

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**MODELAMENTO ANALÓGICO DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA PARA  
CORPOS CILÍNDRICOS E TABULARES**

Tese Apresentada por

**JOSÉ DOMINGOS FARACO GALLAS**

como requisito parcial à obtenção do grau em

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

Na área de

**GEOFÍSICA**

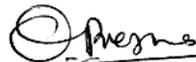
Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

Geociências da

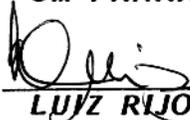
Universidade Federal do Pará

Aprovado: 15.03.90

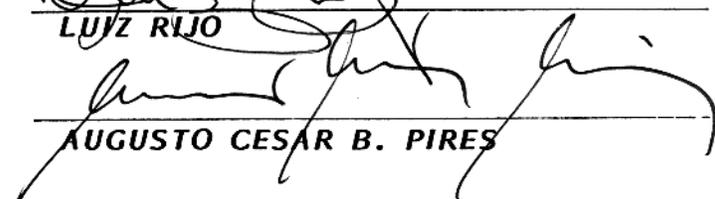
Comitê de Tese



OM PRAKASH VERMA (Orientador)



LUÍZ RIJO



AUGUSTO CESAR B. PIRES

SUMARIO

P.

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

RESUMO..... 1

ABSTRACT..... 2

1 POLARIZAÇÃO INDUZIDA ..... 3

1.1 Introdução..... 3

1.2 O efeito IP..... 4

1.2.1 As argilas e a troca iônica..... 5

1.2.2 Os fenômenos físico-químicos..... 6

1.2.2.1 Polarização metálica ou eletrônica..... 6

1.2.2.2 Polarização não-metálica ou eletrolítica..... 6

1.4.3 O modelo Cole-Cole..... 7

1.3 Parâmetros para medir IP ..... 10

1.3.1 IP no domínio do tempo: DC..... 10

1.3.2 IP no domínio de frequência: AC..... 14

1.4 Fator metal..... 14

1.5 Equivalência entre o domínio do tempo e da frequência 15

1.6 Levantamento de campo..... 18

1.6.1 Técnicas de levantamento..... 18

1.6.1.1 Técnicas polo-dipolo e dipolo-dipolo..... 18

1.6.1.2 Técnicas do caminhamento..... 20

1.6.2 Apresentação dos dados..... 21

1.6.3 Interpretação..... 24

1.7 Objetivos..... 25

2 O MODELAMENTO ANALÓGICO ..... 26

2.1	Introdução.....	26
2.2	Trabalhos anteriores.....	26
2.2.1	Estudos mais recentes.....	27
2.3	O fator de escala.....	29
3	EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAL.....	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Confecção de modelos.....	31
3.3	O tanque dos ensaios.....	32
3.4	A solução utilizada.....	32
3.5	Tipos de eletrodos.....	35
3.6	Equipamentos utilizados.....	37
3.6.1	Sistema de transmissão.....	37
3.6.2	Sistema de recepção das medidas.....	39
3.6.2.1	Medida de PFE.....	41
3.6.2.2	Medida de fase.....	41
3.7	Os dados medidos.....	42
3.8	O comportamento da solução.....	43
4	DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	45
4.1	Comparação com trabalhos anteriores.....	45
4.2	Apresentação dos resultados.....	45
4.2.1	Os modelos cilíndricos (horizontais).....	48
4.2.1.1	Efeito da variação do teor.....	48
4.2.1.2	Efeito da variação no diâmetro.....	50
4.2.1.3	Efeito da variação da profundidade.....	50
4.2.1.4	Efeito da variação de orientação.....	51
4.2.1.5	Efeito do arranjo eletródico-comparação entre dipolo-dipolo e Wenner.....	51

4.2.2	Os modelos tabulares (placas).....	74
4.2.2.1	Efeito da variação do teor.....	74
4.2.2.2	Efeito da variação da espessura.....	75
4.2.2.3	Efeito da variação da profundidade.....	76
4.2.2.4	Efeito da variação de orientação.....	76
4.2.2.5	Efeito da variação do mergulho.....	76
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	93
5.1	Cilindros horizontais.....	93
5.1.1	Efeito da variação do teor.....	93
5.1.2	Efeito da variação de profundidade.....	94
5.1.3	Efeito da variação do diâmetro.....	94
5.1.4	Efeito da variação da orientação.....	94
5.2	Os modelos tabulares (placas).....	103
5.2.1	Efeito da variação do teor.....	103
5.2.2	Efeito da variação da espessura.....	103
5.2.3	Efeito da variação da profundidade.....	103
5.2.4	Efeito da variação da orientação.....	104
5.2.5	Efeito da variação do mergulho.....	104
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	113
7	BIBLIOGRAFIA.....	115
	APÊNDICE I .....	118

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	P.
FIG. 1 - Curva de descarga IP.....	4
FIG. 2 - Modelo Cole-Cole e respostas no domínio do tempo e da frequência.....	8
FIG. 3 - Parâmetros "M" e "L" Newmont.....	12
FIG. 4 - Sistema de medida IP multicanal.....	13
FIG. 5 - Curva de descarga IP.....	13
FIG. 6 - Arranjo dipolo-dipolo.....	18
FIG. 7 - Arranjo polo-dipolo (tripolo).....	19
FIG. 8 - Arranjo retângulo.....	20
FIG. 9 - Arranjo quadripolo simétrico.....	21
FIG.10 - Pseudo-seções de polarização induzida, resistividade aparente, fator metal e perfis eletromagnéticos e potencial espontâneo.....	22
FIG.11 - Apresentação dos dados para o arranjo gradiente...	23
FIG.12 - Concentração de $3,16 \times 10^{-5}$ g/L.....	34
FIG.13 - Concentração de $6,32 \times 10^{-5}$ g/L.....	34
FIG.14 - Concentração de $9,48 \times 10^{-5}$ g/L.....	35
FIG.15 - Concentração de $1,06 \times 10^{-4}$ g/L.....	35
FIG.16 - Concentração de $2,34 \times 10^{-4}$ g/L.....	36
FIG.17 - Concentração de $2,55 \times 10^{-4}$ g/L.....	36
FIG.18 - Diagrama de blocos.....	37
FIG.19 - Diagrama do circuito estabilizador de corrente....	39
FIG.20 - Diagrama do circuito amplificador com alta impedância de entrada.....	40
FIG.21 - Registro do controle de deriva.....	40
FIG.22 - Verificação da uniformidade da solução.....	44
FIG.23 - Cilindro 2,54 cm, prof.= 0,5 cm, teores de 10,20 e 30%.....	53
FIG.24 - Cilindro 2,54 cm, prof.= 1,0 cm, teores de 10,20 e 30%.....	54
FIG.25 - Cilindro 2,54 cm, prof.= 2,0 cm, teor de 30%.....	55
FIG.26 - Cilindro 3,81 cm, prof.= 0,5 cm, teores de 10,20 e 30%.....	56
FIG.27 - Cilindro 3,81 cm, prof.= 1,0 cm, teores de 10,20 e 30%.....	57
FIG.28 - Cilindro 3,81 cm, prof.= 2,0 cm, teor de 30%.....	58

FIG.29 - Cilindro 5,08 cm, prof.= 0,5 cm, teores de 10,20 e 30%.....	59
FIG.30 - Cilindro 5,08 cm, prof.= 1,0 cm, teores de 10,20 e 30%.....	60
FIG.31 - Cilindro 5,08 cm, prof.=1,5 cm, teores de 20 e 30%	61
FIG.32 - Cilindro 5,08 cm, prof.=2,0 cm, teores de 20 e 30%	62
FIG.33 - Cilindro 5,08 cm, prof.=2,5 cm, teores de 20 e 30%	63
FIG.34 - Variação no diâmetro, cil.5,08 cm; 3,81 e 2,54 cm.	64
FIG.35 - Variação da profundidade, cil.2,54 cm, 30%.....	65
FIG.36 - Variação da profundidade, cil.3,81 cm, 30%.....	66
FIG.37 - Variação da profundidade, cil.5,08 cm, 30%.....	67
FIG.38 - Variação da orientação, cil.2,54 cm, ang.90, 30 e 45°,30%.....	68
FIG.39 - Variação da orientação, cil.3,81 cm, ang.90, 30 e 45°,30%.....	69
FIG.40 - Variação da orientação, cil.5,81 cm, ang.90, 30 e 45°,30%.....	70
FIG.41 - Comparação dipolo-dipolo x Wenner, cil. 5,08 cm, 10%, prof.= 0,5 cm.....	71
FIG.42 - Comparação dipolo-dipolo x Wenner, cil. 5,08 cm, 20%, prof.= 0,5 cm.....	72
FIG.43 - Comparação dipolo-dipolo x wenner, cil. 3,81 cm, 30%, prof.= 0,5 cm.....	73
FIG.44 - Placa 2,0 cm, prof.= 0,5 cm, teores de 10,20 e 30%	78
FIG.45 - Placa 2,0 cm, prof.= 1,0 cm, teores de 10,20 e 30%	79
FIG.46 - Placa 2,0 cm, prof.= 1,5 cm, teores de 20 e 30%...	80
FIG.47 - Placa 2,0 cm, prof.= 2,0 cm, teor de 30%.....	81
FIG.48 - Placa 3,0 cm, prof.= 0,5 cm, teores de 10,20 e 30%	82
FIG.49 - Placa 3,0 cm, prof.= 1,0 cm, teores de 10,20 e 30%	83
FIG.50 - Placa 3,0 cm, prof.= 1,5 cm, teores de 20 e 30%...	84
FIG.51 - Placa 3,0 cm, prof.= 2,0 cm, teores de 20 e 30%...	85
FIG.52 - Placa 3,0 cm, prof.= 3,0 cm, teor de 30%.....	86
FIG.53 - Variação da espessura, placas 2,0 e 3,0 cm, prof.= 0,5 cm.....	87
FIG.54 - Variação da profundidade, placa 2,0 cm, 30%.....	88
FIG.55 - Variação da profundidade, placa 3,0 cm, 30%.....	89

FIG.56 - Variação da orientação, placa 3,0 cm, ang.90, 30 e 45°, 30%.....	90
FIG.57 - Variação do mergulho, placa 2,0 cm, ang. 90, 30 e 45°, 30%.....	91
FIG.58 - Variação do mergulho, placa 3,0 cm, ang. 90, 30 e 45°, 30%.....	92
FIG.59 - Variação do teor, cilindro 2,54 cm.....	96
FIG.60 - Variação do teor, cilindro 3,81 cm.....	97
FIG.61 - Variação do teor, cilindro 5,08 cm.....	98
FIG.62 - Variação da profundidade, cil.5,08;3,81 e 2,54 cm, 30%.....	99
FIG.63 - Variação do diâmetro,cil.teores 30,20 e 10%,prof.= 0,5 cm.....	100
FIG.64 - Variação do diâmetro,cil.teores 30,20 e 10%,prof.= 1,0 cm.....	101
FIG.65 - Variação do diâmetro, cil. 2,54; 3,81 e 5,08 cm, 30%, prof.= 0,5 cm.....	102
FIG.66 - Variação do teor, placa 2,0 cm.....	106
FIG.67 - Variação do teor, placa 3,0 cm.....	107
FIG.68 - Variação da espessura, placas teores 30, 20 e 10%, prof.= 0,5 cm.....	108
FIG.69 - Variação da espessura, placas teores 30, 20 e 10%, prof.= 1,0 cm.....	109
FIG.70 - Variação da profundidade, placas 2,0 e 3,0 cm, 30%	110
FIG.71 - Variação da orientação, placa 3,0 cm, 30%, prof.= 0,5 cm.....	111
FIG.72 - Variação do mergulho, placas 2,0 e 3,0 cm, 30%, prof.= 0,5 cm.....	112

A minha esposa  
Ana Maria

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Francisco Hiodo do IAG, que sem o seu auxílio na parte de instrumentação não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Verma, meu orientador, pelo seu empenho para que este trabalho fosse realizado.

Ao Técnico Luiz do IPT, pelo seu auxílio na confecção das peças necessárias que requeriam a sua habilidade de torneiro mecânico.

Ao chefe e colega Augustinho Rigoti pelo seu apoio e ajuda dada neste trabalho.

Ao técnico Inocêncio, que executou todos os desenhos aqui contidos, exceto aqueles feitos pelo computador.

A Lúcia, pelo seu trabalho de datilografia.

A minha mãe, que mesmo à distância também me auxiliou.

Enfim, meu agradecimento a todos aqueles que direta ou indiretamente, de uma maneira ou de outra, colaboraram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O método de polarização induzida, consagrado como ferramenta de prospecção de sulfetos metálicos e indiretamente, do ouro em associações polimetálicas, vem crescendo em outras aplicações como prospecção de águas subterrâneas, investigações de interesse à Engenharia Civil e ao uso de ocupação do solo.

Neste trabalho, inicialmente, faz-se uma visualização geral do método IP, suas aplicabilidades, metodologia de trabalhos, arranjos de campo, fundamentos teóricos, vantagens e desvantagens etc.

O objetivo principal, entretanto, é o modelamento analógico em laboratório, no sentido de simular-se as condições encontradas na natureza. Para tanto, utilizou-se de modelos geométricos simples, cilindros e placas. Na confecção destes modelos, utilizou-se cimento, areia quartzítica e grafita. Como a grafita apresenta um intenso fenômeno IP, variou-se o teor de grafita contido nos modelos. Assim, para diferentes formas e medidas dos modelos, variou-se também o conteúdo de partículas polarizáveis. As medidas foram feitas no sentido de verificar-se o comportamento da resposta IP quanto a forma, conteúdo de grafita, profundidade e direção do modelo estudado.

**ABSTRACT**

The Induced Polarization method, a well known tool for sulphide exploration and indirectly for gold searching in polymetallic associations is experiencing also an increasing application in underground water exploration and civil engineering problems.

A review on the basic theory, applicabilities, field methodologies, advantages and disadvantages is presented. The aim of the present study, however, is to develop a methodology for IP analog modelling. The choice was for simple geometric shapes such as cylinder and thin sheets, built with quartzitic sand and disseminated graphite in a standard cement. The grade of graphite was controlled and varied for different model geometries. The results are discussed in terms of IP response as a function of geometry, graphite content, depth and strike of the models.

## 1 POLARIZAÇÃO INDUZIDA

### 1.1 Introdução

A polarização induzida (IP) é um fenômeno elétrico provocado pela transmissão de corrente no solo, observado como uma resposta defasada de voltagem nos materiais terrestres. Tem importância prática como método de prospecção de depósitos minerais. Como medida geofísica, a polarização induzida refere-se a uma ação de bloqueio resistivo ou de polarização elétrica nos materiais terrestres, com maior pronunciamento do processo nos poros preenchidos por fluidos nas vizinhanças de minerais metálicos. Observa-se, portanto, efeito IP mais intenso em rochas que contêm minerais metálicos. Contudo, é complexa senão impossível, a relação exata entre a resposta IP e a quantidade de mineralização.

A vantagem principal do método IP é sua capacidade de, em condições favoráveis, detectar a presença de minerais metálicos, mesmo para quantidades muito pequenas, em que, disseminações de sulfetos da ordem de 0.5% em volume metálico têm sido identificadas pelo IP (SUMNER, 1976).

Neste método, a presença de uma indicação é em si própria, suficiente para definir uma anomalia, ao invés de uma diferença no nível de medida. Isto é, o fenômeno IP geralmente tem um valor baixo de nível de base, acima do qual as medidas podem ser ditas anômalas. Assim, o método IP apresenta a vantagem de uma interpretação definitiva direta. Esta distinção é marcante com relação aos métodos potenciais e de resistividade, cujas interpretações muito raramente são tão diretas.

A amplitude da resposta IP geralmente cresce com a quantidade de mineralização até o ponto em que se observa um forte efeito IP na presença de corpos de sulfetos maciços. Contudo, este tipo de ocorrência economicamente interessante, pode ser detectado por outros métodos elétricos de menor custo, principalmente os eletromagnéticos. Assim, a polarização induzida é um método particularmente importante na prospecção de mineralizações metálicas disseminadas, situação em que outros métodos geofísicos são muito menos eficazes.

Por isso, este método é freqüentemente utilizado também na prospecção de depósitos maciços de cobre-zinco e níquelíferos, em áreas de capeamento condutivo como na Austrália, África do Sul, Brasil ou qualquer país tropical. Com boas razões, nestas áreas o método é utilizado como complemento do EM no "follow up" de anomalias AEM.

Atualmente, além do uso corrente do IP em prospecção mineral, o método vem sendo utilizado também em levantamentos para obras de engenharia civil e prospecção de água subterrânea (ROY & ELLIOT, 1980).

## 1.2 O efeito IP

Quando é estabelecida uma diferença de potencial  $\Delta V$ , devido à passagem de corrente pelo solo, esta diferença de potencial não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos, e descreve uma curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ , a qual liga a assíntota  $\Delta V_p$  em regime estacionário, com a assíntota zero após o corte da corrente (ver FIGURA 1). Este fenômeno é chamado "Polarização Induzida".

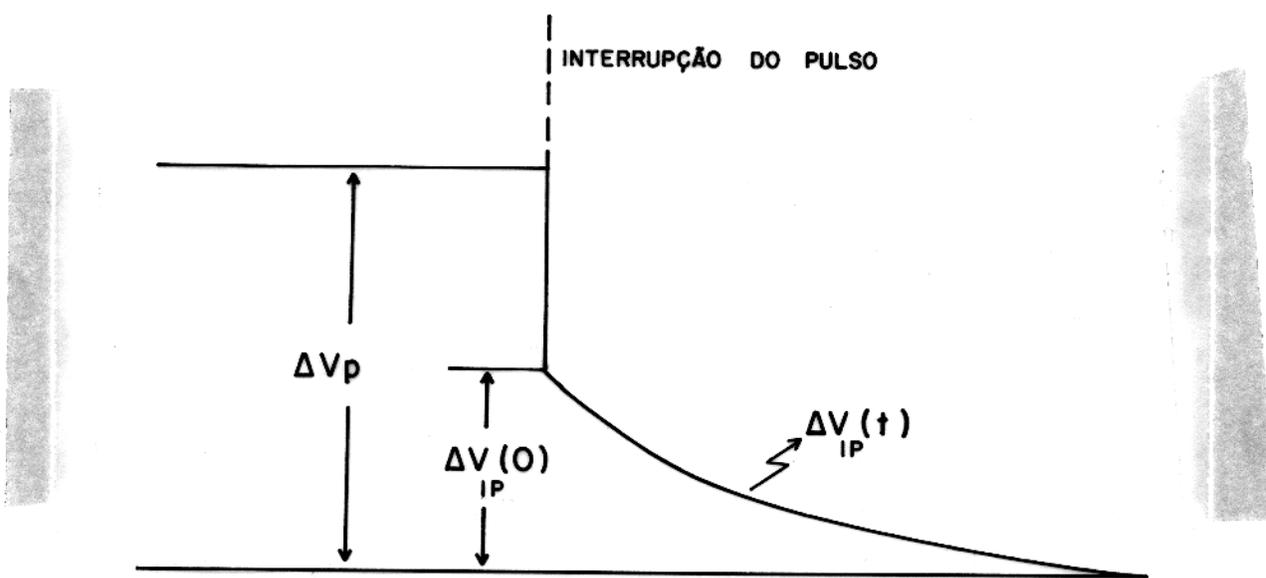


FIGURA 1 - Curva de descarga IP.

O comportamento de  $V_{IP}(t)$  depende da polarizabilidade das rochas. Analogamente, tudo se passa como se o solo contivesse pequenos condensadores que se carregariam durante a

a emissão, descarregando-se após o corte. A curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$  seria chamada então de curva de descarga IP. Contudo, esta comparação é apenas uma imagem muito grosseira, pois essa analogia com um circuito elétrico (resistência + condensador) não explica por completo o fenômeno IP.

Normalmente a corrente se propaga no solo através do movimento de íons em solução e eletronicamente nas partículas metálicas, caso estas últimas estejam presentes nos materiais terrestres. Na interface sólido-líquido ocorre algum tipo de reação eletroquímica, responsável pela transferência de eletricidade entre íons da solução e elétrons livres nos minerais metálicos. Várias reações possíveis são discutidas na literatura (KLEIN & SHUEY, 1976; SHUEY, 1977); contudo, não se tem o conhecimento de quais reações predominam nas medidas IP in situ. As reações podem ser classificadas em 2 tipos: aquelas em que o sólido é inerte e aquelas em que o sólido é ativo. A grafita é considerada inerte; ela apenas troca elétrons com a solução, permitindo que os íons em solução mudem de valência. Por ex., o  $Fe^{2+}$  pode fornecer um elétron ao sólido e tornar-se  $Fe^{3+}$ .

Para os sulfetos in situ, segundo SHUEY (1977), existe grande probabilidade de que a reação eletroquímica envolva os sulfetos de forma ativa. Se por ocasião dos ensaios IP o minério está passando por processos de oxidação ou enriquecimento secundário, então a corrente se propaga nos sulfetos desbalanceando as "meias reações" que estejam ocorrendo naturalmente. Outro enfoque é o de que o sulfeto reage apenas com a solução muito próxima de sua superfície. Na frequência de 1 Hz, a extensão de difusão para íons na água é menor que 10 microns. Isto significa que os íons que realmente transmitem a corrente para o sulfeto são os das vizinhanças imediatas; e nesta proximidade, a composição da água deve estar fortemente afetada pelo prolongado contato com o sulfeto.

### 1.2.1 As argilas e a troca iônica

A característica essencial das argilas é o pequeno tamanho dos cristais, menor que 2 microns. Em algumas argilas,

os cristais podem ter uma ou mais dimensões da ordem de 0.001 microns ou 100 angstroms. Por outro lado, os minerais não argilosos geralmente ocorrem em cristais maiores que 2 microns. O pequeno tamanho dos cristais das argilas significa uma maior superfície específica ( área por massa) e assim a eletrificação da superfície apresenta maior efeito sobre propriedades macroscópicas. Estruturalmente as argilas adsorvem um certo conteúdo de água em sua rede cristalina. As camadas silicáticas da rede são carregadas negativamente, devendo existir então cátions entre elas.

A quantidade mensurável utilizada para descrever efeitos de carga na superfície das argilas é a capacidade de troca catiónica. Existe também uma capacidade de troca de ânions que é difícil de medir. Imagina-se que a troca de ânions se dá geralmente nos locais de ruptura dos eixos das camadas silicáticas, eletricamente análoga à superfície de outros minerais, provocando assim, o efeito IP.

### **1.2.2 Os fenômenos físico-químicos**

Os dois principais fenômenos físico-químicos que poderiam explicar a polarização induzida são a polarização metálica ou eletrônica e a polarização não metálica.

#### **1.2.2.1 Polarização metálica ou eletrônica**

No caso da presença de partículas metálicas, a dupla camada elétrica é composta de íons do eletrólito que circundam a partícula, balanceados por elétrons ou prótons de cargas opostas, concentrados na superfície metálica. Durante a transmissão da corrente os íons móveis acumulam-se na interface dos grãos condutores e restringem o fluxo de corrente no solo até que o equilíbrio se estabeleça. A situação fica equivalente a dipolos elétricos. Quando a corrente é interrompida, os íons imobilizados difundem-se lentamente no ambiente eletrolítico para voltar ao equilíbrio inicial, manifestando o efeito IP.

#### **1.2.2.2 Polarização não-metálica ou eletrolítica**

Para explicar o efeito IP eletrolítico, considera-se

comumente a presença de partículas de argila cujas superfícies estariam carregadas negativamente, induzindo um acúmulo de cátions no eletrólito. A dupla camada iônica assim formada agiria como uma membrana que se opõe ao fluxo de corrente, gerando a sobrevoltagem ou efeito IP.

Menos intenso, este caso de fenômeno IP, constitui na prática um "fundo de ruído" na prospecção de corpos minerais metálicos. Outras vezes, a polarização eletrolítica pode fornecer dados suplementares para distinguir certas categorias de rochas, esclarecer problemas estruturais e também fornecer informações importantes ao mapeamento geológico.

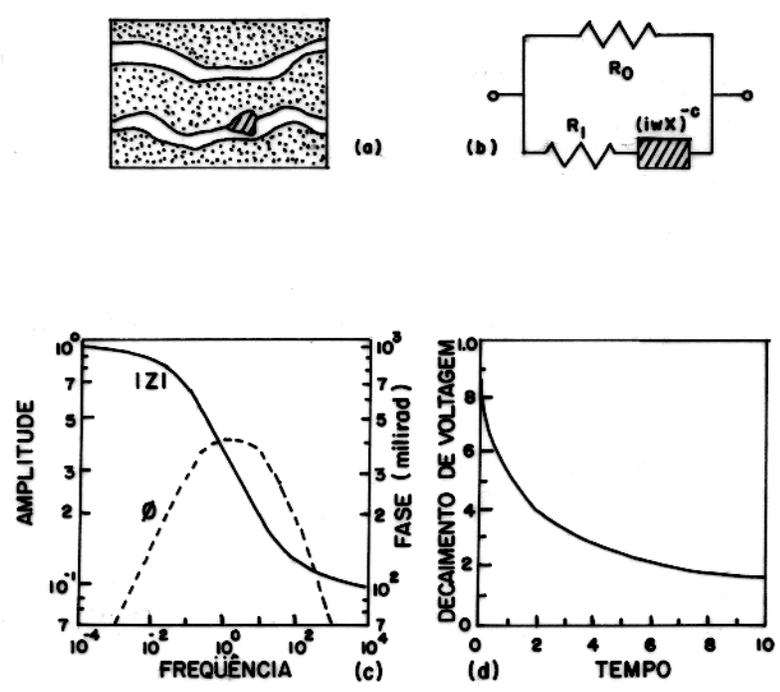
### 1.2.3 O modelo Cole-Cole

Um modelo simples de relaxação que tem sido usado para explicar uma variedade de resultados de laboratório de resistividade complexa (MADDEN and CANTWELL, 1967; PELTON et al., 1972) foi originalmente proposto por COLE and COLE (1941) para predizer o comportamento complexo do material dielétrico.

Uma rocha mineralizada com poros (FIGURA 2a) pode ser representada analogicamente por um circuito elétrico (FIGURA 2b) que tenha a mesma resposta. As respostas nos domínios da frequência e do tempo deste circuito equivalente, chamado modelo Cole-Cole, são representadas nas FIGURAS 2c e 2d.

Neste circuito, a impedância complexa  $(i\omega X)^{-c}$  simula a interface iônica-metálica. A resistência  $R_0$  simula um poro da rocha não bloqueado que permite a condução paralela através de um elemento puramente resistivo. A resistência  $R_1$ , simula a resistência da solução na passagem de um poro bloqueado. Este caminho de uma pequena secção de rocha mineralizada é reconhecidamente muito simples; os verdadeiros caminhos de condução certamente são mais complicados. Entretanto, este modelo simples nos permite derivar virtualmente todos os aspectos essenciais do espectro IP observados no laboratório e no campo (PELTON et al, 1978).

É óbvio que em frequências muito baixas somente o caminho puramente resistivo permite a passagem da corrente. Como resultado, a amplitude da impedância vai assintoticamente para  $R_0$  (Ver FIGURA 1c).



- 2a) Representação simplificada de rocha mineralizada com poros.
- 2b) Circuito elétrico equivalente do sistema (2a).
- 2c) Resposta do modelo Cole-Cole no domínio da frequência.
- 2d) Resposta do modelo Cole-Cole no domínio do tempo.

FIGURA 2 - Modelo Cole-Cole e respostas no domínio do tempo e da frequência

Para frequências muito altas a impedância complexa torna-se negligenciável com respeito a  $R_1$  em paralelo com  $R_0$ . Entre estas duas assintotas há uma região dispersiva onde a amplitude da impedância decresce suavemente e o ângulo de fase atinge um máximo. Na dupla plotagem logarítmica, a fase é inteiramente simétrica em torno deste máximo:

- a) para baixas frequências a fase tem uma inclinação de +c.
- b) para altas frequências a fase tem uma inclinação de -c.

Uma vez que a impedância do circuito não é zero para uma frequência infinitamente alta, deve haver uma descontinuidade na resposta do domínio do tempo do circuito.

Se for adotada a definição para cargabilidade  $m$  proposta por SEIGEL (1959) como sendo a razão da voltagem

imediatamente após, pela voltagem imediatamente antes a cessação de uma carga de corrente infinitamente longa, pode-se escrever a expressão para a impedância do circuito equivalente como:

$$Z(w) = R_o \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1+(i_w\tau)^c} \right) \right] \quad (1)$$

onde

$$m = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_o}} \quad (2)$$

e

$$\tau = x \left( \frac{R_o}{m} \right)^{1/c} \quad (3)$$

e

$\tau$  = "constante de tempo"

O segundo parâmetro  $\tau$ , ou "constante de tempo", como é chamado, tem como unidade o segundo e determina o tempo necessário para o decaimento no domínio do tempo.

Se a dependência de frequência  $c$  for igual a 1.0, o decaimento no domínio do tempo apresenta a forma exponencial negativa conhecida,

$$V(t) = m \frac{R_{oe}}{I_o} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

onde  $I_o$  é a magnitude da corrente de carga infinitamente longa.

Estudos de laboratório em IP (MADDEN and CANTWELL 1967; PELTON et al., 1972) têm sugerido, entretanto, que a dependência da frequência não é igual a 1.0, mas tipicamente

no intervalo 0.1 a 0.6. Como resultado, o decaimento IP é mais suavizado que a exponencial mostrada na FIGURA 1d, e assume a seguinte forma:

$$V(t) = m \frac{R_0}{I_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\Gamma(nc+1)} \quad (5)$$

onde  $\Gamma(x)$  é a função gama. Desde que  $\Gamma(x+1) = x!$ , quando  $x$  é inteiro, (5) reduz-se a (4) quando  $c = 1,0$ .

Aqui tem-se tido a preocupação de demonstrar como um caminho muito simples de uma rocha mineralizada resulta em um modelo de relaxação contendo somente quatro parâmetros, os quais permitem prever o comportamento IP tanto no domínio do tempo como no da frequência.

Os quatro parâmetros são a resistividade dc ( $R_0$ ) a cargabilidade  $m$ , a constante de tempo  $\tau$  e a dependência de frequência  $c$ .

Foi observado que o principal efeito de aumento na cargabilidade é aumentar a polarizabilidade ou ângulo de fase.

Embora o modelo Cole-Cole seja extremamente simples, ele nos dá uma descrição quantitativa do espectro IP. A variação de somente um parâmetro, a constante de tempo  $\tau$ , é capaz de mostrar os efeitos vistos antes de caracterizações qualitativas tais como concavidades e convexidades do espectro (FRASER et al., 1964) e espectros tipos A, B e C (ZONGE and WYNN, 1975).

### 1.3 Parâmetros para medir IP

#### 1.3.1 IP no domínio do tempo: DC

Quando se interrompe um pulso de corrente sendo transmitido ao solo, observa-se que a voltagem monitorada através de eletrodos não cai imediatamente para zero. Como mostra a FIGURA 3, a voltagem cai imediatamente para um certo

valor  $V_{IP}(0)$  e depois lentamente decai para zero. Este comportamento transiente mostra que o comportamento do solo não é simplesmente resistivo, mas que possui também um caráter reativo.

A medida da resposta IP chamada CARGABILIDADE (M) é simplesmente a amplitude da voltagem secundária ou de decaimento  $V_{IP}(t)$  com relação a amplitude da voltagem primária  $V_p$  enquanto a corrente estava sendo transmitida.

A voltagem secundária é geralmente muito menor do que a primária, sendo usual expressá-la em milivolts, mantendo a primária em volts. Assim, as medidas IP no domínio do tempo são freqüentemente expressas em mV/V (também pode ser expressa em milissegundos).

A definição da cargabilidade como  $M = V_{IP}(t)/V_p$  indica que ela é função do tempo. Existe então um número infinito de possibilidades para a definição de um único parâmetro que caracteriza a medida da resposta IP.

Como a voltagem secundária é às vezes recebida em níveis muito baixos, sua medida é muito susceptível ao ruído. Por isto, a voltagem secundária é geralmente integrada num período chamado janela. Assim, se o ruído é de média zero, a integração tende a cancelá-lo. A FIGURA 3 ilustra as medidas "Newmont". O fator M Newmont é um parâmetro IP padrão. O atraso da janela (i.e., o tempo após a interrupção da corrente antes do início da integração), 0.45 segundos foi escolhido como suficiente para atenuação dos efeitos eletromagnéticos indutivos e dos efeitos capacitivos entre os circuitos transmissor e receptor, de tal forma que a voltagem secundária analisada consiste apenas do efeito IP.

Na maioria das situações de prospecção, o atraso de 450 milissegundos antes da integração é suficiente para que os efeitos eletromagnéticos tenham decaído. O fator L como definido na FIGURA 3 auxilia a evidenciar a presença de uma forma de decaimento anômala. A razão L/M é unitária sempre que se tenha uma curva de decaimento típica. Quando L/M é muito diferente de 1, tem-se a evidência de efeitos de acoplamento eletromagnético. Uma análise mais profunda deste parâmetro é apresentada por SWIFT (1973).

