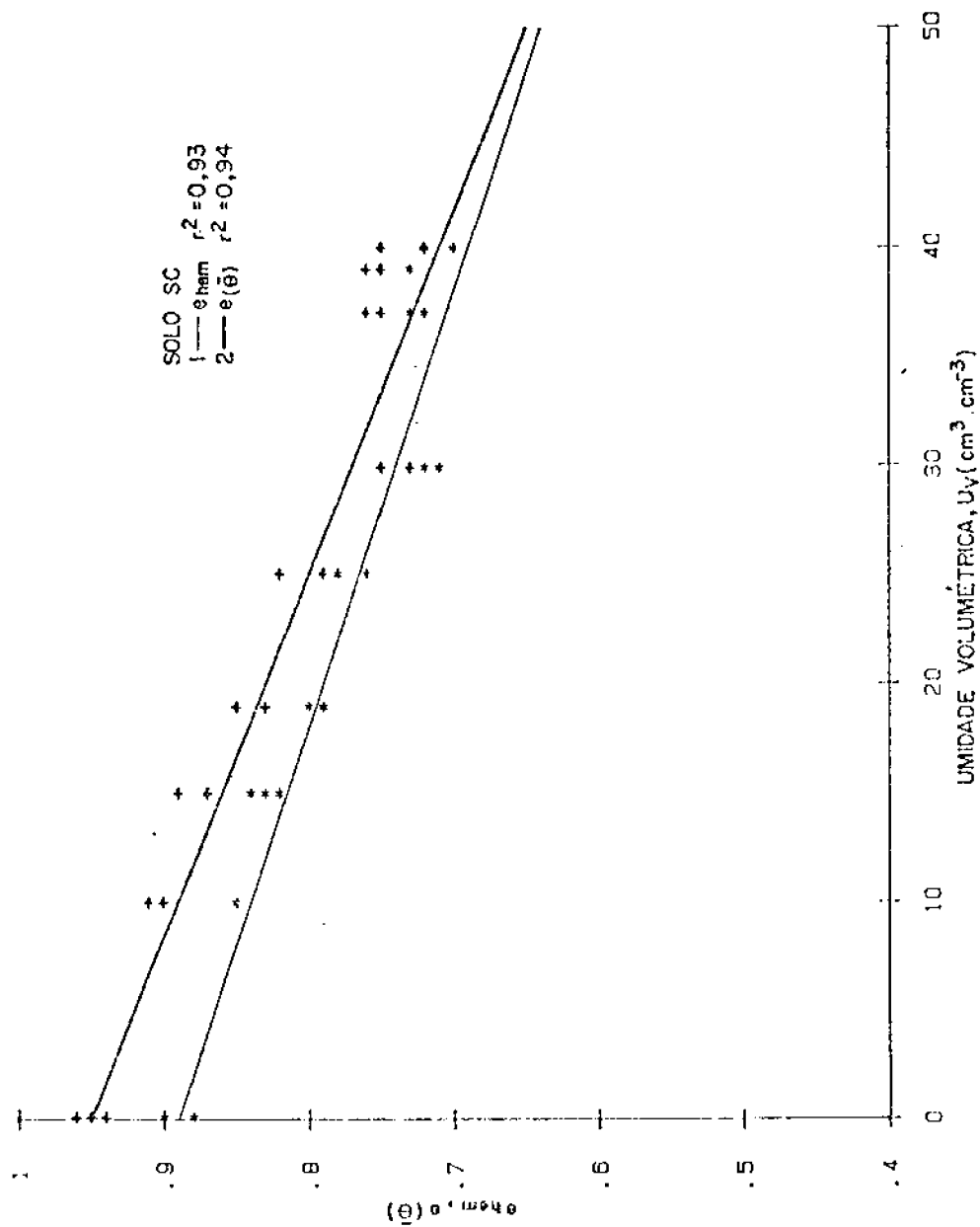


Fig. 4.36 - Gráfico da emissividade hemisférica (e_{hem}) e $e(\theta)$ em função da unidade volumétrica (U_v), para o solo SC.

4.3 - ÂNGULO EFETIVO DE RESOLUÇÃO ESPACIAL DA ANTENA DO RMO.

Admitiu-se para a determinação do ângulo efetivo da resolução espacial da antena do RMO que a T_B média dos alvos considerados (solos) era de 210K (faixa de variação de 120 a 300K) e da água 120K, conforme calibrações e testes efetuados com o RMO nas dependências do INPE/ATIDAIA.

Os resultados encontrados são (ver também a Figura 4.37).

a) Média dos 6 solos:

$$\tau_1 = 0,1s$$

$$\Delta T_1 = 2,0K$$

$$\tau_2 = 1,0s$$

$$\Delta T_2 = 0,6K$$

$$S_1 = \frac{\Delta T_1}{210}$$

$$S_1 = 0,0100$$

$$S_2 = \frac{\Delta T_2}{210}$$

$$S_2 = 0,0030$$

$$P_{90} = 0,0266$$

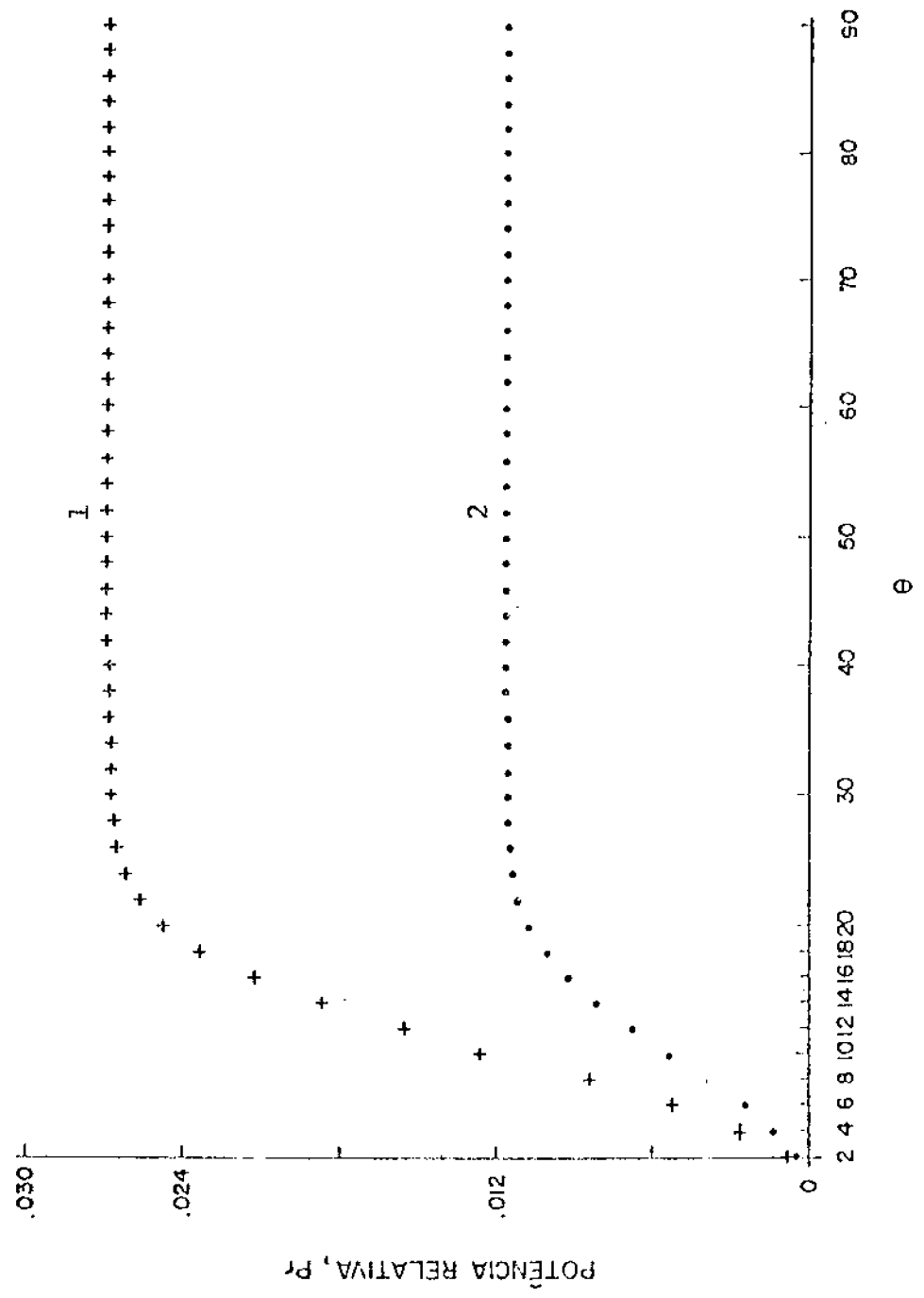


Fig. 4.37 - Gráfico dos resultados encontrados para a potência relativa em função do ângulo e do diagrama de radiação da antena do RMO. Média dos 6 so los (1) e água (2).

Portanto:

$$P_{\bar{\theta}_1} = 0,0263$$

$$\bar{\theta}_1 = 28^\circ$$

$$P_{\bar{\theta}_2} = 0,0265$$

$$\bar{\theta}_2 = 36^\circ$$

b) Água

$$S_1 = \frac{\Delta T_1}{120}$$

$$S_1 = 0,0167$$

$$S_2 = \frac{\Delta T_2}{120}$$

$$S_2 = 0,0050$$

$$P_{g_0} = 0,0113$$

Portanto:

$$P_{\bar{\theta}_1} = 0,0111$$

$$\bar{\theta}_1 = 26^\circ$$

$$P_{\bar{\theta}_2} = 0,0112$$

$$\bar{\theta}_2 = 28^\circ$$

4.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE ϵ_r^* E QUANTIDADE DES FÍSICAS ASSOCIADAS.

A constante dielétrica relativa (ϵ_r') de todos os solos quando secos apresenta valores que variam de 2,4 a 2,8 (Tabelas 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 e 4.11) vindo a confirmar as afirmações de Shutko et alii (1982a) e Hallikainen et alii (1985).

De modo geral os solos possuem comportamento distinto em relação ao aumento de ϵ'_r com o aumento da umidade, havendo dependência quanto à classe de solo. Considerando-se somente a textura e agrupando-se os seis solos em suas classes texturais, seria de se esperar a obtenção de três grupos quais sejam:

PV₂ e LV₃

LRd e SC

LE₁ e SAP

Destes, o único que apresenta solos cujo comportamento de ϵ'_r versus umidade é razoavelmente semelhante é o grupo LRd/SC. (Figura 4.13 e Figura 4.31). A não ser pela classe textural, estes solos não têm características comuns (Apêndice A).

Por outro lado, apesar dos solos PV₂ (areia franca) (Figura 4.1) e SAP (muito argiloso) (Figura 4.25) serem de textura bastante distinta, há uma tendência em afirmar que possuem mesmo comportamento. Examinando-se o Apêndice A pode-se notar que estes solos não têm nenhuma característica em comum. Convém ressaltar que há a necessidade de um maior número de medições de ϵ'_r principalmente para o solo PV₂.

A partir das equações sugeridas por Dobson et alii (1985) pode-se calcular a umidade volumétrica correspondente à água presa (Equação 2.87) em gcm^{-3} , assumindo-se $d_s = 3\text{Å}$.

PV ₂	0,019 g.cm ⁻³	LE ₁	0,022 g.cm ⁻³
LV ₃	0,014 g.cm ⁻³	SAP	0,026 g.cm ⁻³
LRd	0,032 g.cm ⁻³	SC	0,028 g.cm ⁻³

A partir destes graus de umidade espera-se que exista um aumento mais acentuado da constante dielétrica devido à presença de água livre.

Os resultados parecem estar de acordo com uma possível classificação dos seis solos quanto à tendência de aumento de ϵ'_r em função de umidade e superfície específica, com exceção dos solos SAP e PV₂, ou seja:

SAP e PV₂
LV₃
LE₁
LRd e SC

A densidade aparente, textura, porosidade, superfície específica e o teor de água são de modo geral citados por outros autores como sendo os parâmetros fundamentais do solo a controlar ϵ'_r . A densidade aparente provavelmente é o parâmetro mais crítico de ser controlado quando do processo de medição de ϵ'_r , principalmente em solos de textura fina onde ocorre variação da densidade aparente com o aumento do teor de água. A princípio seria de se esperar que solos de textura arenosa mostrassem um aumento mais acentuado de ϵ'_r em função da umidade e que solos de textura argilosa apresentassem comportamento o

posto (Figura 2.9). No presente trabalho o solo LV₃ (73% de areia) mostra um aumento rápido de ϵ'_r , Figura 4.7, vindo a confirmar as expectativas da influência da textura grosseira sobre ϵ'_r (água livre). Por outro lado os menores incrementos de ϵ'_r versus umidade ocorrem para os solos LRd (Figura 4.13) e SC (Figura 4.31) e não para o solo SAP (74% argila) (Figura 4.25). Os dois primeiros solos têm como características marcantes alto teor de Fe e M.O., respectivamente. Além do mais o teor de Na⁺ do LRd é de 0,31 meq/100g, considerado relativamente alto para esta classe de solos.

Parece portanto evidente que, para os solos do presente trabalho, os parâmetros relacionados somente às propriedades físicas dos solos não explicam completamente o comportamento de ϵ'_r , sugerindo que as propriedades químicas e/ou mineralógicas também possam estar envolvidas.

A principal dificuldade de se explicar estes resultados em termos de propriedades físicas isoladamente recai no velho problema da distinção entre atributos e qualidade (comportamento), Resende (1982). Isto é muito importante: nada pode-se dizer a respeito da influência do teor de argila se mistura-se Latossolos (solos velhos, ricos em óxidos de Fe e Al) e Vertissolos (como o Massapé do Recôncavo Bahiano, já muito rico em argila 2:1 que se expande e se contrai). Nestes últimos, em condições comparáveis, haveria menor contribuição da água às propriedades dielétricas do solo.

Analisando-se os valores de ϵ''_r , tg δ e σ para os seis solos secos (Tabela 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 e 4.11), pode-se notar diferenças bastante significativas. Os altos valo

res encontrados para os solos LRd e LE₁ provavelmente são devidos à presença de Fe₂O₃ (20,6 e 3,7%; respectivamente). O solo SC tem como característica marcante o alto teor de M.O. (14,6%). Solos arenosos normalmente apresentam baixos valores de ϵ_r'' . Com o aumento da umidade, ϵ_r'' e σ mostram tendências diferentes para cada um dos solos, tendo inclusive o solo LV₃, valores de ϵ_r'' superiores aos apresentados para o solo LRd no intervalo entre 10 e 40% de umidade, devido à presença de água livre (perda alta da água). O alto valor de σ para o solo LRd seco também pode ser explicado pela presença de Fe, o mesmo acontecendo para o solo LE₁.

A profundidade de penetração da radiação no solo estando diretamente relacionada a ϵ_r' e $\text{tg}\delta$, faz com que os solos que apresentem valores de $\text{tg}\delta$ pequenos quando secos, possuam uma profundidade de penetração da radiação muitas vezes maior que λ (solos PV₂, LV₃ e SAP - Figuras 4.4, 4.10, 4.28 respectivamente); os solos SC e LE₁ representam situações intermediárias. Para o solo LRd os valores de P(e) e P(7e) são de início os menores. Com exceção do solo LRd, o decréscimo de P(e) e P(7e) dá-se de modo bastante rápido com o aumento da umidade volumétrica dos solos.

Com U_v acima de 10, todos os solos apresentam valores de P(e) da ordem de décimos de comprimento de onda. Para $U_v = 10$ os valores de P(7e) estão por volta de dois comprimentos de onda, decrescendo, com o aumento de U_v , para valores da ordem de um comprimento de onda (solos PV₂ e SC - Figuras 4.4 e 4.34 respectivamente) e décimos de comprimento de onda (Solos LV₃, LRd, LE₁ e SAP - Figuras 4.10, 4.16, 4.22 e 4.28

respectivamente).

A emissividade nas faixas de microondas é fortemente controlada por ϵ_r^* (principalmente ϵ_r'). Um rápido aumento de ϵ_r' em função da umidade, resulta em uma queda acentuada da emissividade. Como entre os seis solos existem diferentes comportamentos para ϵ_r^* , as emissividades consideradas no presente trabalho, ou sejam, $e(0)$, e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ também apresentam diferenças entre os solos. As Tabelas 4.1 a 4.7 mostram os valores obtidos para $e(0)$ enquanto que e_{hem} e $e(\bar{\theta})$ são apresentados nas Tabelas 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 e 4.12. O solo que apresenta a queda mais acentuada da emissividade em função da umidade volumétrica do solo é o LV₃, que é também o solo que apresenta o aumento mais rápido de ϵ_r' . Os solos LRd e SC apresentam basicamente a mesma inclinação da reta ajustada para $e(0)$.

A emissividade de todos os solos quando secos é alta, resultado que já era esperado, devido ao comportamento semelhante dos solos secos para ϵ_r' .

Para os solos PV₂, LRd, LE₁ e SC, $e(\bar{\theta}) > e_{hem}$ para todos os valores da umidade volumétrica do solo. Para os solos LV₃ e SAP, há equivalência entre $e(\bar{\theta})$ e e_{hem} para valores de U_v próximos a 30% havendo conseqüentemente cruzamento das duas retas ajustadas por regressão estatística.

O fato de $e(\bar{\theta})$ ser maior que e_{hem} é devido à influência do diagrama de radiação da antena do RMO, que apresenta os maiores valores de $F(\theta)$ para valores pequenos de θ , tendo estes portanto um maior peso no cômputo da emissividade. Além

do mais, $e(0)$ também é maior que e_{hem} .

Para a água, obteve-se um valor para a emissividade igual a 0,4, consistente com resultados de outros trabalhos na faixa de X de microondas (Ulaby et alii, 1986).

As Figuras 4.38 a 4.43 apresentam gráficos polares da emissividade direcional ($e(\theta)$) para os seis solos secos e com umidade volumétrica próxima de 30%.

Observa-se que todos os solos comportam-se como corpos cinzas até um determinado ângulo θ quando ocorre um ligeiro aumento da emissividade, seguido de um decréscimo acentuado para θ grandes.

A Figura 4.44 apresenta o gráfico polar de $e(\theta)$ para a água. Nota-se um comportamento diferente para a água, que é um corpo cinza somente para valores de θ próximos a zero. Além do mais, o aumento de $e(\theta)$ com θ é mais acentuado sendo máximo para θ próximo de 85.

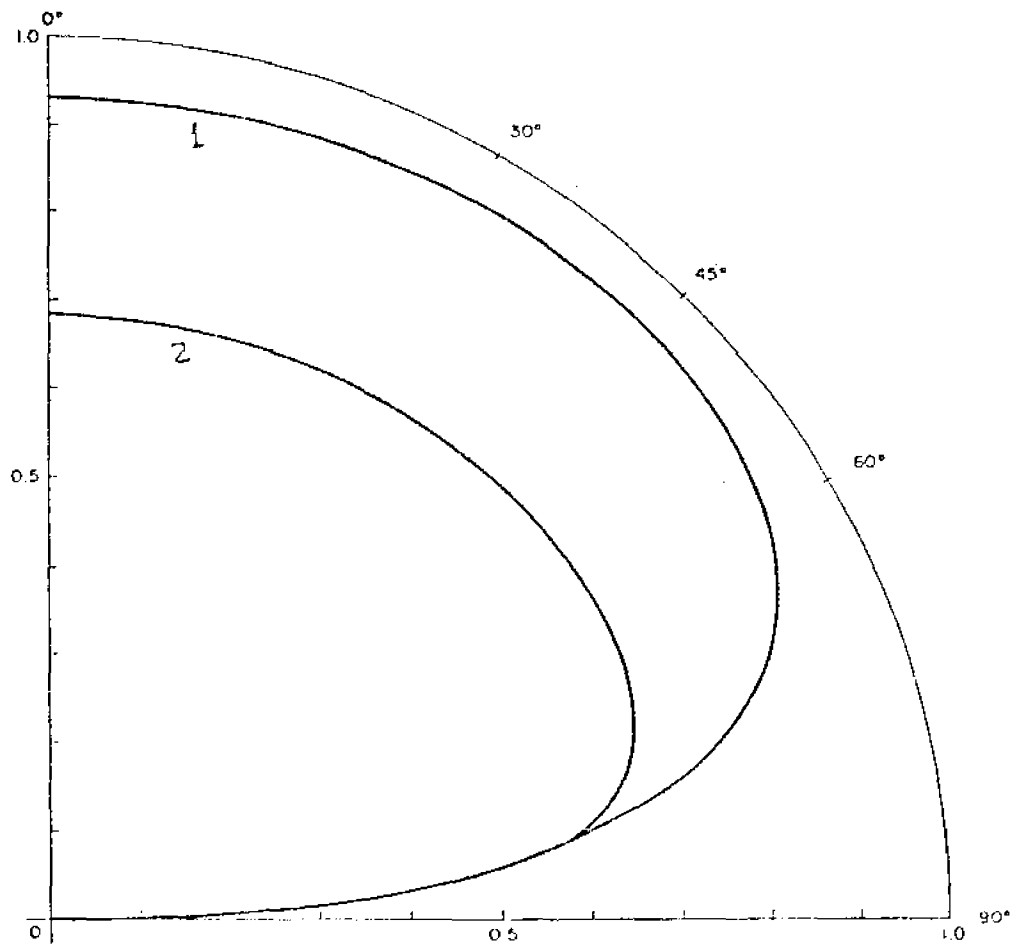


Fig. 4.38 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo PV₂ seco (1) e com U_v de 28,0% (2).

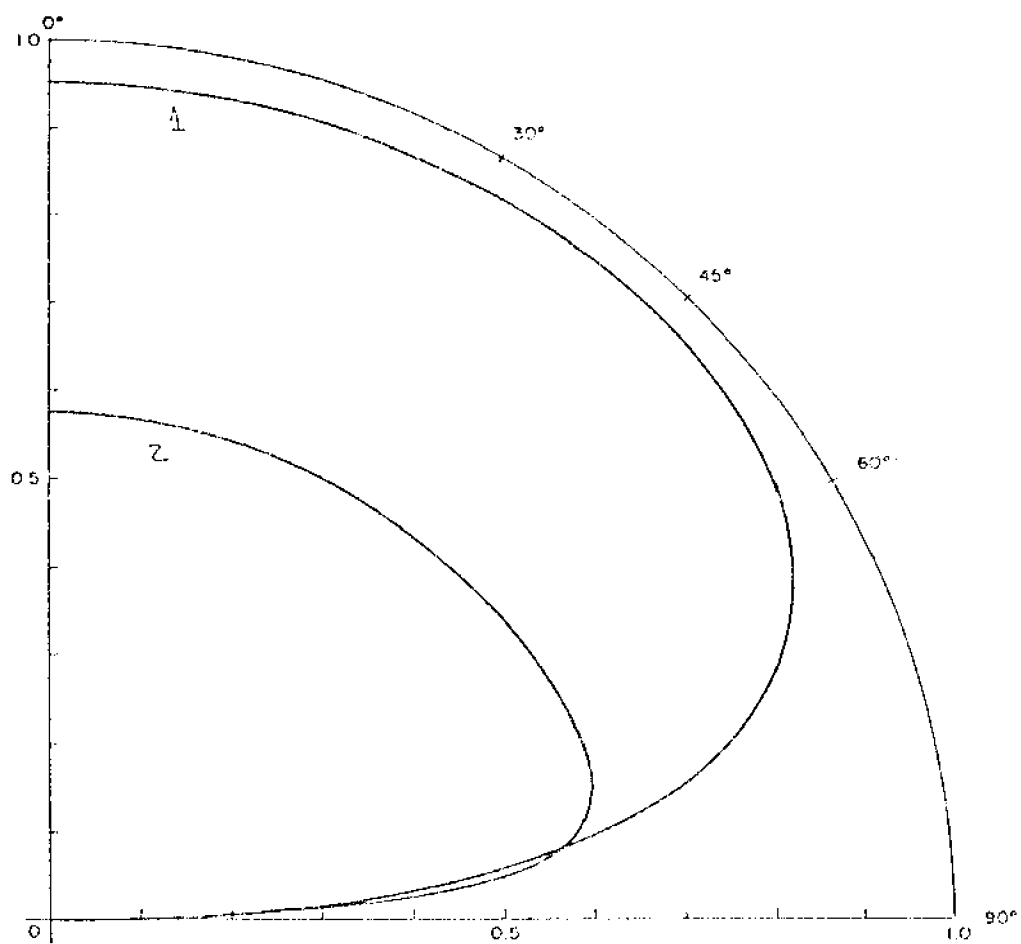


Fig. 4.39 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo LV₃, seco (1) e com U_V de 30,0% (2).

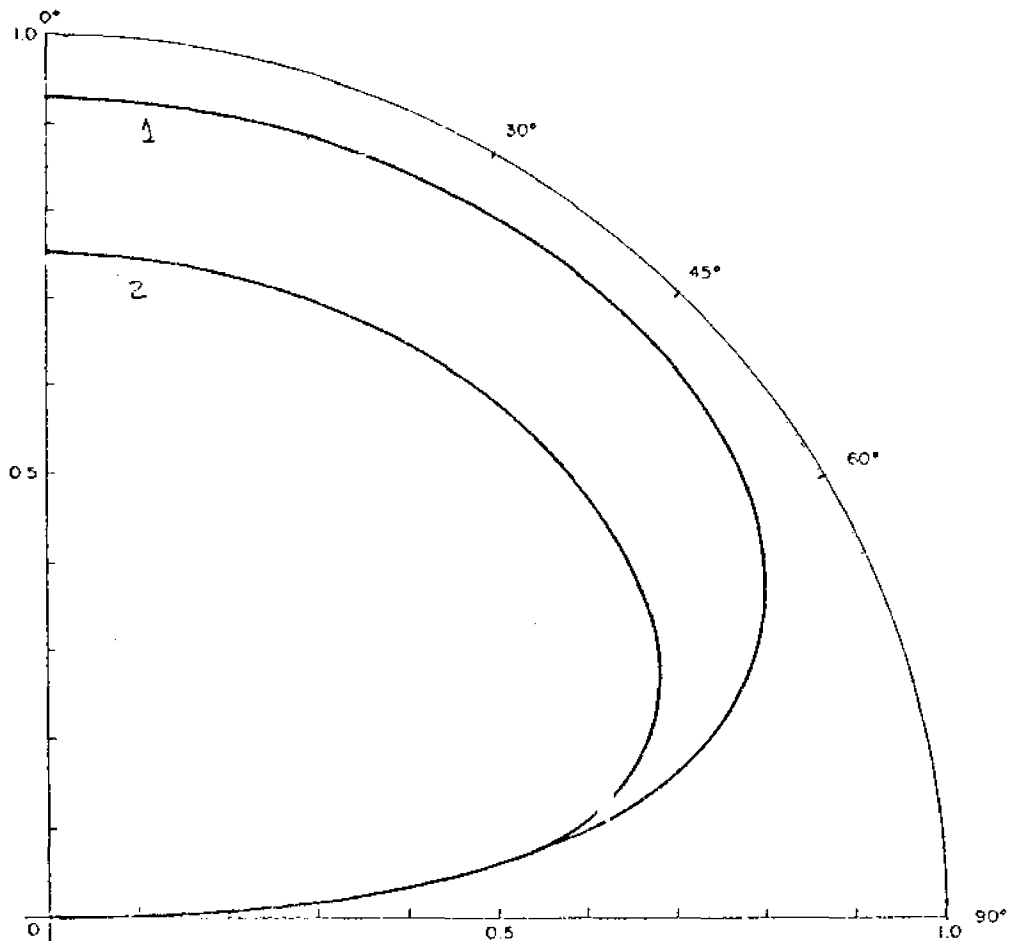


Fig. 4.40 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo LRd seco (1) e com U_v de 31,0% (2).

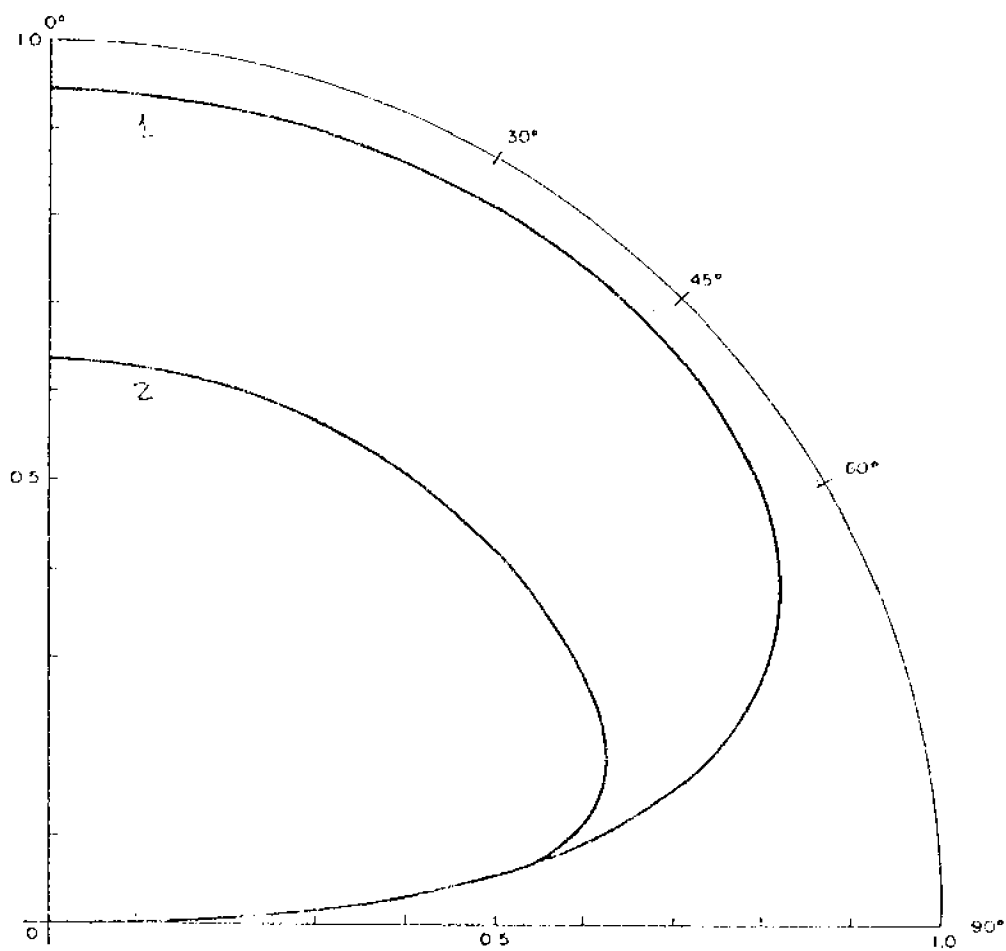


Fig. 4.41 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo LE_1 seco (1) e com U_V de 30,0% (2).

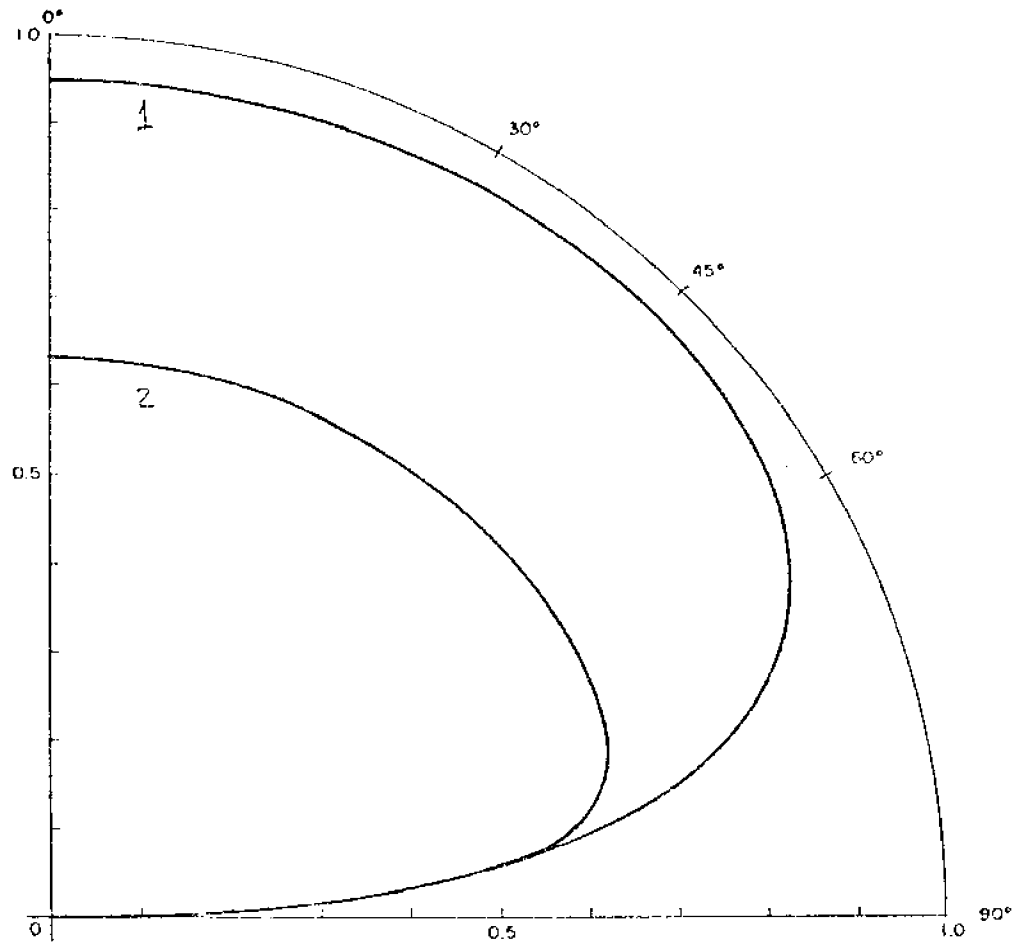


Fig. 4.42 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo SAP seco (1) e com U_v de 30,2% (2).