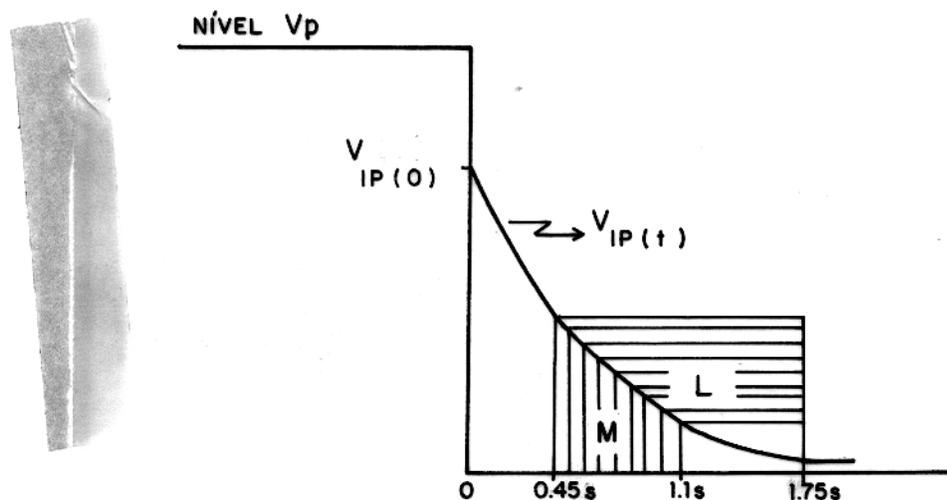


FIGURA 3 - Parâmetros "M" e "L" Newmont.

É possível extrair mais informações da curva de descarga IP do que uma simples cargabilidade. A tendência atual é de analisar todo o decaimento com vistas à caracterização da natureza da fonte anômala. A FIGURA 4 mostra de forma esquemática a medida de 4 canais ou janelas arbitrárias ao longo da curva de descarga. As janelas das fases mais tardias integram um sinal de amplitude sempre menor; por isto é comum incrementar a largura da janela por algum múltiplo da largura da primeira. A FIGURA 4 sugere um binário. Alguns instrumentos selecionam largura de janelas e constantes de calibração tais que, para qualquer curva de decaimento de forma padrão, as cargabilidades medidas nas várias janelas são iguais. A forma padrão Newmont refere-se à curva média obtida por DOLAN e Mc LAUGHLIN (1967) a partir da análise de 575 amostras analisadas em laboratório.

Em síntese, pode-se descrever o fenômeno IP no domínio do tempo como segue abaixo. Consideremos a FIGURA 5.

A quantidade que caracteriza o fenômeno IP é a área sob a curva de descarga, inclusive a parte assintótica que tende a zero.

$$\text{AREA} = \int_0^{\infty} V_{IP} dt \quad (6)$$

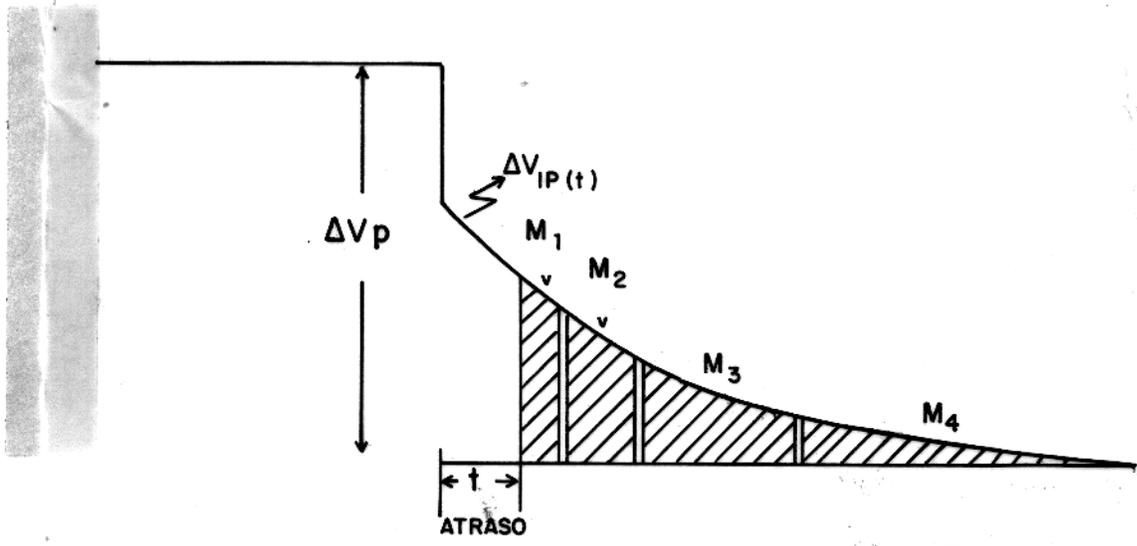


FIGURA 4 - Sistema de medida IP multicanal.

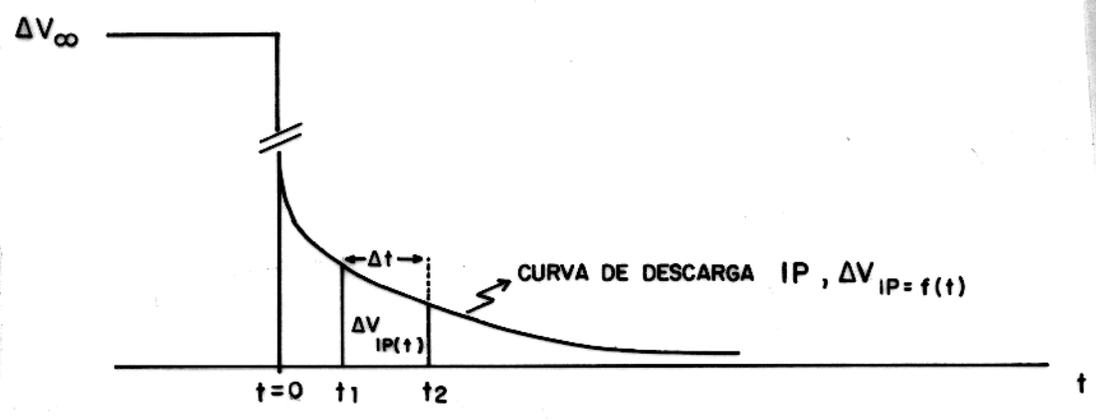


FIGURA 5 - Curva de descarga IP.

Na prática, por razões de instrumentação e rapidez nas medidas, mede-se diretamente uma área sob a curva de descarga através da integração da voltagem transiente no intervalo de uma janela, de  $t_1$  a  $t_2$ . A quantidade medida, normalmente chamada de carga aparente  $M$ , será então:

$$M_{t_1, t_2} = \int_{t_1}^{t_2} V_{IP} dt \quad (7)$$

Como o fenômeno de decaimento IP é essencialmente linear com relação à voltagem primária  $V_p$ , a área é normalizada por  $V_p$ , ficando:

$$M = \frac{M_{t_1, t_2}}{V_p} = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_{IP} dt \quad (8)$$

Se o fenômeno IP é linear,  $V_{IP}$  e  $V_p$  são proporcionais à intensidade de corrente  $I$  e o valor de  $M$  não depende de  $I$ . Por outro lado, a amplitude de cargabilidade aparente  $M$  depende do tempo de integração de  $t_1$  a  $t_2$ .

### 1.3.2 IP no domínio da frequência: AC

Quando as medidas são feitas no domínio da frequência, é usual comparar a impedância do solo obtida em uma determinada frequência com a impedância obtida em uma outra frequência comparativamente muito mais baixa. Esta baixa frequência é usada como um nível de referência "DC".

O efeito de polarização é avaliado em termos da percentagem do aumento na condutividade para a frequência relativa "AC" com o valor "DC". Em termos de resistividades, o efeito percentual de frequência (PFE) é obtido através da relação:

$$PFE = \frac{\rho_{dc} - \rho_{ac}}{\rho_{ac}} \times 100 \quad (9)$$

### 1.4 Fator metal

O Fator Metal é uma normalização feita nos valores aparentes do efeito IP bruto, simplesmente dividindo deste efeito pelo valor de resistividade aparente obtido em uma mesma estação de medida, para dc.

$$MF_a = \frac{IP_a}{(\rho_{dc})_a} \cdot A \quad (10)$$

onde  $A$  é uma constante arbitrária, normalmente igual a  $10^3$ .

$IPa$  pode ser a cargaabilidade aparente  $Ma$  ou o efeito de frequência aparente  $FEa$ .

Trata-se de uma correção bastante tosca, uma vez que assume-se arbitrariamente que a relação entre  $IPa$  e  $\rho_a$  é linear, o que nem sempre é verdade.

### 1.5 Equivalência entre os domínio do tempo e frequência

Existe a discussão sobre qual dos métodos seria o melhor, se aquele no domínio do tempo ou aquele no da frequência. Teoricamente, os dois métodos são equivalentes.

O requisito básico para a equivalência é a linearidade do sistema passivo a ser estudado. Ou seja: a frequência da resposta de saída precisa ser a mesma da de entrada. Assim, a transformada de Fourier ou Laplace é aplicável de um sistema de coordenadas para outro.

Para um material resistividade complexa  $\rho(j\omega)$ , a Lei de Ohm para este material tri-dimensional tem uma resistividade complexa que é:

$$\vec{E}(j\omega)e^{j\omega t} = \rho(j\omega) \vec{J}e^{j\omega t} \quad (11)$$

onde:  $\vec{E}$  = intensidade do campo elétrico

$\vec{J}$  = densidade de corrente

$\rho(j\omega)$  = resistividade complexa

Os valores limites da resistividade complexa são:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \rho(j\omega) = \rho_0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \rho(j\omega) = \rho_\infty$$

Assim, o efeito de frequência para estes valores limites é dado por:

$$EF = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_\infty} = \frac{\rho_0}{\rho_\infty} - 1 \quad (12)$$

Portanto,

$$\rho_0 = \rho_\infty (1 + FE) \quad (13)$$

No caso do domínio do tempo, a corrente é aplicada na forma da função degrau e a função resposta da voltagem decrescente  $V(t)$  é um transiente decaindo. Se for feita a substituição  $s = j$ , a teoria da transformada de Laplace diz que:

$$L(V(t)) = V(s) \frac{1}{s} = \frac{\rho(s)}{s} j \quad (14)$$

A partir dos valores inicial e final para o teorema da transformação de Laplace, temos:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = \lim_{w \rightarrow 0} J\rho(jw) = J\rho_0$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} V(t) = \lim_{w \rightarrow \infty} J(jw) = J\rho$$

A definição da cargabilidade  $M$  para um material homogêneo polarizável respondendo a uma função degrau de corrente é:

$$M = \frac{\frac{V(t)}{t \rightarrow \infty} - \frac{V(t)}{t \rightarrow 0}}{\frac{V(t)}{t \rightarrow \infty}} \quad (15)$$

$$\text{mas, } \frac{V(t)}{t \rightarrow \infty} = J\rho_0 \quad ; \quad \frac{V(t)}{t \rightarrow 0} = J\rho$$

então,

$$M = \frac{J\rho_0 - J\rho}{J\rho_0} = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \quad (16)$$

e

$$EF = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_\infty} \quad (17)$$

fazendo  $\rho_\infty = \rho$

temos:

$$EF = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \quad (18)$$

e

$$\rho_0 = EF + \rho \quad (19)$$

portanto:

$$M = \frac{EF + \rho - \rho}{EF + \rho} = \frac{EF}{EF + \rho} = \frac{\rho EF}{\rho(EF + 1)} \quad (20)$$

finalmente

$$M = \frac{EF}{EF + 1} \quad (21)$$

e para pequenos efeitos de frequência, onde  $EF \ll 1$

$$M \approx EF \quad (22)$$

Deve ser observado que se o efeito de frequência fosse definido como  $EF = (\rho_0 - \rho)/\rho_0$  ao invés de  $EF = (\rho_0 - \rho_\infty)/\rho_\infty$ , a correlação entre  $M$  e  $EF$  poderia ser exata e não uma aproximação como foi obtida ( $M \approx EF$ ).

Na prática esta relação não é válida, porque:

- a) em parte porque uma análise teórica do efeito IP não é possível, isto é, as premissas básicas dos dois sistemas de medidas são somente aproximadamente válidas.
- b) em parte porque as medidas não são feitas em DC e VHF, desse modo não é possível a passagem de um resultado para outro.

A derivação como mostrada acima traça um paralelo entre as respostas de alta frequência e as respostas DC e os valores finais e iniciais de pulsos transientes de voltagem. Para frequências intermediárias ou transientes de tempo, como

vistos nas curvas de decaimento ou espectros de resistividade, a correlação é muito complexa.

## 1.6 Levantamentos de Campo

Os levantamentos de campo são feitos no domínio do tempo ou da frequência.

No caso do domínio de frequência, é utilizada uma frequência geralmente baixa ( $\leq 10$  Hz) regulada na forma de uma onda quadrada de corrente alternada, medindo-se, então, o PFE. Enquanto no domínio do tempo, pulsos repetitivos pré-selecionados na forma pulso ON(T) + pulso OFF(O) + pulso ON com inversão (T) + pulso OFF(O); com período normalmente de 2 segundos. Esta corrente pulsante corresponde a uma corrente alternada de onda quadrada de 0,125 Hz. A cargabilidade é medida pela integração ou amostragem de uma parte da curva de descarga IP.

### 1.6.1 Técnicas de levantamento

#### 1.6.1.1 Técnicas polo-dipolo e dipolo-dipolo

Os arranjos eletródicos mais utilizados em levantamentos de IP são o polo-dipolo e dipolo-dipolo, mostrados esquematicamente nas FIGURAS 6 e 7, onde A e B são elétrodos de corrente e M e N de potencial.

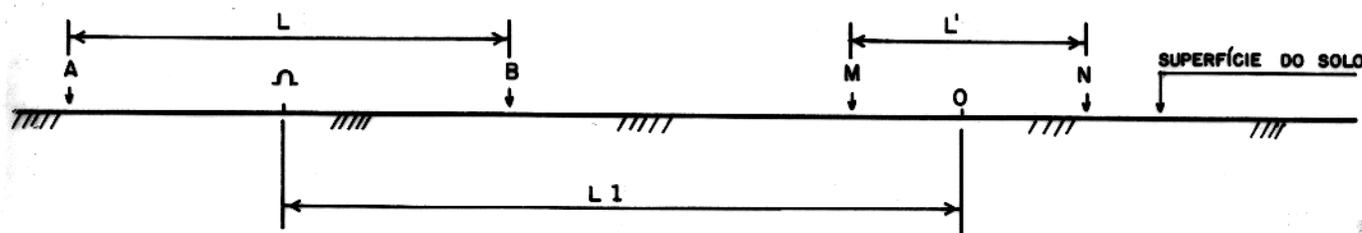


FIGURA 6 - Arranjo dipolo-dipolo.

Normalmente as aberturas dos dipolos  $AB = L$  e  $MN = L'$  são mantidos iguais. O espaçamento entre eles ( $O-O'$ ) é variado nos múltiplos de abertura do dipolo, na forma  $L_1 = n L$  ou

$nL'$ , onde  $n = 2, 3, 4, 5, \dots$ . Assim, investiga-se virtualmente os efeitos IP no subsolo a profundidades cada vez maiores, progressivamente.

O arranjo dipolo-dipolo fornece um sinal  $\Delta V$  relativamente fraco; isto somado à necessidade de movimentação dos eletrodos de corrente torna-o difícil ou mesmo inexecutável em áreas de alta resistência de contato solo-eletrodos. Este arranjo é mais comumente utilizado no sistema freqüencial, porque provoca efeitos indutivos parasitas mínimos, graças a possibilidade de separar completamente as linhas AB e MN.

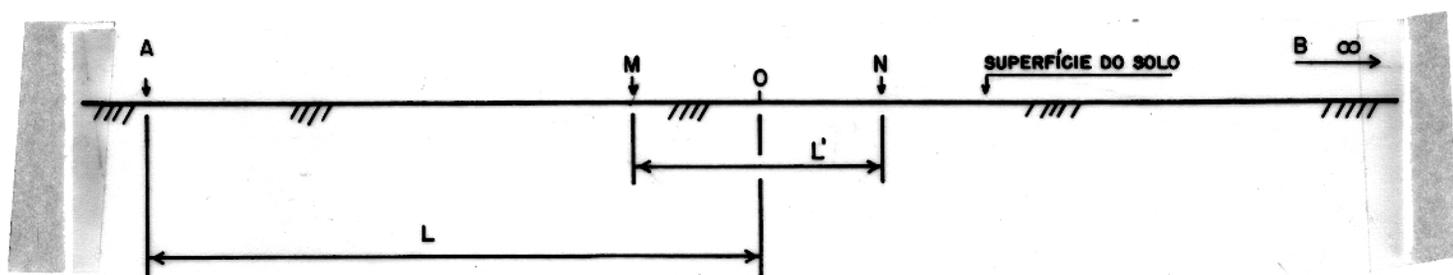


FIGURA 7 - Arranjo polo-dipolo (tripolo).

O arranjo polo-dipolo, também conhecido como tripolo, é constituído de três eletrodos móveis A, M e N, sendo que o eletrodo B é mantido fixo e situado a uma distância suficientemente grande para que seu efeito sobre os eletrodos de potencial M e N possa ser considerado desprezível. A profundidade de investigação aumenta com L e teoricamente corresponde a  $1/2 L$ . Nos levantamentos, L é variado progressivamente de uma distância normalmente igual a  $L'$  ( $L/L' = 3/2, 5/2, 7/2, \dots$ ).

A vantagem do dispositivo tripolo é que são apenas 3 eletrodos a serem deslocados ao longo do perfil. Este fato possibilita a instalação de ao menos um dos eletrodos de corrente com bom aterramento, diminuindo a resistência da linha de emissão RAB, permitindo a emissão de maior intensidade de corrente. Além disso, para uma mesma intensidade de corrente, o sinal  $\Delta V$  no tripolo é maior do que o dipolo-dipolo, facilitando uma maior relação sinal/ruído.

Por outro lado, devido a sua assimetria, torna-se mais difícil localizar perfeitamente a posição de massas mineralizadas com o arranjo tripolo.

### 1.6.1.2 Técnica do caminhamento

O caminhamento é caracterizado por tomada de leituras sobre uma linha, com uma única profundidade de investigação. Incluem-se aqui como arranjos mais utilizados o gradiente e o quadripolo simétrico.

O fato de os arranjos descritos a seguir serem simétricos, em casos de anomalias bem definidas, é possível quantificar dados de profundidade e mergulho bem como precisar a posição de um corpo polarizável com auxílio de ábacos.

O dispositivo retângulo (FIGURA 8) consiste de uma linha de emissão fixa  $AB = L$ , com medidas efetuadas entre os eletrodos  $M$  e  $N$ , os quais são deslocados sobre perfis paralelos a  $AB$ ; o deslocamento é comumente igual a  $n$  ( $= MN$ ).

A profundidade de investigação cresce com  $L$  e é sempre possível realizar vários retângulos simultaneamente superpostos com diferentes extensões de linha  $AB$ .

Geralmente, as estações de medida permanecem no interior de um retângulo central onde o centro coincide com o meio de  $AB$  e o lado menor não ultrapassa  $AB/2$  ou  $AB/3$  e a extensão do lado maior ou o número de perfis dependerá da intensidade do sinal que estiver sendo captado. Assume-se que na porção  $1/3$  central de  $AB$  o campo elétrico seja uniforme e não varie a profundidade investigada.

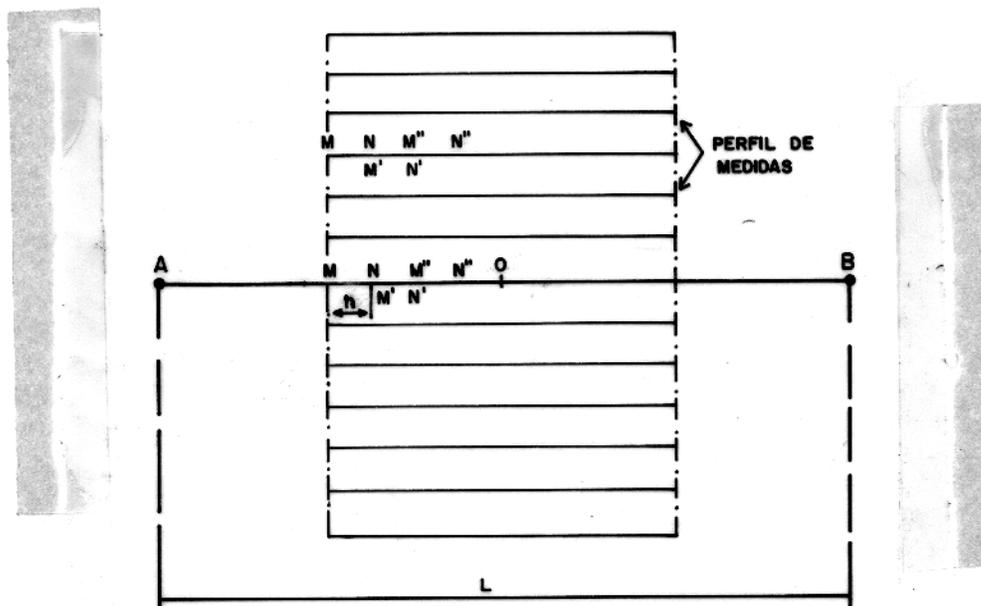


FIGURA 8 - arranjo retângulo (gradiente).

Em outro arranjo quadripolo simétrico, os eletrodos de recepção ou de potencial M e N são alinhados com os eletrodos de corrente A e B e possuem o mesmo centro O (ver FIGURA 9).

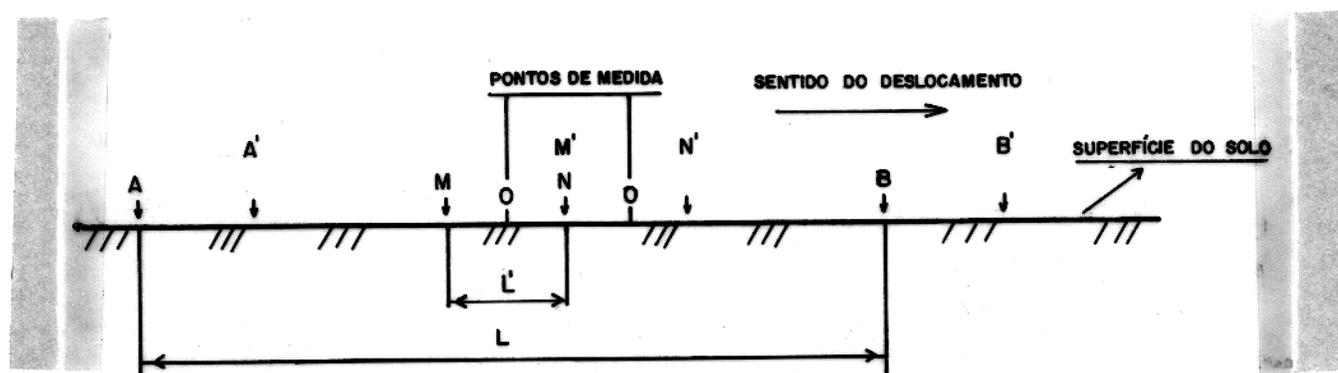


FIGURA 9 - Arranjo quadripolo simétrico (Schlumberger).

Este arranjo pode ser utilizado também para sondagem IP vertical. A profundidade investigada é função da abertura AB e varia de 1/4 a 1/10 de AB, dependendo das resistividade das camadas presentes.

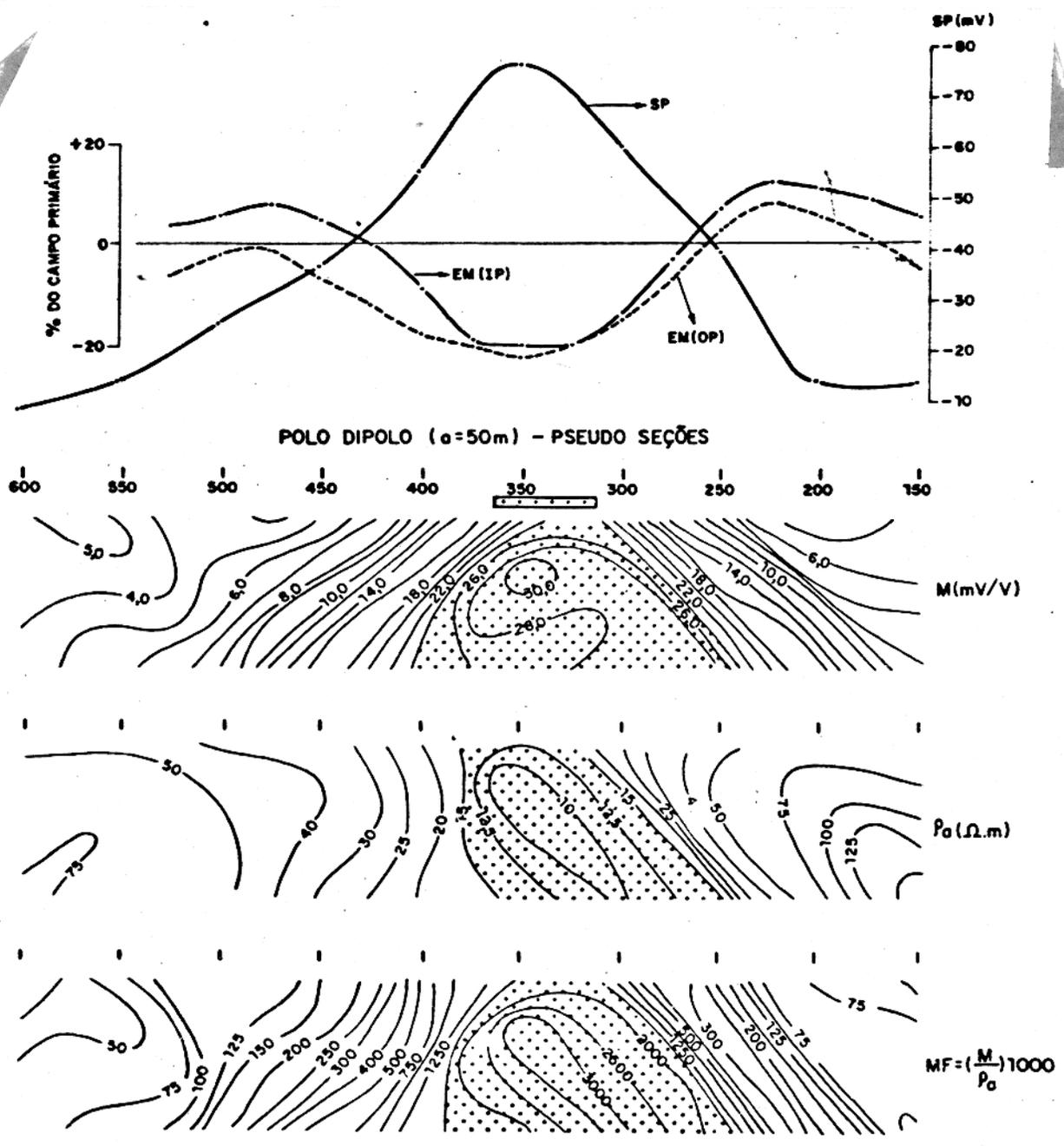
A FIGURA 9 que ilustra o princípio do método de eletrorresistividade ilustra também o arranjo Schlumberger para execução da sondagem-IP.

### 1.6.2 Apresentação dos dados

Em geral, os dados obtidos em um levantamento de polarização induzida são apresentados sob a forma pseudo-seções, perfis e ocasionalmente mapas.

As FIGURAS 10 e 11 a seguir mostram como os resultados podem ser apresentados. Estes dados foram obtidos em levantamentos reais realizados pelo IPT. Além da interpretação final que acompanha as pseudo-seções apresentadas, também são mostrados os dados referentes ao levantamento eletromagnético que também foi realizado. Os dados referentes ao levantamento eletromagnético (EM) são dados em percentagens do campo primário, para os componentes em fase (IP) e fora de fase (OP).

Os dados de levantamentos IP são normalmente apresentados na forma de pseudo-seções; assim chamadas porque o dados obtidos de diferentes níveis de investigação são os

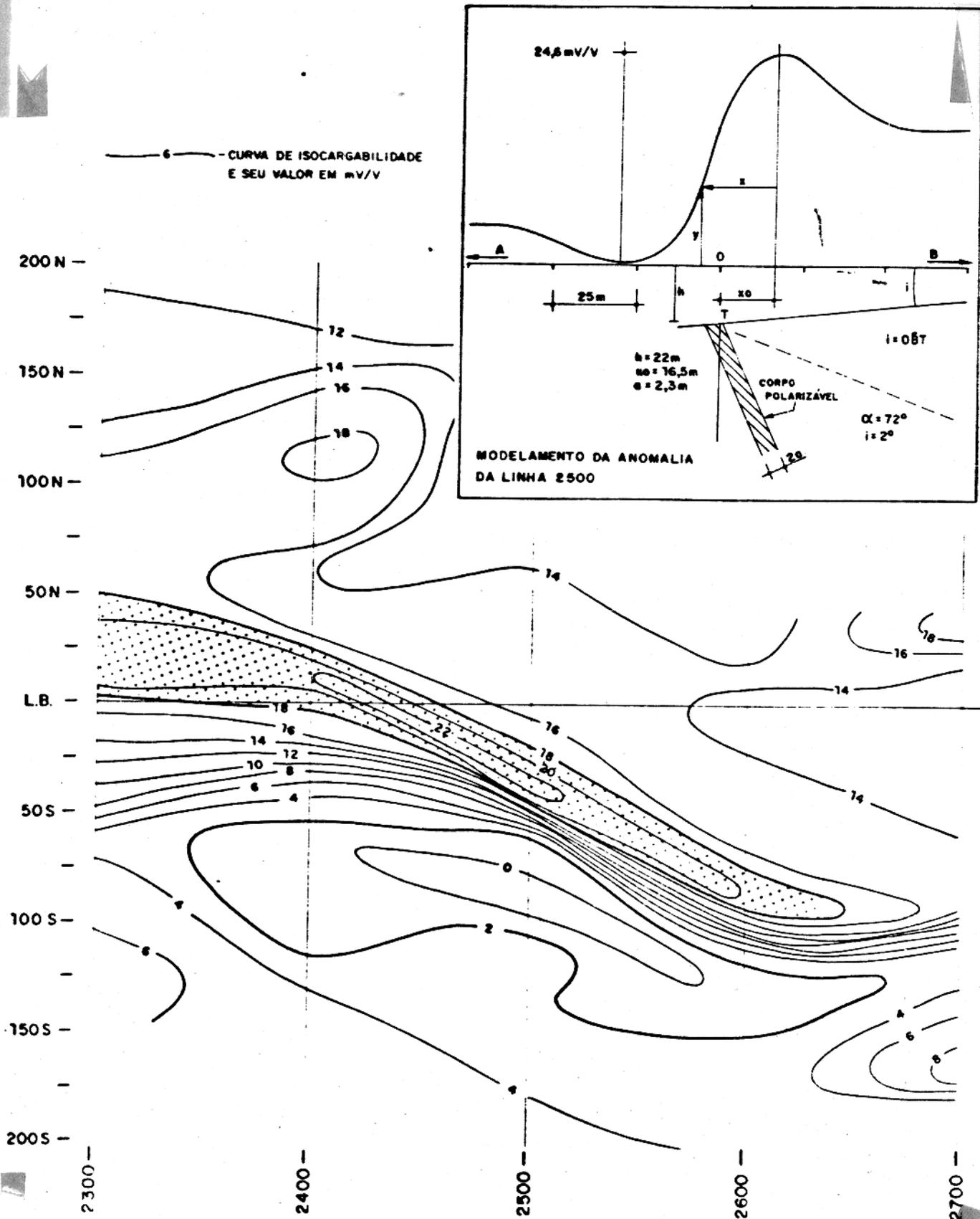


**LEGENDA**

- SP (mV) - POTENCIAL NATURAL EM MILIVOLTS
- EM (IP) - COMPONENTE E.M. "EM FASE"
- EM (OP) - COMPONENTE E.M. "EM QUADRATURA"
- M (mV/V) - CARGABILIDADE EM MILIVOLT POR VOLT
- $P_a$  ( $\Omega.m$ ) - RESISTIVIDADE APARENTE EM OHM.M
- MF - FATOR METAL

DADOS OBTIDOS PELO IPT  
EM PROSPECÇÃO DE SULFETOS  
NO ESTADO DA BAHIA.

FIGURA 10 - Pseudo-seções de polarização induzida resistividade aparente, fator metal e perfis eletromagnético e de potencial espontâneo.



DADOS OBTIDOS PELO IPT SOBRE UM CORPO DE SULFETOS METÁLICOS NA REGIÃO DE RIO CLARO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

FIGURA 11 - Apresentação dos dados para o arranjo gradiente.

valores aparentes tanto dos parâmetros IP como de resistividade e as profundidades dentro da seção vertical também são apenas qualitativas. Nos pseudo-seções do arranjo dipolo-dipolo os valores obtidos são plotados a  $45^\circ$  de O e O' (FIGURA 6), normalmente com 4 ou 5 níveis de investigação. No caso do arranjo polo-dipolo, os valores são plotados a  $45^\circ$  de A e M (FIGURA 7), também com 4 ou 5 níveis de investigação.

### 1.6.3 Interpretação

Na interpretação dos dados das pseudo-seções obtém-se informações qualitativas sobre a posição dos corpos polarizáveis e profundidade ao topo; mais raramente pode-se estimar o mergulho. Naturalmente, as informações são tão mais precisas quanto melhor seja a definição de uma anomalia IP.

A interpretação qualitativa e semi-quantitativa dos dados é feita de acordo com a experiência do intérprete, utilizando-se de ábacos e em alguns casos através do método de inversão. Os ábacos são baseados em resultados de modelamento digital ou analógico.