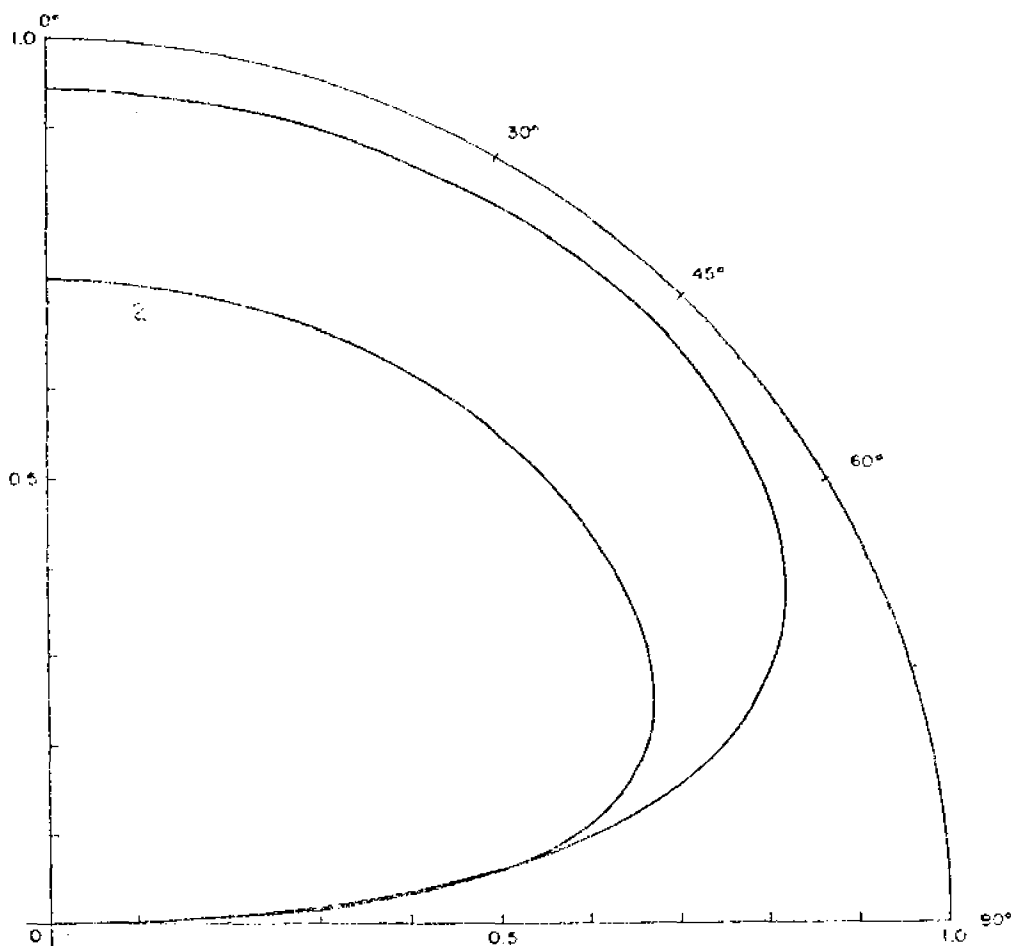


Fig. 4.43 - Gráfico polar da emissividade direcional do solo SC seco (1) e com U_v de 29,9% (2).

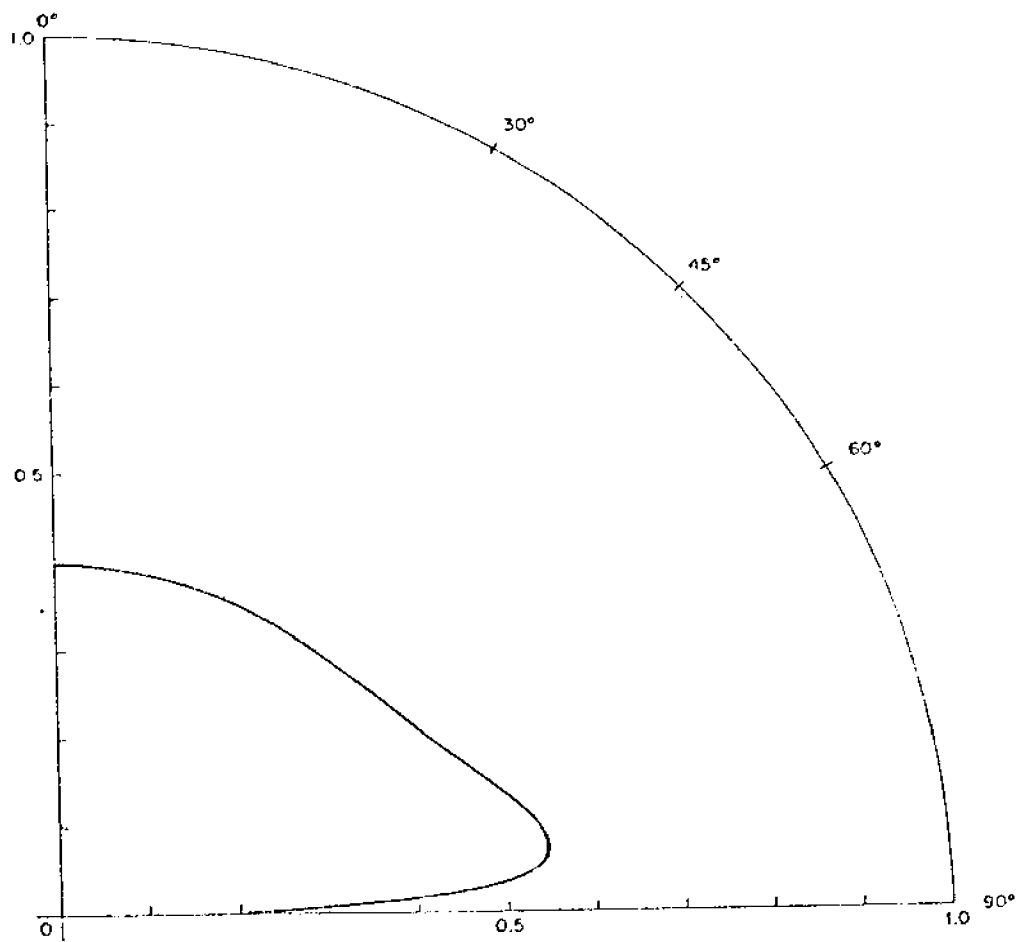


Fig. 4.44 - Gráfico polar da emissividade direcional para a água.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados encontrados no presente trabalho permitem concluir que:

- 1) Apesar de não se ter efetuado uma análise estatística detalhada para todos os casos, a análise visual da distribuição dos resíduos padronizados mostra que de um modo geral os modelos estatísticos utilizados são adequados.
- 2) A presença de heterocedasticidade, principalmente o aumento da variância dos resultados com o aumento da umidade do solo, indica a necessidade de um processo mais criterioso de preparação das amostras para a medição ϵ_r^* .
- 3) Os solos com teor mais elevado de Fe (LE, LRd) e M.O. (SC) apresentam, para a Faixa X de microondas, um comportamento de ϵ_r^* distinto dos de autores de outros países, principalmente no que se refere a ϵ_r'' , $\text{tg}\delta$ e σ , evidenciando que o comportamento de ϵ_r^* não depende somente das características e propriedades físicas dos solos.
- 4) O comportamento de ϵ_r^* em função da umidade depende da classe de solo, afetando conseqüentemente as emissividades consideradas no presente trabalho.

1 - Há necessidade de confrontar os resultados aqui

encontrados com experimentos em nível de campo utilizando o RMO, nas áreas onde foram coletadas as amostras de material de solo.

- 2- Seria interessante determinar-se ϵ_r^* em função de frequência, o que pode ser realizado através do uso de técnicas que utilizam refletometria no domínio do tempo, no sentido de se avaliar qual a frequência ou faixa de microondas de maior interesse para as aplicações consideradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSCOMBE, F.J. Graphs in statistical analysis. *American Statistician*, 27:17-21, 1973.
- BALER, W.; ROBERTSON, G.W. The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yields. *Agronomical Meteorology*, (5):17-31, 1968. APUD Idso et alii (1975).
- BERNARDO, S. *Manual de irrigação*, Viçosa, UFV, Imprensa Universitária. 1982. 463 p.
- BURKE, W.J.; SCHMUGGE, T.; PARIS, J.F. Comparison of 2,8 and 21cm microwave radiometer observations over soils with emission model calculations. *Journal of Geophysical Research*, 84(1):287-294, Jan. 1979.
- CHATTERJEE, S.; PRICE, B. *Regression analysis by example*. New York, John Wiley, 1977. 228 p.
- CURL, N.; KAMPE, N.; FREIRE, J.C.; VENEGAS, V.H.A. *Caracterização do material de solo no laboratório*. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1986. (em fase de preparo para publicação).
- DOBSON, M.C.; ULABY, F.T. Active microwave soil moisture research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 24(1):23-35, Jan. 1986.
- DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; HALLIKAINEN, M.T.; EL-RAYES, M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: dielectric mixing models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 23(1):35-45, Jan. 1985.
- GRUNER, K.; KEYDEL, W.; SUSS, H. Beiträge zur Anwendung von Mikrowellenradiometern in der Fernerkundung, *ntz Archiv*. Bd 5(8): 223-231, 1983.
- HALLIKAINEN, M.T.; ULABY, F.T.; DOBSON, A.C.; EL-RAYES, M.A.; WU, L. Microwave dielectric behavior of wet soil - part I: empirical models and experimental observations from 1,4 to 18 GHz. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 23(1):25-34, Jan. 1985.

- HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York Academic Press, 1980. 385 p.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; REGINATO, R.J. Detection of soil moisture by remote surveillance. *American Scientist*, 63(5):549-557, Sept./Oct. 1975.
- JACKSON, J.D. *Classical electrodynamics*. 2 ed. New York: John Wiley, 1975. 827 p.
- KEYDKU, W. Sensoren und Verfahren zur wetterunabhängigen Fernerkundung mit Mikrowellen. *DFVJ-Nachrichten*. H. 31:34-41, Nov. 1980.
- KRUSE, P.W.; Mc Glauchling, L.D.; Mc Quistan, R.B. *Elements of infrared technology: generation, transmission, and detection*. New York, John Wiley, 1963. 448 p.
- MEDINA, H.P. *Elementos de pedologia*. São Paulo, EPUSP, 1972. 459 p.
- NELSON, S.O.; SIMPSON, L.E.; SCHLAPHOFF, C.W. A general computer program for precise calculation of dielectric properties from shortcircuited-waveguide measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-23(4):455-460, Dec. 1974.
- NEWTON, R.W.; BLACK, Q.R.; MAKANVAND, S.; BLANCHARD, A.J.; JEAN, B.R. Soil moisture information and thermal microwave emission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 20(3):275-280, July 1982.
- METER, J.; WASSERMAN, W. *Applied linear statistical models*. Homewood, Ricard D. Irwin, 1974. 842 p.
- NJOKU, E.G.; O'NEIL, P.E. Multifrequency microwave radiometer measurements of soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 20(4):468-475, Oct. 1982.
- OLIVEIRA, J.B. de; MENK, J.R.F.; ROPPA, C.L. *Levantamento pedológico semidetalhado dos solos do Estado de São Paulo; quadrícula de Campinas*. Rio de Janeiro. IBGE, 1979. 172 p. (Série Recursos Nat., e Meio Ambiente, 5).
- RESENDE, M. 1982. *Pedologia*. Viçosa, Imprensa Universitária, 1982. 100 p.

- SCHMUGGE, T. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers. *Transactions of the ASAE*, 26(3):748-753. 1983b.
- Remote sensing of soil moisture: recent advances. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 21(3):336-344. July, 1983a.
- Microwave remote sensing of soil moisture: *In SPIE. Recent advance in civil space remote sensing*. Washington, D.C., 1984. p. 249-257 (Proceedings SPIE, v. 481).
- SCHMUGGE, T.J.; JACKSON, T.J.; Mc KIM, H.K. Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16(6):961-979, Dec. 1980.
- SHUTKO, A.M. Microwave radiometry of lands under natural and artificial moistening. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, GE 20(1):18-26. Jan. 1982.
- SHUTKO, A.M.; REUKOV, E.V. Mixture formulas applied in estimation of dielectric and radiative characteristics of soils and grounds at microwave frequencies. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, GE 20(1):29-32, Jan. 1982a.
- STRATTON, J.A. *Electromagnetic Theory*. New York. Mc Graw-Hill, 1941, 615 p.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. *Microwave remote sensing; active and passive*. Reading, MA, Addison Wesley, 1981. v. 1.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. *Microwave remote sensing, active and passive*. Washington, DC., Artech House, 1986. v.3.
- WANG, R.J.; SCHMUGGE, T.J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE 18(4) Oct., 1980.
- VERDADE, F.C.; HUNGRIA, L.S.; RUSSO, R.; NASCIMENTO, A.C.; GROHMANN, F.; MEDINA, F.P. Solos da Bacia de Taubaté (Vale do Paraíba); Levantamento de reconhecimento, séries monotípicas, suas propriedades genético-morfológicas, físicas e químicas. *Bragantia*, v. 20, nº 4, Mai. 1961. 322 p.

APÊNDICE A

RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS DAS
AMOSTRAS DE MATERIAL DE SOLOS.

PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS DAS AMOSTRAS DE MATERIAL DE SOLOS.

SOLO	DENSIDADE APARENTE (g.cm ⁻³)	DENSIDADE REAL (g.cm ⁻³)	POROSIDADE TOTAL (%)	POROSIDADE Se* (m2g ⁻¹)	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	CLASSE TEXTURAL
PV ₂	1,35 (1,13)	2,66	49	46	57	29	14	areia franca
LV ₃	1,49 (1,35)	2,70	45	37	73	16	11	areia franca
LRG	1,23 (1,07)	2,50	58	87	27	17	56	argila
LE ₁	1,09 (1,07)	2,66	59	67	22	17	61	muito argiloso
SAP	0,79 (0,78)	2,53	69	110	11	15	74	muito argiloso
SC	0,69 (0,74)	2,27	70	136	36	21	43	argila

A.2

UNIDADE GRAVIMÉTRICA (%)

SOLO	C (%)	M.O. (%)	CTC (meq/100g)	Na ⁺ (meq/100g)	DIGESTÃO H ₂ SO ₄ 1:1		COND. ELÉTRICA EXTRATO SAT. (mmhos/cm/25°C)	15 atm 0,33 atm
					Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)		
PV ₂	1,0	1,7	5,3	0,13	2,0	2,9	0,1	5,63 6,70
LV ₃	0,5	0,9	2,4	0,09	1,4	2,5	0,1	3,02 3,62
LRG	0,6	1,0	5,2	0,31	20,6	20,1	0,4	17,65 18,67
LE ₁	0,1	0,2	4,8	0,10	8,7	21,1	<0,1	17,50 18,21
SAP	2,6	4,5	12,4	0,20	3,9	28,5	0,5	31,63 33,80
SC	8,5	14,6	18,5	0,22	3,6	22,6	0,2	32,81 34,64

* Se = superfície específica.

APÊNDICE B

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS ÀS QUANTIDADES FÍSICAS CONSIDERADAS EM FUNÇÃO DE U_V , PARA OS DIFERENTES SOLOS.

(ANEXOS 1 a 6)

OBS.: Todas as regressões são significativas ao nível de 95% ($\alpha = 0,05$)

B.2

ANEXO 1

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA O SOLO PV₂.

ANEXO 1

$$\hat{e}_r' = 2,630 \text{ EXP}(0,046 U_V)$$

$$\hat{e}_r'' = 0,072 \cdot U_V^{0,763}$$

$$\hat{a} = 4,851 \cdot U_V^{0,621}$$

$$\hat{P}(e) = 41,640 - 13,775 \ln U_V$$

$$\hat{P}(7e) = 125,801 - 41,616 \ln U_V$$

$$\hat{c} = 0,424 \cdot U_V^{0,765}$$

$$\hat{c}(0) = 0,957 - 0,008 \cdot U_V$$

$$\hat{c}_{hcm} = 0,896 - 0,007 \cdot U_V$$

$$\hat{e}(\bar{\theta}) = 0,954 - 0,008 \cdot U_V$$

ANEXO 2

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA O SOLO LV₃.

ANEXO 2

$$\hat{e}_r' = 2,669 E \times P(0,074 \cdot U_V)$$

$$\hat{c}_r'' = 0,078 \cdot U_V^{1,099}$$

$$\hat{a} = 4,771 \cdot U_V^{1,914}$$

$$P(\hat{c}) = 10,265 \cdot U_V^{-0,910}$$

$$P(\hat{7e}) = 30,900 \cdot U_V^{-0,911}$$

$$\hat{\sigma} = 0,498 \cdot U_V^{1,077}$$

$$e(\hat{0}) = 0,952 - 0,013 \cdot U_V$$

$$e_{hem}(\hat{0}) = 0,897 - 0,011 \cdot U_V$$

$$e(\hat{\bar{0}}) = 0,955 - 0,013 \cdot U_V$$

B.6

ANEXO 3

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA O SOLO LR6

ANEXO 3

$$\hat{\varepsilon}_r' = 2,828 E \times P(0,035 \cdot U_V)$$

$$\hat{\varepsilon}_r'' = 0,317 E \times P(0,061 \cdot U_V)$$

$$\hat{\alpha} = 16,330 + 2,096 \cdot U_V$$

$$P(\hat{e}) = 2,547 E \times P(-0,052 \cdot U_V)$$

$$P(\hat{7e}) = 7,651 E \times P(-0,051 \cdot U_V)$$

$$\hat{\delta} = 1,330 + 0,278 \cdot U_V$$

$$e(\hat{0}) = 0,939 - 0,006 \cdot U_V$$

$$e_{hem} = 0,883 - 0,005 \cdot U_V$$

$$e(\hat{0}) = 0,939 - 0,006 \cdot U_V$$

ANEXO 4

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA O SOLO LE,

ANEXO 4

$$\hat{\varepsilon}_r' = 2,186 E \times P(0,065 \cdot U_V)$$

$$\hat{\varepsilon}_r'' = 0,161 E \times P(0,107 \cdot U_V)$$

$$\hat{\alpha} = 15,981 \cdot U_V^{0,428}$$

$$\hat{P}(e) = 4,314 - 1,144 \ln U_V$$

$$\hat{P}(7e) = 13,116 - 3,492 \ln U_V$$

$$\hat{\delta} = 0,923 E \times P(0,109 \cdot U_V)$$

$$\hat{e}(0) = 0,990 - 0,011 \cdot U_V$$

$$\hat{e}_{hem} = 0,924 - 0,010 \cdot U_V$$

$$\hat{e}(\bar{\theta}) = 0,990 - 0,011 \cdot U_V$$

B.10

ANEXO 5

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA O SOLO SAP

ANEXO 5

$$\hat{\epsilon}'_r = 2,477 E \times P(0,050 \cdot U_V)$$

$$\hat{\epsilon}''_r = 0,069 \cdot U_V^{1,026}$$

$$\hat{\alpha} = 4,801 \cdot U_V^{0,852}$$

$$\hat{P}(e) = 10,287 \cdot U_V^{-0,848}$$

$$\hat{P}(7e) = 31,298 \cdot U_V^{-0,855}$$

$$\hat{\sigma} = 0,421 \cdot U_V^{1,019}$$

$$\hat{e}(0) = 0,977 - 0,009 \cdot U_V$$

$$\hat{e}_{hem} = 0,914 - 0,008 \cdot U_V$$

$$\hat{e}(\bar{U}) = 0,976 - 0,009 \cdot U_V$$

ANEXO 6

EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA O SOLO SC

ANEXO 6

$$\hat{\varepsilon}'_r = 2,655 \text{ E x P}(0,033 \cdot U_V)$$

$$\hat{\varepsilon}''_r = 0,298 \cdot U_V^{0,440}$$

$$\hat{a} = 18,074 \cdot U_V^{0,331}$$

$$\hat{P}(e) = 3,688 - 0,821 \cdot \ln U_V$$

$$\hat{P}(7e) = 11,156 - 2,490 \cdot \ln U_V$$

$$\hat{\sigma} = 1,668 \cdot U_V^{0,457}$$

$$\hat{e}(0) = 0,949 - 0,005 \cdot U_V$$

$$\hat{c}_{\text{hem}} = 0,892 - 0,005 \cdot U_V$$

$$\hat{e}(\bar{0}) = 0,95 - 0,006 \cdot U_V$$

APÊNDICE C

PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PARA VERIFICAÇÃO DA VALIDADE DOS MODELOS ESTATÍSTICOS (EXEMPLO SOLO SAP)

(ANEXOS 1 e 2)

C.2

Verificou-se a hipótese de normalidade dos erros para todos os solos e quantidades físicas, através de um gráfico probabilístico normal. Esses gráficos, para o solo SAP (exemplo) são apresentados nas Figuras a seguir. Para os demais solos esses gráficos não são apresentados. Entretanto, seus comportamentos são semelhantes ao do solo SAP.

Ainda para o solo SAP mostra-se os gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade).

ANEXO 1

GRÁFICOS PROBABILÍSTICOS NORMAIS DAS QUANTIDADES
FÍSICAS PARA O SOLO SAP.

C.4

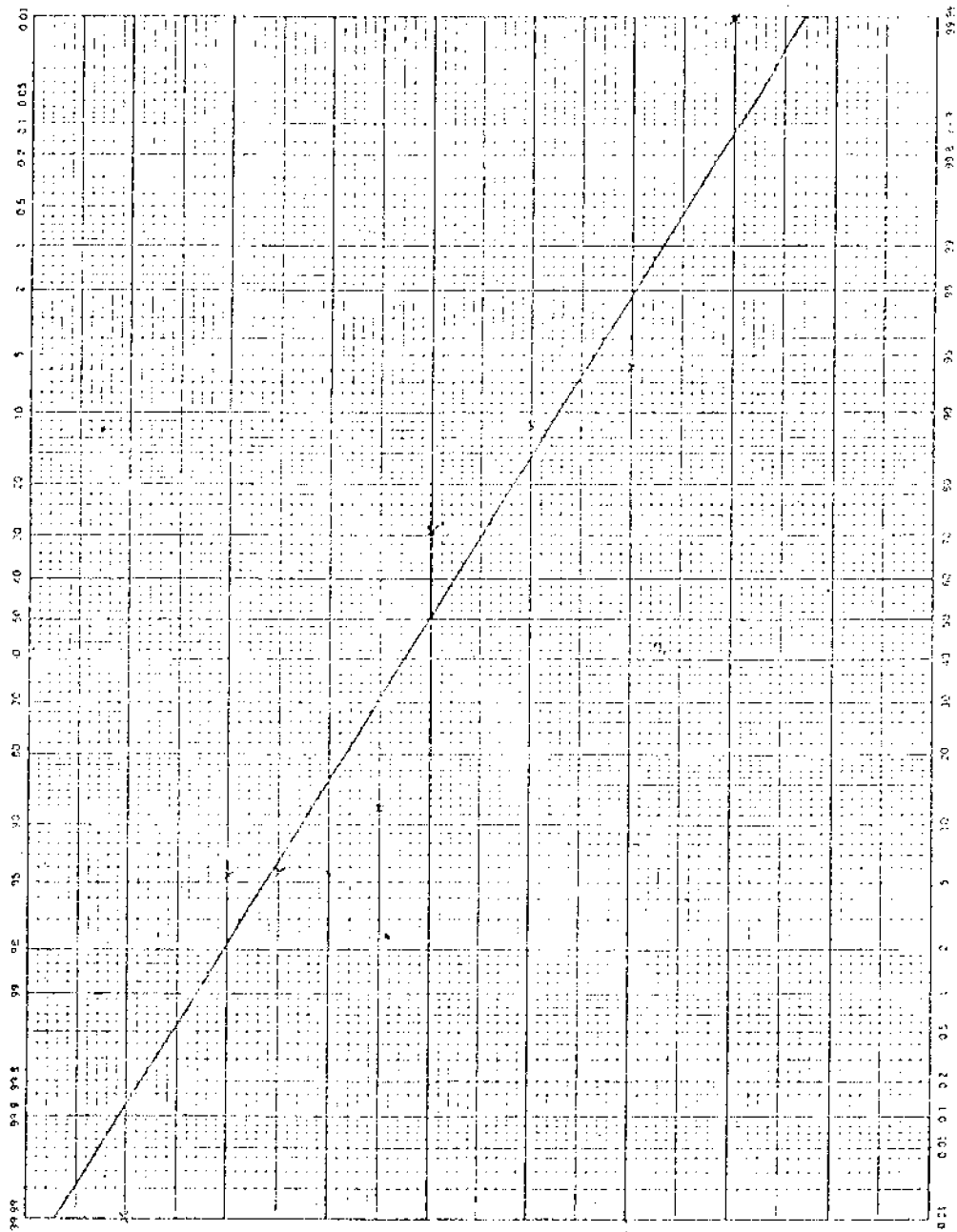


Gráfico probabilístico normal para ϵ'_r .

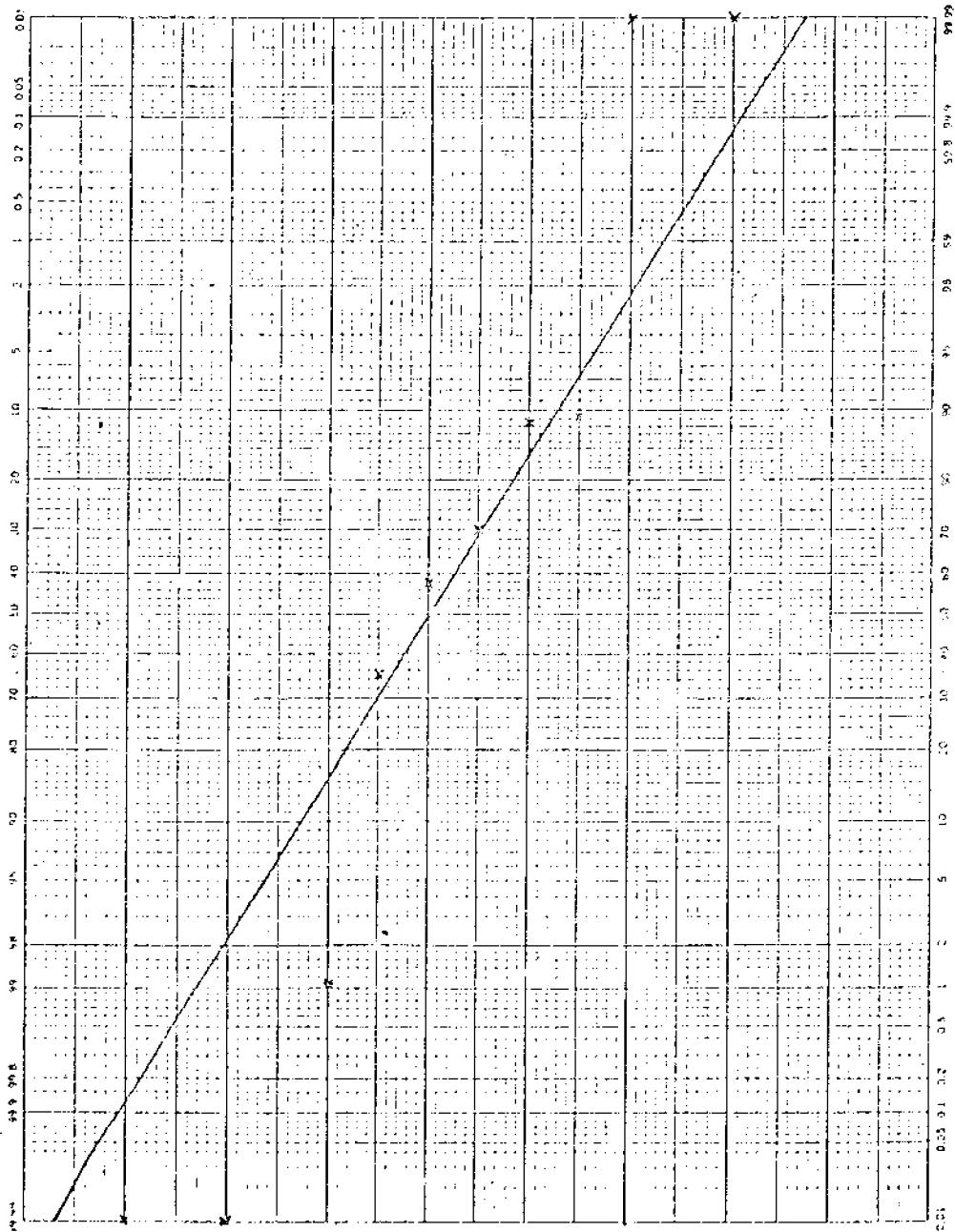


Gráfico probabilístico normal para c''_r .

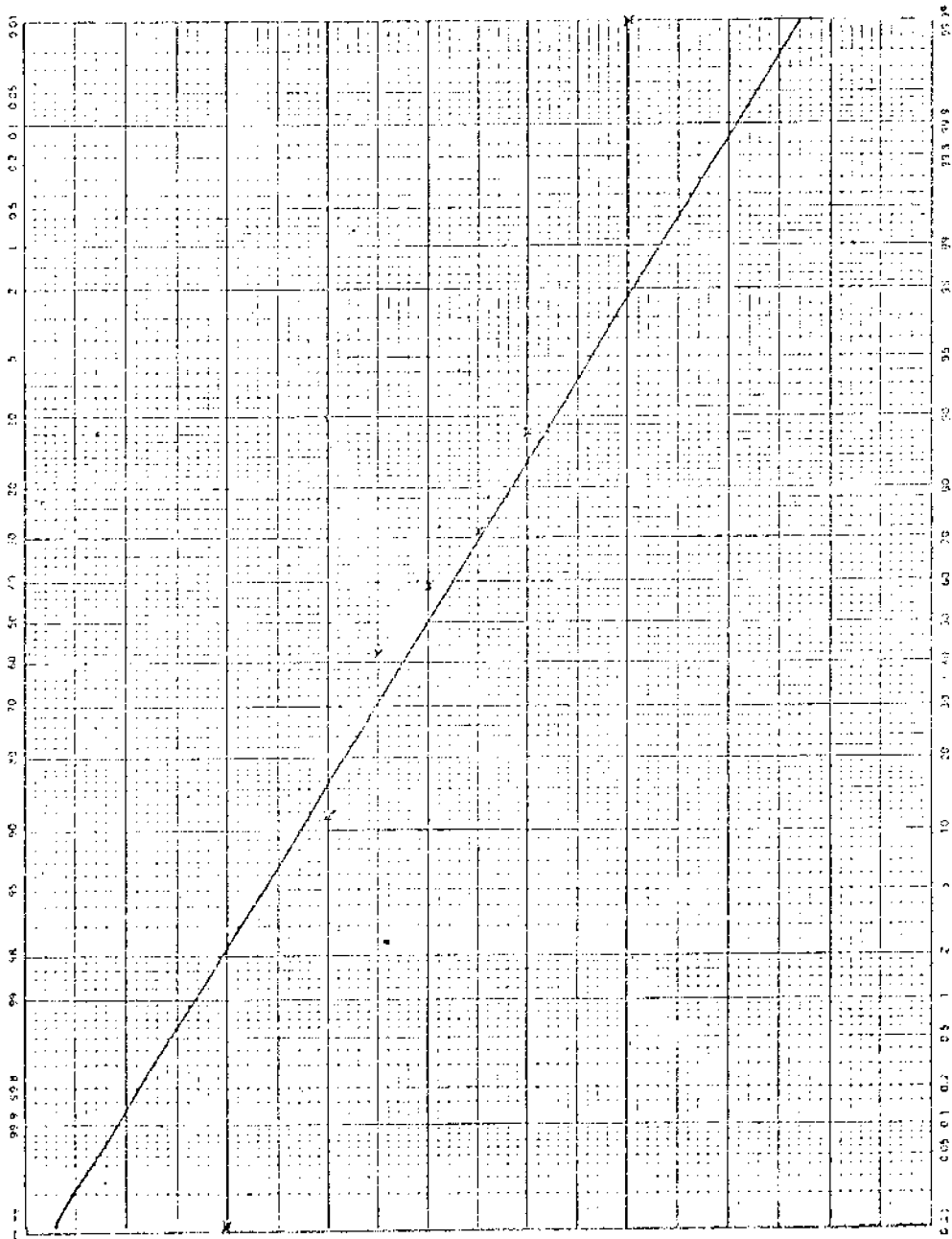


Gráfico probabilístico normal para σ .