Normalmente, os ábacos usados para interpretação dos dados de IP e resistividade são construídos com base em modelos teóricos gerados através de programas computacionais. HALLOF (1970) construiu vários destes ábacos, onde podem ser observados modelos em diversas situações, que auxiliam na interpretação de dados reais. Estas situações e modelos são introduzidos no programa, onde têm-se as possibilidades de variar a geometria, profundidade, mergulho, espessura etc.. A partir daí, o programa gera a pseudo-seção IP e resistividade correspondente, construindo-se, assim, os ábacos.

No caso de modelamentos digitais, FOX et al. (1980) realizaram estudos sistemáticos para o caso do arranjo dipolo-dipolo. Neste trabalho, foram estudados os efeitos da topografia nos valores de resistividade aparente e IP observados nas pseudo-seções para o arranjo citado.

O programa computacional bi-dimensional (2-D) utilizado foi baseado em elementos finitos. Neste trabalho, os efeitos topográficos considerados foram casos de topografias com vales e morros, além de planos inclinados (aclives e

declives topográficos). Os resultados obtidos mostram que os valores de resistividade aparente e IP são afetados por irregularidades no terreno, devendo-se isso às variações causadas pela topografia nos espaçamentos eletródicos. Pela observação dos dados obtidos neste estudo, nota-se que o efeito da topografia é bem mais marcante nos dados de resistividade aparente que nos de IP.

A principal vantagem da técnica digital é a rapidez e precisão com que os dados são obtidos, uma vez pronto o programa. Por outro lado, existe a limitação de não ser possível, matematicamente, a simulação de situações geológicas complexas, o que não ocorre no caso de modelamento analógico.

### 1.7 Objetivos

O principal objetivo deste estudo é aferir-se no laboratório o grau de detectabilidade da Polarização Induzida frente às condições que se encontram os corpos mineralizados. Para tanto, foram simuladas variações no teor do conteúdo das partículas polarizáveis dos modelos, profundidade, direção do modelo em relação ao perfil e mergulho.

## 2. O MODELAMENTO ANALÓGICO

### 2.1 Introdução

O fenômeno de polarização induzida geralmente não é modelado diretamente. Entretanto, a diferença de resistividade medida nas frequências alta e baixa pode ser modelada analogicamente, variando-se o contraste de resistividade entre alvo e ambiente (fator de diluição), mantendo-se a frequência constante (PELTON et al., 1978). Desse modo, duas diferentes resistividades são medidas num mesmo local no modelo. O que acontece é que o potencial muda neste ponto devido à mudança no contraste de resistividades entre o alvo e o ambiente. Analogicamente, isto significa dois pontos na curva de decaimento do potencial. Assim, os 2 valores obtidos poderiam ser utilizados na fórmula análoga do IP para obter-se o efeito percentual de frequência.

### 2.2 Trabalhos anteriores

Comumente têm-se usado esponjas plásticas porosas com gelatina salgada imersas em água para simular os corpos mineralizados. Mudando-se o conteúdo de sal da gelatina obtém-se uma determinada escala de resistividade, bem como os contrastes que são obtidos (SUMNER, 1976; HALLOF, 1967). Neste caso, alvo e ambiente são condutores iônicos.

Também tem sido modelado o fenômeno IP usando-se argila ou areia como "back-ground" e amostras mineralizadas como corpos anômalos. Neste caso, a anomalia IP é observada diretamente (BERTIN & LOEB, 1976).

Se aceitarmos que o fenômeno IP é uma distribuição do fenômeno de polarização de eletrodo, então um bloco maciço será equivalente a um grande eletrodo (ZONGE et al., 1972). Entretanto, embora tenham sido registradas "anomalias" nos modelamentos, este modelo não simula e verdadeira polarização de eletrodo como seria observada no campo.

Semelhante situação ocorre quando são utilizados modelos de resina com grafita, modelos de cobre puro ou alumínio no modelamento direto para se reproduzir as razões de resistividade extremas exigidas pelo problema (AIKEN

et al., 1973).

O uso de folhas de papel também é uma outra técnica de modelamento físico. Corpos anômalos são pintados sobre o papel, com ouro, prata ou cobre. Através desse método podem ser estudados casos de meio-espaços em duas dimensões. Esta técnica é comumente utilizada para simular, o fluxo de fluidos em hidrogeologia. Medidas quantitativas feitas com esta técnica são, entretanto, irreais devido à variação na qualidade do papel, técnicas de medidas e outras causas.

### 2.2.1 Estudos mais recentes

A polarização induzida (IP) das rochas acontece em seu interior sobre a superfície dos grãos minerais. Este fenômeno pode ser descrito macroscopicamente com o auxílio de um modelo volumétrico de polarização.

O modelamento IP e de resistividade também é feito em laboratório submergindo-se um corpo metálico em um eletrólito em baixas frequências. Em um estudo recente GUPTASARMA (1983) trata a superfície de polarização de modelos metálicos submersos em solução eletrolítica e conclui que o modelamento de resistividade precisa ser feito em frequências suficientemente altas se a superfície de polarização ocorre sobre a superfície dos modelos.

Para entender-se as bases macroscópicas do fenômeno da polarização superficial foi desenvolvida uma teoria macroscópica (ESKOLA et al., 1984). Esta teoria é formulada por uma técnica de equação integral e resolvida numericamente. Basicamente se supõe que a resistividade do condutor eletrônico é no mínimo duas ordens de magnitude inferior que o eletrólito, no caso do condutor poder ser considerado um sistema equipotencial. Esta premissa é tida como realística para modelos nos quais a polarização superficial é o modo predominante de polarização (ESKOLA et al., 1984).

O problema é tratado de acordo com a teoria eletrostática, isto é, a indução eletromagnética é omitida. O método desenvolvido é aplicado em computação para anomalias resistivas para um modelo de polarização superficial.

Com o objetivo de ilustrar as diferenças entre o

modelo de polarização superficial e o modelo convencional geoeletrico de resistividade, deve-se considerar um corpo condutivo colocado em um ambiente condutor.

No caso do modelo resistivo (ou convencional) o corpo e suas vizinhanças estão em contato galvânico direto um com o outro. A corrente flui através deste contato criando uma superficie de distribuição de carga. A densidade de carga é proporcional ao produto da componente normal da densidade de corrente e o contraste de resistividade entre o corpo e o meio circundante. A polaridade da superficie de carga é dependente do sinal do contraste de resistividade. Assim, a superficie de distribuição de carga é, desse modo, a fonte de todo fenômeno potencial teórico no modelo resistivo.

No caso do modelo de polarização superficial o corpo está vinculado ao meio circundante por mais de uma impedância interfacial em sua superficie. Geralmente o corpo é altamente condutor em comparação com o meio circundante. Quando há o fluxo de corrente através deste contato, a corrente cria sobre a superficie, uma distribuição superficial de cargas e uma dupla camada elétrica. A densidade da superficie de carga é novamente proporcional ao produto da normal da densidade de corrente e da impedância superficial. A polaridade da dupla camada é de tal forma que a mesma impede o fluxo da corrente através da superficie.

Em altas frequências a impedância superficial é baixa. Então, a densidade da dupla camada elétrica também é baixa e a principal fonte do potencial secundário é a distribuição superficial de carga. Conseqüentemente, a anomalia de resistividade aparente correspondente ao condutor é formada. Dentro do escopo da teoria eletrostática esta anomalia é semelhante aquela causada por um condutor no "modelo resistivo". Com o decréscimo da frequência aumenta a densidade da dupla camada e decresce a densidade superficial de carga. Se a impedância superficial atingir valores superficialmente altos, a dupla camada chega a saturação e a superficie de carga tende a desaparecer. Como resultado, é formada uma anomalia resistiva do isolante. A fonte desta anomalia, entretanto, é a dupla camada elétrica, ao passo que no modelo resistivo a

distribuição superficial de carga é a origem da anomalia.

Isto explica o fato que as anomalias de polarização superficial não podem ser colocadas em escala como foi apontado por GUPTASARMA (1983). A dependência na escala é claramente manifestada no comportamento da "frequência característica" (frequência onde ocorre máxima anomalia de fase). Este fenômeno também foi observado em experimentos numéricos (ESKOLA et al., 1984).

O modelamento em escala de volume de polarização não deve ser feito nunca usando-se modelos de metal. As medidas de laboratório também têm mostrado que a intensa polarização superficial ocorre externamente em amostras compactas de minério (do tipo testemunho de sondagens), se ocorrerem inclusões grandes expostas na amostra, ocasionadas pela sondagem ou quando da serragem da amostra. O uso destas amostras como modelos em escala de corpos é questionável e precisam ser feitos arranjos adequados para serem usados nas medidas de laboratório do efeito IP. Se a corrente é levada através das superfícies externas das amostras, os efeitos IP observados são muito diferentes, dependendo de que modo as superfícies estão incluídas ou excluídas das medidas.

Por isso, GUPTASARMA (1983) recomenda a utilização de modelos volumétricos construídos com material poroso e polarizável para simular o alvo na solução condutiva no modelamento físico de IP em laboratório.

### 2.3 O fator de escala

Em modelamento, é necessário que seja estabelecida uma similaridade entre o modelo de laboratório e o corpo real. É preciso também estabelecer-se uma relação nas dimensões dos arranjos de emissão de corrente e recepções do sinal, relativamente às dimensões e profundidade do corpo modelado. A resistividade do corpo anômalo e/ou do "background" é mudada, criando-se desta maneira um contraste de resistividade global para um modelo análogo IP.

Um aspecto de real interesse deste princípio é a sua aplicação no caso da profundidade de investigação do método

IP. Ou seja, é possível estabelecer-se quase sempre um modelo em escala da razão do espaçamento eletródico para profundidade e geometrias de corpos em subsuperfície.

Outra observação de suma importância a ser feita é que o potencial elétrico é uma função linear da resistividade. Assim, se todas as resistividades do sistema são multiplicadas pelo mesmo fator de escala, do mesmo modo teremos a correspondente multiplicação do potencial por este mesmo fator de escala.

Diante do exposto, é possível referir-se a valores normalizados de IP e resistividade aparente de uma modelagem específica de uma estrutura subjacente e então, relacioná-los às suas correspondentes situações físicas reais através do fator de escala adequado. Este procedimento permite uma solução generalizada para uma geometria específica e que pode ser aplicada a muitas situações reais.

### 3. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introdução

A grande maioria das pesquisas em modelamento analógico de laboratório até hoje utilizou-se de modelos metálicos maciços, gelatinas e simulações de rochas com areia. As medidas feitas visavam a obtenção dos valores de resistividade em diferentes frequências para a partir daí calcularem-se os valores para o correspondente efeito IP.

Neste trabalho procurou-se simular no laboratório as condições que melhor reproduzissem as que se encontram na natureza. É claro que ainda assim estas condições artificiais são diferentes daquelas reais. Isto porque é praticamente impossível a fiel reprodução das condições de levantamentos práticos e das eventuais peculiaridades características inerentes a cada área de trabalho.

#### 3.2 Confeção de modelos

Com o objetivo de criar modelos de polarização volumétrica, inicialmente os modelos foram confeccionados em cerâmica com teores variáveis de pó de aço inoxidável. A cerâmica era constituída de argila caulinitica, caulim puro, talco e dolomita. Após feita a mistura da massa cerâmica com o teor desejado de pó de aço inoxidável e água, os modelos eram levados ao forno e queimados a 1100<sup>0</sup> C.

Não foi possível a utilização destes modelos porque descobriu-se que após a queima do modelo, o pó de aço inoxidável perdia suas características. A superfície do grão metálico oxidava-se, criando uma película isolante em volta do mesmo, o que inutilizava o modelo para os objetivos propostos.

A partir daí, utilizou-se uma matriz de quartzo finamente granular e cimento e substituindo-se o pó de aço pelo pó de grafita, que apresenta o fenômeno IP de maneira bastante intensa, semelhante à dos sulfetos metálicos.

Os modelos assim obtidos foram bastante satisfatórios, apresentando uma boa porosidade. A necessidade da porosidade, é com o objetivo da solução em que os modelos foram imersos, percolar e saturar o modelo. Havendo a

saturação - obtida por capilaridade - tem-se a certeza de que a solução entre em contato direto com as partículas polarizáveis, no caso, a grafita, obtendo-se assim um modelo de polarização volumétrica.

Os modelos feitos foram cilindros e placas. Para os cilindros os diâmetros escolhidos foram 3, a saber: 2,54 cm, 3,81 cm e 5,08 cm. O comprimento de 25 cm foi o mesmo para todos.

As placas foram quadrados de 20 cm de lado e espessuras de 2 e 3 cm.

Todos os modelos foram feitos contendo 3 teores diferentes de pó de grafita: de 10, 20 e 30%. O teor foi calculado sobre o volume total do modelo e não em peso.

### 3.3 O Tanque dos ensaios

GOUDSWAARD (1957) realizou experimentos sobre a influência do tipo de tanque utilizado em ensaios de laboratório para modelos geoeletricos. Ele conclui que as medidas só podem ser feitas na porção central do tanque, onde as equipotenciais do campo elétrico criado para as medidas são uniformes. Nas proximidades das paredes do tanque constata-se uma distorção do campo, o que inviabiliza as medidas nestas regiões.

No presente trabalho, foi construído um tanque de acrílico transparente com as seguintes dimensões internas: 90 cm de comprimento, 50 cm de largura e 50 cm de profundidade.

Devido à sensibilidade dos aparelhos utilizados para as medidas, foi necessário blindar eletrostaticamente o tanque, colocando-o sobre uma folha de alumínio. A referida folha foi aterrada, juntamente com todos os aparelhos utilizados em um ponto terra comum, com o objetivo de reduzir-se ao mínimo os ruídos presentes.

### 3.4 A solução utilizada

Para simular um meio homogêneo onde os modelos estariam imersos, utilizou-se de uma solução de água deionizada com  $\text{Cu SO}_4$ . Deve ser observado que concentração de  $\text{Cu SO}_4$  ou de qualquer outra substância é

extremamente crítica. Para chegar-se à concentração ideal, foi-se testando experimentalmente a concentração.

Este teste foi realizado através do ensaio de uma onda do tipo quadrada através dos eletrodos de corrente em contato com a solução. Isto foi feito através da técnica pulsante, ou seja: ON (+) = 2s, OFF = 2s, ON (-) = 2s, OFF = 2s, ON (+) = 2s.

Para se conseguir uma solução ideal para as medidas, é necessário que a forma da onda transmitida não sofra distorção e apresente estabilidade.

O comportamento da forma de onda foi monitorado sobre um resistor (4,7 k $\Omega$ ) colocado em série com a solução, à medida que se adicionava à água do tanque dos ensaios a solução concentrada de Cu SO<sub>4</sub> (60 g/L). A medida exata da concentração ideal foi obtida com o auxílio de uma pipeta graduada. Para isso, a cada pipetagem era registrado o comportamento da forma de onda.

Os registros obtidos são mostrados a seguir e ilustram de maneira bastante boa o comportamento da solução de acordo com a concentração de Cu SO<sub>4</sub>.

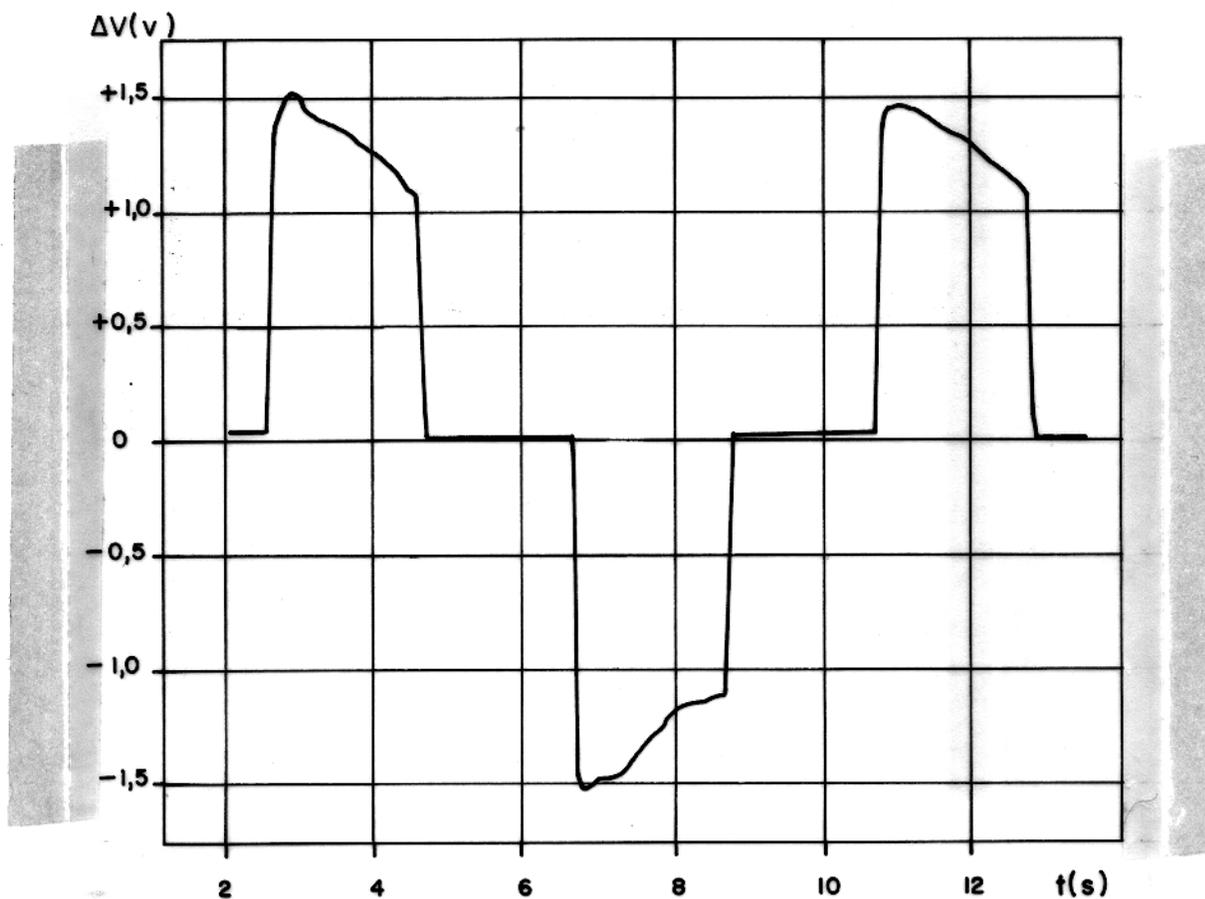
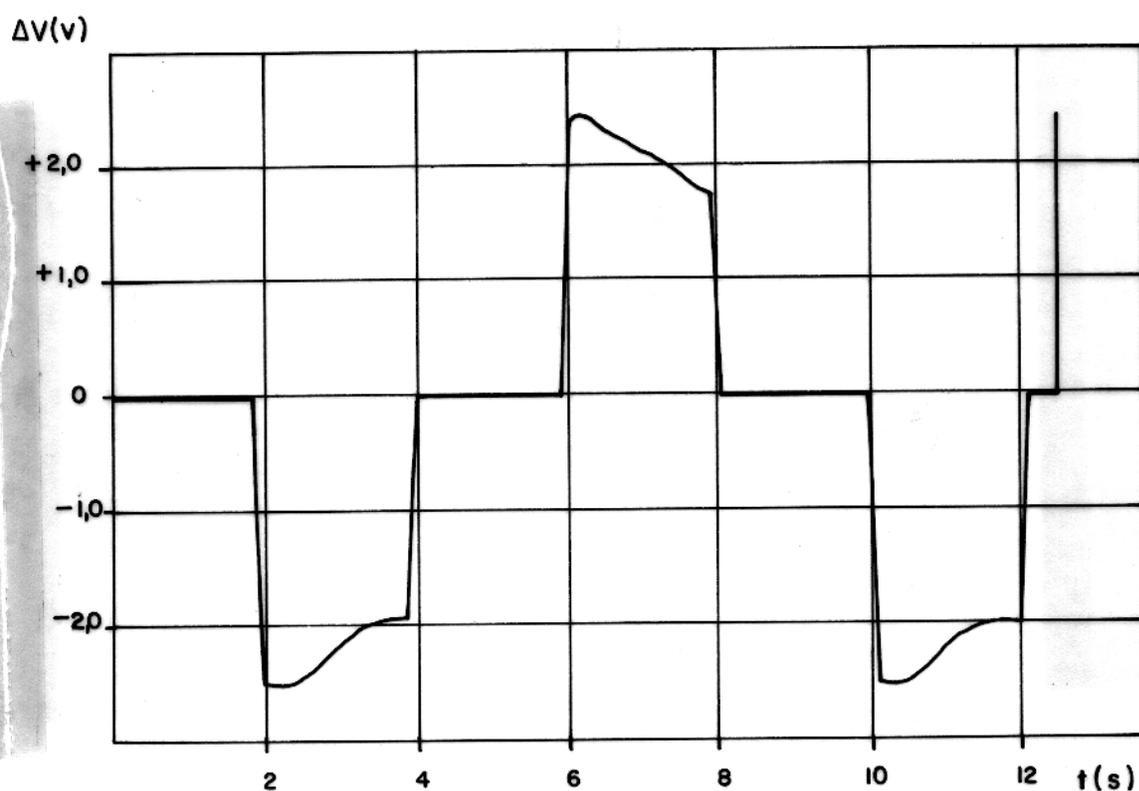
OBS.: 1) Foram feitos diversos registros. Aqui são apresentados apenas os iniciais e os finais, por questão de praticidade.

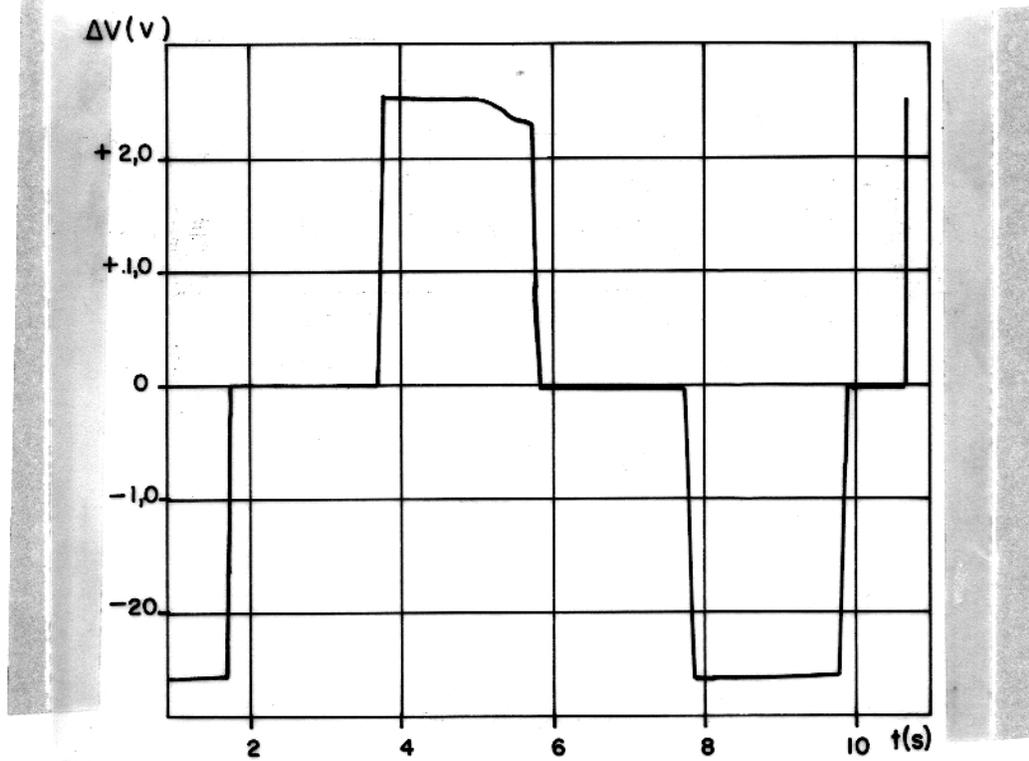
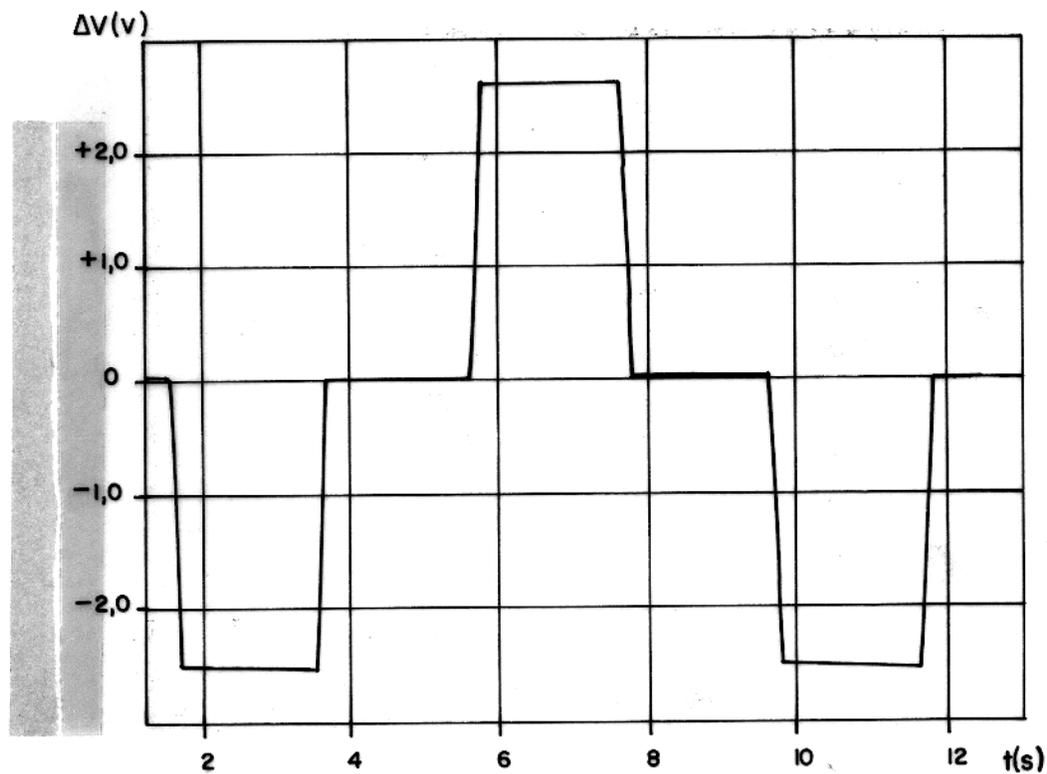
2) A resistividade da solução, para a forma de onda transmitida não distorcida foi de 1221  $\Omega$ .m.

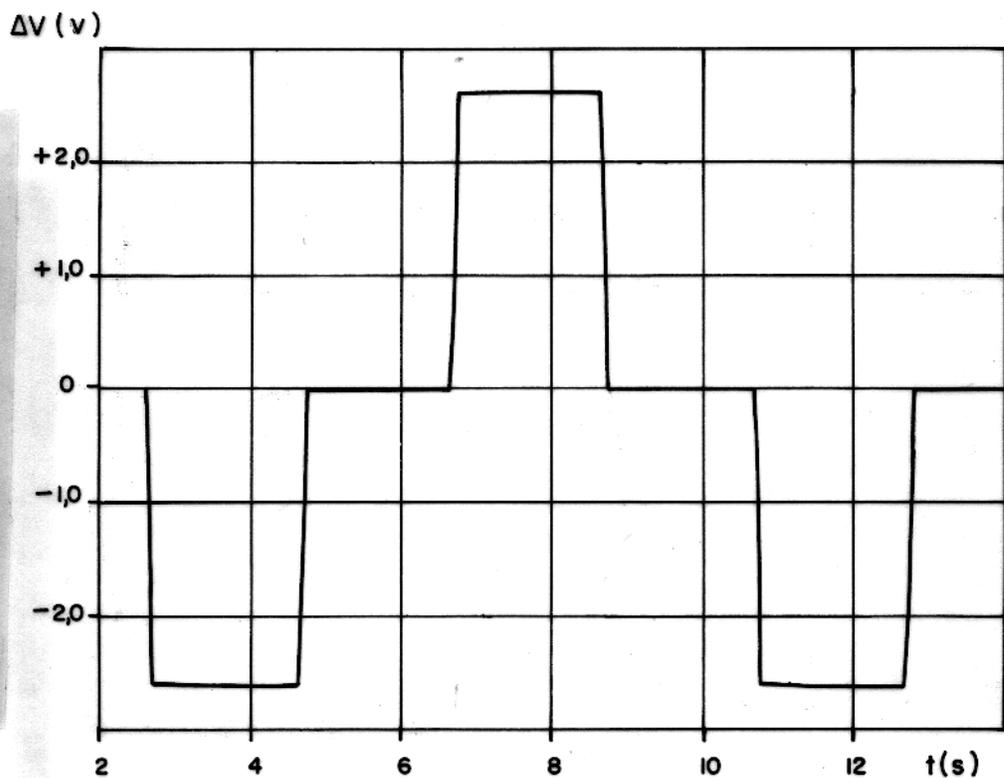
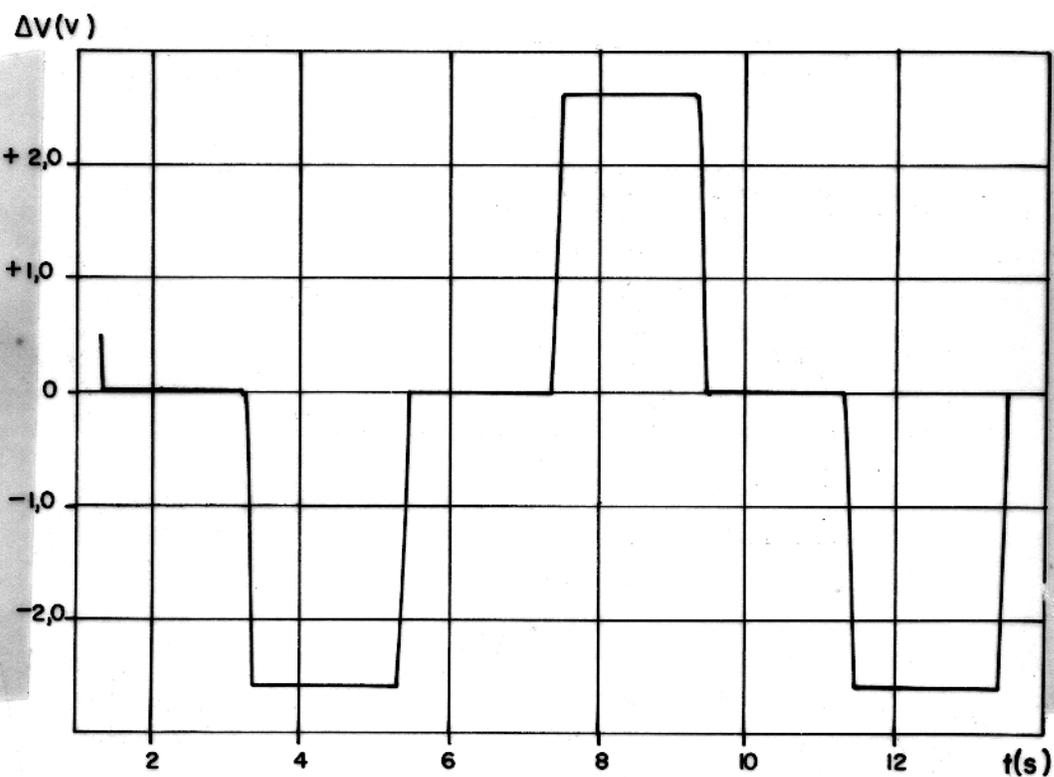
### 3.5 Tipos de eletrodos

A escolha do tipo de eletrodos é extremamente crítica. Para o envio de corrente na solução o eletrodo deve ser inerte quimicamente com relação à mesma. Por outro lado, os eletrodos de potencial, onde o sinal é captado, além de não poder existir nenhum tipo de reação química na interface solução/eletrodos, os mesmos também devem ser impolarizáveis.

Por isso, os eletrodos escolhidos para execução das medidas foram confeccionados em platina, os quais comportam-se de maneira satisfatória.

FIGURA 12 - Concentração de  $3,16 \times 10^{-5}$  g/L.FIGURA 13 - Concentração de  $6,32 \times 10^{-5}$  g/L.

FIGURA 14 - Concentração de  $9,48 \times 10^{-5}$  g/LFIGURA 15 - Concentração de  $1,06 \times 10^{-4}$  g/L.

FIGURA 16 - Concentração de  $2,34 \times 10^{-4}$  g/L.FIGURA 17 - Concentração de  $2,55 \times 10^{-4}$  g/L.

### 3.6 Equipamentos utilizados

O diagrama de blocos abaixo mostra a disposição esquemática dos diferentes equipamentos que foram necessários para a obtenção das medidas.