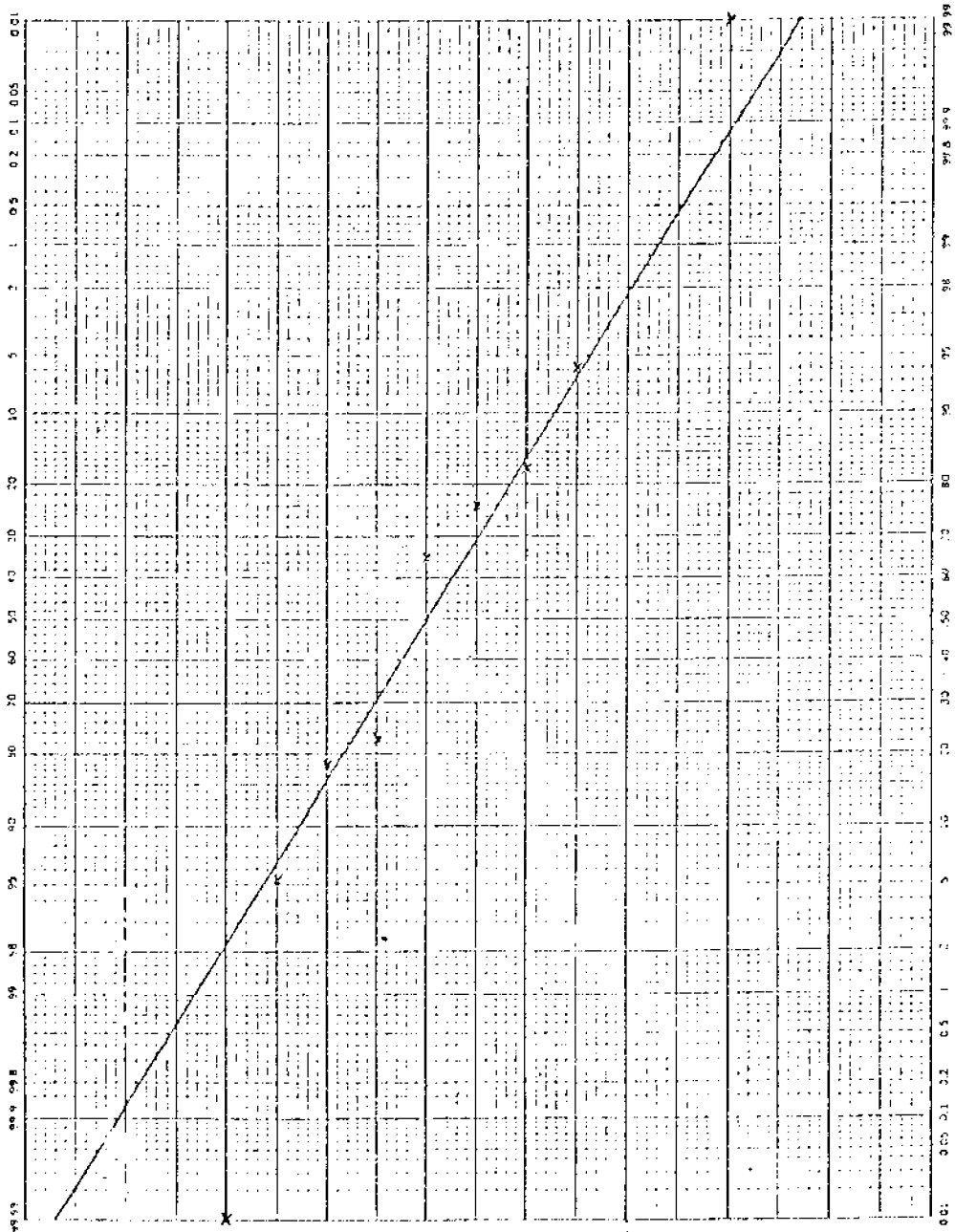


Gráfico probabilístico normal para α .

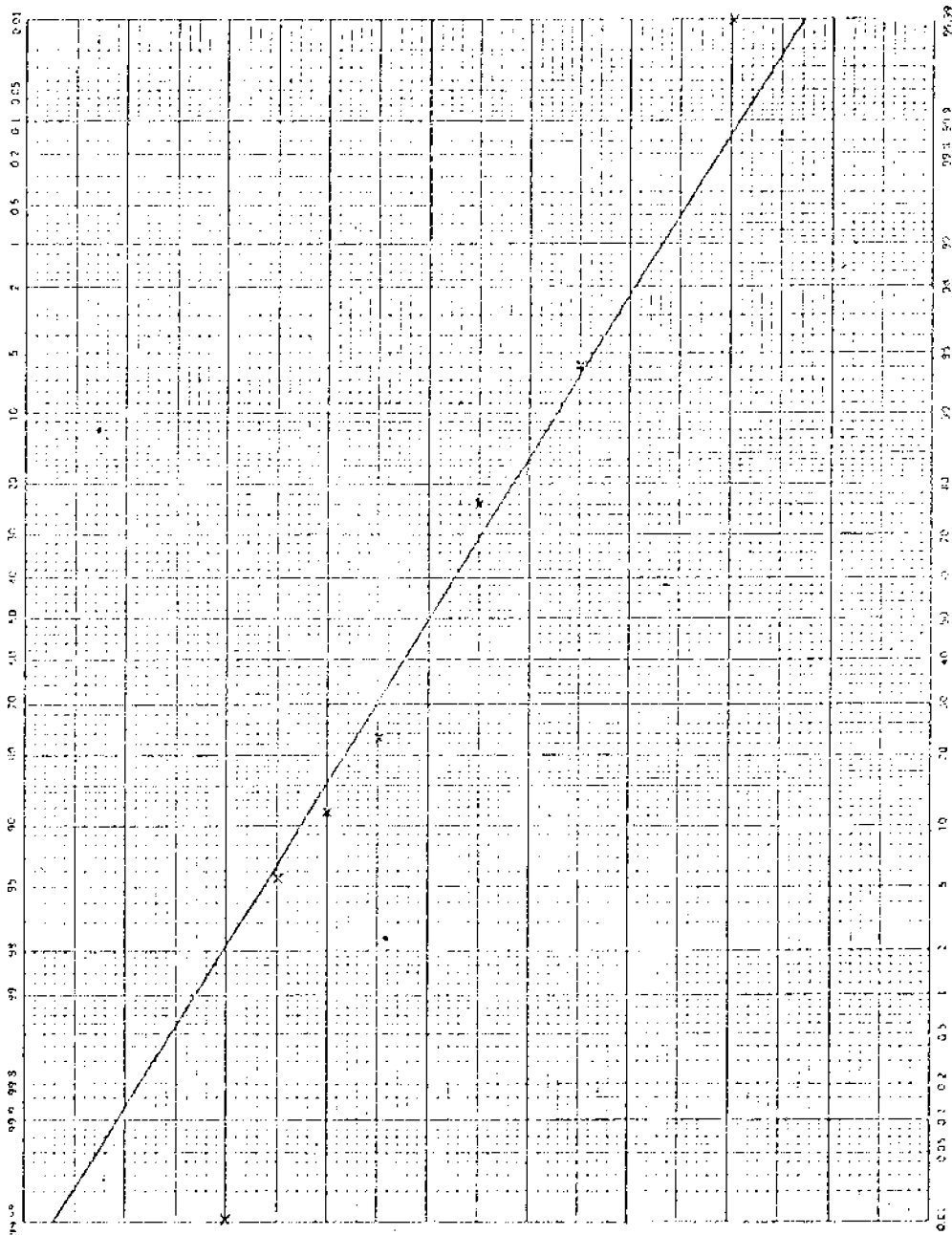


Gráfico probabilístico normal para $P(e)$.

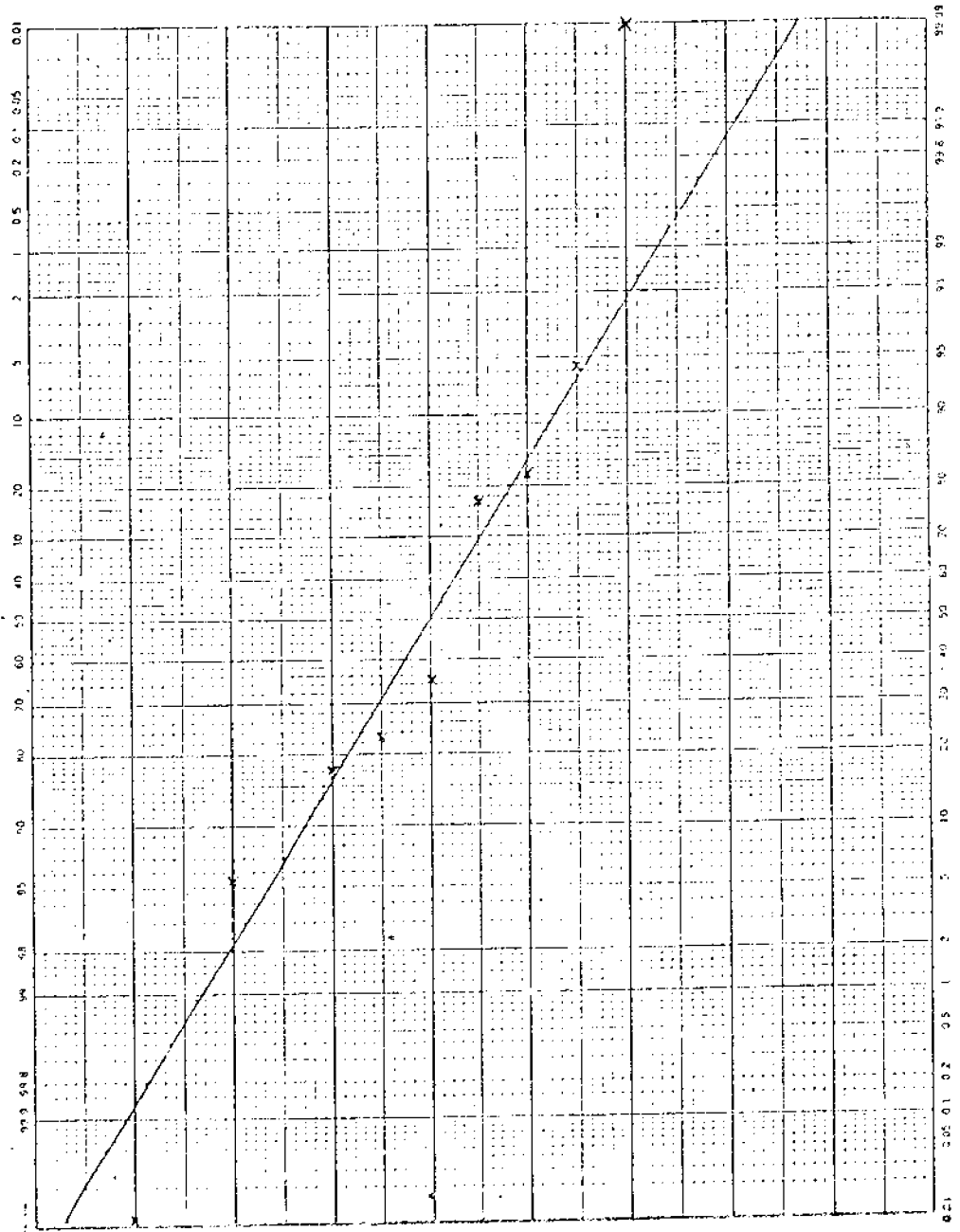


Gráfico probabilístico normal para $P(7e)$.

C.10

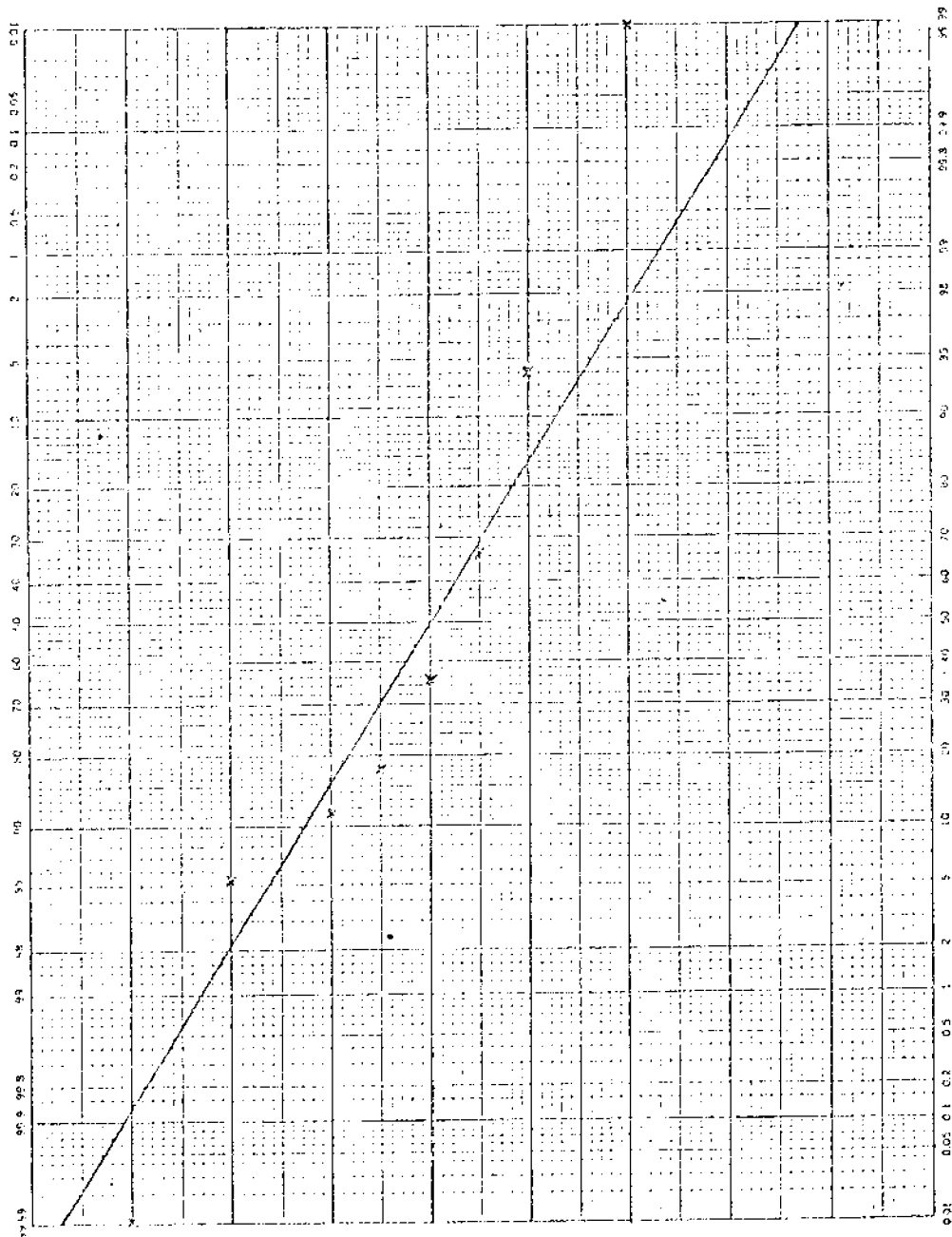


Gráfico probabilístico normal para $e(0)$.