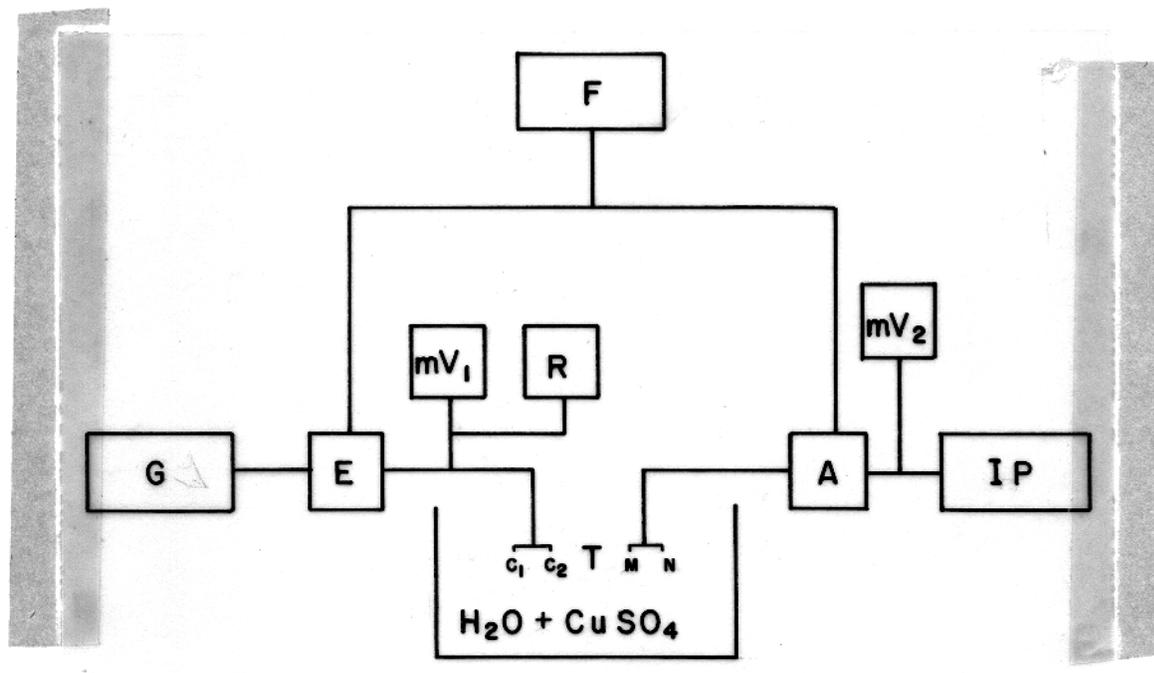


FIGURA 18 - Diagrama de blocos.

onde: G = gerador de funções

E = circuito estabilizador de corrente

m V<sub>1</sub> = milivoltímetro 1

m V<sub>2</sub> = milivoltímetro 2

R = registrador

F = fonte dupla simétrica 18 V

A = pré-amplificador de alta impedância de entrada

IP = receptor IP

T = tanque de medidas

C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub> = eletrodos de corrente

M e N = eletrodos de potencial.

#### 3.6.1 Sistema de transmissão

Esse sistema consiste de um gerador de funções, um estabilizador de corrente e um milivoltímetro seguido de um registrador.

A forma de onda comumente empregada em IP no domínio da frequência é a onda quadrada, simplesmente por que esta é facilmente criada por componentes de estado sólido. É bem conhecido que a onda quadrada contém o harmônico fundamental e seus harmônicos ímpares, tendo cada harmônico uma amplitude inversamente proporcional à sua ordem. Sempre tem sido possível usar alguns destes vários componentes frequenciais transmitidos simultaneamente para se obter a informação IP desejada.

Foi utilizado um gerador de funções marca Robotron, de fabricação alemã oriental. A forma de onda gerada pelo instrumento foi a onda quadrada, com amplitude do sinal de +2,4 V a -2,4 V, a uma frequência de 3 Hz, ON+; ON-; ON+; ON-...

Uma das premissas básicas para se obter medidas confiáveis, é a necessidade de se trabalhar em regime de corrente constante. Para tanto, construiu-se um circuito estabilizador de corrente, utilizando-se 3 amplificadores operacionais CA 741 (FIGURA 19).

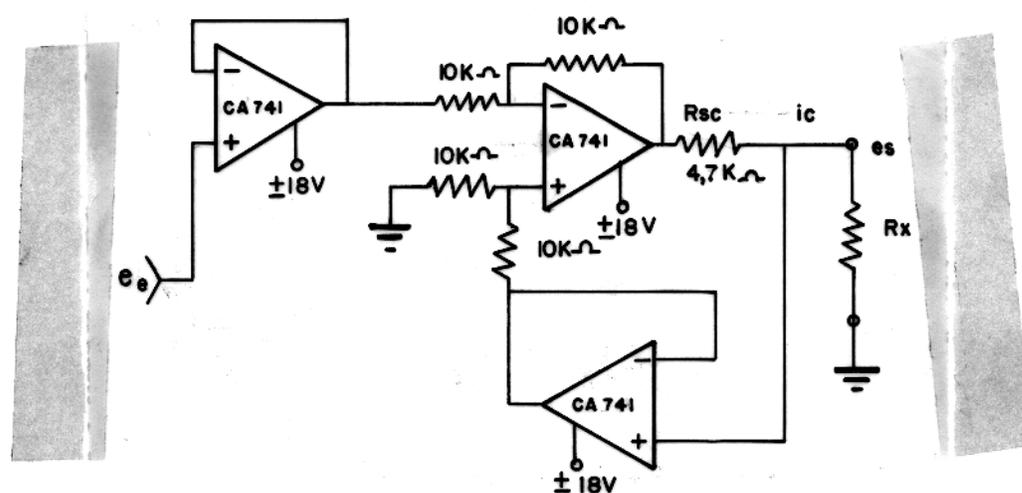


FIGURA 19 - Diagrama do Circuito estabilizador de corrente.

LEGENDA:  $R_x$  = Resistência representativa da solução de  $Cu SO_4$

$i_c$  = Corrente no líquido (Cte.)

$e_e$  = Tensão de entrada (vem do ger. de função)

$e_s$  = Tensão de saída (acompanha  $e_i$ )

$R_{sc} = 4,7 \text{ k}\Omega$

O resistor de  $4,7\text{ K}\Omega$  visto na FIGURA 19 é o que governa a estabilidade da corrente, pois o mesmo está em série com a solução.

Através do milivoltímetro  $mV_1$  e do registrador R mostrados na FIGURA 18, é que foram feitas as medidas sobre o resistor  $4,7\text{ K}\Omega$ , para se obter os registros de estabilidade do sinal circulante na solução, conforme mostrado nas FIGURAS 13 a 17. O milivoltímetro  $mV_1$ , na realidade, é para verificar a todo instante se o sinal de saída do estabilizador realmente comporta-se de maneira simétrica.

### 3.6.2 Sistema de recepção das medidas

O instrumento utilizado neste trabalho foi o modelo IPRF-2 de fabricação Scintrex, que realiza as medidas do Efeito Percentual de Frequência, Deslocamento Relativo de Fase e Diferença de Potencial. Este equipamento é o mesmo utilizado em levantamentos IP no campo.

O equipamento não pode simplesmente ser utilizado em laboratório, porque as condições encontradas diferem bastante daquelas existentes na natureza. No campo, a resistência de contato entre os eletrodos de medida, normalmente é baixa (geralmente menor que  $15\text{ K}\Omega$ ). Já em condições de laboratório esta resistência é maior, uma vez que os eletrodos utilizados tem uma superfície de contato com a solução extremamente pequena. Como esta superfície de contato deve ser a menor possível em virtude da precisão das medidas, a solução é aumentar a impedância de entrada do IPRF-2, através de um pré-amplificador de alta impedância de entrada.

O pré-amplificador foi construído utilizando-se amplificadores operacionais do tipo CA-3140, obtendo-se uma impedância de entrada de  $10^{12}$  Ohms.

Como pode ser visto na FIGURA 20, a resistência variável (trimpot) de  $10\text{ k}\Omega$ , trata-se de um ajuste do nível zero para controle de deriva instrumental e da própria solução. Foi feito um registro desta deriva, conforme é visto na FIGURA 21.

A utilidade da resistência variável citada acima é para a correção desta deriva, que é verificada a cada medida através do milivoltímetro  $mV_2$ . Assim, toda vez que é

feita uma medida, é preciso estabelecer novamente a simetria da onda quadrada que se desloca do nível de zero.

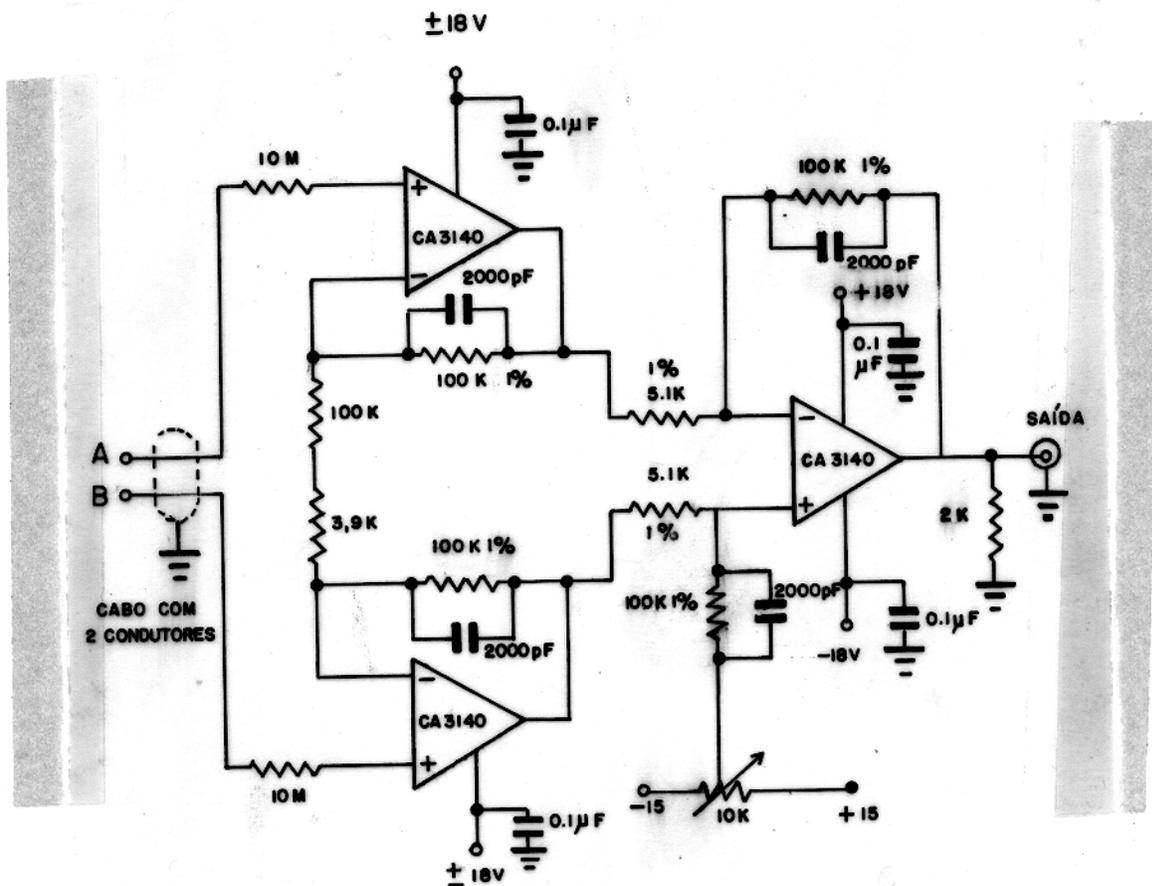


FIGURA 20 - Diagrama do circuito pré-amplificador com alta impedância de entrada.

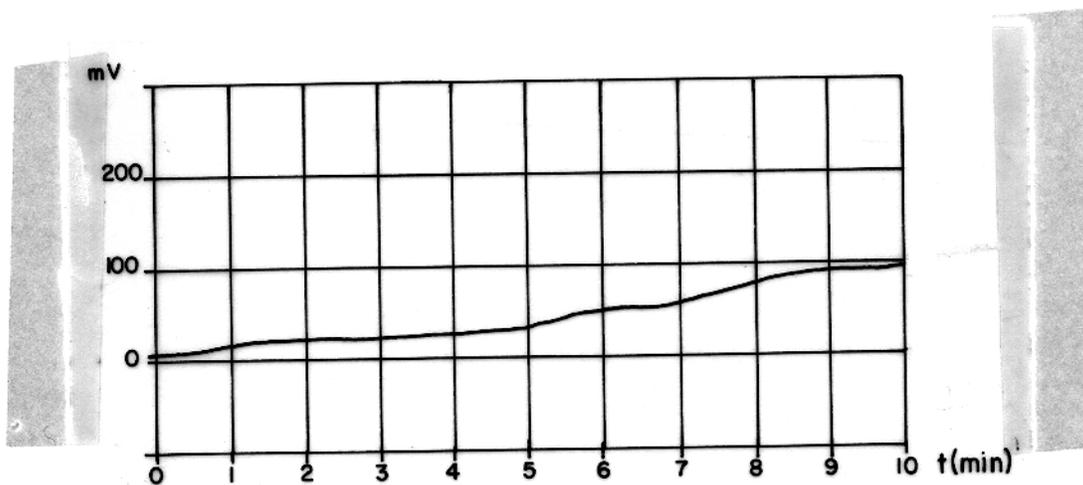


FIGURA 21 - Registro do controle de deriva.

### 3.6.2.1 Medida de PFE

A maneira comumente usada para se obter as medidas no IP domínio da frequência é aquela que vincula a comparação de resistividades do meio investigado entre duas frequências bastante espaçadas. Estas comparações na realidade requerem 4 medidas, duas de corrente e duas de voltagem, usando-se uma transmissão seqüencial de corrente em duas frequências. Normalmente uma fonte de geração de corrente constante é empregada, a qual, dentro de certos limites de variação de carga, mantém constante o fluxo de corrente no meio investigado.

### 3.6.2.2 Medida de fase

Mais recentemente, uma segunda medida no IP domínio da frequência tem sido utilizada, que é o ângulo de fase entre as voltagens medidas no solo e a corrente primária. As publicações de ZONGE & WYNN (1975), HALLOF (1974) e SEIGEL (1974), entre outros, mostram a equivalência geral da medida do ângulo de fase em uma frequência específica no intervalo IP com o PFE obtido sobre duas frequências deste intervalo.

Uma das vantagens das medidas de ângulo de fase é a de ser necessária somente a transmissão de uma única frequência e não de duas frequências em seqüência como no caso das medidas de PFE. Também a necessidade de uma rígida manutenção de corrente constante é eliminada.

Por outro lado, também existem as desvantagens. Em primeiro lugar exige-se a necessidade de se obter uma referência de tempo ou de fase. Isto pode ser obtido de duas maneiras. A primeira seria a rádiotransmissão de uma referência de fase e a segunda, mais comum, seria através do uso de dois cristais iguais e sincronizados. No primeiro caso existem os problemas usuais vinculados ao rádio, isto é, problemas com blindagens e licença para transmissão. O último sistema parece o melhor, apesar da necessidade de instrumentação adicional e sincronização periódica de tempos em tempos para casos de alta precisão.

O segundo problema inerente às medidas de ângulo de fase é que estas são mais suscetíveis aos efeitos de indução

EM (eletromagnética) que as medidas equivalentes PFE, porque as medições de ângulo de fase são de quadratura (fora-de-fase) enquanto que o PFE as medidas são de amplitudes (principalmente em fase). No caso de levantamento IP em áreas que apresentam formações superficiais ou próximas da superfície que tenham condutividade de moderada a alta, os efeitos de indução eletromagnética podem tornar-se consideráveis.

Para remover estes efeitos EM dos dados observados de ângulo de fase e obter-se a real contribuição do efeito IP, tem sido proposto em vários trabalhos, que as medidas de ângulo de fase sejam feitas em duas ou mais frequências (HALLOF, 1974; e WYNN and ZONGE, 1975). Neste caso, haveria a necessidade de transmissão de correntes em no mínimo duas frequências bastante espaçadas e retorna-se aos mesmos requisitos das medidas de PFE.

### 3.7 Os dados medidos

Os dados medidos são na forma de perfis de  $V_p$ , PFE e RPS, onde

$V_p$  = voltagem primária (em milivolts)

PFE = efeito percentual de frequência (em %)

RPS = deslocamento de fase relativo (em graus).

e

$$PFE = \frac{A_1 - 3A_3}{3A_3} \times 100\%$$

onde  $A_1$  e  $A_3$  são as amplitudes do fundamental e 3º harmônico do sinal recebido, respectivamente.

$$RPS = 3\phi_1 - \phi_3$$

onde  $\phi_1$  é o ângulo de fase da voltagem medida no harmônico fundamental e  $\phi_3$  é o ângulo de fase da voltagem medida no 3º harmônico, relativos aos componentes transmitidos pela corrente.

Um esclarecimento a ser feito é quanto à opção de serem plotados os valores brutos de  $V_p$ , quando poderia ser feita

a plotagem sob a forma de resistividade. O que ocorre, é que não se dispunha de um equipamento de precisão que pudesse medir a corrente transmitida - na frequência de 3 Hz. O valor da resistividade da solução citado anteriormente ( $1221\Omega .m.$ ) foi calculado para um pulso de corrente de 2s (equivalente a uma frequência de 0,125 Hz).

De qualquer modo, os valores de  $V_p$  obtidos devem ser diretamente proporcionais aos valores de resistividade aparente que seriam obtidos nos pontos correspondentes, considerando que se trabalhou sempre em regime de corrente constante.

### 3.8 O comportamento da solução

Os primeiros perfis, mostrados na FIGURA 22, foram um teste para verificação da constância dos parâmetros a serem medidos. Como mostram os perfis, a uniformidade da solução e dos equipamentos utilizados é bastante boa.

Os valores de PFE medidos apresentam uma variação mínima, que oscila entre -2,6 e -3,0%, o que pode se considerado o "background" da solução.

Os valores de RPS também praticamente não apresentam variação, ficando entre -0,8 e -0,4 graus.

No caso das medidas de  $V_p$ , também os valores observados apresentam uma oscilação mínima, ficando entre 1650 e 1700 mV.

A análise destes resultados permite afirmar que o comportamento da solução é estável e as pequenas variações observadas não devem ter influência significativa nas medidas na presença dos modelos.

## VERIFICACAO DA UNIFORMIDADE DA SOLUCAO

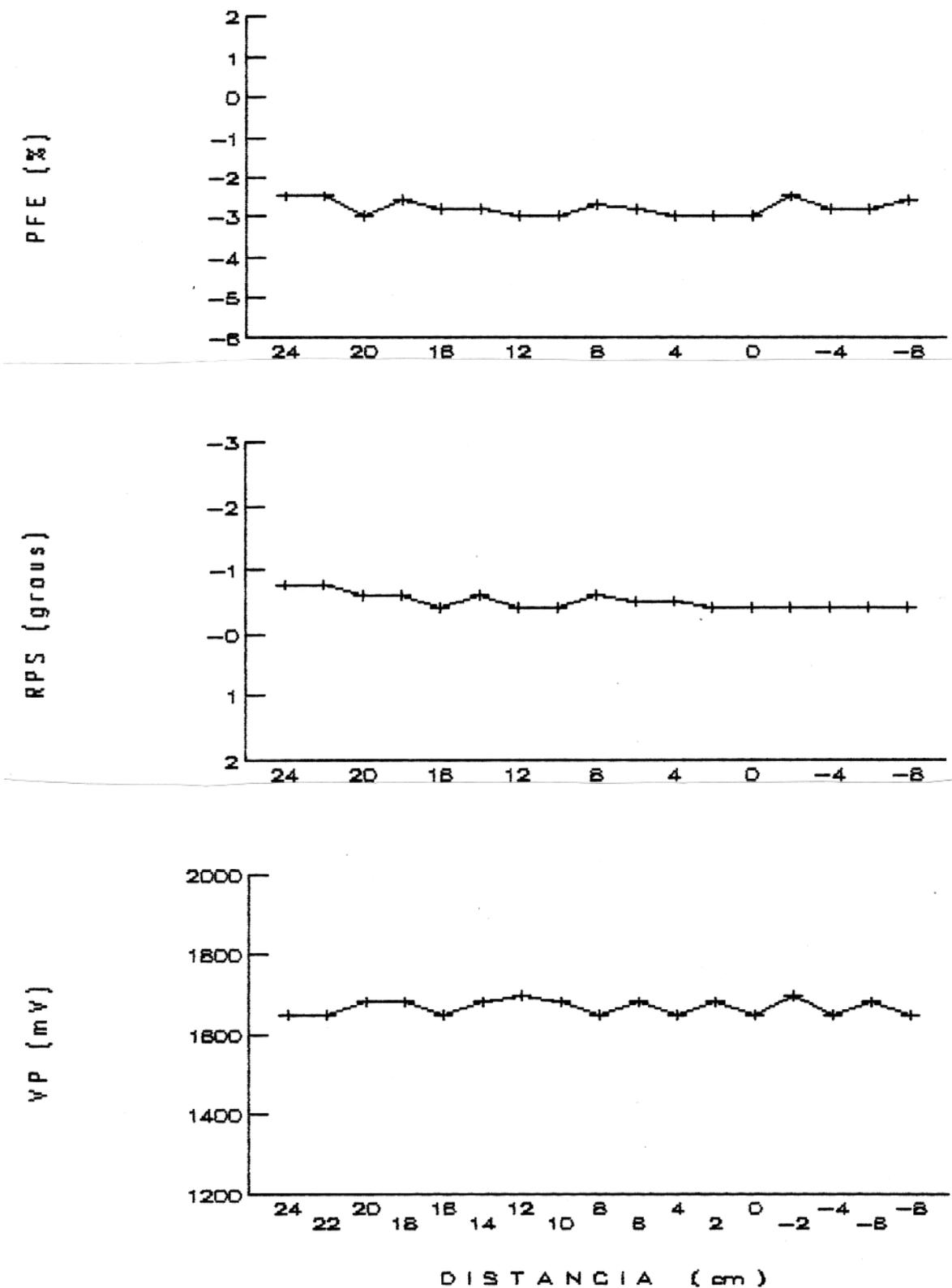


FIGURA 22

## 4 DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Comparação com trabalhos anteriores

HALLOF (1970), construiu ábacos de resistividade aparente e IP para modelos tabulares. Este autor utilizou-se de programas computacionais para gerar estes ábacos, diferentemente deste trabalho, onde o modelamento é analógico. A semelhança entre aquele e este trabalho consiste nas situações simuladas, onde estudou-se o comportamento da resposta IP e de resistividade aparente dos modelos frente à situações de variação de teores, dimensões, profundidade, mergulho e orientação.

MAJUMDAR & DATTA (1981) e MAJUMDAR (1985) também realizaram testes de modelamento analógico IP em laboratório. Estes autores modelaram corpos tabulares com o objetivo de simular o comportamento de um dique estreito e mineralizado. A metodologia utilizada por estes autores é bastante semelhante àquela que foi utilizada no presente estudo. A principal diferença consiste no tipo de modelo utilizado por estes autores, que foi construído com uma mistura de grafita e poliéster. Este tipo de modelo, provavelmente não é poroso, o que poderia representar um efeito de polarização apenas na superfície dos modelos (GUPTASARMA, 1983), ao invés de volumétrica, que é o objetivo do presente trabalho.

### 4.2 Apresentação dos resultados

Os perfis medidos foram feitos com o arranjo dipolo-dipolo, mesmo porque com as dimensões do tanque utilizado, torna-se inexequível o arranjo polo-dipolo. A título de ilustração e comparação, também foram feitas algumas medidas com o arranjo Wenner.

O espaçamento eletródico utilizado foi de 2 cm, a saber:

- a) Arranjo dipolo-dipolo:  $AB = MN = 2,0 \text{ cm}$
- b) Arranjo Wenner:  $AM = MN = NB = 2,0 \text{ cm}$ .

Os perfis, de modo geral, foram feitos normalmente à direção dos modelos variando-se a profundidade dos mesmos, dimensões e teor em grafita. Nos modelos que apresentaram anomalias mais intensas, também foram feitos perfis onde eram mudadas as inclinações dos mesmos com relação ao perfil e também o ângulo de mergulho.

Foram apresentados perfis sobre corpos tabulares e cilíndricos, variando-se a profundidade, direção do "strike" e inclinação dos corpos tabulares. Variou-se também as dimensões dos modelos e concentração do pó de grafita. As profundidades indicadas referem-se à profundidade ao topo dos modelos.

A apresentação dos perfis foi organizada em dois grupos:

a) Cilindros horizontais

a.a) Estudo da variação de teores;  $\phi = 90^\circ$

DIAMETRO (cm)	PROFUNDIDADE (cm)	TEORES (%)
2,54	0,5	10; 20; 30
2,54	1,0	10; 20; 30
2,54	2,0	- ; - ; 30
3,81	0,5	10; 20; 30
3,81	1,0	10; 20; 30
3,81	2,0	- ; - ; 30
5,08	0,5	10; 20; 30
5,08	1,0	10; 20; 30
5,08	1,5	- ; 20; 30
5,08	2,0	- ; 20; 30
5,08	2,5	- ; 20; 30

a.b) Estudo variando-se a direção;  $\phi =$  variável.

DIAMETRO (cm)	PROFUNDIDADE (cm)	TEORES (%)	(GRAUS) $\phi$
2,54	0,5	30	30; 45; 90
3,81	0,5	30	30; 45; 90
5,08	0,5	30	30; 45; 90

a.c) Estudo com arranjo Wenner;  $\phi = 90^\circ$

DIAMETRO (cm) -	PROFUNDIDADE (cm)	TEORES (%)
3,81	0,5	30
5,08	0,5	10; 20

b) Modelos tabulares

b.a) Estudo da variação de teores;  $\phi = 90^\circ$

ESPESSURA (cm)	PROFUNDIDADE (cm)	TEORES (%)
2,0	0,5	10; 20; 30
2,0	1,0	10; 20; 30
2,0	1,5	10; 20; 30
2,0	2,0	- ; - ; 30
3,0	0,5	10; 20; 30
3,0	1,0	10; 20; 30
3,0	1,5	- ; 20; 30
3,0	2,0	- ; 20; 30
3,0	3,0	- ; - ; 30

b.b) Estudo variando-se o mergulho;  $\theta =$  variável

ESPESSURA (cm)	PROFUNDIDADE (cm)	TEOR (%)	(GRAUS) $\theta$
2,0	0,5	30	30; 45; 90
3,0	0,5	30	30; 45; 90

b.c) Estudo variando-se a direção;  $\phi =$  variável

ESPESSURA (cm)	PROFUNDIDADE (cm)	TEOR (%)	(GRAUS) $\phi$
3,0	0,5	30	30; 45; 90

onde  $\theta =$  mergulho do corpo (ângulo com a vertical)

$\phi =$  ângulo formado entre a orientação do corpo e o perfil de medidas.

- = dados não incluídos por estarem no limite de detecção, não detectáveis, desconsiderados ou medida não realizada.

## 4.2.1 Os modelos cilíndricos (horizontais)

### 4.2.1.1 Efeito da variação do teor

Neste item são apresentados os resultados obtidos variando-se o teor em grafita dos modelos e também a profundidade em que os mesmos foram colocados. As FIGURAS 23 a 25 referem-se aos modelos cilíndricos horizontais com diâmetro de 2,54 cm.

No caso do cilindro com teor de 10% de grafita, verifica-se que a uma profundidade de 0,5 cm a pequena anomalia de PFE verificada (FIGURA 23) está praticamente dentro do nível de ruído verificado na solução, o que coloca em dúvida a detectabilidade deste modelo nestas condições. Estas considerações também podem ser estendidas para o perfil de RPS, que se apresenta da mesma maneira. Já no perfil de  $V_p$ , apesar da pequena amplitude, a anomalia é perfeitamente detectável. Ao aumentar-se a profundidade para 1,0 cm (FIGURA 24), não há anomalias de PFE e RPS, mas ainda há detecção pelo perfil de  $V_p$ , com uma amplitude menor, porém mais simétrica. Quando o teor do cilindro é de 20%, verifica-se que o mesmo é fracamente detectável pelo parâmetro RPS na profundidade de 0,5 cm (FIGURA 23). A 1,0 cm de profundidade (FIGURA 24), este parâmetro praticamente não apresenta anomalia, mas neste caso, há o registro de valores anômalos no parâmetro PFE. Novamente o modelo é bem marcado pelos perfis  $V_p$ , diminuindo a amplitude dos valores anômalos com a profundidade.

No caso do teor em grafita de 30%, o modelo é detectável pelo perfil kde PFE nas profundidades de 0,5 cm, 1,0 cm e 2,0 cm (FIGURA 23, 24 e 25), diminuindo a amplitude das anomalias com a profundidade. Um fato interessante verificado foi um valor de pico negativo de PFE precisamente sobre o centro do corpo na profundidade de 0,5 cm.

O fenômeno IP negativo é explicado pela inversão de linhas de correntes na presença de corpos condutores (SUMNER, 1976).

Nos perfis de RPS o modelo é detectado nas três profundidades investigadas (0,5; 1,0 e 2,0 cm), decrescendo a amplitude da anomalia com a profundidade. Também nos valores de  $V_p$  é marcada a presença do modelo, igualmente decrescente com a profundidade.

As FIGURAS 26 a 28 referem-se aos cilindros com 3,81 cm de diâmetro.

No caso do conteúdo em volume de grafita de 10%, praticamente o modelo não é detectado pelos parâmetros PFE e RPS nas profundidades de 0,5 e 1,0 cm (FIGURAS 26 e 27). Já no perfil Vp, a marcação é perfeita para estas profundidades, diminuindo sua amplitude como no caso dos cilindros de 2,54 cm.

Com os modelos cilíndricos com teor de 20%, na profundidade de 0,5 cm não são observados valores anômalos de PFE, porém, com 1,0 cm de profundidade há a presença de um pequeno pico anômalo exatamente sobre o centro do corpo. Os perfis de RPS e PFE mostram as mesmas características anteriores, decrescendo a amplitude das anomalias com a profundidade.

Com o teor de 30%, as FIGURAS 26, 27 e 28 (0,5; 1,0; 2,0 cm de profundidade) apresentam valores anômalos de PFE, RPS e Vp sobre os modelos, à exceção do perfil de PFE para a profundidade de 2,0 cm (FIGURA 28). Como já era de se esperar, as amplitudes dos valores anômalos diminuem com a profundidade. Também aqui foi observado o valor de pico negativo de PFE sobre o centro do cilindro.

As FIGURAS 29 a 33 referem-se aos resultados obtidos para os modelos cilíndricos de 5,08 cm e teores de 10, 20 e 30% de grafita.

Nas FIGURAS 29 e 30 são mostrados os perfis para as profundidades de 0,5 e 1,0 cm. Não se observam anomalias de PFE e RPS no teor de 10% para estas profundidades. Já no perfil Vp consegue-se visualizar baixos de Vp que decrescem com a profundidade.

No caso do teor de 20%, percebe-se a detectabilidade do modelo nos perfis de PFE e RPS para as profundidades de 0,5 e 1,0 cm. A partir daí, o modelo só é detectado com segurança no perfil Vp. Neste teor, foram investigados 4 níveis de profundidade (0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm), sempre decrescendo o valor da amplitude com a profundidade (FIGURAS 29, 30, 31 e 32).

A análise dos perfis com cilindros a 30% de teor (FIGURAS 29 a 33), mostra que os mesmos são detectáveis até a profundidade de 1,5 cm pelo parâmetro PFE. Já o parâmetro RPS

consegue detectar o modelo até a profundidade de 2,0 cm. O parâmetro Vp detecta o modelo até a última profundidade investigada, que foi de 2,5 cm (FIGURA 33).

#### 4.2.1.2 Efeito da variação no diâmetro

A FIGURA 34 mostra os resultados obtidos variando-se o diâmetro do modelo cilíndrico horizontal e mantendo-se fixos o teor (30% de grafita) e a profundidade ao topo do modelo (0,5 cm).

O perfil de PFE mostra que o efeito de pico negativo sobre o ponto 00 (centro do modelo no perfil de medidas) está presente nos modelos de diâmetros menores (2,54 e 3,81 cm) e ausente no diâmetro maior (5,08 cm).

O perfil de RPS para o diâmetro de 5,08 cm é o que apresenta o maior valor de pico. O diâmetro de 3,81 apresenta uma forma de anomalia um pouco semelhante à de maior diâmetro, porém com os valores laterais aos picos maiores que os verificados para o diâmetro 5,08 cm. Já para o diâmetro 2,54 cm, a forma da anomalia RPS medida difere das anteriores. Neste caso, o valor de pico não se situa entre 2 valores altos intermediários e sim antecedendo-se a 2 valores altos, formando uma série de 3 valores decrescentes.

Os perfis de Vp são semelhantes entre si, mas observa-se que o maior diâmetro apresenta um valor de pico um pouco menor e que os menores diâmetros apresentam pequenos picos laterais à anomalia nos perfis e que são maiores do que para o diâmetro 5,08 cm.

#### 4.2.1.3 Efeito da variação da profundidade

As FIGURAS 35, 36 e 37 mostram o efeito que o aumento da profundidade provoca nos perfis de medidas. Aqui são apresentadas conjuntamente três perfis correspondentes a diferentes profundidades do modelo nas medidas de PFE, RPS e Vp. As figuras referidas tratam dos modelos de 2,54; 3,81 e 5,08 cm respectivamente.

Como já observado no item 4.2.1.1, percebe-se que o parâmetro Vp consegue detectar a presença do modelo até a última profundidade investigada para os três diâmetros

utilizados.

Os perfis de PFE das FIGURAS 35 e 36 (2,54 e 3,81 cm) mostram o pico negativo apenas para a profundidade de 0,5 cm, desaparecendo para as outras profundidades. Este parâmetro consegue marcar com segurança a presença do modelo até a profundidade de 1,0 cm para os diâmetros menores e até 1,5 cm para o diâmetro de 5,08 cm).

Já o parâmetro RPS consegue a detecção até a última profundidade investigada, exceto para 2,5 cm no caso do cilindro 5,08 cm.

#### **4.2.1.4 Efeito da variação de orientação**

Os perfis apresentados nas FIGURAS 38, 39 e 40 referem-se aos resultados obtidos variando-se o ângulo dos modelos cilíndricos horizontais em relação aos perfis de medidas para os diâmetros 2,54; 3,81 e 5,08 cm com teor de grafita de 30% e profundidade do modelo de 0,5 cm.