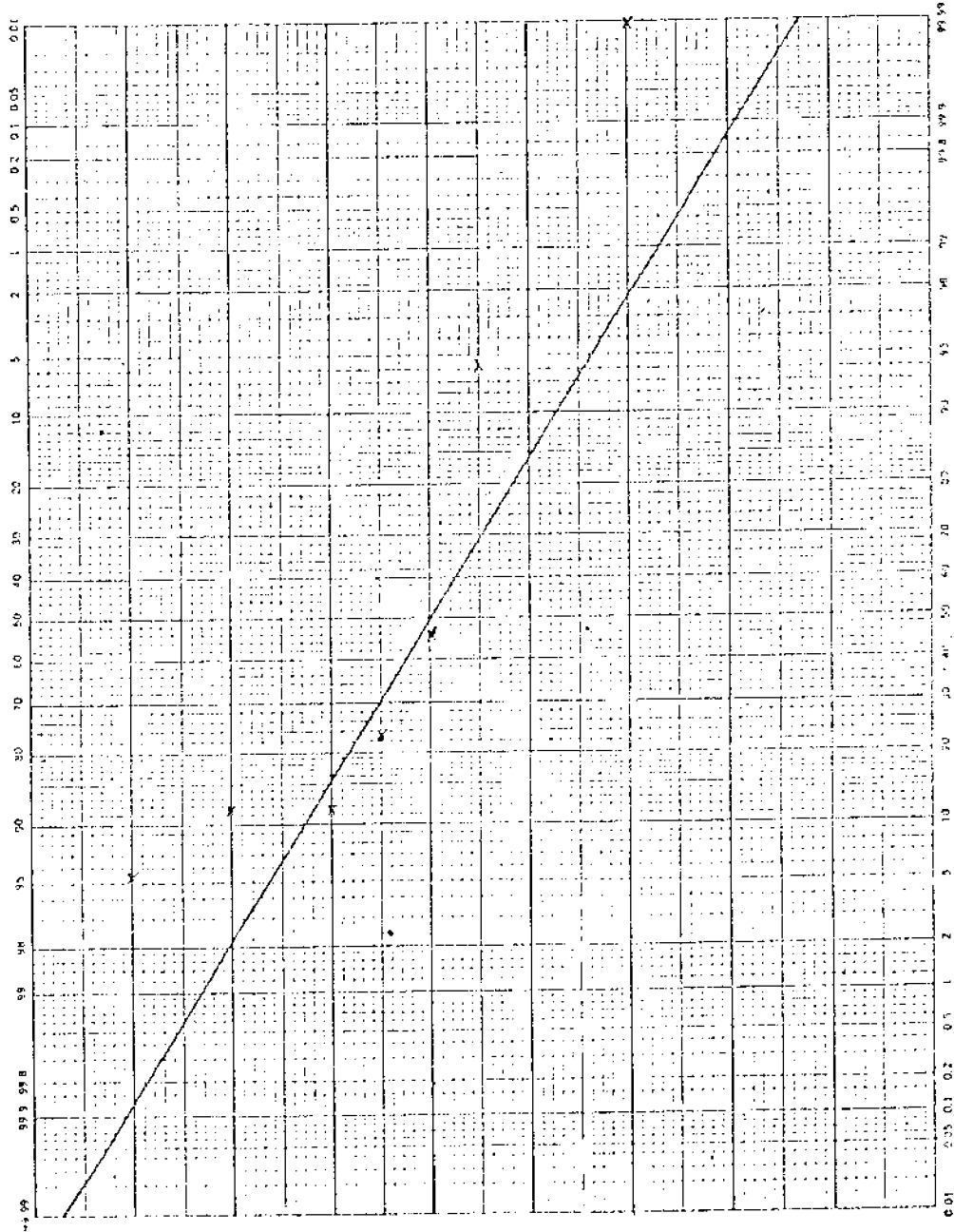


Gráfico probabilístico normal para e_{hem} .

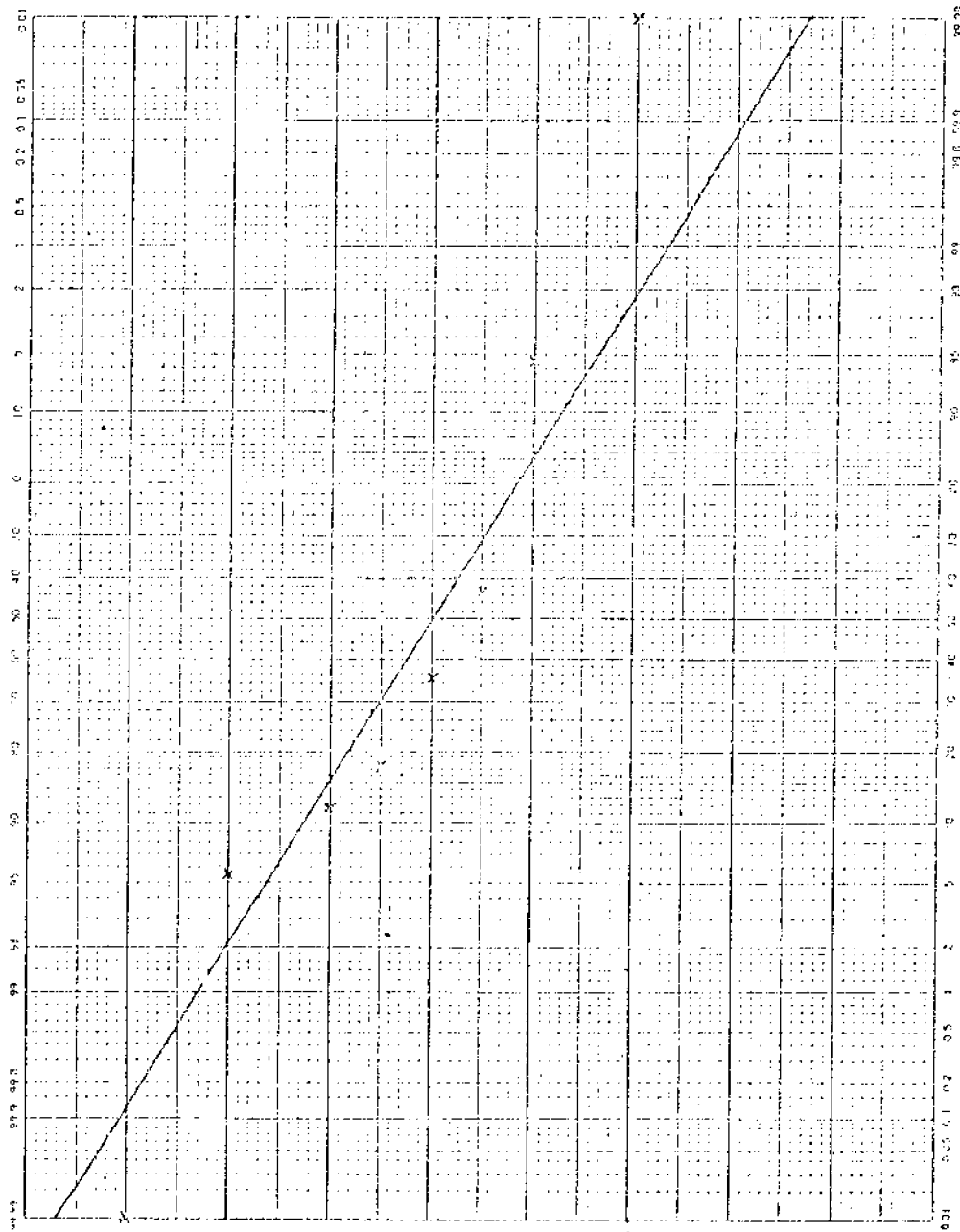
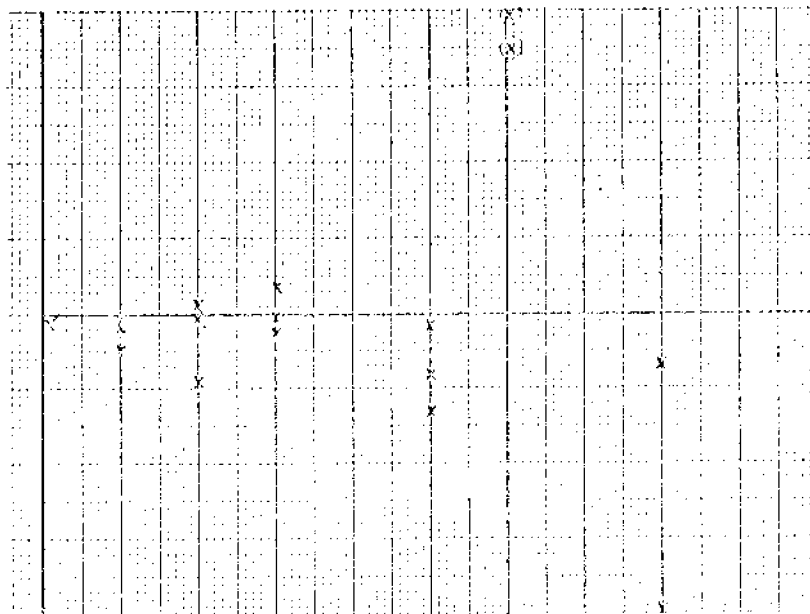


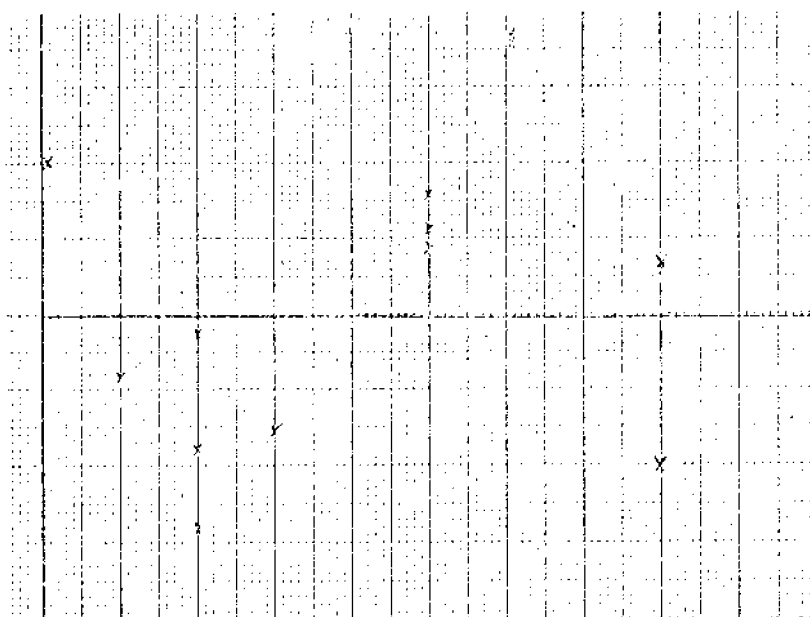
Gráfico probabilístico normal para $e(\bar{\theta})$.

ANEXO 2

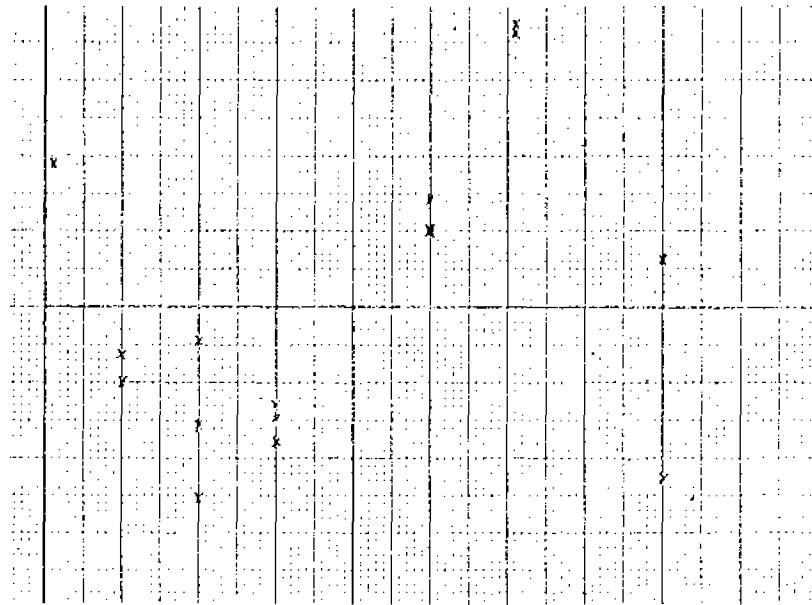
PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS DAS QUANTIDADES
FÍSICAS VERSUS A VARIÁVEL INDEPENDENTE (U_V), PARA
O SOLO SAP.



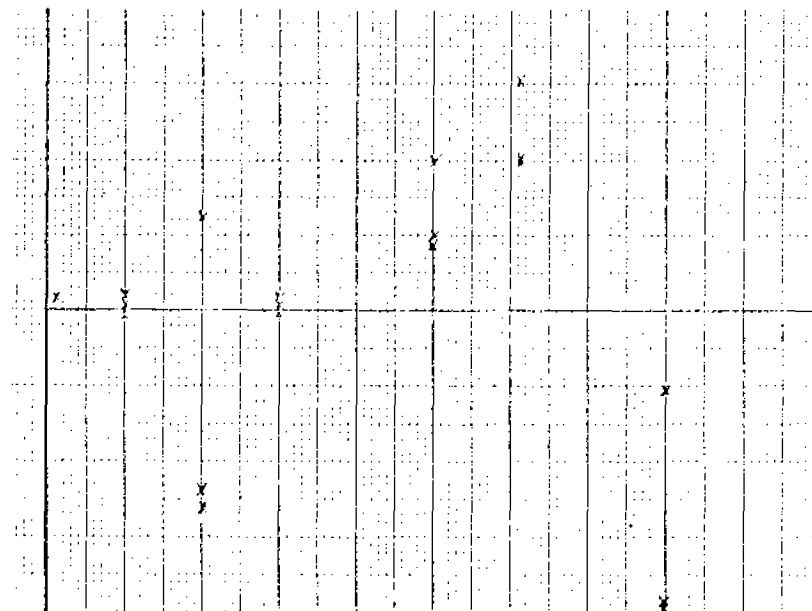
Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para c_r^1 .



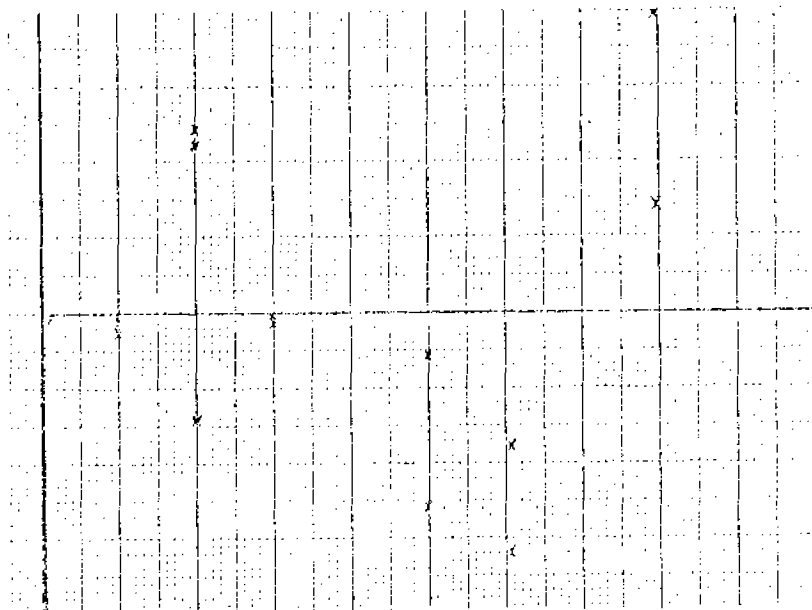
Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para c_r^2 .



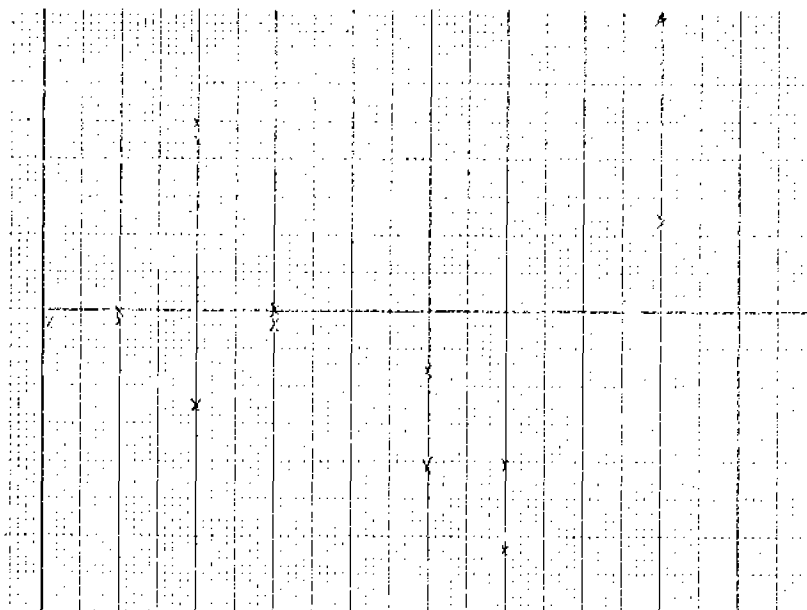
Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para α .



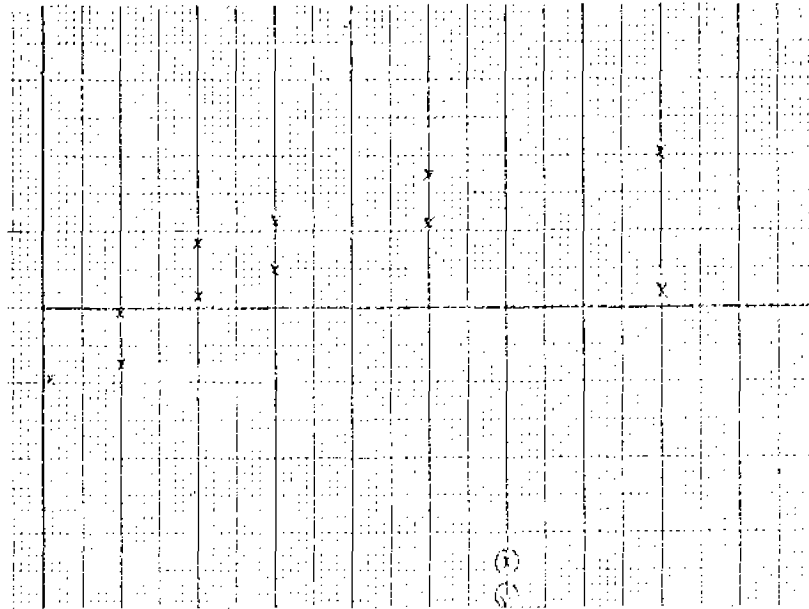
Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para α .