No perfil de PFE, o fato mais interessante constatado, é que para o ângulo de  $45^\circ$ , o cilindro de 5,08 cm apresenta um valor de pico central negativo, o que não ocorre nas orientações de  $90^\circ$  e  $30^\circ$ .

O parâmetro RPS mostra que a amplitude lateral da anomalia aumenta com o ângulo de inclinação. Apesar de os três valores anômalos centrais para o cilindro de 3,81 cm de diâmetro não obedecerem esta regra geral, nota-se que os valores imediatamente subseqüentes medidos guardam esta relação, isto é, aumentam progressivamente com o ângulo de orientação (valores sobre os pontos 4 e -4).

O aumento da amplitude lateral da anomalia é claramente verificado nos perfis  $V_p$  para os três diâmetros, à medida que é aumentado o ângulo de inclinação do modelo em relação ao perfil de medidas.

#### **4.2.1.5 Efeito do arranjo eletródico-comparação entre dipolo-dipolo e Wenner**

As FIGURAS 41, 42 e 43 apresentam os resultados obtidos com o arranjo Wenner e comparados com o arranjo dipolo-dipolo. Estas medidas foram feitas apenas a título de

ilustração e comparação, não tendo o objetivo de um estudo sistemático com o arranjo Wenner.

As FIGURAS 41 e 42 referem-se ao cilindro de 5,08 cm e teores de 10 e 20% de pó de grafita, respectivamente. A FIGURA 43 mostra os resultados obtidos para o cilindro de 3,81 cm e 30% de teor de pó de grafita.

O perfil de PFE da FIGURA 41 mostra que o modelo é detectável pelo arranjo Wenner, o que não ocorre com o arranjo dipolo-dipolo. A FIGURA 43 (cilindro 3,81 cm) mostra o perfil de PFE sem a presença do pico central negativo para o arranjo Wenner, que ocorre quando o perfil é feito com dipolo-dipolo.

O que se verifica nas três figuras, de um modo geral, é que o arranjo Wenner apresenta as anomalias de uma forma mais simétrica e com maior amplitude lateral que o arranjo dipolo-dipolo, além de uma amplitude de sinal  $V_p$  da ordem de três vezes maior para o arranjo Wenner.

CILINDRO 2.54cm, PROF.=0.5cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

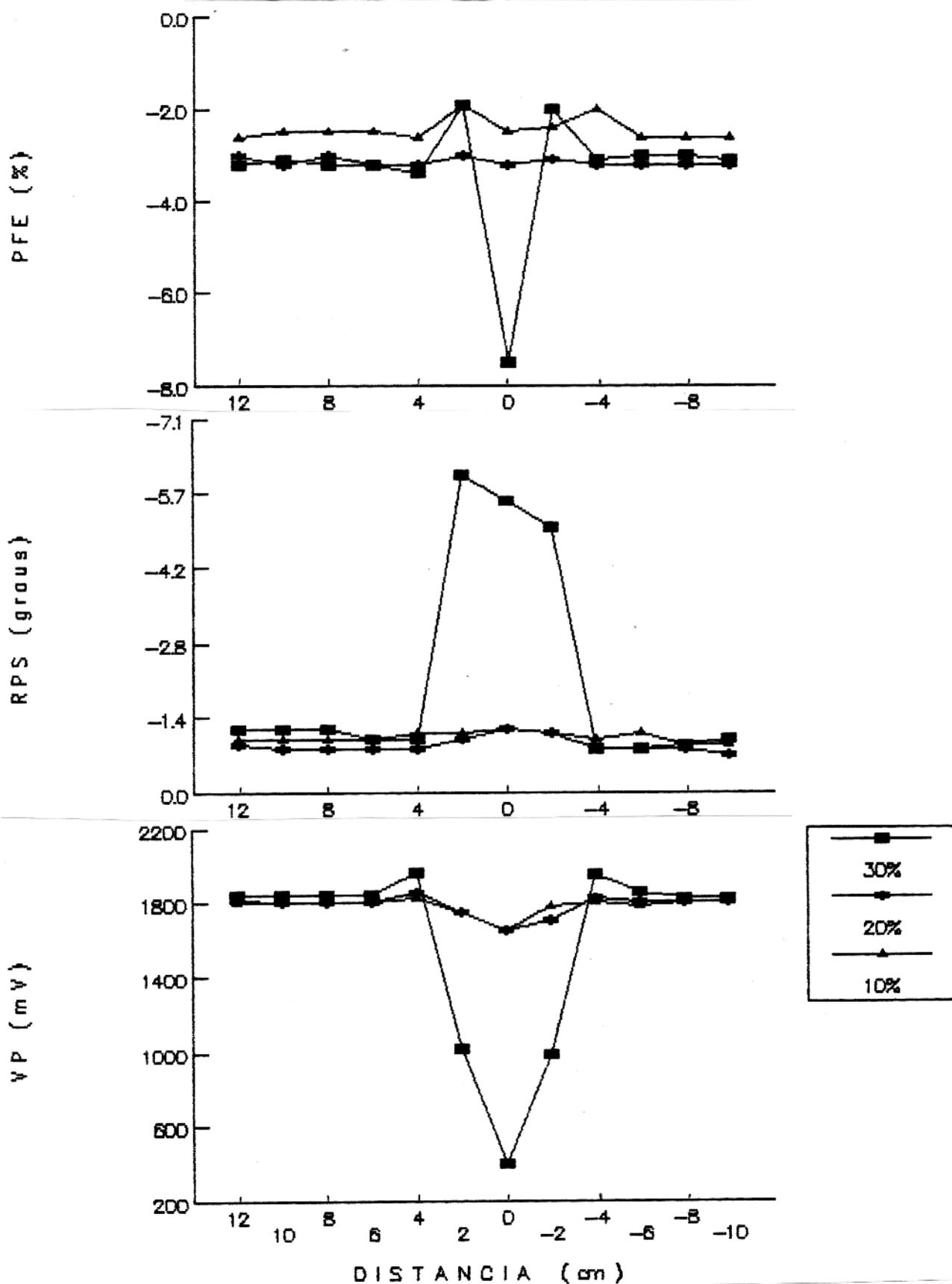


FIGURA 23

CILINDRO 2.54cm, PROF.=1.0cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

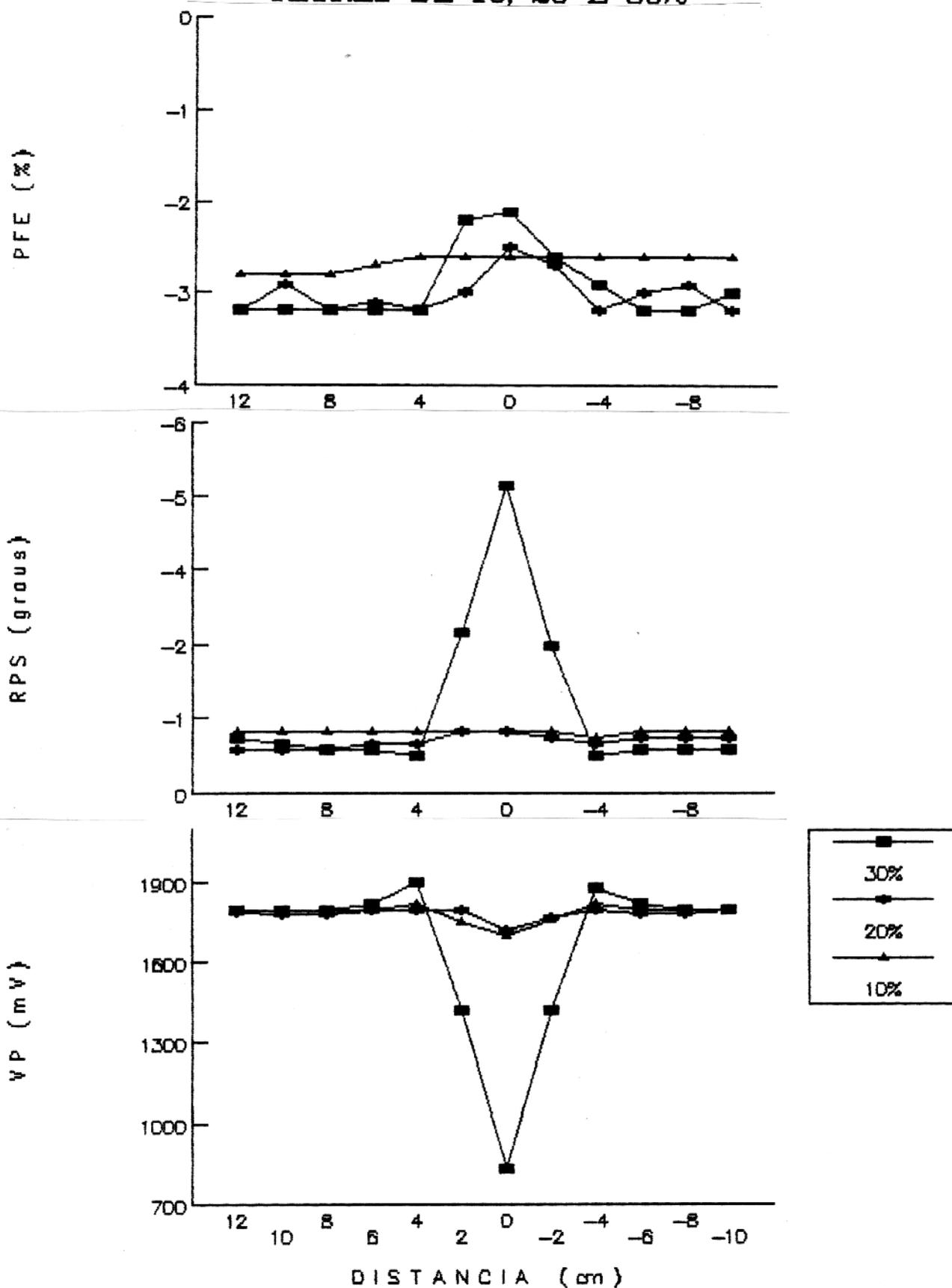


FIGURA 24

CILINDRO 2.54cm, PROF.=2.0cm

TEOR DE 30%

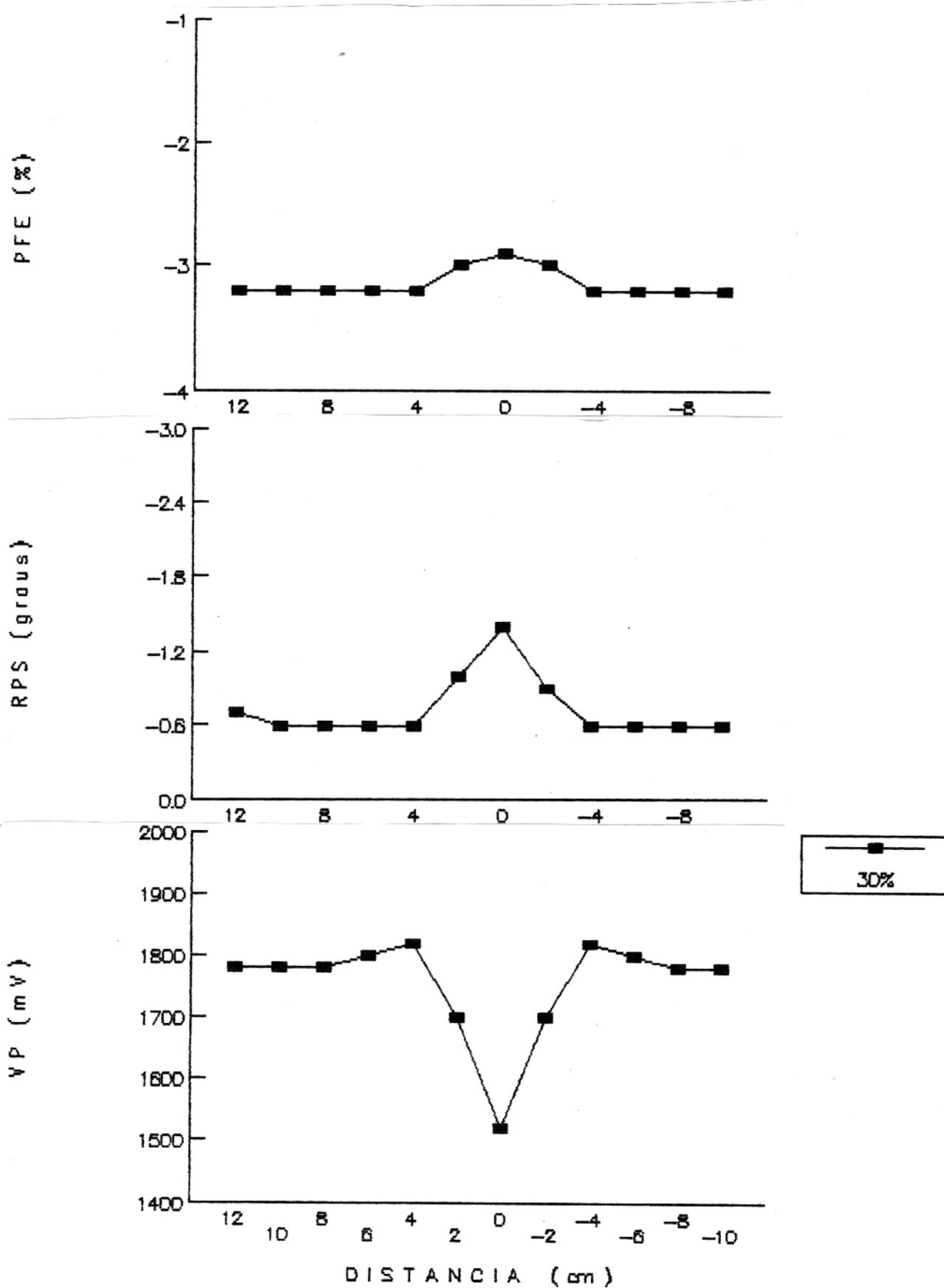


FIGURA 25

CILINDRO 3.81cm, PROF.=0.5cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

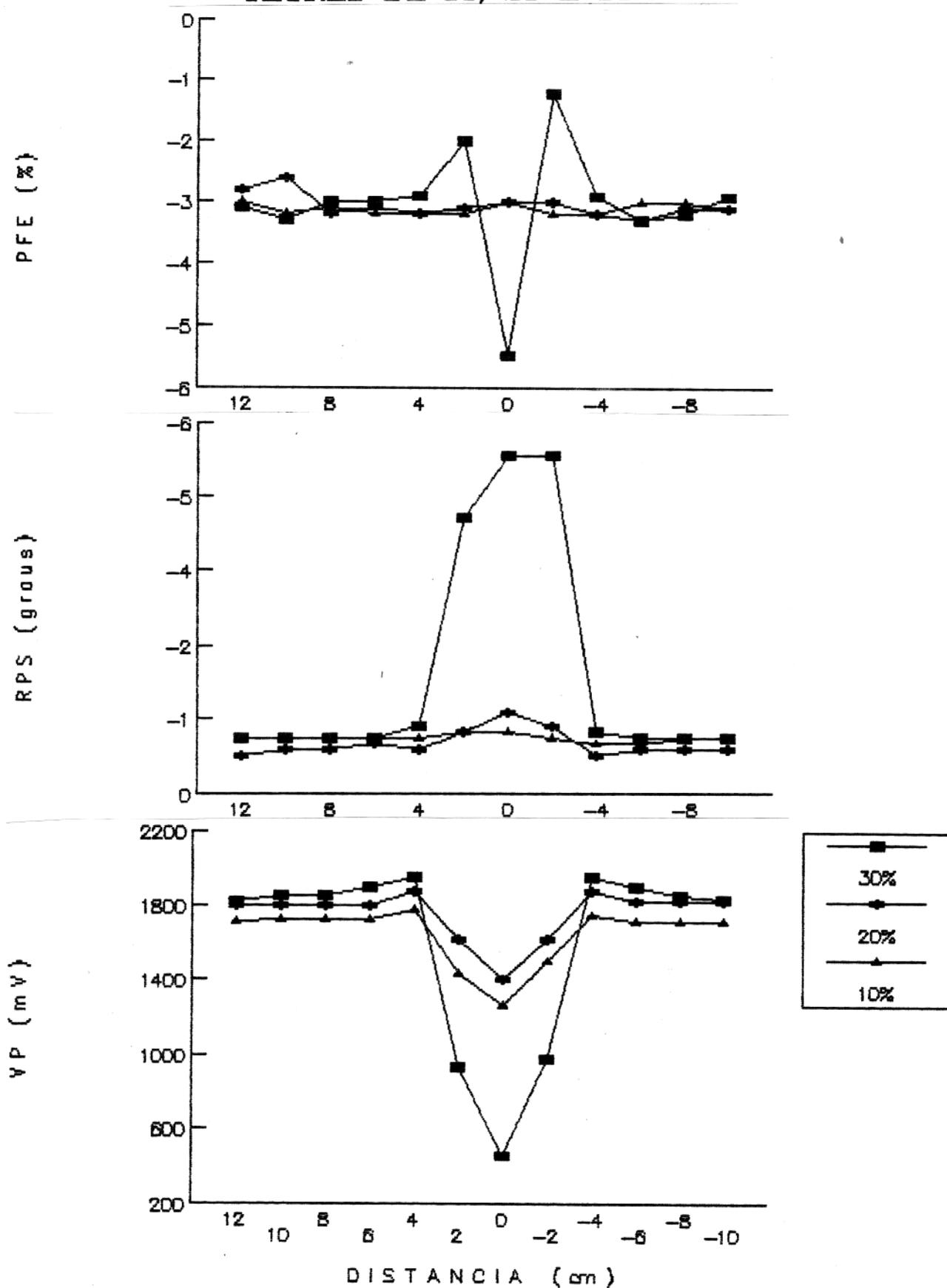


FIGURA 26

CILINDRO 3.81cm, PROF.=1.0cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

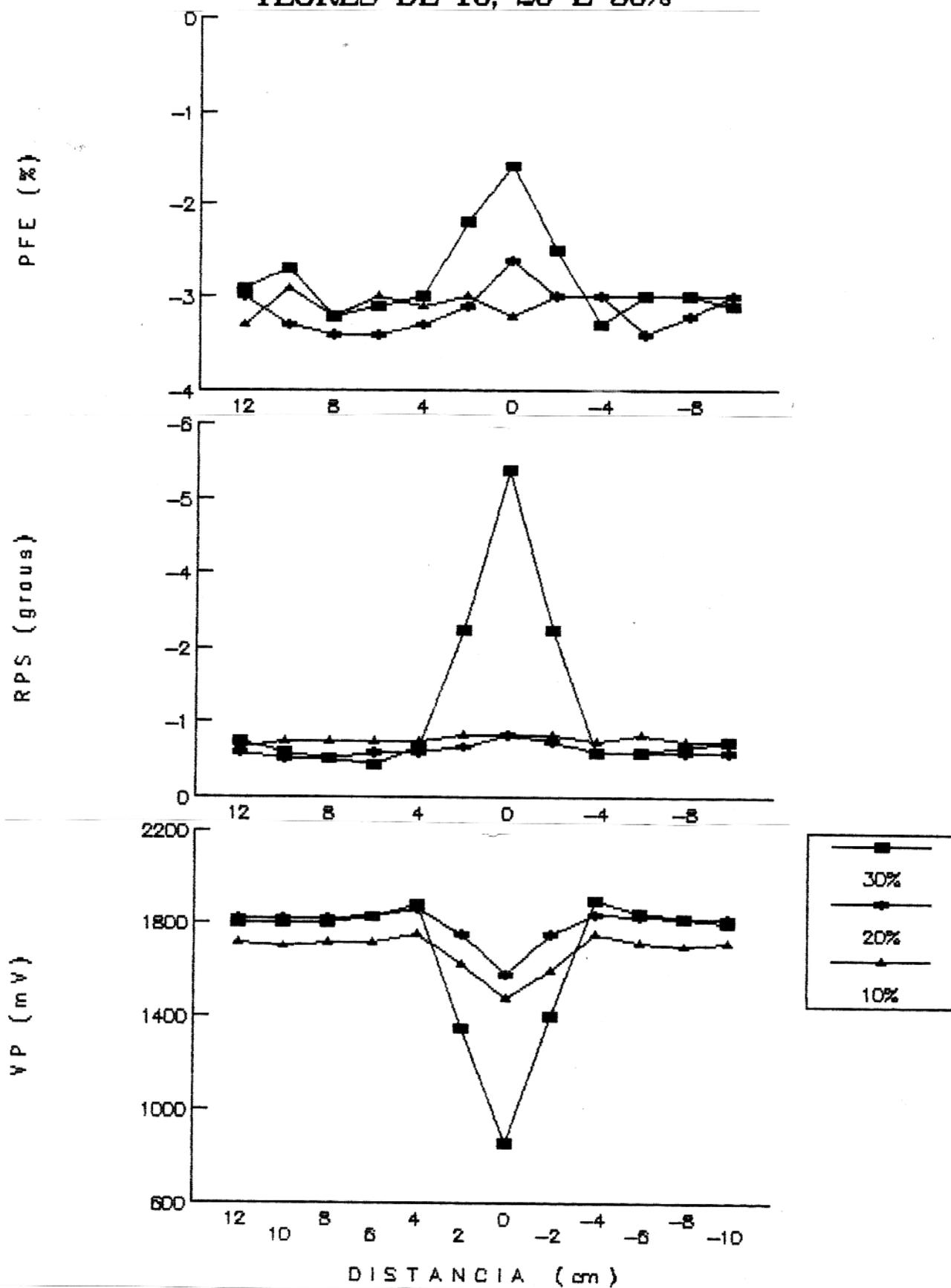


FIGURA 27

### CILINDRO 3.81cm, PROF.= 2.0cm

### TEOR DE 30%

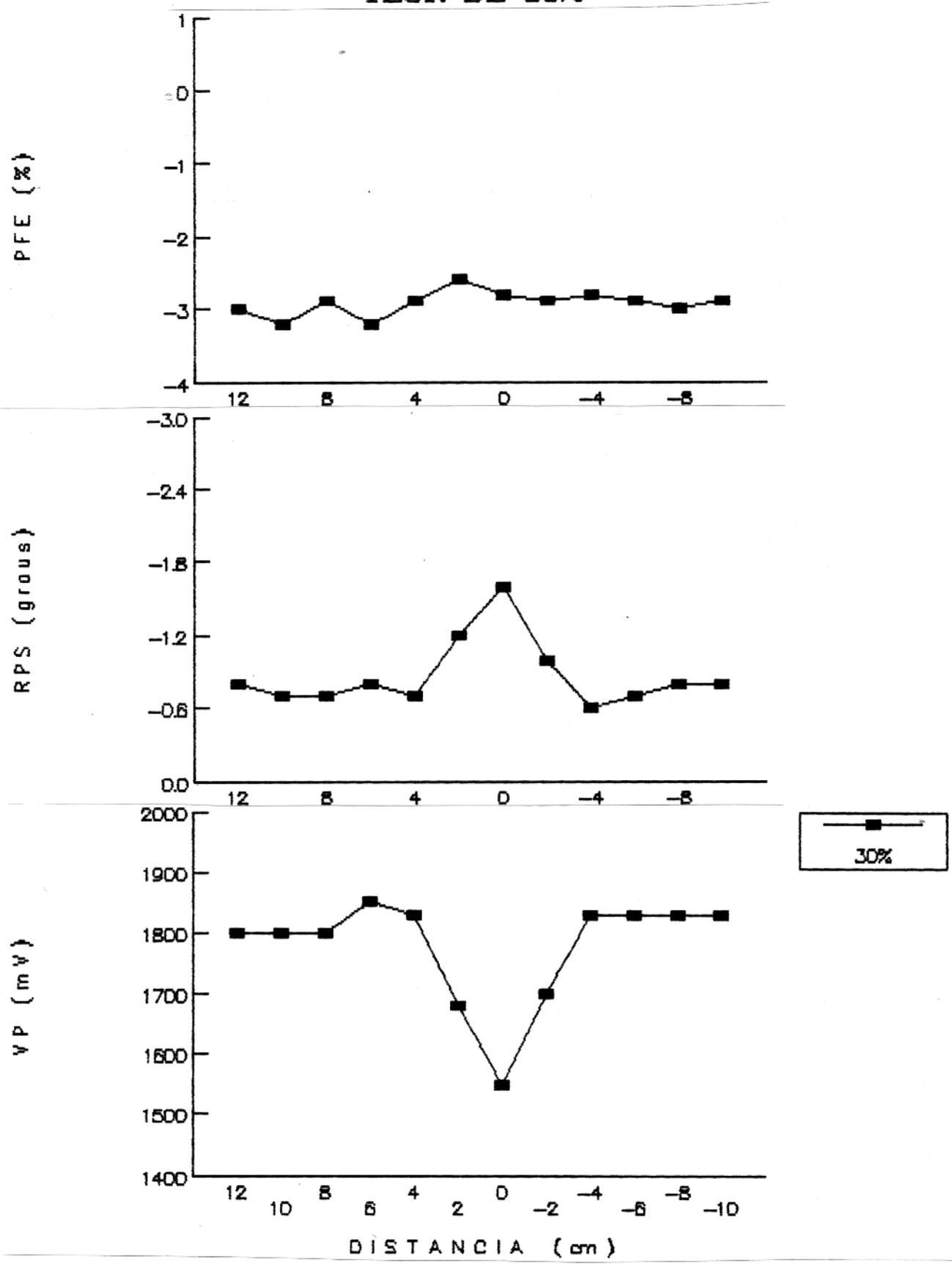


FIGURA 28

CILINDRO 5.08cm, PROF.=0.5cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

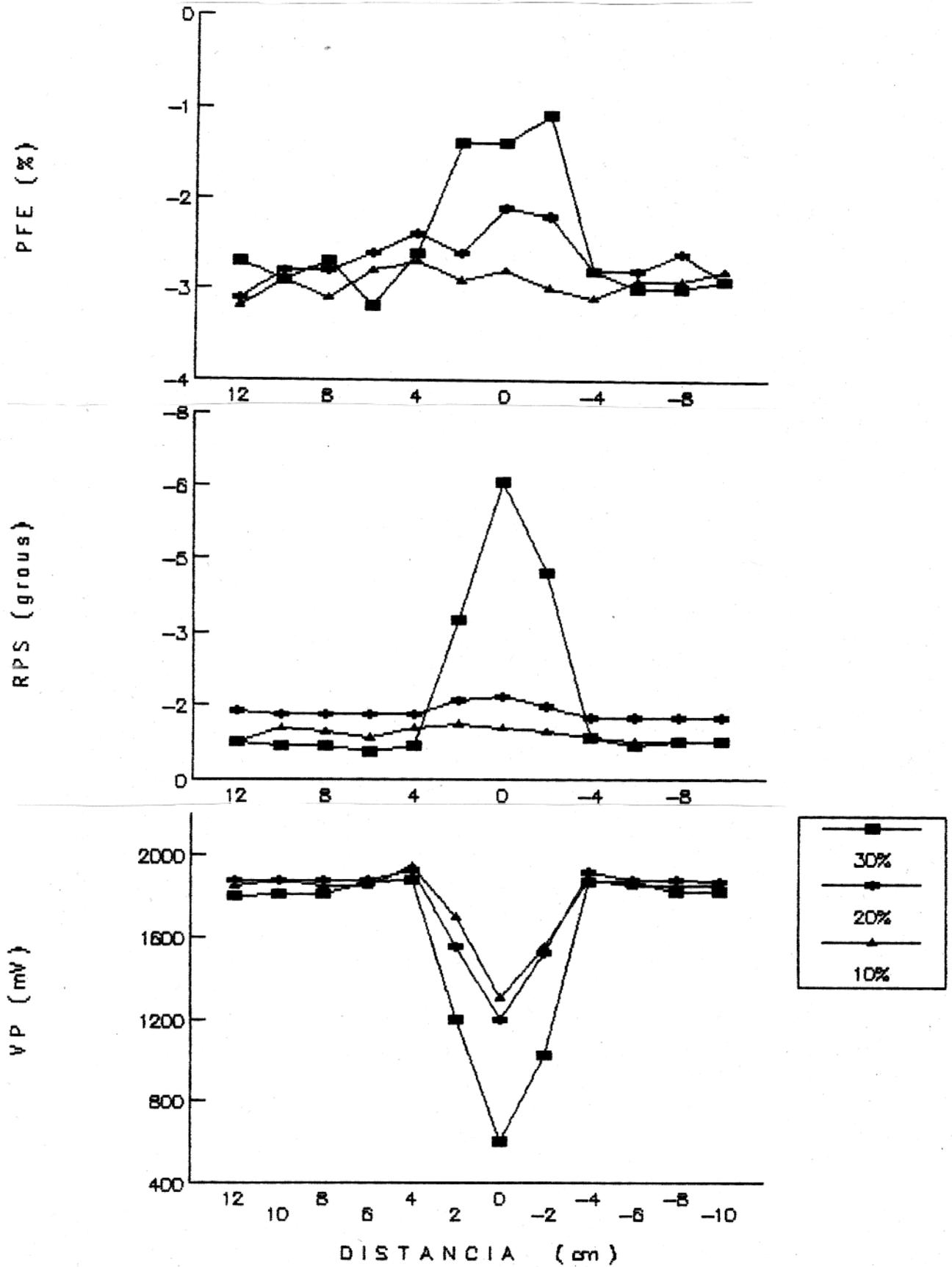


FIGURA 29

CILINDRO 5.08cm, PROF.=1.0cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

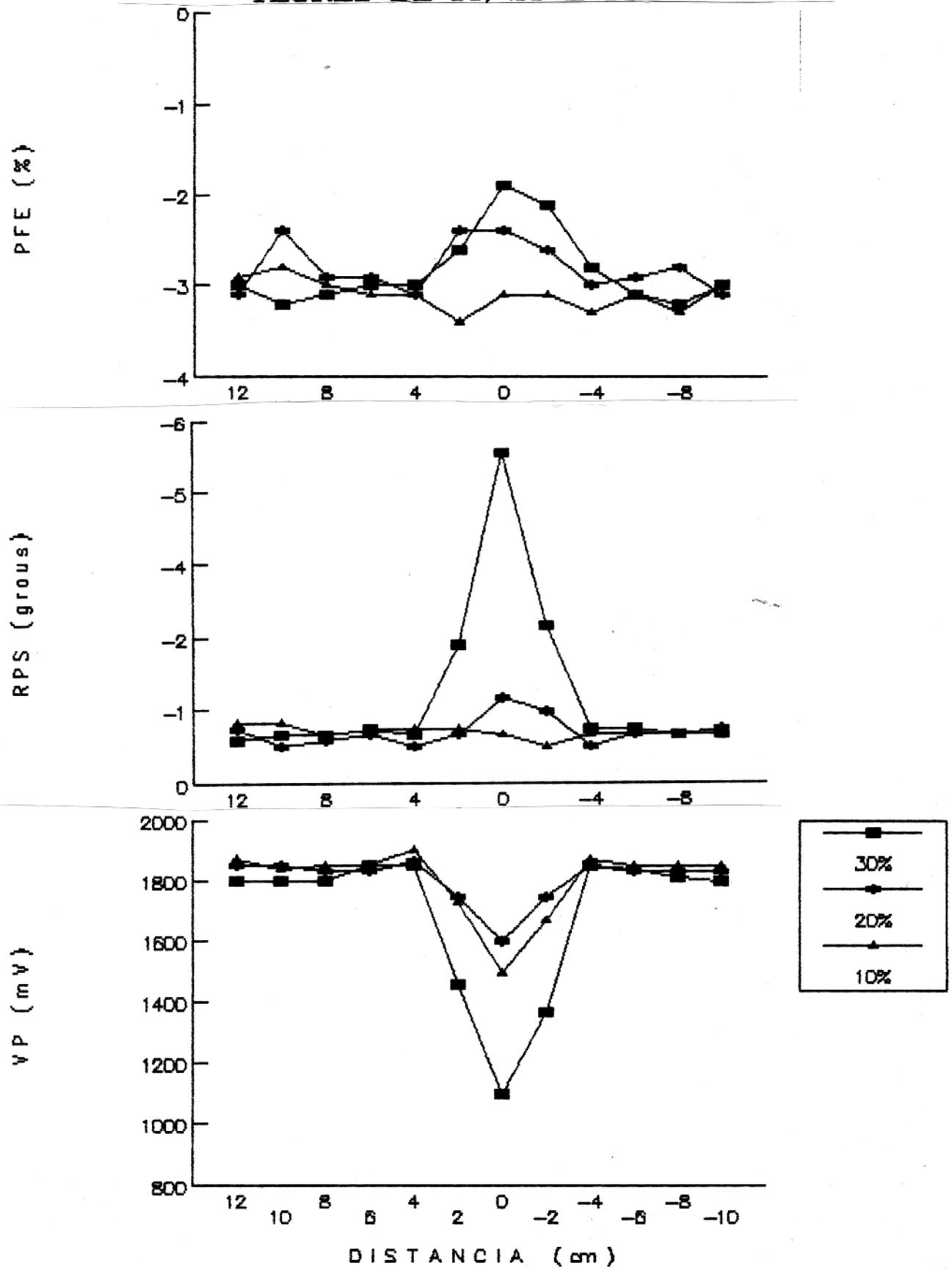


FIGURA 30

CILINDRO 5.08cm, PROF.=1.5cm

TEORES DE 20 E 30%

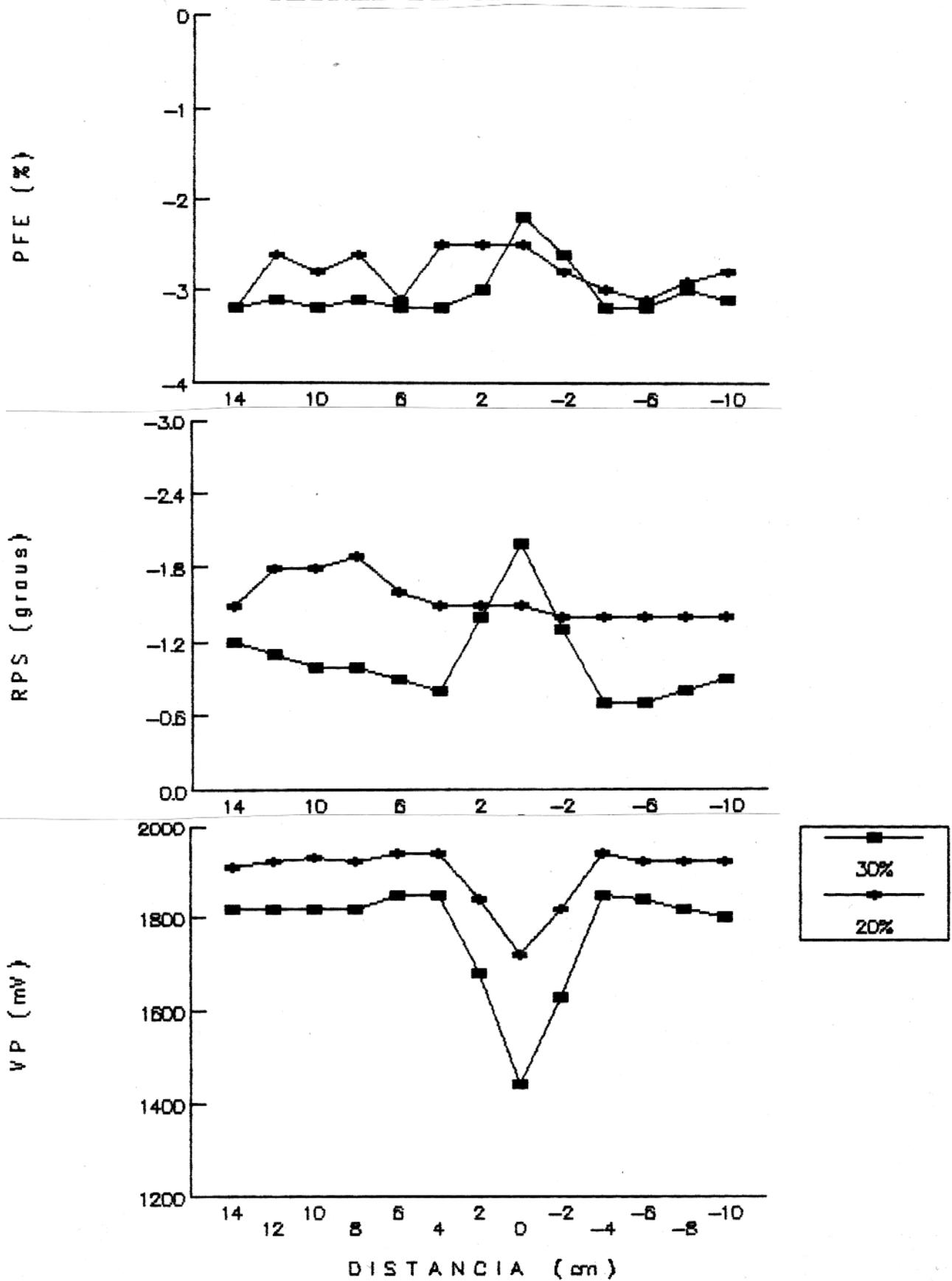


FIGURA 31

CILINDRO 5.08cm, PROF.=2.0cm

TEORES DE 20 E 30%

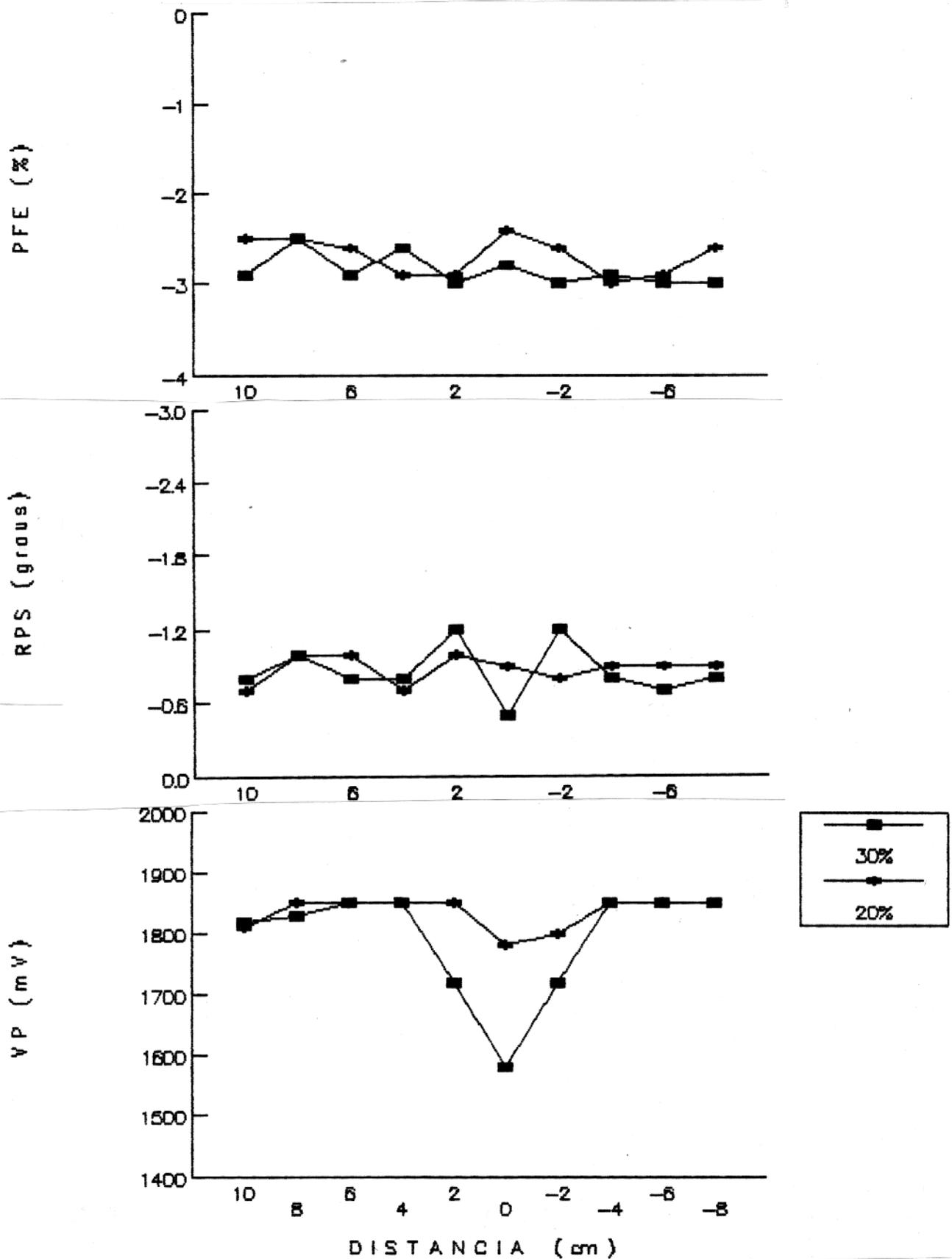


FIGURA 32

CILINDRO 5.08cm, PROF.=2.5cm

TEORES DE 20 E 30%

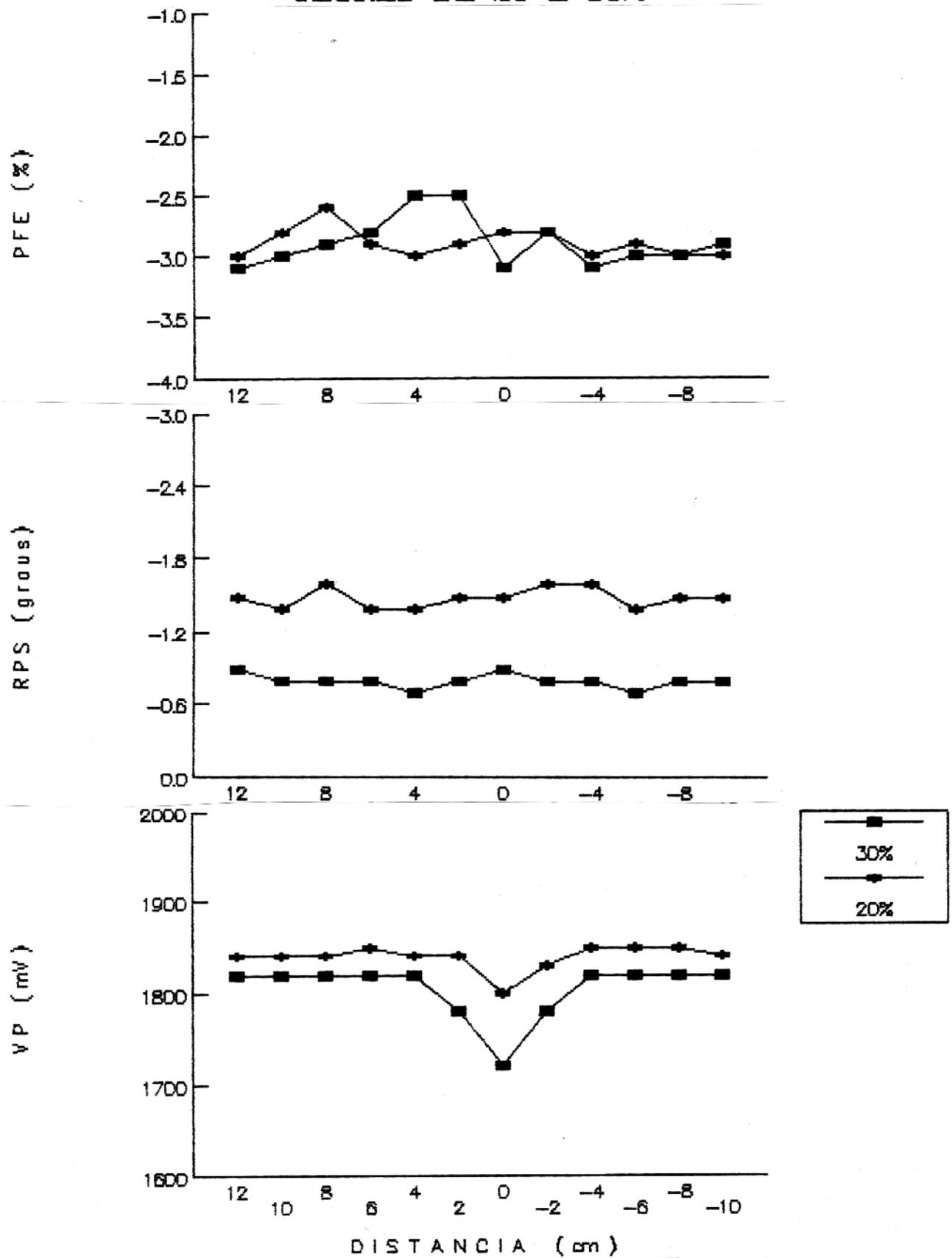


FIGURA 33

VARIACAO NO DIAMETRO (PROF.=0.5cm)