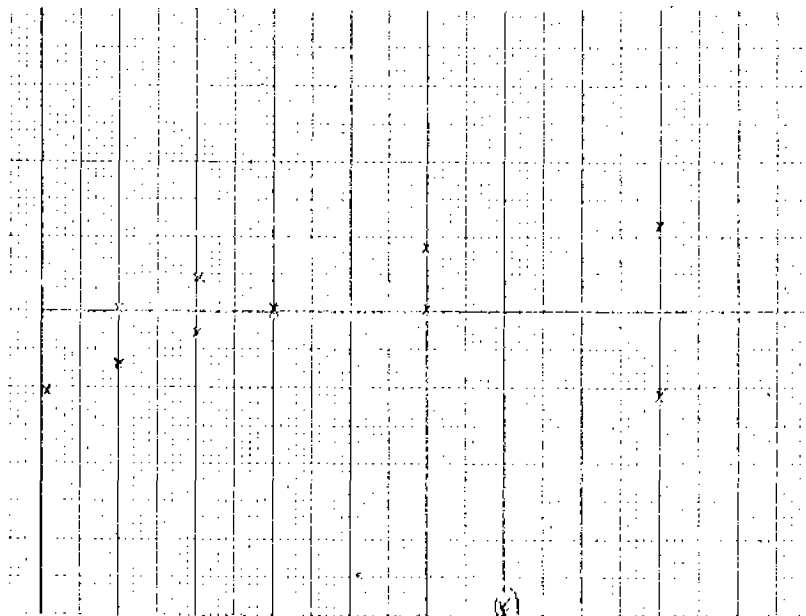
Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para $P(e)$.



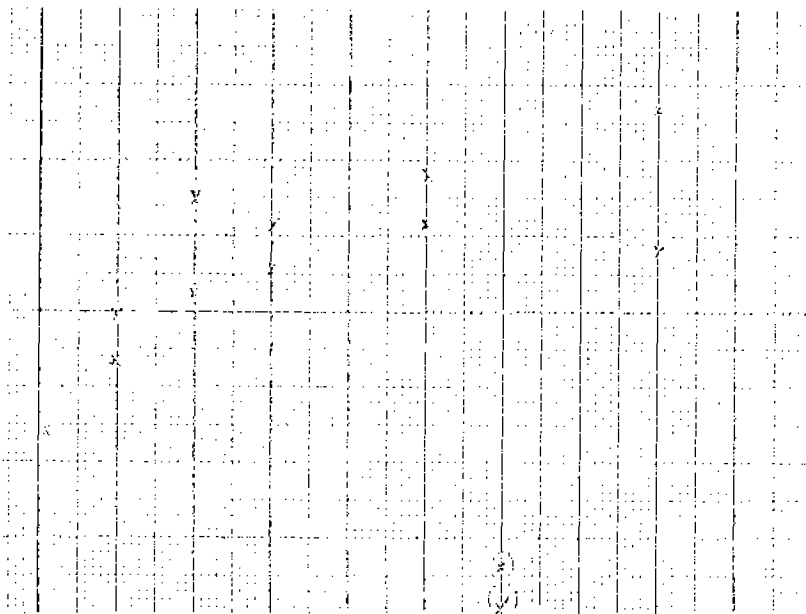
Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente $P(7e)$.



Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para $e(0)$.



Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (umidade) para e_{hem} .



Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade) para $e(\bar{\theta})$.

APÊNDICE D

ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS (EXEMPLO SOLO SAF)

(ANEXO 1 a 9)

Através dos gráficos probabilísticos normais apresentações anteriormente não existe evidência de que as hipóteses de normalidade dos erros não esteja sendo satisfeita.

Entretanto, através dos gráficos dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade), pode-se notar, para ϵ_1^1 , $e(0)$ e $e(7e)$ a presença de heterocedasticidade (ver Figuras).

Os gráficos de $e(0)$, e_{hen} e $e(\bar{0})$ mostram que os resíduos associados ao valor da variável independente 30,2 não possuem o mesmo comportamento que os demais. Além disso, para os 17 pontos considerados, existe uma tendência em se afirmar que o modelo linear não é adequado. Os gráficos para ϵ_1^2 , e e σ não apresentam evidências da presença de heterocedasticidade, havendo no entanto suspeita, pela inspeção visual, de que os resíduos possam estar autocorrelacionados, principalmente para ϵ_1^1 e σ .

Antes de se abandonar o modelo linear assumido, na procura de modelos mais adequados e mais complexos, é conveniente utilizar técnicas de transformação de dados na tentativa de tornar o modelo linear apropriado para os dados transformados. Uma transformação muitas vezes eficaz na remoção da heterocedasticidade é a divisão da equação do modelo pela variável independente (equivalente à utilização do método dos mínimos quadrados ponderados).

Principalmente para ϵ_1^1 , $e(0)$, e_{hen} e $e(\bar{0})$ os valores da variável independente 30,2 parecem ser observações discrepantes (outliers). A presença de observações discrepan-

tes causa grande dificuldade para a análise estatística dos dados. Outliers tanto podem ocorrer devido a erros no processo de medição de ϵ_r^* (no presente trabalho), como denotar a interação com outras variáveis independentes desconsideradas no modelo. Apesar de existirem regras de decisão estatística para outliers, estes somente devem ser eliminados do conjunto de dados quando houver grande evidência de erros cometidos durante o processo de obtenção do conjunto de dados.

Procede-se a seguir para ϵ_r^* , cujo modelo é $y = \alpha \cdot \text{EXP}(\beta \cdot x)$, uma análise que inclui tanto a estatística inicial utilizada, como a transformação dos dados originais em $\frac{1}{x}$ e $\frac{\ln y}{x}$ (mínimos quadrados ponderados) e a eliminação dos valores da variável independente 30,2, na seguinte ordem:

- 1) dados originais ($n = 17$); x e $\ln y$
- 2) dados originais ($n = 17$); $\frac{1}{x}$ e $\frac{\ln y}{x}$
- 3) $n = 15$; x e $\ln y$
- 4) $n = 15$; $\frac{1}{x}$ e $\frac{\ln y}{x}$

O mesmo procedimento é adotado para $e(\bar{\theta})$, não havendo neste caso a transformação dos dados, visto ser o modelo aqui assumido $y = \alpha + \beta x$, efetuando-se portanto somente os cálculos estatísticos com $n = 17$ (estatística inicial) e $n=15$.

Para ϵ_r^* com $n = 17$ e dados transformados e $n = 15$ com x , $\ln y$ e $\frac{1}{x}$, $\frac{\ln y}{x}$ e ainda $e(\bar{\theta})$ com $n = 15$, mostrar-se os novos gráficos dos resíduos padronizados entre -2 e +2 versus a variável independente.

Em seguida apresenta-se os resultados estatísticos para σ (modelo $y = \alpha \cdot x^\beta$) com $n = 17$ e $n = 15$ e para α (modelo $y = \alpha \cdot x^\beta$) com $n = 17$. Nestes casos o interesse maior recai sobre os valores da estatística Durbin-Watson que testa a independência ou não (autocorrelação) dos resíduos.

ANEXO I

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA c_k^j VERSUS $U_{V,r}$ COM $N = 17$ E
 X_i LNY

D.6

$$\epsilon_r^1 \quad x, \ln y \quad n=17$$

M U L T I P L E L I N E A R R E G R E S S I O N

PROBLEM NUMBER = 2
 SAMPLE SIZE = 17
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = LNY

VAR	LABEL	MEAN	STD. DEVIATION
1	X	17.95882	12.37109
2	LNY	1.70941	0.59946

T A B L E O F R E S I D U A L S

Obs	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	0.57500	0.89130	-0.01630
2	1.06500	1.11582	-0.05082
3	1.09200	1.11582	-0.01282
4	1.13100	1.11582	0.01518
5	1.25300	1.34485	-0.09185
6	1.36100	1.34485	0.01615
7	1.33500	1.34485	-0.00985
8	1.54100	1.57388	-0.03288
9	1.58900	1.57388	-0.00488
10	1.00200	1.57388	0.03512
11	1.90200	2.03194	-0.12994
12	1.94600	2.03194	-0.08594
13	2.01500	2.03194	-0.01694
14	2.62500	2.27013	0.35487
15	2.78500	2.27013	0.51487
16	2.64500	2.71444	-0.06944
17	2.22200	2.71444	-0.49244

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.13251

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED (BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	STDA
1	INTLCCPI	0.04521	0.04521

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	STDA
1	INTLCCPI	0.04521	0.04521

STANDARD ERRORS OF ESTIMATE
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 0.20144
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 0.89414
 COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ) = 0.88709
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT = 0.94559
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ) = 0.94185

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	X	0.00467	0.00461	11.256	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	X	0.94559	0.893400-11

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREE OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	0.0011	0.0011	126.7000	100.000
RESIDUAL	10	0.0008	0.0008		
TOTAL	11	0.0019			

ANEXO 2

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA c'_F VERSUS U_V , COM $N = 17$ E
 $\frac{1}{x}$, $\frac{\ln Y}{x}$ E PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PADRONIZA
DOS.

$$\epsilon_i^2 = \frac{1}{x_i} - \frac{\ln y_i}{x_i} \quad n=17$$

MULTIPLE LINEAR REGRESSION

PROBLEM NUMBER = 3
 SAMPLE SIZE = 17
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = LBYZX

VAR	LABEL	MEAN STD DEVIATION	
1	L1ZX	0.60660	2.49287
2	LBYZX	0.62759	2.09375

TABLE OF RESIDUALS

OBS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	0.79000	0.74565	0.04435
2	0.21300	0.22128	-0.00828
3	0.22000	0.22128	-0.00128
4	0.22800	0.22128	0.00672
5	0.12500	0.13425	-0.00925
6	0.13800	0.13425	0.00375
7	0.13400	0.13425	-0.00025
8	0.10300	0.10393	-0.00093
9	0.10500	0.10393	0.00107
10	0.10700	0.10393	0.00307
11	0.07800	0.08204	-0.00404
12	0.07800	0.08204	-0.00404
13	0.08100	0.08204	-0.00104
14	0.08700	0.07594	0.01106
15	0.09200	0.07594	0.01606
16	0.08500	0.08298	-0.00798
17	0.07000	0.06898	0.00102

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.74067

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED (SETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	COEFFICIENT	STANDARDIZED COEFFICIENT	CONF
	INTERCEPT	0.04727		
1	1/X	0.07036	1.00000	
STANDARD ERROR OF ESTIMATE				
			F	0.00950
COEFFICIENT OF DETERMINATION				
			F	0.99999
COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ)				
			F	0.99999
MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT				
			R	1.00000
MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ)				
			R	1.00000

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

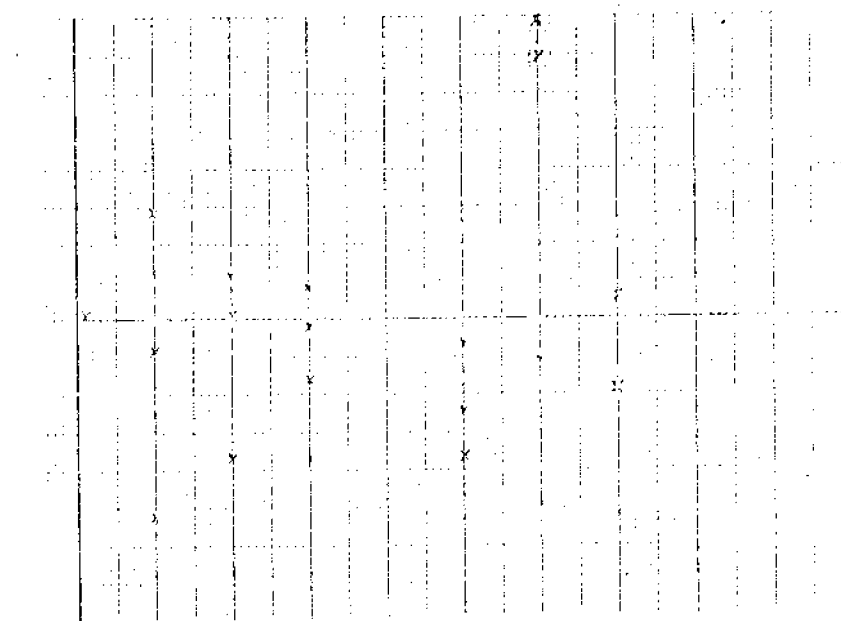
VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	1/X	0.00000	0.00070	1000.013	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R-SQUARES -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R-SQUARE
1	1/X	1.00000	1.00000E+07

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREE OF FREEDOM	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	7.1727	70.1799	1.0000E+05
RESIDUAL	10	0.0010	4.2001E+05	
TOTAL	11	20.1400		



Plotação dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade), para e'_I com dados transformados.

ANEXO 3

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA ϵ'_T VERSUS U_V , COM N = 15 E
X, LNY E PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS.

$$c_r^1 \quad x, \ln y \quad n=15$$

M U L T I P L E L I N E A R R E G R E S S I O N

PROBLEM NUMBER = 1
 SAMPLE SIZE = 15
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = LNY

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	X	16.32667	12.27881
2	LNY	1.57667	0.49930

T A B L E O F R E S I D U A L S

OBS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	0.87500	0.92616	-0.05116
2	1.06500	1.12259	-0.05759
3	1.09800	1.12259	-0.02459
4	1.13100	1.12259	0.00841
5	1.25300	1.32304	-0.07004
6	1.36100	1.32304	0.03796
7	1.33500	1.32304	0.01196
8	1.54800	1.52348	0.02452
9	1.56900	1.52348	0.04552
10	1.60900	1.52348	0.08552
11	1.90200	1.92437	-0.02237
12	1.95600	1.92437	0.02163
13	2.01500	1.92437	0.09063
14	2.04600	2.52169	0.12431
15	2.29700	2.52169	-0.22469

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.67101

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED(BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
1	INTERCEPT	0.92215	
	X	0.94009	0.90583
	STANDARD ERROR OF ESTIMATE	=	0.00692
	COEFFICIENT OF DETERMINATION	=	0.97189
	COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ)	=	0.96970
	MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT	=	0.98993
	MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ)	=	0.98473

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

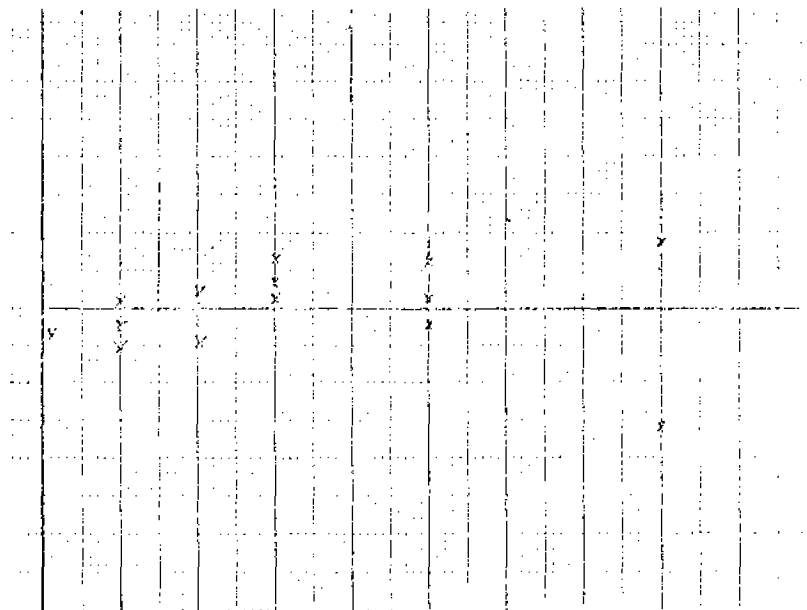
VAR	LABEL	X	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1			0.00103	0.04652	21.190	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	X	0.98503	1.93730E-10

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	3.3920	3.3920	449.0125	100.000
RESIDUAL	13	0.0002	0.0076		
TOTAL	14	3.4902			



Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade), para ε_i^1 com $n = 15$.