CIL 5.08, 3.81 E 2.54cm, 30%

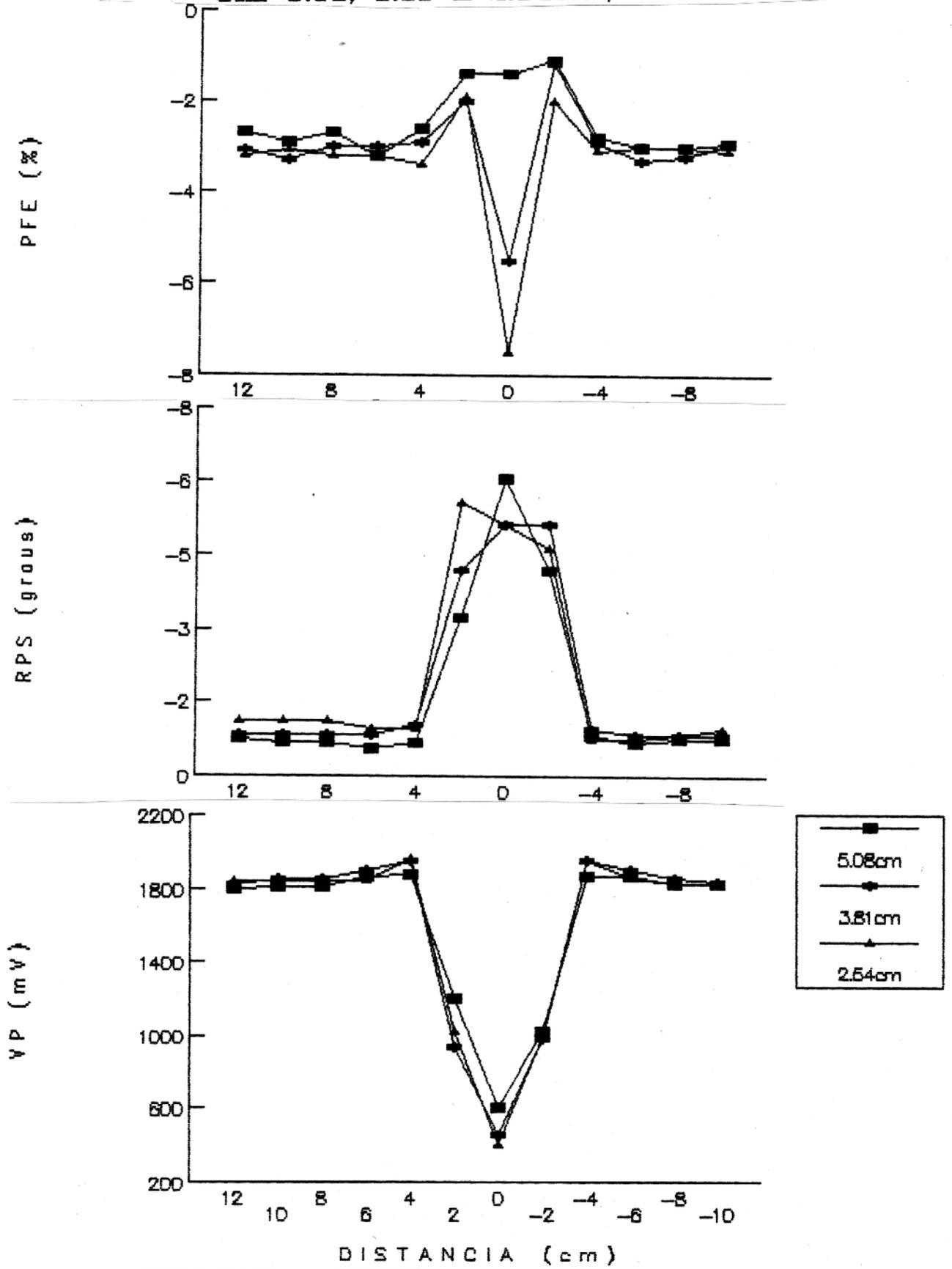


FIGURA 34

# VARIACAO DA PROFUNDIDADE

## CILINDRO 2.54cm, 30%

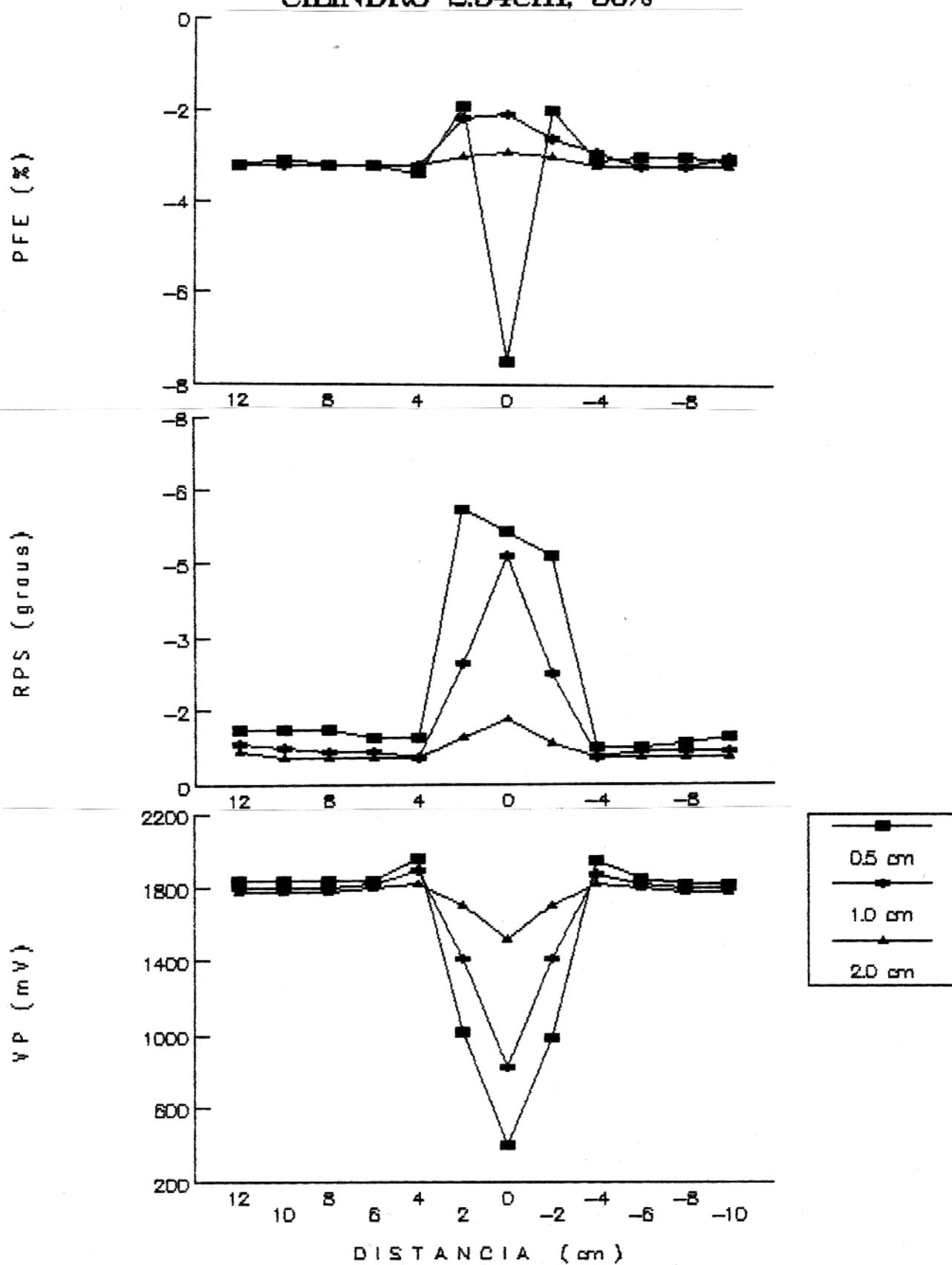


FIGURA 35

# VARIACAO DA PROFUNDIDADE

## CILINDRO 3.81cm, 30%

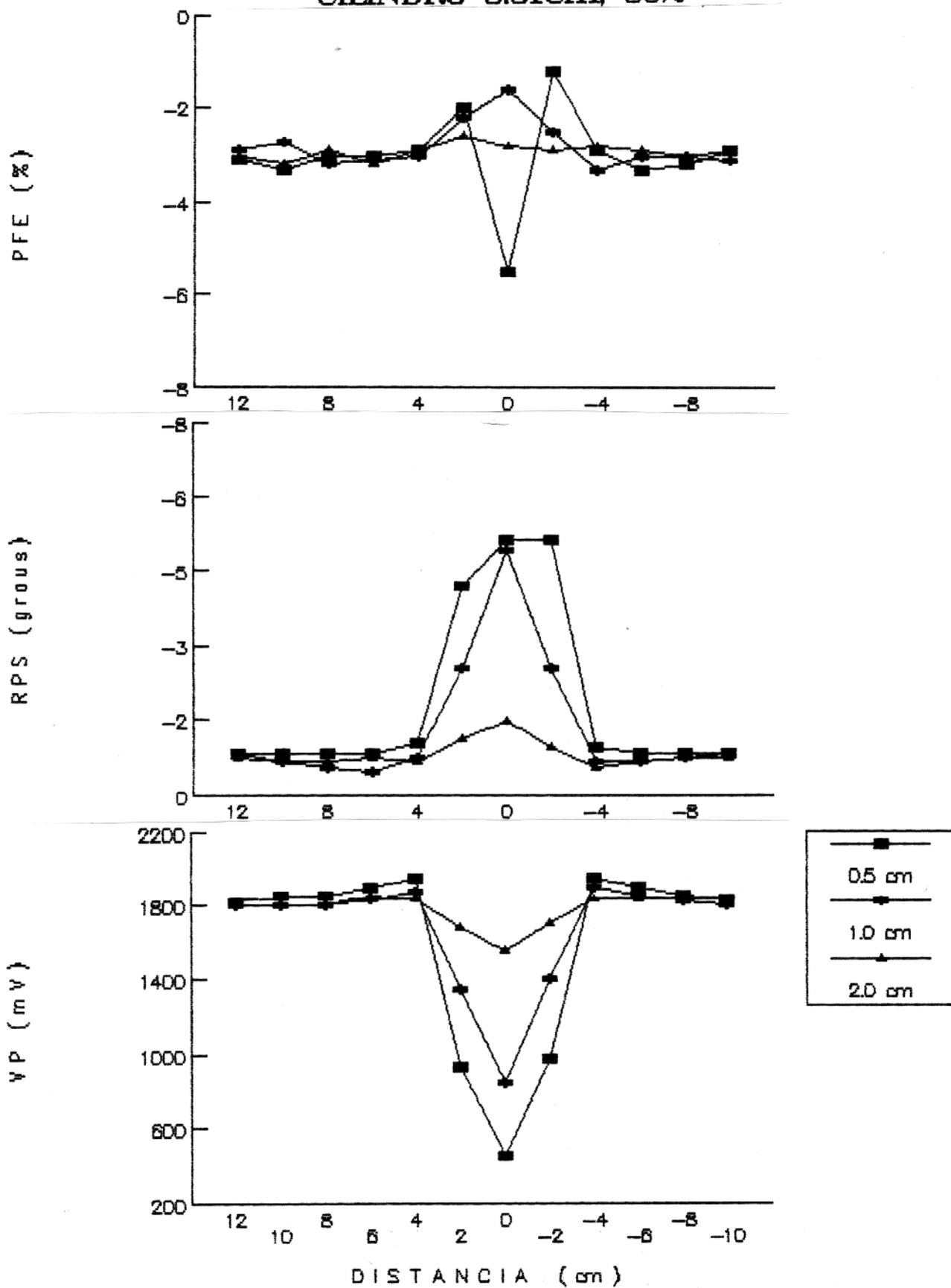


FIGURA 36

## VARIACAO DA PROFUNDIDADE

CIL 5.08cm, 30%

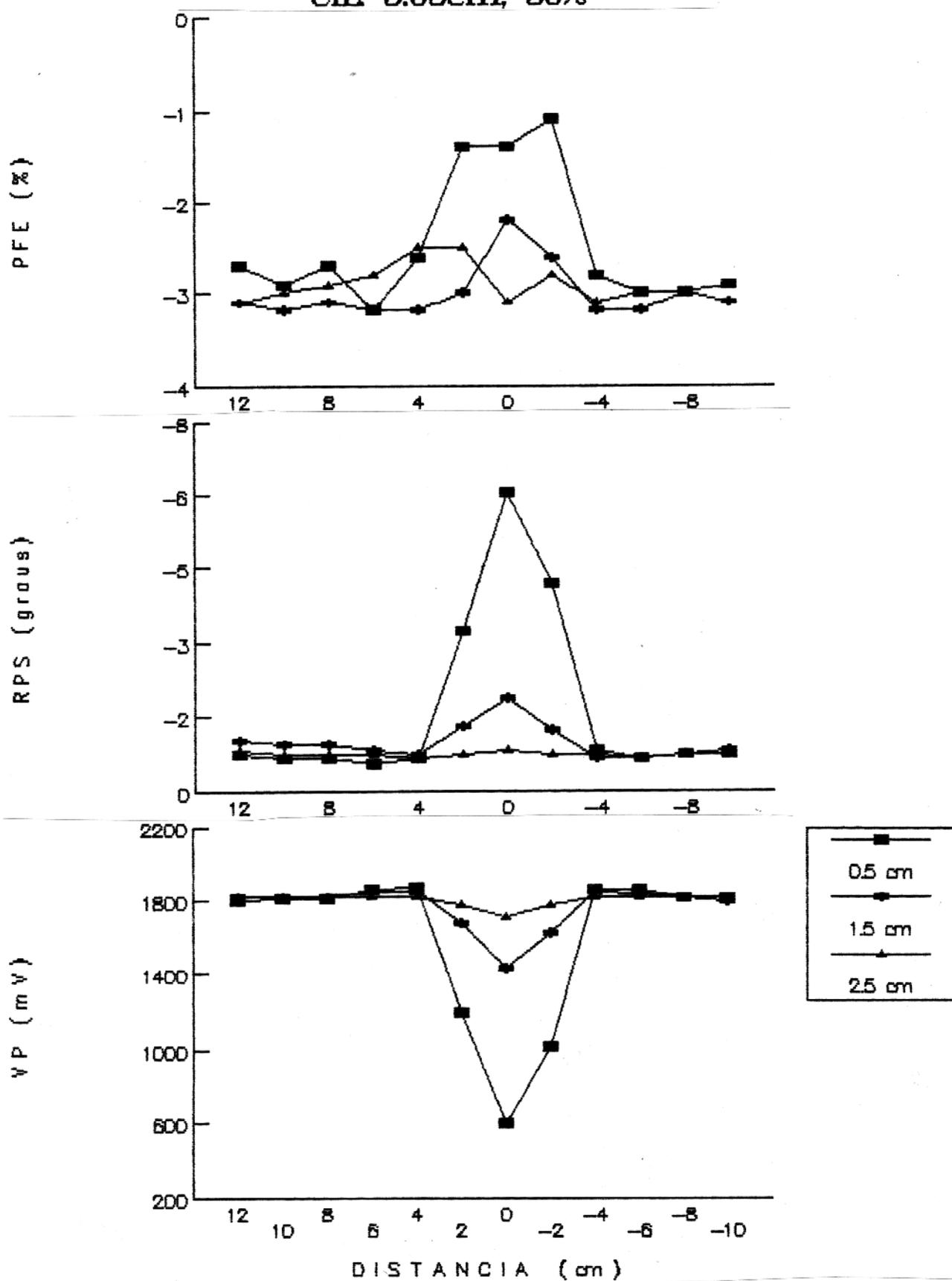


FIGURA 37

# VARIACAO DA ORIENTACAO

CIL 2.54 cm, ANG. 90, 30 E 45', 30%

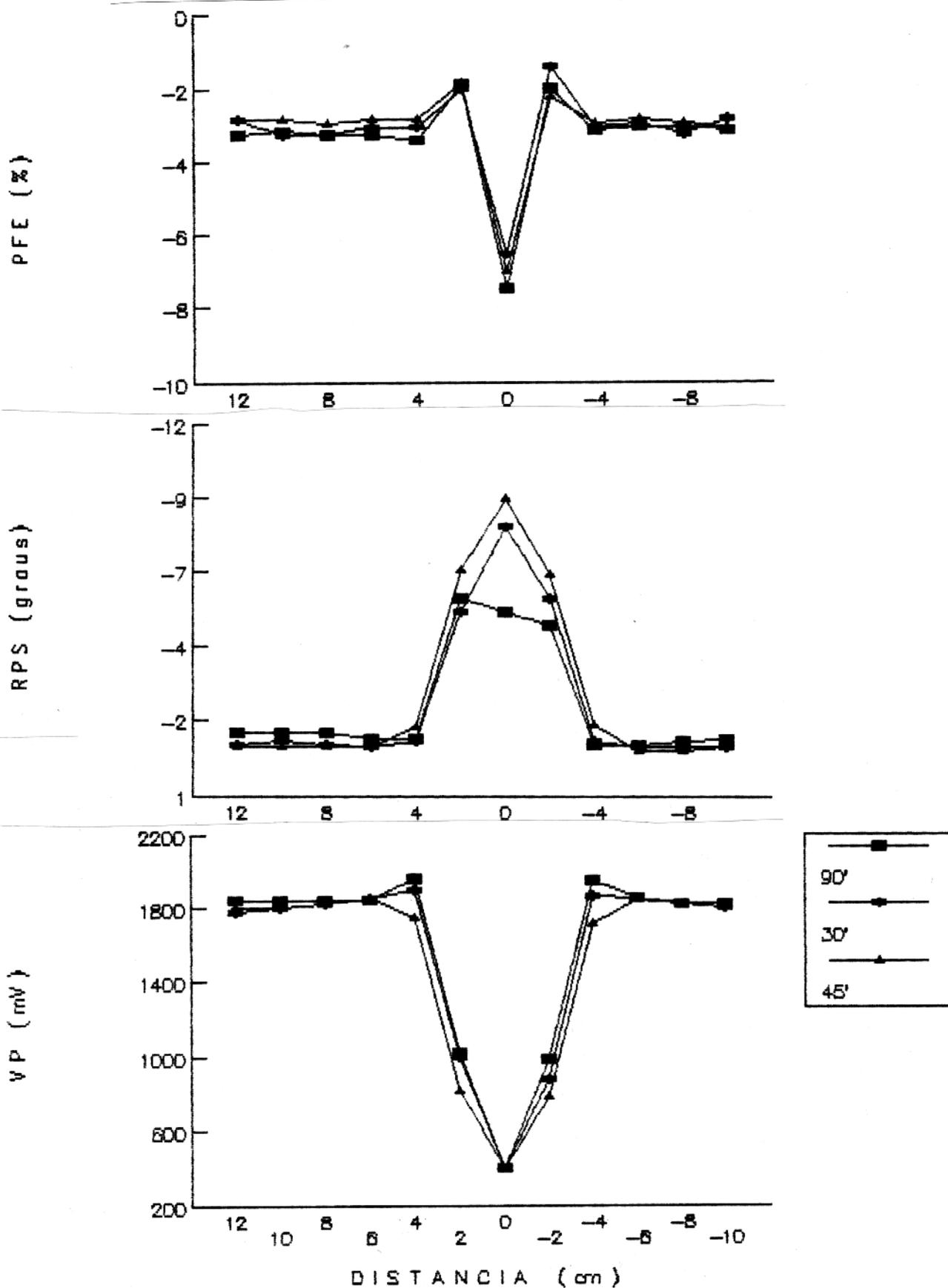


FIGURA 38

# VARIACAO DA ORIENTACAO

CIL. 3.81cm, ANG. 90, 30 E 45', 30%

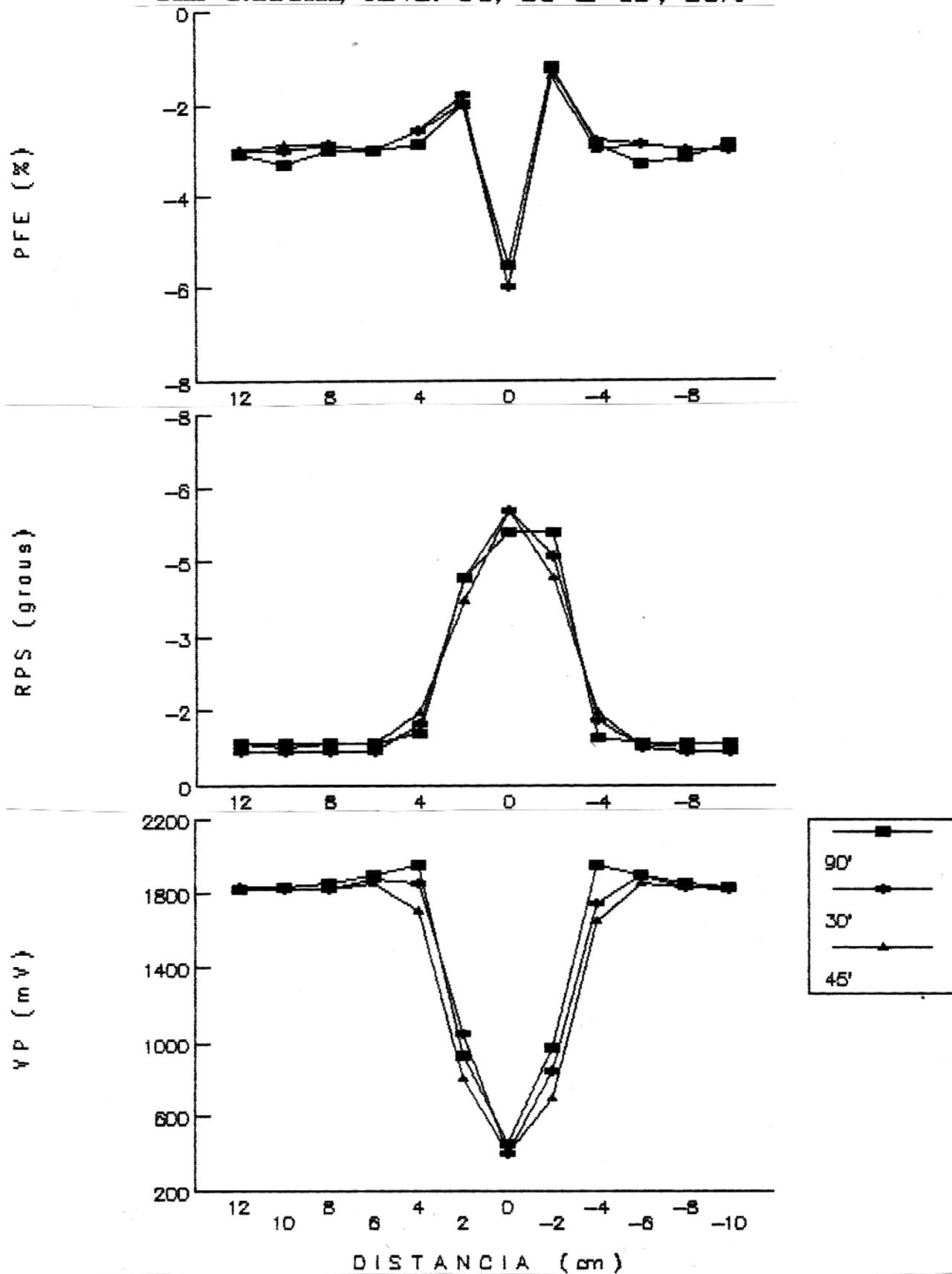


FIGURA 39

# VARIACAO DA ORIENTACAO

CIL 5.08cm, ANG. 90, 30 E 45', 30%

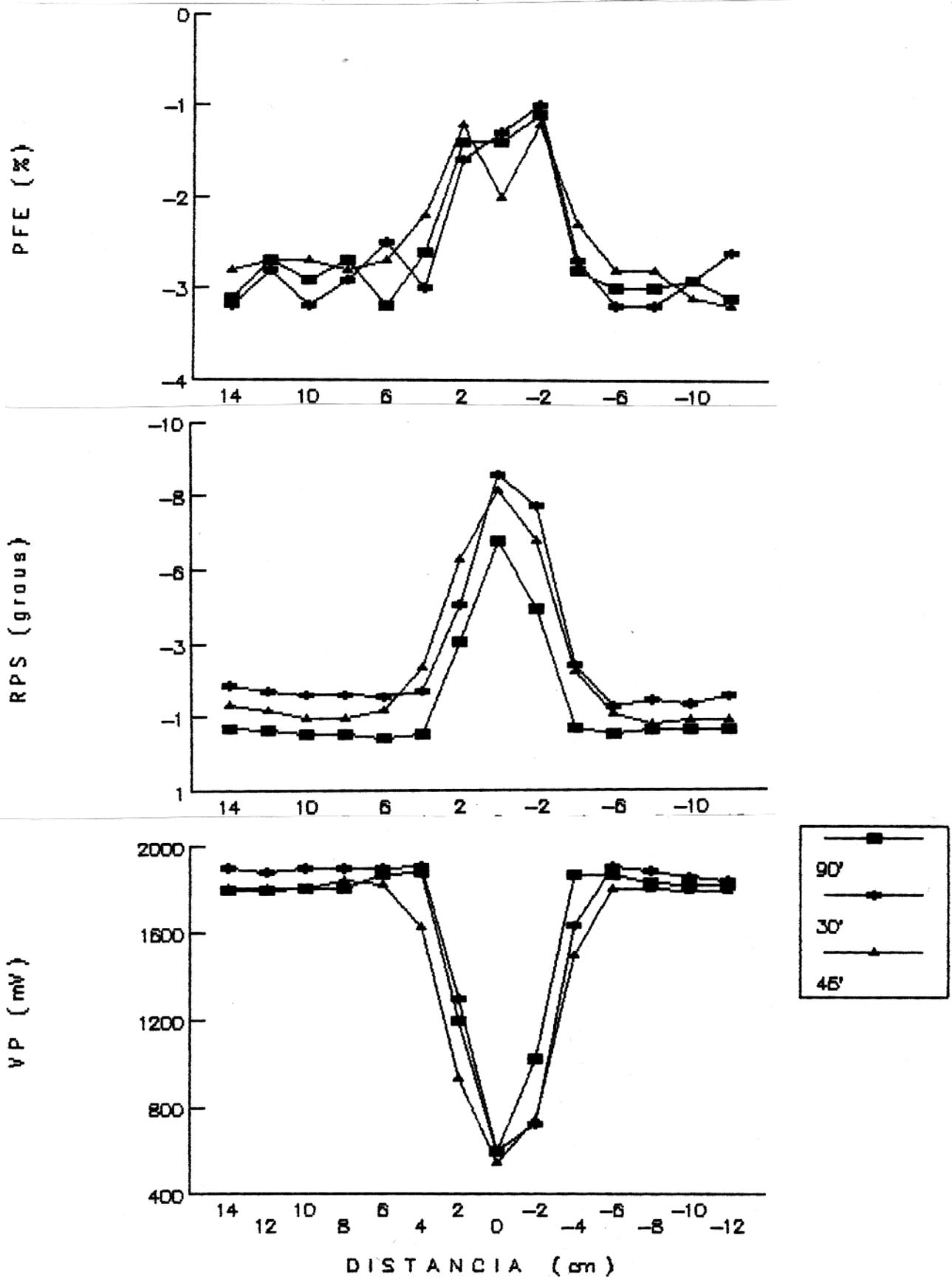


FIGURA 40

# COMPARACAO DIPOLO-DIPOLO X WENNER

CILINDRO 5.08cm, 10%, PROF.=0.5cm

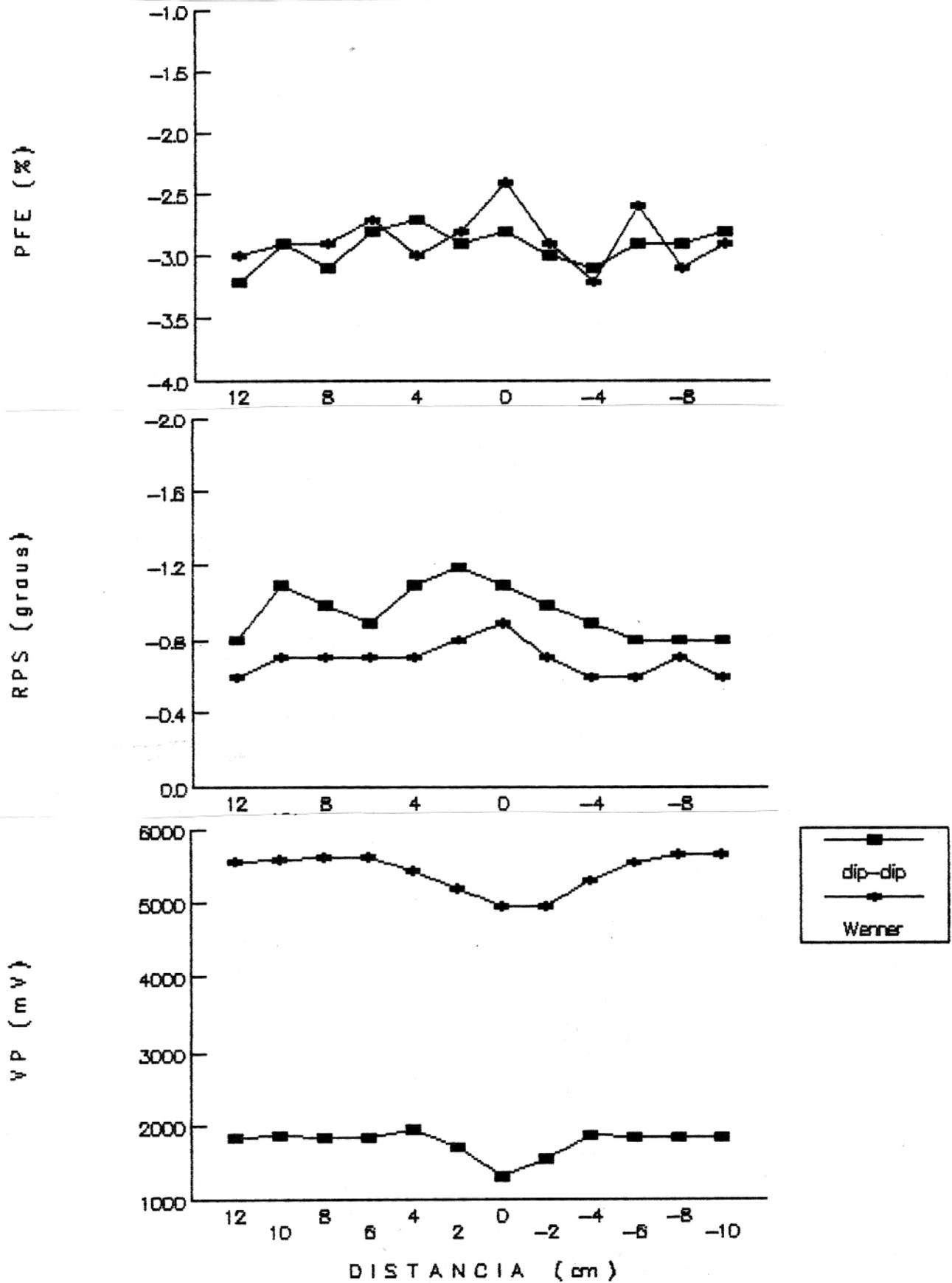


FIGURA 41

# COMPARACAO DIPOLO-DIPOLO X WENNER

CILINDRO 5.08cm, 20%, PROF.=0.5cm

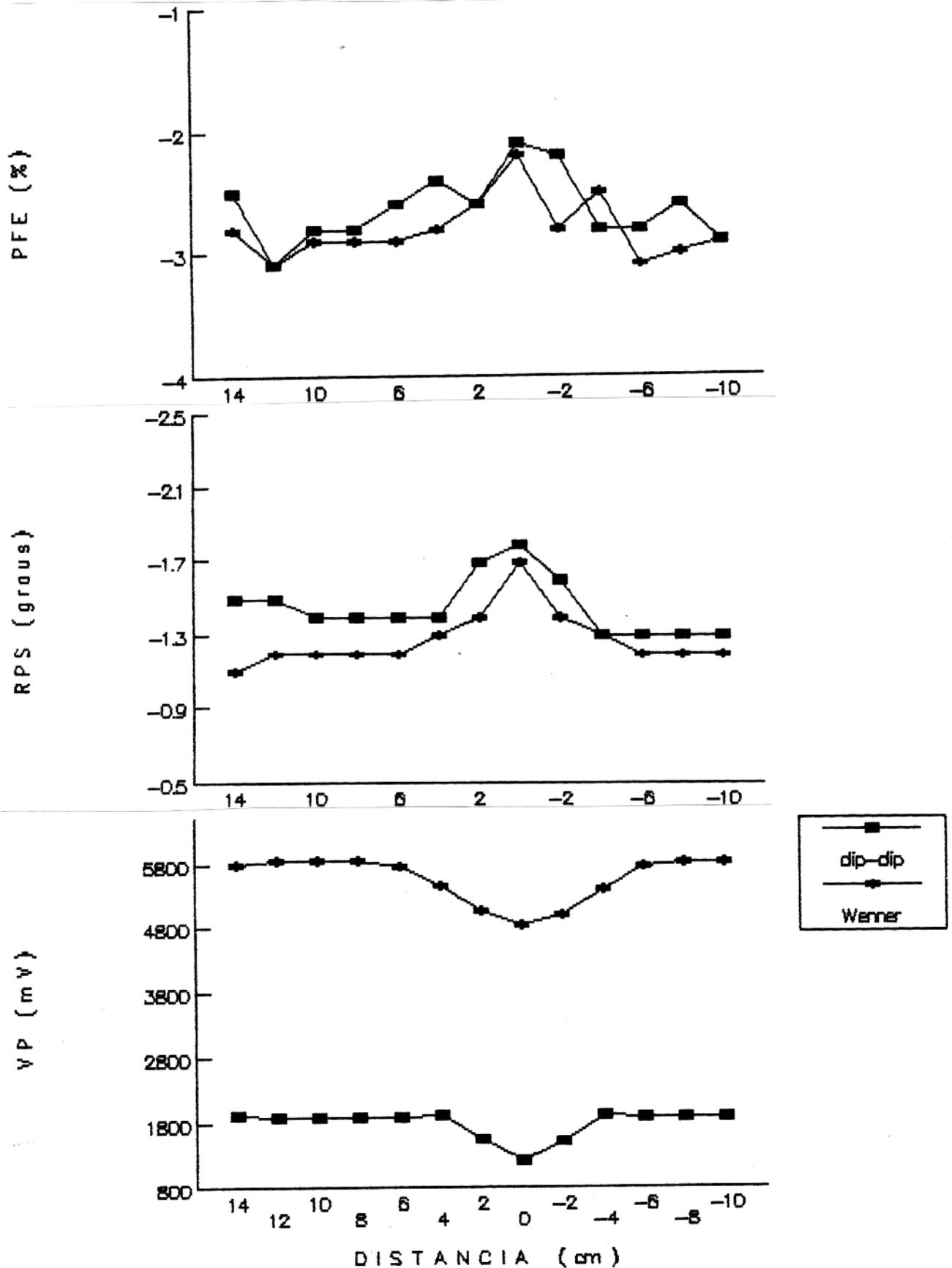


FIGURA 42

# COMPARACAO DIPOLO-DIPOLO X WENNER

CILINDRO 3.81cm, 30%, PROF.=0.5cm

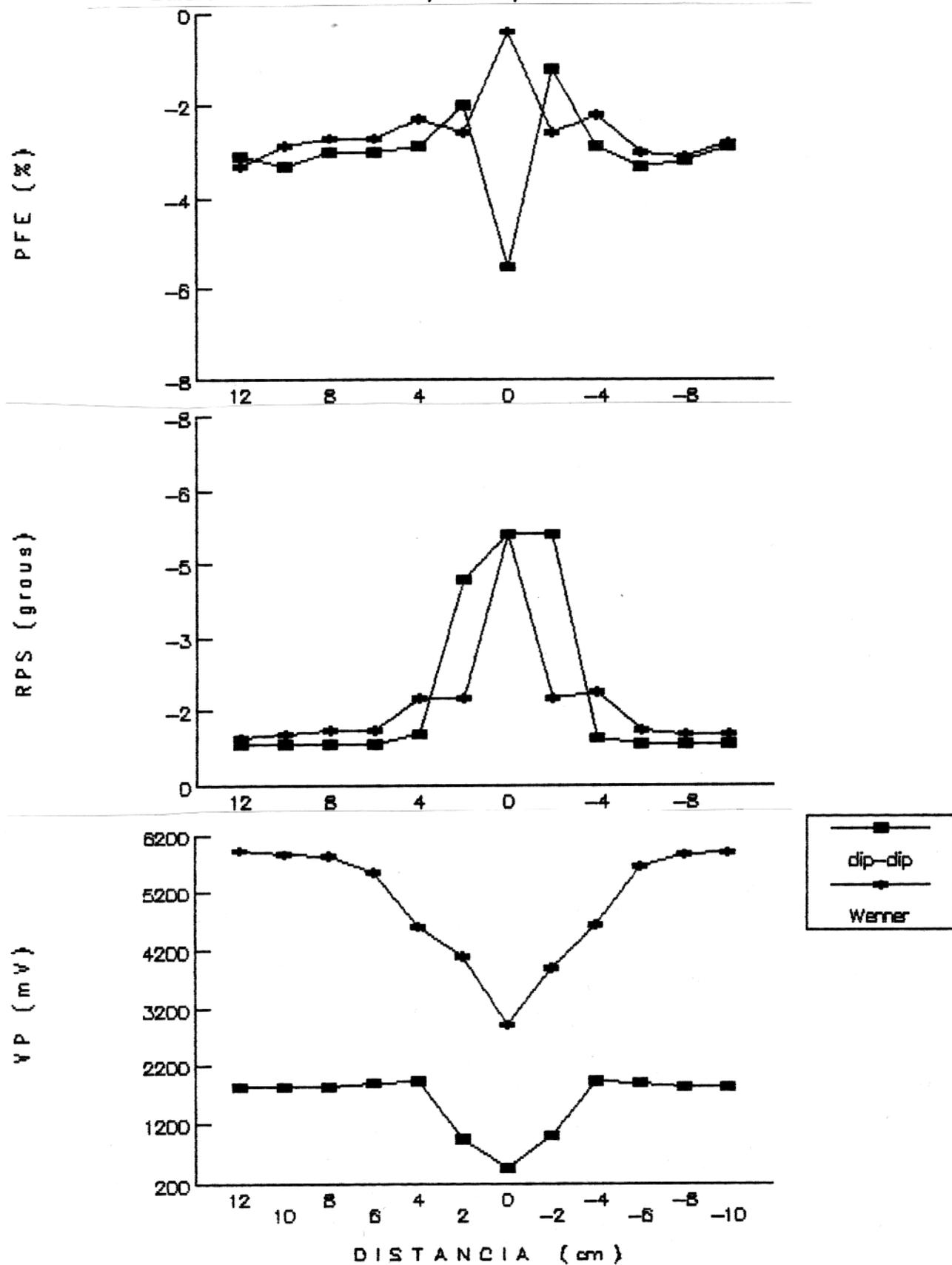


FIGURA 43

## 4.2.2 Os modelos tabulares (placas)

### 4.2.2.1 Efeito da variação do teor

Do mesmo modo que para os modelos cilíndricos, neste item são apresentados os resultados obtidos para as placas variando-se o teor volumétrico de pó de grafita em função da profundidade em que estes modelos tabulares foram posicionados.

As FIGURAS 44 a 47 referem-se às medidas feitas para as placas de 2,0 cm de espessura e teores de 10, 20 e 30% de grafita, nas profundidades de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm de profundidade.

No caso das placas com 10% em teor (FIGURAS 44 e 45), verifica-se que as mesmas são detectáveis pelo parâmetro PFE nas profundidades de 0,5 e 1,0 cm. O parâmetro RPS apresenta uma fraca detecção apenas na profundidade 0,5 cm e mesmo assim de forma irregular. Já o parâmetro  $V_p$  detecta o modelo perfeitamente, porém, ao invés de um baixo de  $V_p$ , o que ocorre é um alto. Isto significa que, ao invés de uma anomalia com queda de resistividade, ocorre uma anomalia com alto de resistividade. É de se supor que a causa desta inversão seja ocasionada pelo baixo teor de grafita, pela geometria e medidas do modelo em questão.

A detectabilidade das placas com teor de 20% foi investigada para as profundidades de 0,5; 1,0 e 1,5 cm (FIGURAS 44, 45 e 46, respectivamente). Nota-se que este modelo é detectado pelos três parâmetros estudados, decrescendo a amplitude da anomalia com a profundidade. Aqui também ocorre a inversão da anomalia de  $V_p$  como verificado para o modelo de 10%, mas apenas para a profundidade de 1,0 cm. Na profundidade de 1,5 cm a detecção pelo parâmetro PFE é fraca e o parâmetro  $V_p$  deixa dúvidas.

Para o teor de 30%, verifica-se uma ótima detectabilidade dos modelos nas profundidades investigadas, 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm (FIGURAS 44, 45, 46 e 47, respectivamente), observando-se novamente o decréscimo das amplitudes à medida que é aumentada a profundidade do modelo. Também se observa uma melhor simetria dos valores anômalos com o aumento da profundidade. Aqui também ocorre o valor negativo de pico no PFE sobre o centro do modelo na profundidade de

0,5 cm.

As FIGURAS 48 A 52 referem-se aos modelos tabulares com espessura de 3,0 cm, teores de 10; 20 e 30%, colocados nas profundidades de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.

Para o teor de 10% (FIGURAS 48 e 49), vê-se que o modelo não é detectável pelo parâmetro PFE nas profundidades 0,5 e 1,0 cm estudadas. Já o parâmetro RPS apresenta uma fraca anomalia nos perfis. O parâmetro  $V_p$  consegue marcar o modelo. O perfil medido mostra um alto de  $V_p$  entre 2 baixos, o que se deve novamente atribuir à geometria e dimensões do corpo.

No caso do teor de 20% estudaram-se 4 profundidades, 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 cm (FIGURAS 48, 49, 50 e 51 respectivamente). Observa-se que os parâmetros RPS e  $V_p$  conseguem detectar o modelo em todos os níveis. Já o parâmetro PFE, consegue uma boa detecção somente até a profundidade de 1,5 cm.

Para o teor de 30% os níveis medidos foram de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm (FIGURAS 48, 49, 50, 51 e 52, respectivamente). Vê-se que o modelo é detectado nos cinco níveis investigados pelos parâmetros RPS e  $V_p$ . Quanto ao PFE, o mesmo já não consegue detectar o modelo ao nível de 3,0 cm.

#### 4.2.2.2 Efeito da variação da espessura

A FIGURA 53 mostra os dados obtidos para as placas de 2,0 e 3,0 cm, teor de 30% à profundidade de 0,5 cm, objetivando-se avaliar o comportamento dos perfis de medidas de acordo com a variação na espessura das placas, mantendo-se fixas todas as outras variáveis possíveis.

Antes de serem analisados os comportamentos dos perfis, é necessário salientar que quando as medidas são realizadas em ocasiões diferentes, pode-se verificar que o "background" da solução apresenta algum deslocamento, mas sempre de maneira uniforme.

Apesar de este fato ocorrer neste caso, pode-se perfeitamente avaliar que as anomalias verificadas nos perfis de PFE, RPS e  $V_p$  para a placa de 3,0 cm apresentam maiores amplitudes do que para a placa de 2,0 cm. Tal variação é mais facilmente visualizada nos perfis de RPS e  $V_p$ , não estando esta diferença tão evidente no perfil de PFE.

#### 4.2.2.3 Efeito da variação da profundidade

As FIGURAS 54 e 55 referem-se à detectabilidade dos modelos à medida que se aumenta a profundidade em que os mesmos são colocados. A FIGURA 54 apresenta os dados obtidos para a placa de 2,0 cm de espessura, 30% de teor de pó de grafita nas profundidades de 0,5; 1,0 e 2,0 cm. A FIGURA 55 mostra os resultados das medidas sobre a placa de 3,0 cm, 30% de teor de pó de grafita, nas profundidades 0,5; 2,0 e 3,0 cm.

Como já comentado no item 4.2.1.1, verifica-se a detecção dos modelos em todas as profundidades aqui apresentadas e em todos os parâmetros medidos, exceto os parâmetros PFE e RPS para a placa de 3,0 cm à profundidade de 3,0 cm. À medida que a profundidade aumenta, a amplitude das anomalias diminui. Isto sempre é mais evidente no parâmetro  $V_p$ . Também é observado que os valores negativos de pico central tendem a desaparecer com o aumento da profundidade.

#### 4.2.2.4 Efeito da variação de orientação

Na FIGURA 56 são apresentados os perfis de medidas para a placa de 3,0 cm de espessura, teor de 30%, profundidade de 0,5 cm para os ângulos de 90, 30 e 45° de orientação do modelo em relação ao perfil de medidas.

Tanto os perfis de PFE como os de RPS e  $V_p$  mostram-se diferenciados se relacionados entre si. O sentido do levantamento sempre foi do sentido positivo para o negativo (esquerda para a direita no desenho). É bastante claro que a maior assimetria do perfil ocorre no lado direito dos perfis (sentido negativo). O máximo valor de pico no perfil de PFE ocorre para a inclinação de 45°, enquanto que o maior pico de RPS ocorre para o ângulo de 30°. No perfil de  $V_p$  o valor de amplitude máxima é para a inclinação de 45°. De um modo geral, pode-se notar que a assimetria das anomalias aumenta de acordo com o incremento do ângulo do modelo com relação aos perfis de medidas.

#### 4.2.2.5 Efeito da variação do mergulho

As FIGURAS 57 e 58 mostram os efeitos causados nos

perfis variando-se a inclinação das placas de 2,0 e 3,0 cm, respectivamente, com relação à vertical. Nestas medidas foram utilizadas as placas com teor de 30% de pó de grafita à uma profundidade de 0,5 cm. Os ângulos estudados foram de 90, 30 e 45°.

Observa-se que os perfis de PFE para ambos os modelos apresentam um valor de pico central negativo quando os mesmos se encontram na vertical (90°) e que este pico negativo desaparece para as inclinações de 30 e 45°.

No perfil de RPS o menor valor de pico ocorre para o ângulo de 90° e o maior para o mergulho de 30°, enquanto que no perfil  $V_p$  o valor de maior amplitude corresponde ao ângulo de 90° e o menor para o mergulho de 45°.

Também aqui pode-se notar que há um aumento da assimetria da porção anômala dos perfis à medida que aumenta-se o mergulho do modelo tabular.