ANEXO 4

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA ϵ_T' VERSUS U_V , COM $N = 15$ E
 $\frac{1}{x}$, $\frac{\ln Y}{x}$ E PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PADRONIZA-
DOS.

$$c_r = \frac{1}{x} \cdot \frac{\sum xy}{x} \quad n=15$$

MULTIPLE LINEAR REGRESSION

PROBLEM NUMBER = 2
 SAMPLE SIZE = 15
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = LNY/X

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	1/X	0.25130	2.55930
2	LNY/X	0.69933	2.22700

TABLE OF RESIDUALS

DDS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	0.75000	0.75000	-0.00001
2	0.21300	0.21935	-0.00635
3	0.22000	0.21935	0.00065
4	0.22500	0.21935	0.00565
5	0.12500	0.13231	-0.00731
6	0.13000	0.13231	0.00169
7	0.13400	0.13231	0.00169
8	0.10300	0.10350	-0.00050
9	0.10500	0.10350	0.00142
10	0.20700	0.10350	0.00342
11	0.07600	0.06000	-0.00400
12	0.07800	0.06000	-0.00200
13	0.08100	0.06000	0.00092
14	0.06600	0.06702	-0.00102
15	0.07000	0.06702	0.00298

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 2.72682

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED(BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
-----	-------	------------------------	------------------

1	INTERCEPT	0.04525	
	1/X	0.07059	1.59000

STANDARD ERROR OF ESTIMATE = 0.00393
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 1.00000
 COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ) = 1.00000
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT = 1.00000
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ) = 1.00000

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

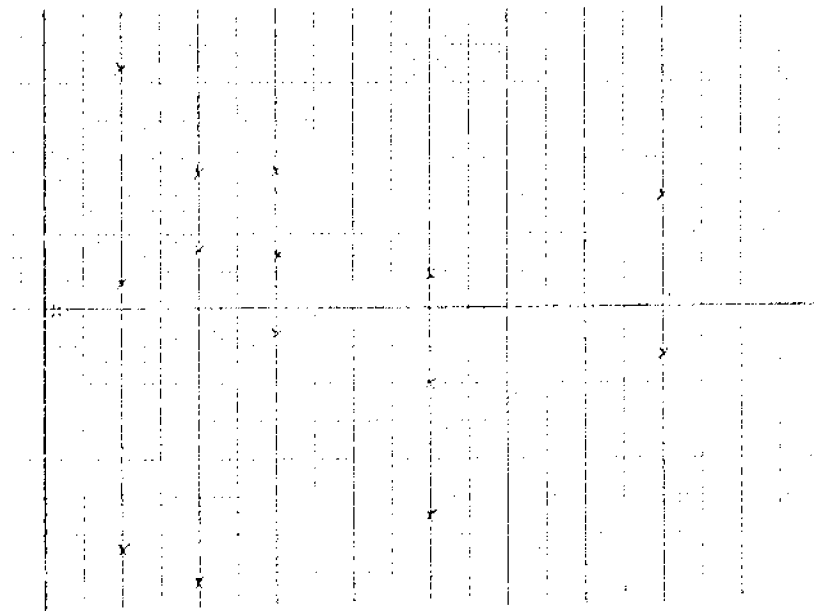
VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	1/X	0.00041	0.00047	2121.954	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	1/X	1.00000	6.30029E-07

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	59.4840	59.4840	4.5027E+06	100.000
RESIDUAL	13	0.0012	1.5432E-05		
TOTAL	14	59.4842			



Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade), para s_r^1 com dados transformados $n = 15$.

ANEXO 5

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MUMER
(BASIS) PARA $e(\hat{\theta})$ VERSUS U_V , COM $N = 17$ E
 X, Y .

$$e(\bar{\theta}) \quad x, y \quad n=17$$

M U L T I P L E L I N E A R R E G R E S S I O N

PROBLEM NUMBER = 1
 SAMPLE SIZE = 17
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = Y

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	X	17.95662	12.37508
2	Y	0.81647	0.11434

T A B L E O F R E S I D U A L S

OBS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	0.95000	0.97498	-0.02498
2	0.93000	0.93149	-0.00149
3	0.93000	0.93149	-0.00149
4	0.92000	0.93149	-0.01149
5	0.91000	0.88711	0.02289
6	0.89000	0.88711	0.00289
7	0.89000	0.88711	0.00289
8	0.86000	0.84273	0.01727
9	0.86000	0.84273	0.01727
10	0.85000	0.84273	0.00727
11	0.78000	0.75397	0.02603
12	0.78000	0.75397	0.02603
13	0.77000	0.75397	0.01603
14	0.65000	0.70782	-0.05782
15	0.62000	0.70782	-0.08782
16	0.66000	0.62172	0.03828
17	0.63000	0.62172	0.00828

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.61865

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED(BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
-----	-------	------------------------	------------------

1	INTERCEPT	0.97587	
	X	-0.00009	-0.96662

STANDARD ERROR OF ESTIMATE		=	0.03281
COEFFICIENT OF DETERMINATION		=	0.92279
COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ)		=	0.91785
MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT		=	0.96082
MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ)		=	0.95794

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	X	0.00006	0.07174	-13.390	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	X	-0.96062	7.06397E-11

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	0.1230	0.1230	179.2028	100.000
RESIDUAL	15	0.0142	0.0009		
TOTAL	16	0.2072			

ANEXO 6

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA $e(\hat{\theta})$ VERSUS u_v , COM $N = 15$ E
X, Y E PLOTAGEM DOS RESÍDUOS PADRONIZADOS.

e(0) x, y n=15

MULTIPLE LINEAR REGRESS

PROBLEM NUMBER = 1
 SAMPLE SIZE = 15
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = Y

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	X	16.32667	12.27841
2	Y	0.84067	0.09767

TABLE OF RESIDUALS

OBS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	0.95000	0.96916	-0.01916
2	0.93000	0.93036	-0.00036
3	0.93000	0.93036	-0.00036
4	0.92000	0.93036	-0.01036
5	0.91000	0.89077	0.01923
6	0.89000	0.89077	-0.00077
7	0.89000	0.89077	-0.00077
8	0.86000	0.85117	0.00883
9	0.86000	0.85117	0.00883
10	0.85000	0.85117	-0.00117
11	0.78000	0.77199	0.00801
12	0.78000	0.77199	0.00801
13	0.77000	0.77199	-0.00199
14	0.65000	0.65400	0.00600
15	0.63000	0.65400	-0.02400

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.75662

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED(BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
1	INTERCEPT	0.96985	
	X	-0.00792	-0.99346

STANDARD ERROR OF ESTIMATE	=	0.01159
COEFFICIENT OF DETERMINATION	=	0.98692
COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ)	=	0.99597
MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT	=	0.99346
MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ)	=	0.99296

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

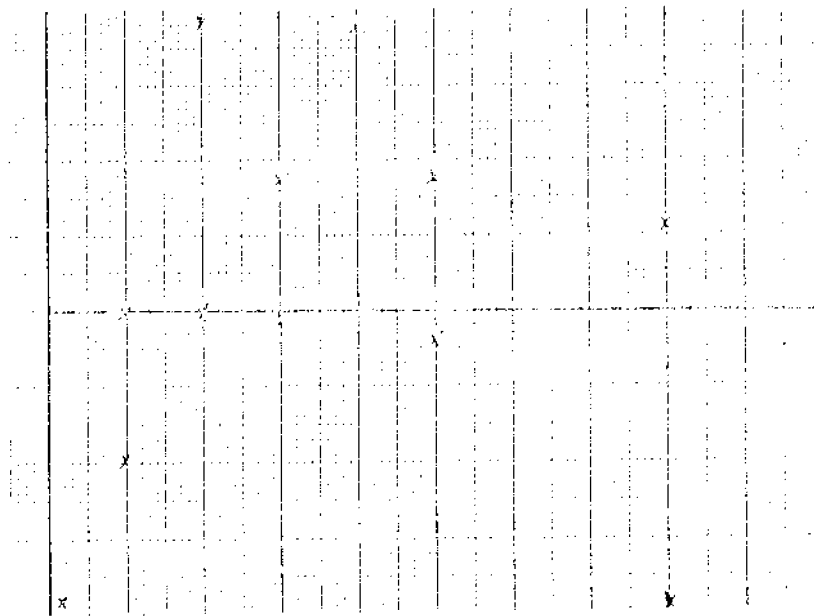
VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	X	0.00025	0.03156	-31.379	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	X	-0.99346	0.00000

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	0.1323	0.1323	994.6240	100.000
RESIDUAL	13	0.0017	0.0001		
TOTAL	14	0.1340			



Plotagem dos resíduos padronizados versus a variável independente (unidade), para $e(\hat{\theta})$ com $n = 15$.

ANEXO 7

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA σ VERSUS U_v , COM $N = 17$ E
LNx, LNy

σ $\ln x, \ln y$ $n=17$

M U L T I P L E L I N E A R R E G R E S S I O N

PROBLEM NUMBER = 1
 SAMPLE SIZE = 17
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = LN Y

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	LN X	2.43541	1.40621
2	LN Y	1.61500	1.48607

T A B L E O F R E S I D U A L S

COS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	-2.81300	-3.21116	0.39816
2	0.64200	0.77328	-0.13128
3	0.58800	0.77328	-0.18528
4	0.66200	0.77328	-0.11128
5	0.95600	1.40014	-0.44414
6	1.38600	1.40014	-0.01414
7	1.16300	1.40014	-0.23714
8	1.58900	1.89264	-0.30364
9	1.52600	1.89264	-0.36664
10	1.60900	1.89264	-0.28364
11	2.71500	2.41310	0.30190
12	2.63200	2.41310	0.21890
13	2.62500	2.41310	0.21190
14	3.36700	2.60560	0.76140
15	3.39100	2.60560	0.78540
16	2.40700	2.88875	-0.48175
17	3.03000	2.88875	0.14125

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.30619

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED(BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
1	INTERCEPT	-0.66554	
	LN X	1.01832	0.96326

STANDARD ERROR OF ESTIMATE = 5.41240
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 0.92758
 COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ) = 0.92107
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT = 0.96326
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ) = 0.96077

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	LN X	0.07532	0.06934	13.892	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	LN X	0.96326	0.00000

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	32.6215	32.6215	192.9613	100.000
RESIDUAL	15	2.5311	0.1701		
TOTAL	16	35.1526			

ANEXO 8

RESUMEN DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA σ VERSUS U_V , COM $N = 15$ E
LN_X, LN_Y.

σ $\ln x, \ln y$ $n=15$

M U L T I P L E L I N E A R R E G R E S S I O N

PROBLEM NUMBER = 1
 SAMPLE SIZE = 15
 INDEPENDENT VARIABLES = 1
 DEPENDENT VARIABLE = LN Y

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	LN X	2.30573	1.45147
2	LN Y	1.37980	1.42229

TABLE OF RESIDUALS

OBS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	-2.61300	-3.06707	0.23407
2	0.64200	0.71044	-0.06844
3	0.58800	0.71044	-0.12244
4	0.66200	0.71044	-0.04844
5	0.95500	1.37717	-0.42217
6	1.38600	1.52717	-0.14117
7	1.26300	1.37717	-0.21417
8	1.50500	1.76626	-0.17726
9	1.52600	1.76626	-0.24026
10	1.60900	1.76626	-0.15726
11	2.71500	2.25719	0.45781
12	2.63200	2.25719	0.37481
13	2.62500	2.25719	0.36781
14	2.40700	2.70584	-0.29884
15	3.03000	2.70584	0.32416

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.53867

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED(BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
	INTERCEPT	-0.83535	
1	LN X	0.98971	0.98045

STANDARD ERROR OF ESTIMATE = 0.29062
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 0.96128
 COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ) = 0.95330
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT = 0.98045
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ) = 0.97393

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	LN X	0.05348	0.05457	17.965	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	LN X	0.98045	0.99655E-11

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	27.2226	27.2226	322.7526	100.000
RESIDUAL	15	1.0965	0.0731		
TOTAL	16	28.3191			

ANEXO 9

RESULTADOS DA UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA MULTIR
(BASIS) PARA α VERSUS U_V , COM $N = 17$ E
LNX, LNY.

D.34

α Inx, lny n-17

M U L T I P L E L I N E A R R E G R E S S I O N

PROBLEM NUMBER = 1
SAMPLE SIZE = 17
INDEPENDENT VARIABLES = 1
DEPENDENT VARIABLE = LN Y

VAR	LABEL	MEAN	STD DEVIATION
1	LN X	2.44071	1.40767
2	LN Y	3.04400	1.25696

T A B L E O F R E S I D U A L S

OBS	ACTUAL Y	PREDICTED Y	RESIDUAL
1	-0.39700	-0.39429	0.03725
2	2.93900	2.93556	0.00302
3	2.95500	2.93520	0.01982
4	2.97000	2.93520	0.03480
5	3.03500	3.52677	-0.49177
6	3.73700	3.52677	0.25023
7	3.07300	3.52677	-0.45377
8	3.67100	3.67154	-0.00054
9	3.68200	3.67154	0.01046
10	3.90200	3.94616	-0.04616
11	4.72700	4.30655	0.42045
12	4.46900	4.30655	0.16245
13	4.50300	4.30655	0.19645
14	5.08600	4.46744	0.62056
15	4.88000	4.46744	0.42056
16	3.73300	4.70410	-0.97310
17	4.49500	4.70410	-0.20910

DURBIN-WATSON D STATISTIC = 1.97599

REGRESSION COEFFICIENTS AND STANDARDIZED (BETA) COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	REGRESSION COEFFICIENT	BETA COEFFICIENT
1	INTERCEPT	1.55626	
	LN X	0.95322	0.95322

STANDARD ERROR OF ESTIMATE = 0.39242
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 0.20863
 COEFFICIENT OF DETERMINATION (ADJ) = 0.90253
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT = 0.95322
 MULTIPLE CORRELATION COEFFICIENT (ADJ) = 0.95002

STANDARD DEVIATIONS AND T VALUES OF COEFFICIENTS -

VAR	LABEL	STD ERROR	STD ERR BETA	T VALUE	CONF
1	LN X	0.05970	0.07805	12.213	100.000

PARTIAL CORRELATIONS AND R2-DELETE -

VAR	LABEL	PARTIAL CORR	R2-DELETE
1	LN X	0.95322	0.00000

ANALYSIS OF VARIANCE TABLE

SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F RATIO	CONF LEVEL
REGRESSION	1	22.9693	22.9693	149.1580	100.000
RESIDUAL	43	2.0092	0.1510		
TOTAL	44	25.0785			

A aplicação do método dos mínimos quadrados ponderados para $\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$ com $n = 17$ resulta em uma melhoria na distribuição dos resíduos padronizados. Esses resíduos correspondentes ao valor da variável independente 39,9 encontram-se agora corrigidos.

No entanto, os valores da variável independente 30,2 parecem agora ser observações discrepantes, situação semelhante ao caso discutido para $e(0)$, ϵ_{hcm} e $e(\bar{\theta})$. Como a emissividade $e(0)$, ϵ_{hcm} ou $e(\bar{\theta})$, é função da constante dielétrica relativa ($\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$), uma observação discrepante para $\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$ seguramente resultará em resíduos de mesmo padrão para a emissividade em função da variável independente.

Deletando-se os pontos da variável independente 30,2 e executando-se uma nova análise de regressão para $\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$, verifica-se que ainda existe a presença de heterocedasticidade de se bem que de modo menos expressivo. Uma nova transformação dos dados resulta em um padrão aleatório de distribuição dos resíduos padronizados, com um valor de $R^2 = 1$ (ajuste perfeito).

A mesma tendência pode ser observada para $e(\bar{\theta})$ com $n = 15$.

A estatística de Durbin-Watson mostra que para $\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$ com $n = 17$ nada pode ser concluído já que o valor de 1,13 está no intervalo dos valores tabelados ou seja 1,13 e 1,36. Para $\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$, $n = 17$, $\frac{1}{x}$, $\frac{\ln y}{x}$ e para $\epsilon_{\text{r}}^{\text{I}}$, $n = 15$ com x , $\ln y$ e com $\frac{1}{x}$, $\frac{\ln y}{x}$ e ainda para $e(\bar{\theta})$ com $n = 15$ (Durbin-Watson tabelado de 1,08 a 1,36) pode-se afirmar que os resíduos padronizados

são independentes e aleatórios.

Em todos os casos não há mudança significativa nos estimadores havendo ainda melhoria no valor de k^2 principalmente para os casos onde $n = 15$.

Diante das considerações feitas acima há uma forte tendência em se eliminar dos 17 pontos inicialmente considerados os valores correspondentes a 30,2.

No entanto o procedimento mais correto é o da realização de novas medições de σ_Y^2 para este grau de umidade do solo, no sentido de melhor avaliar a influência de observações discrepantes.

Para $n = 17$ a estatística de Durbin-Watson não permite conclusões ($1,13 < 1,30 < 1,38$) ao nível de $\alpha = 0,05$.

Deletando-se os pontos 30,2 pode-se afirmar que os erros são não autocorrelacionados, ou seja, independentes.

O mesmo comportamento pode ser esperado de σ_Y^2 já que σ e σ_Y^2 têm relação direta. Já para $n = 15$ os erros são independentes mesmo considerando-se $n = 17$.