PLACA 2.0cm, PROF.=0.5cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

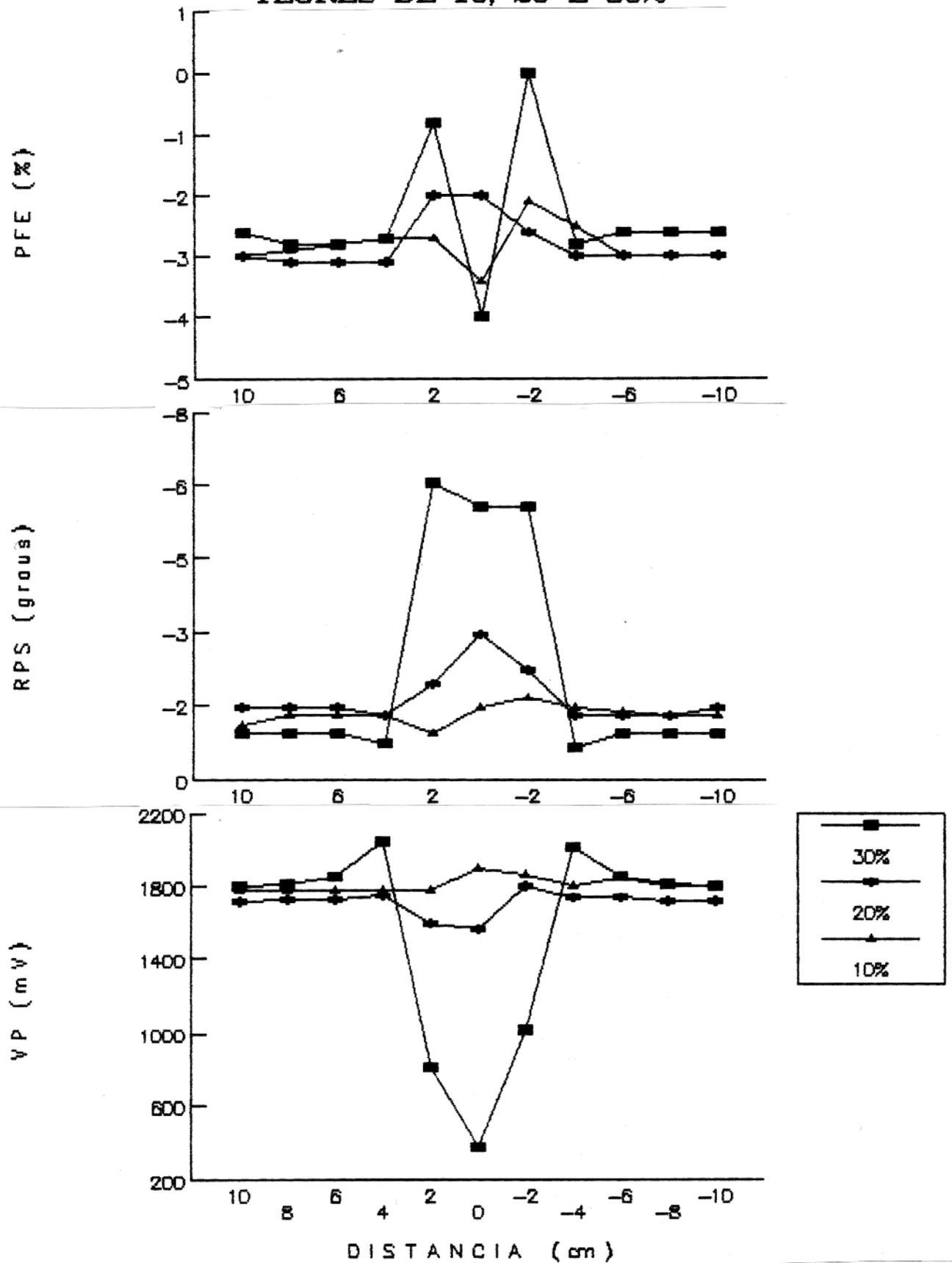


FIGURA 44

PLACA 2.0cm, PROF.=1.0cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

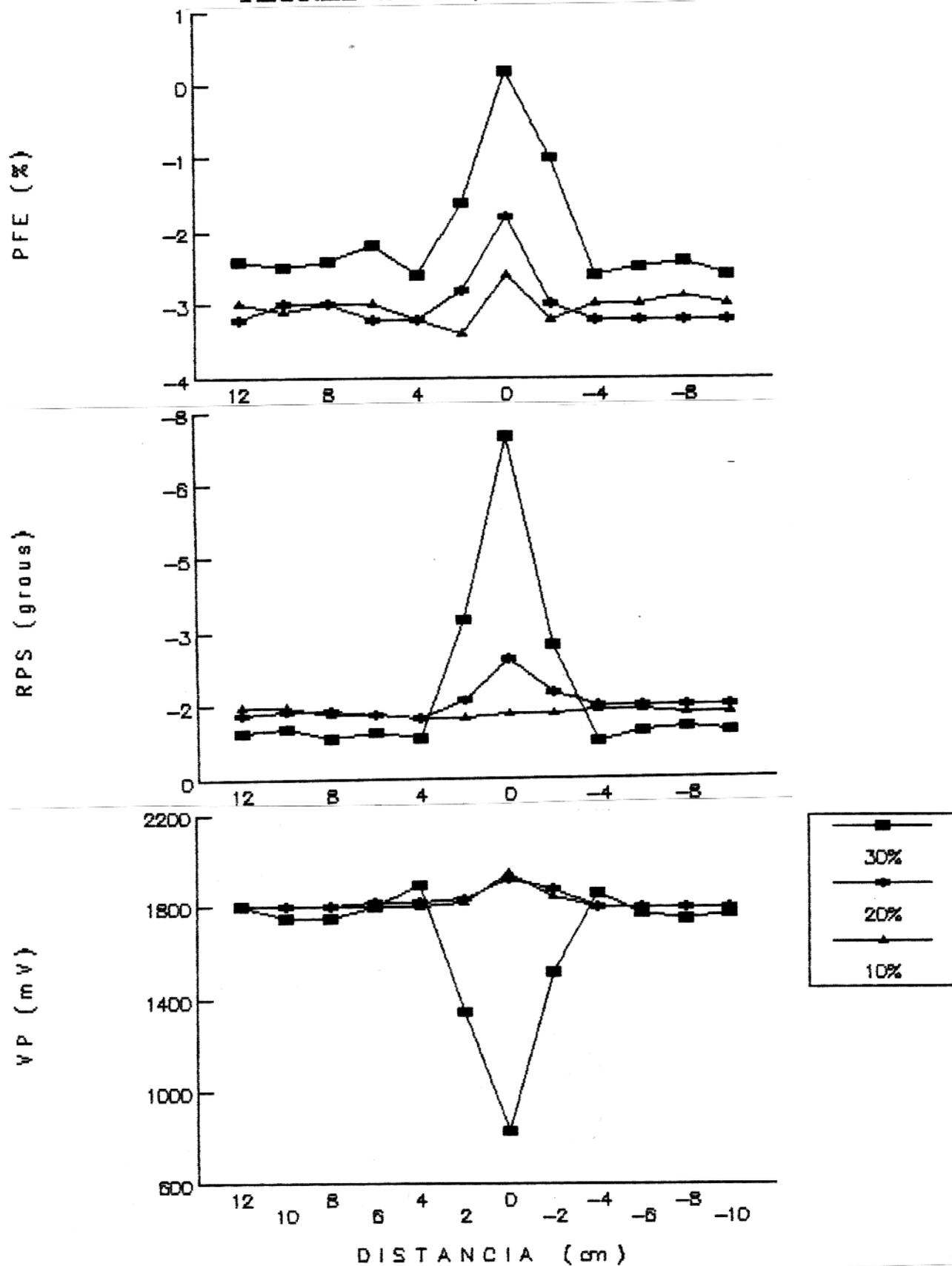


FIGURA 45

PLACA 2.0cm, PROF.=1.5cm

TEORES DE 20 E 30%

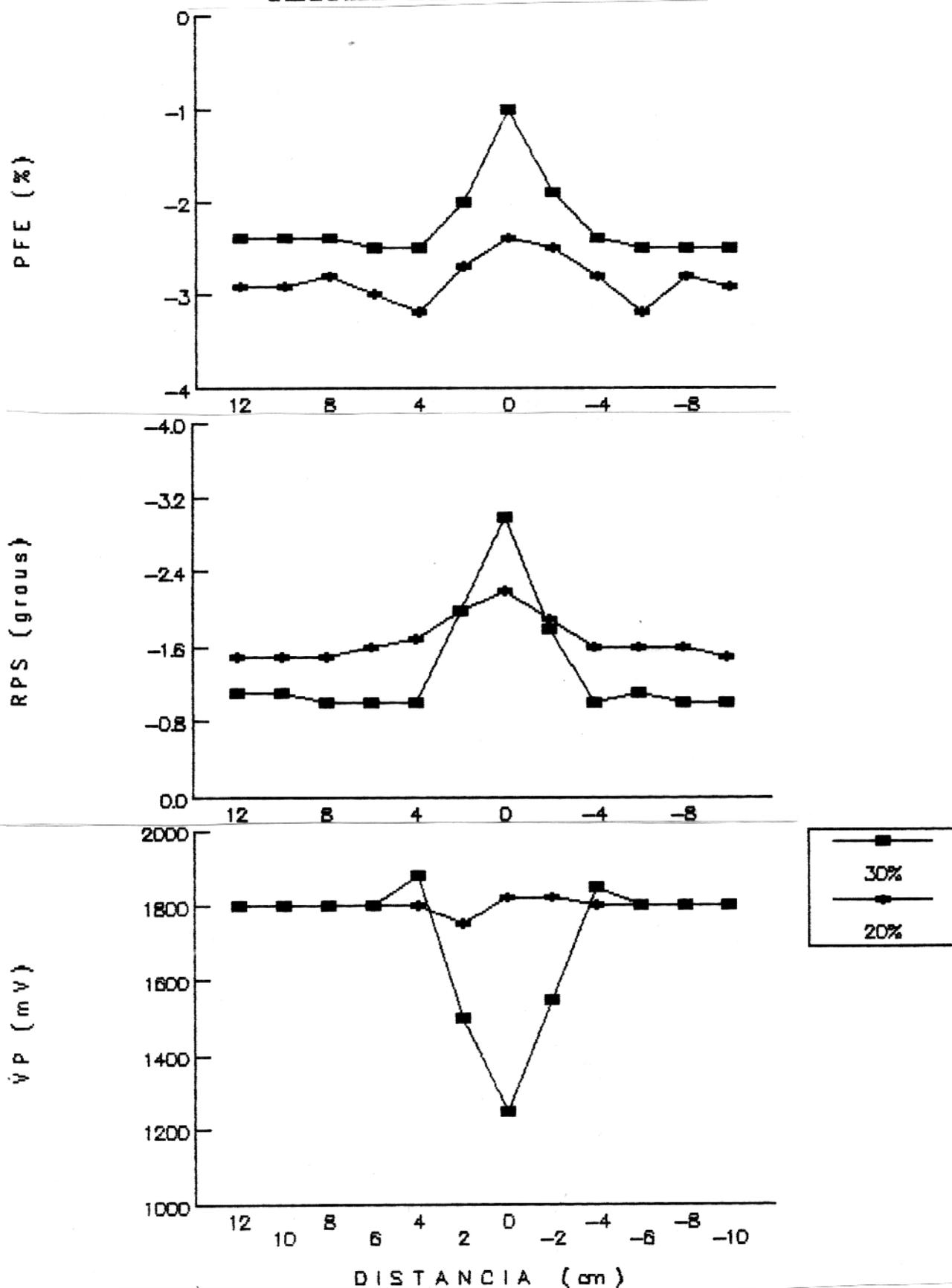


FIGURA 46

PLACA 2.0cm, PROF.=2.0cm

TEOR DE 30%

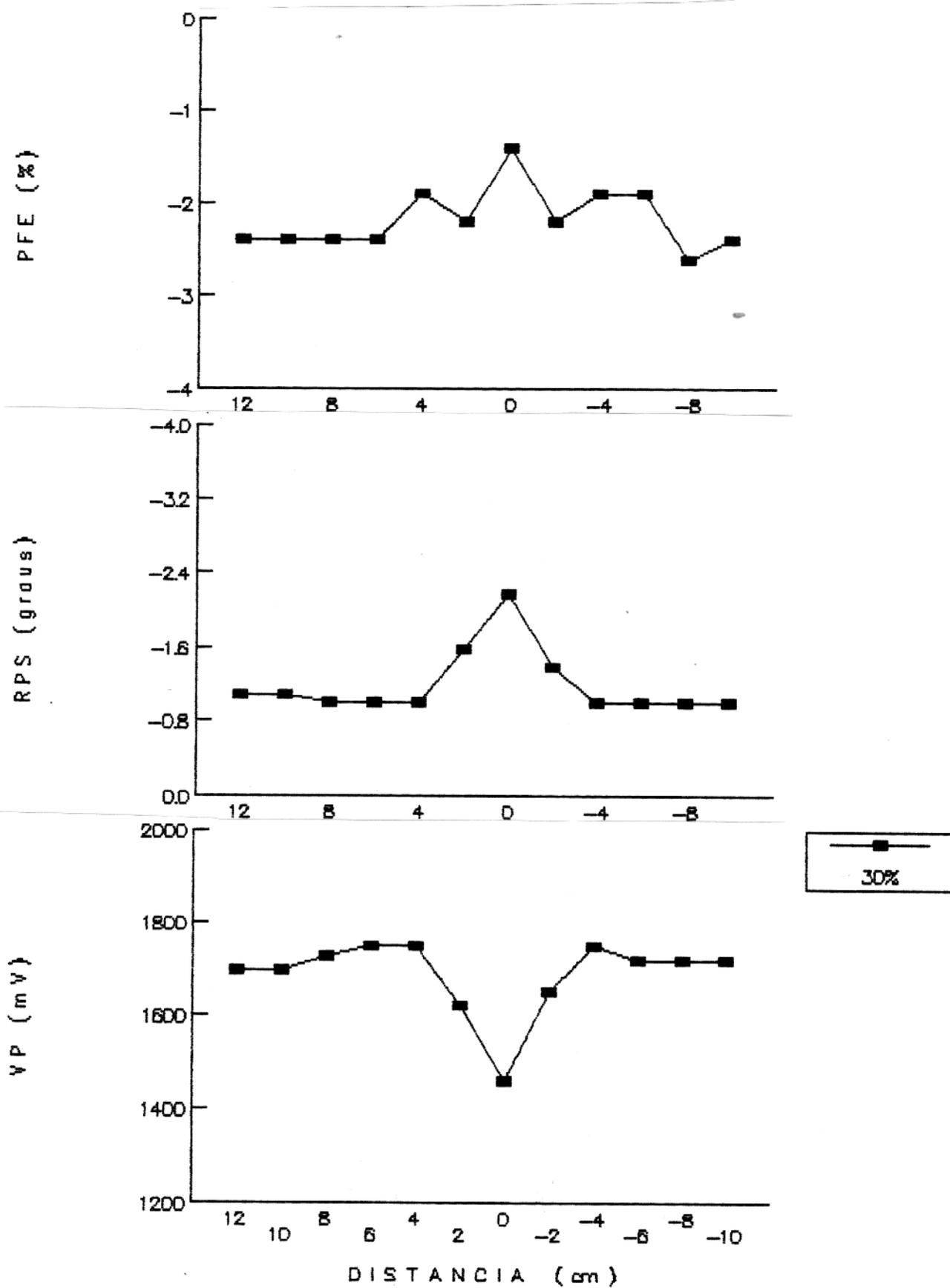


FIGURA 47

PLACA 3.0cm, PROF.=0.5cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

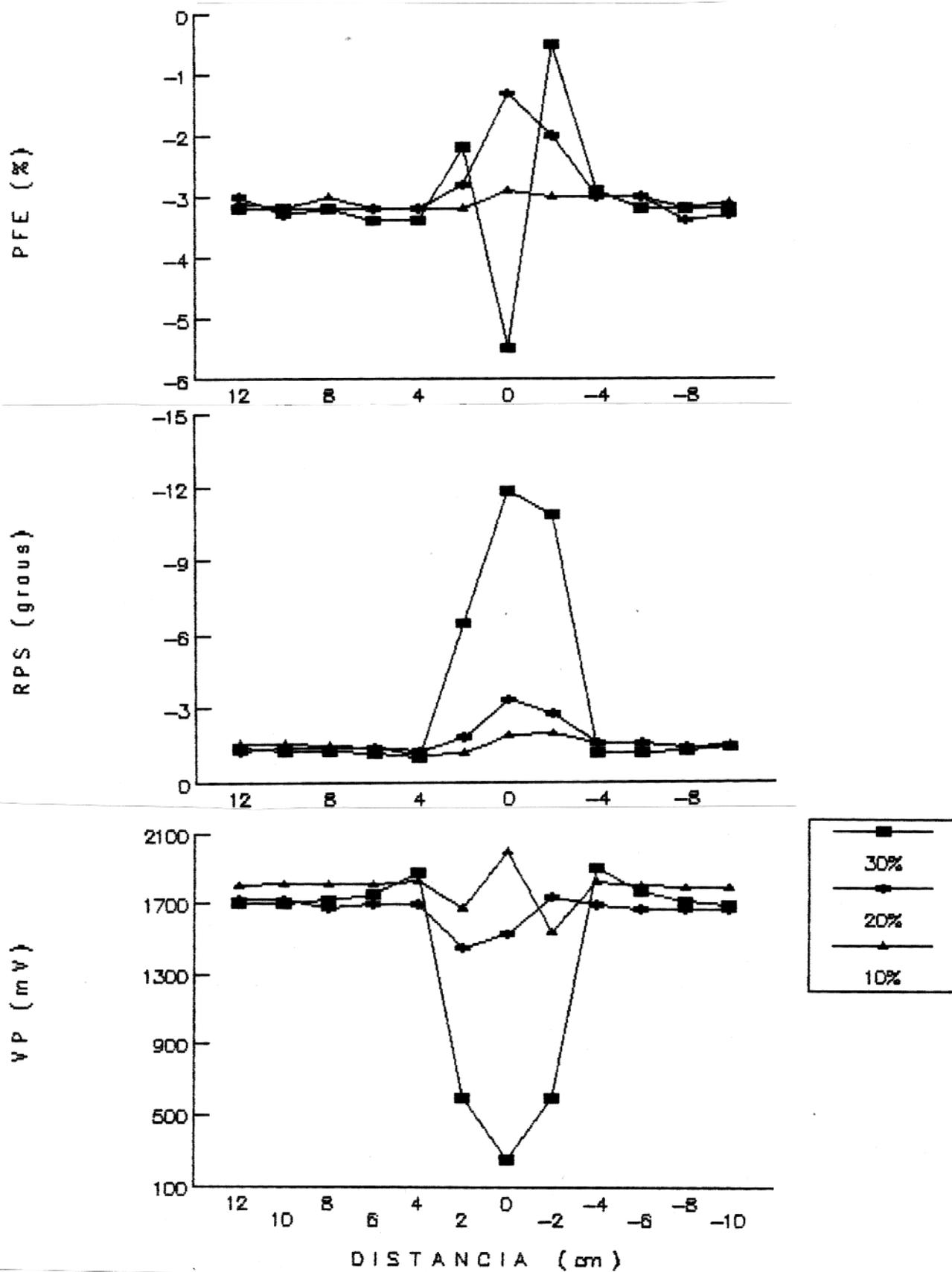


FIGURA 48

PLACA 3.0cm, PROF.=1.0cm

TEORES DE 10, 20 E 30%

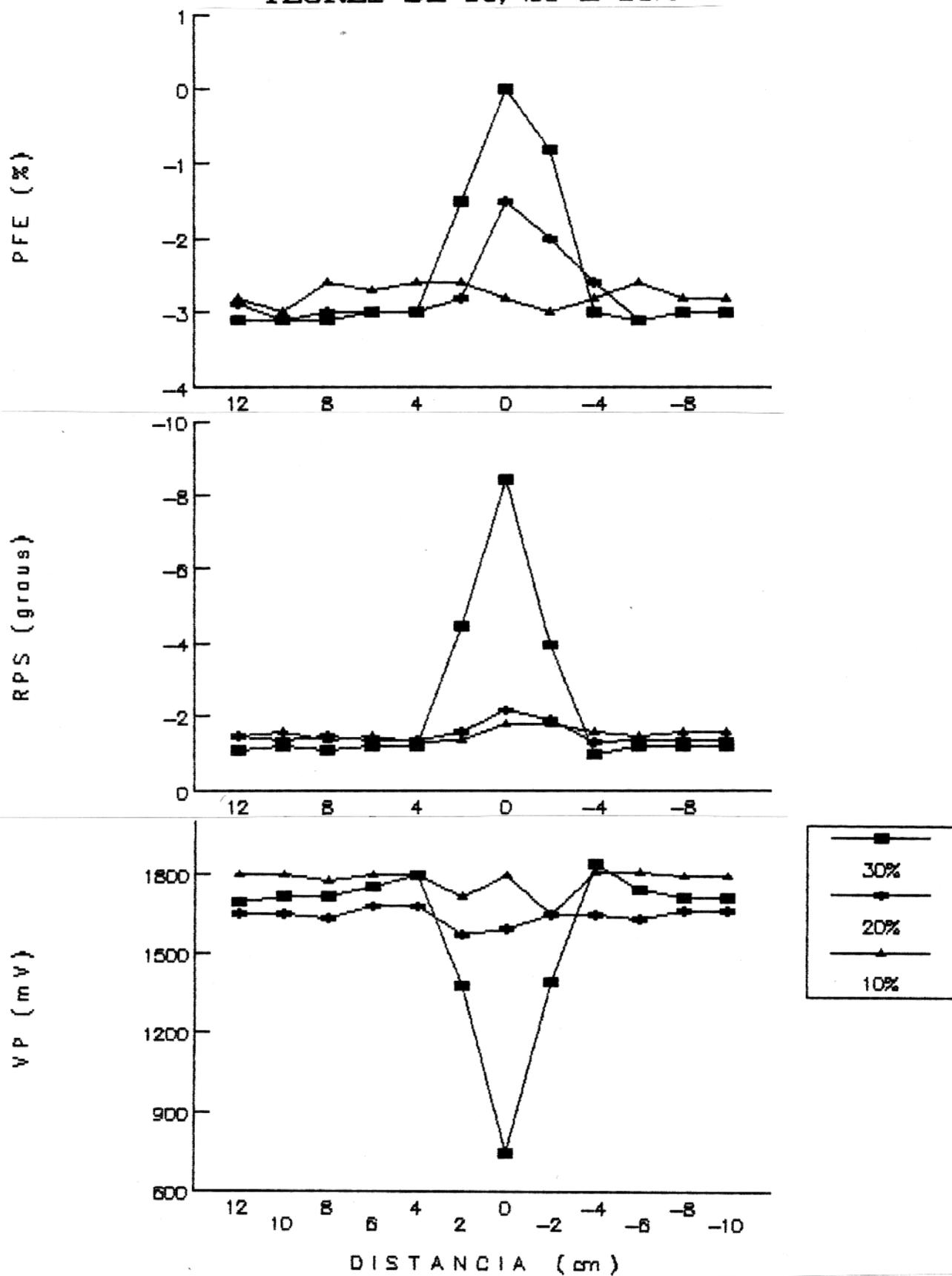


FIGURA 49

PLACA 3.0cm, PROF.=1.5cm

TEORES DE 20 E 30%

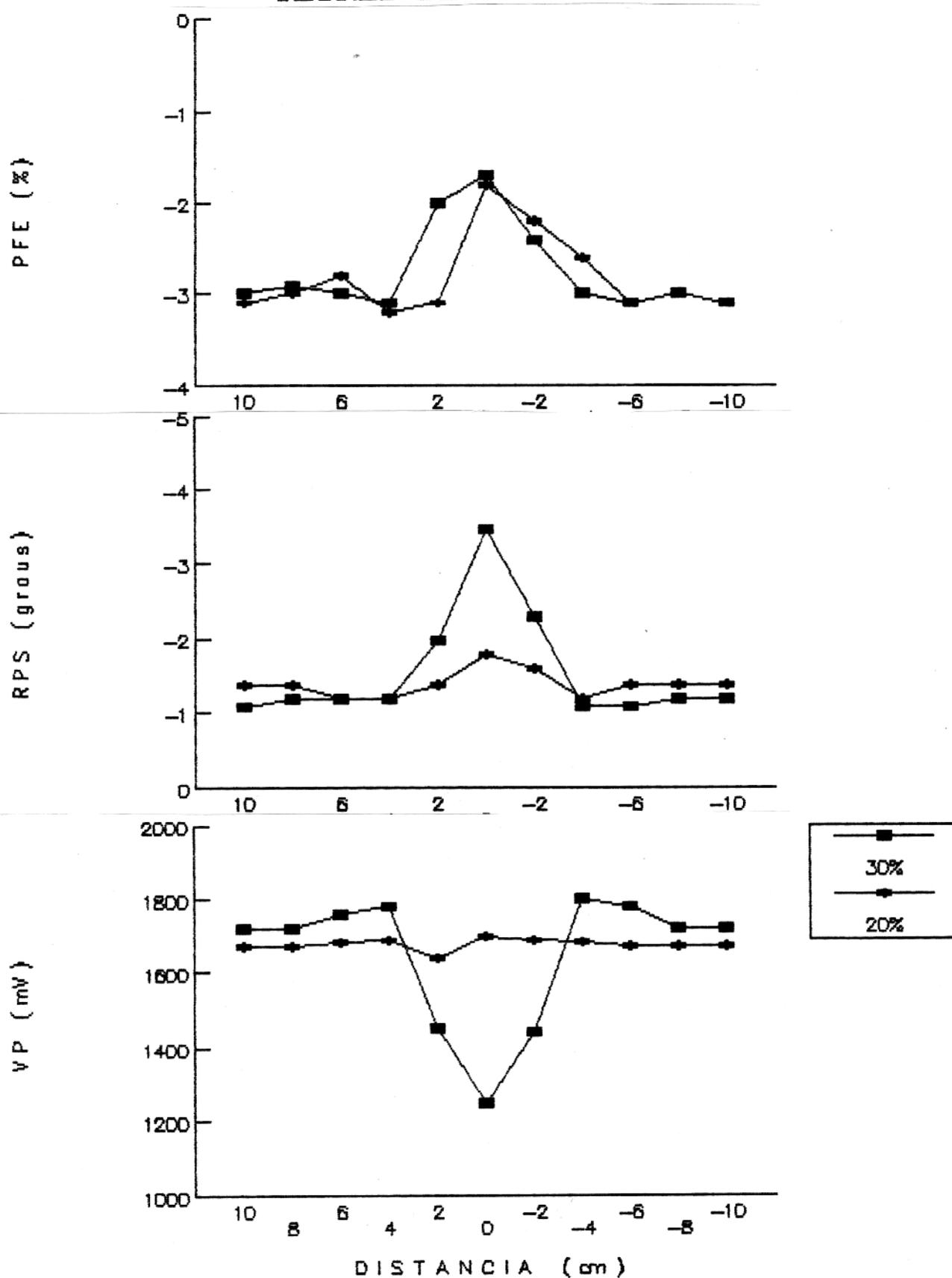


FIGURA 50

PLACA 3.0cm, PROF.=2.0cm

TEORES DE 20 E 30%

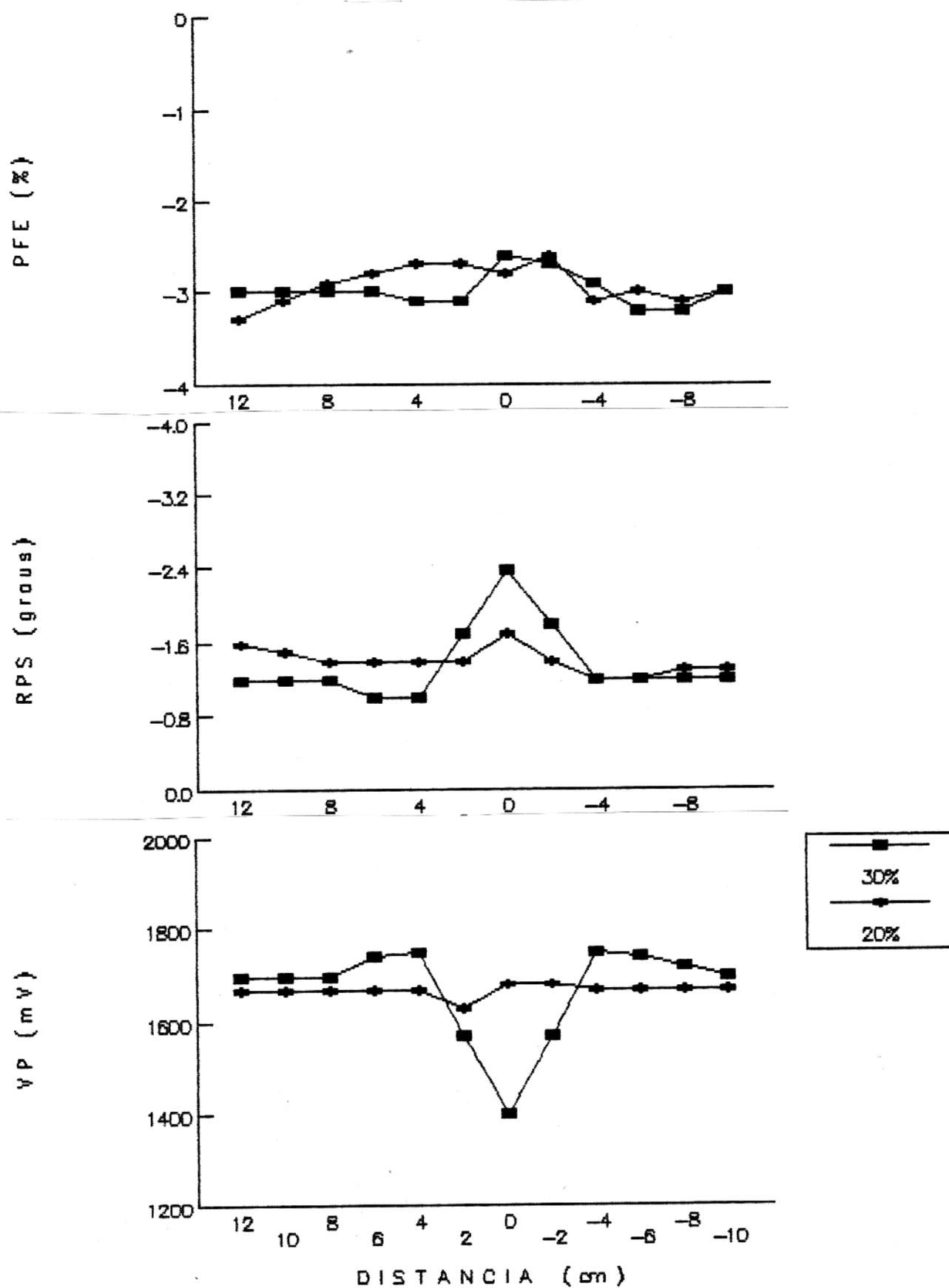


FIGURA 51

PLACA 3.0cm, PROF.=3.0cm

TEOR DE 30%

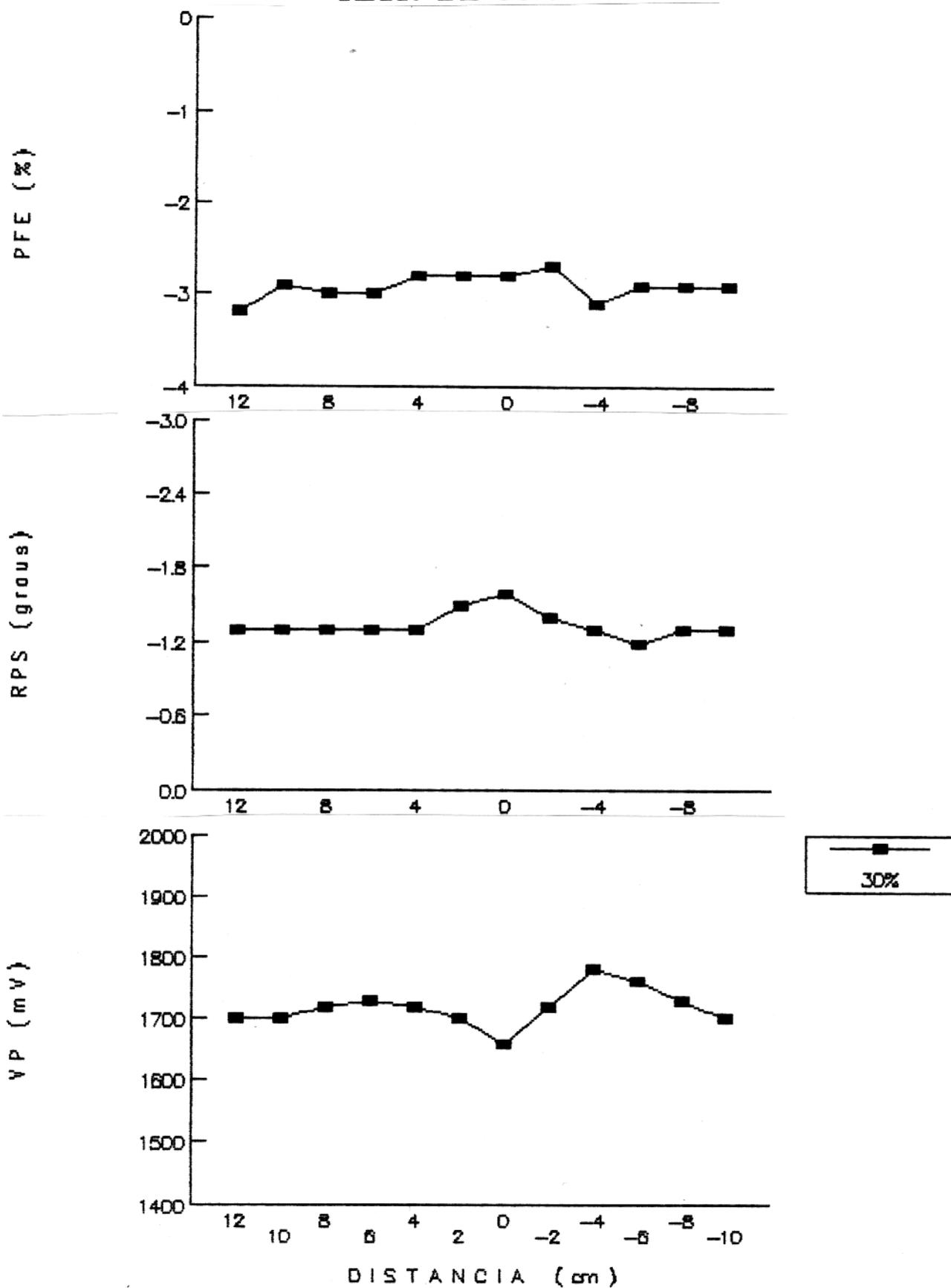


FIGURA 52

# VARIACAO DA ESPESSURA

## PLACAS 2.0 E 3.0cm, PROF.=0.5cm

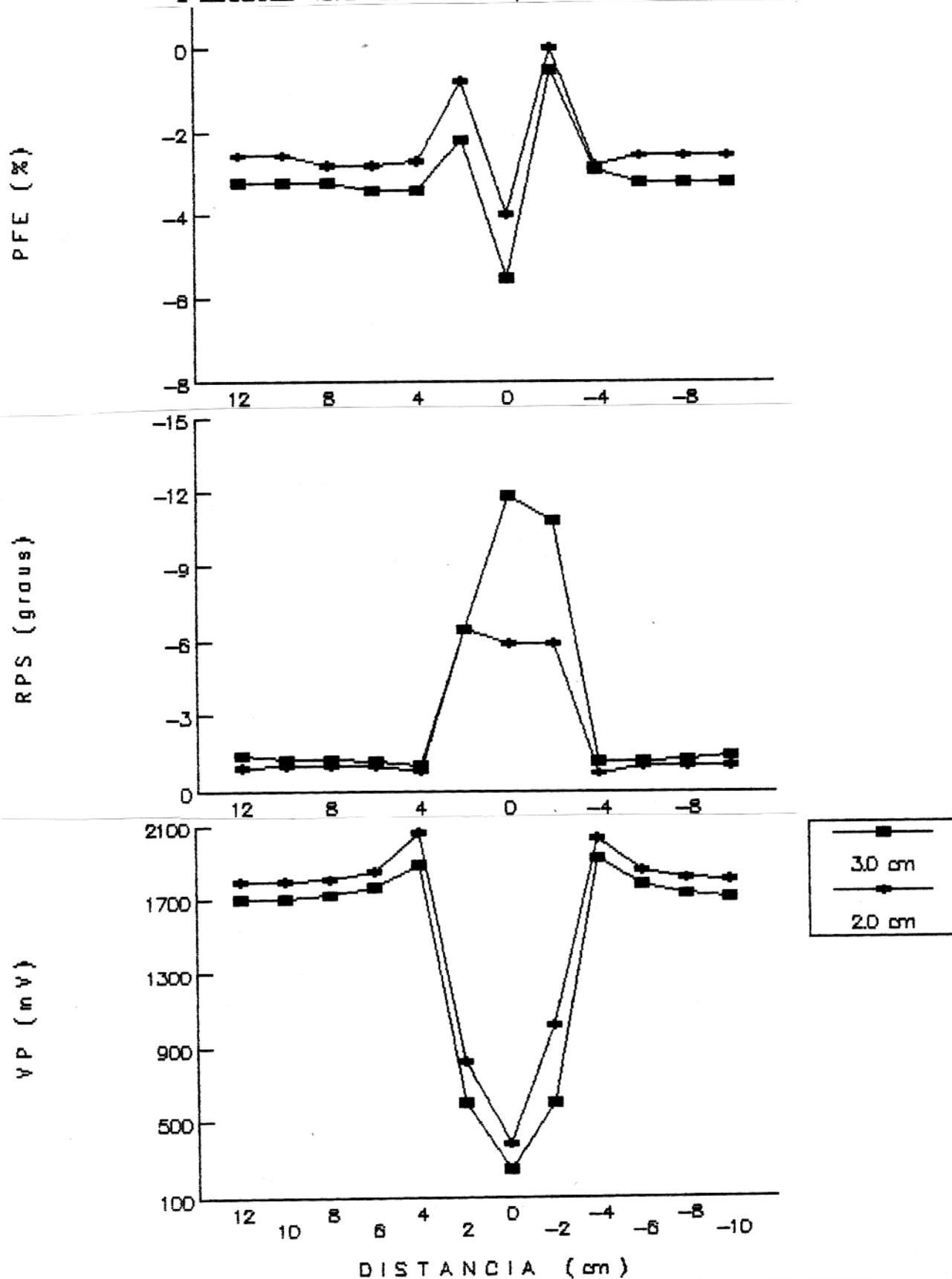


FIGURA 53

# VARIACAO DA PROFUNDIDADE

PLACA 2.0cm, 30%

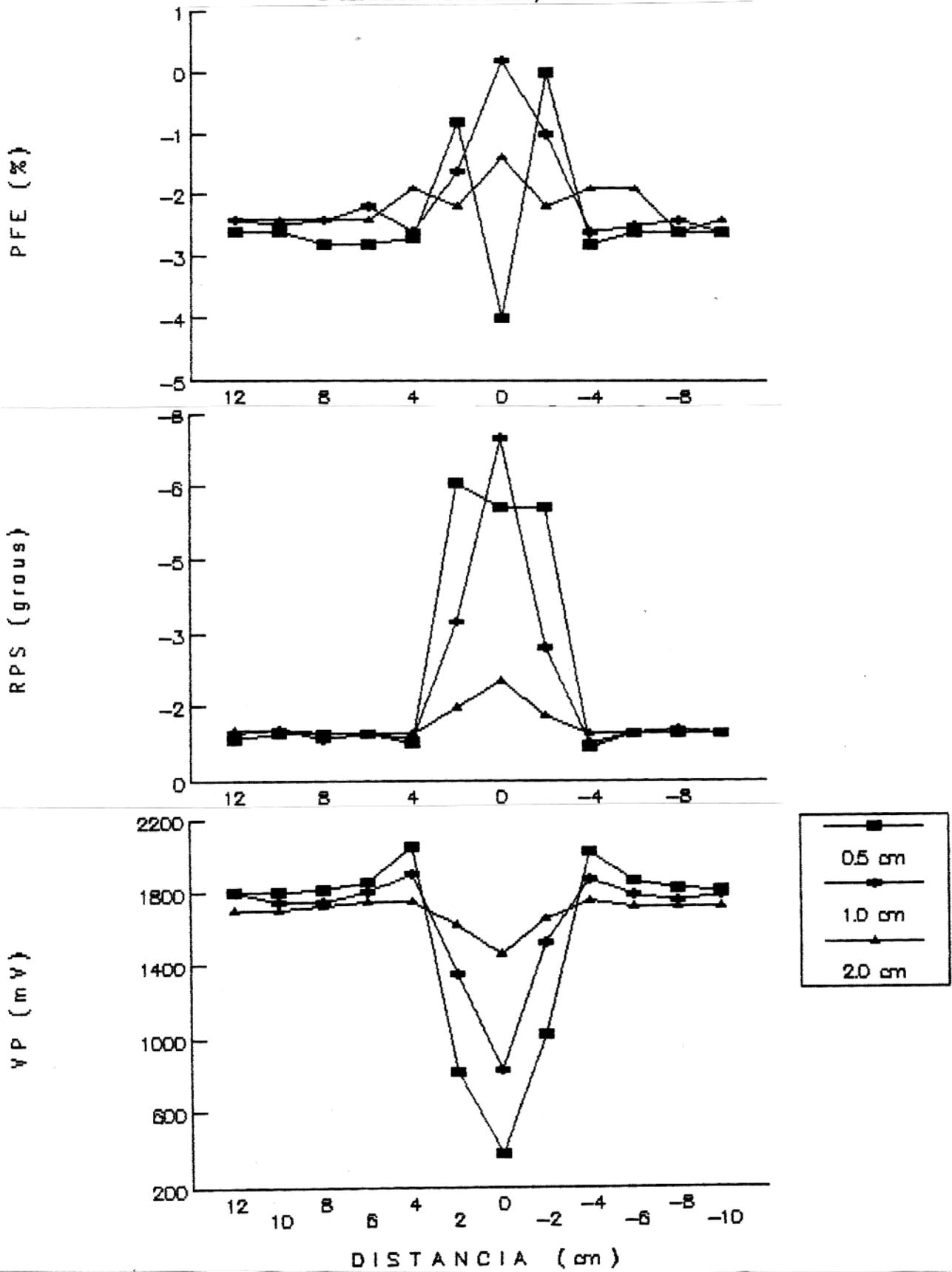


FIGURA 54

# VARIACAO DA PROFUNDIDADE

## PLACA 3.0cm, 30%

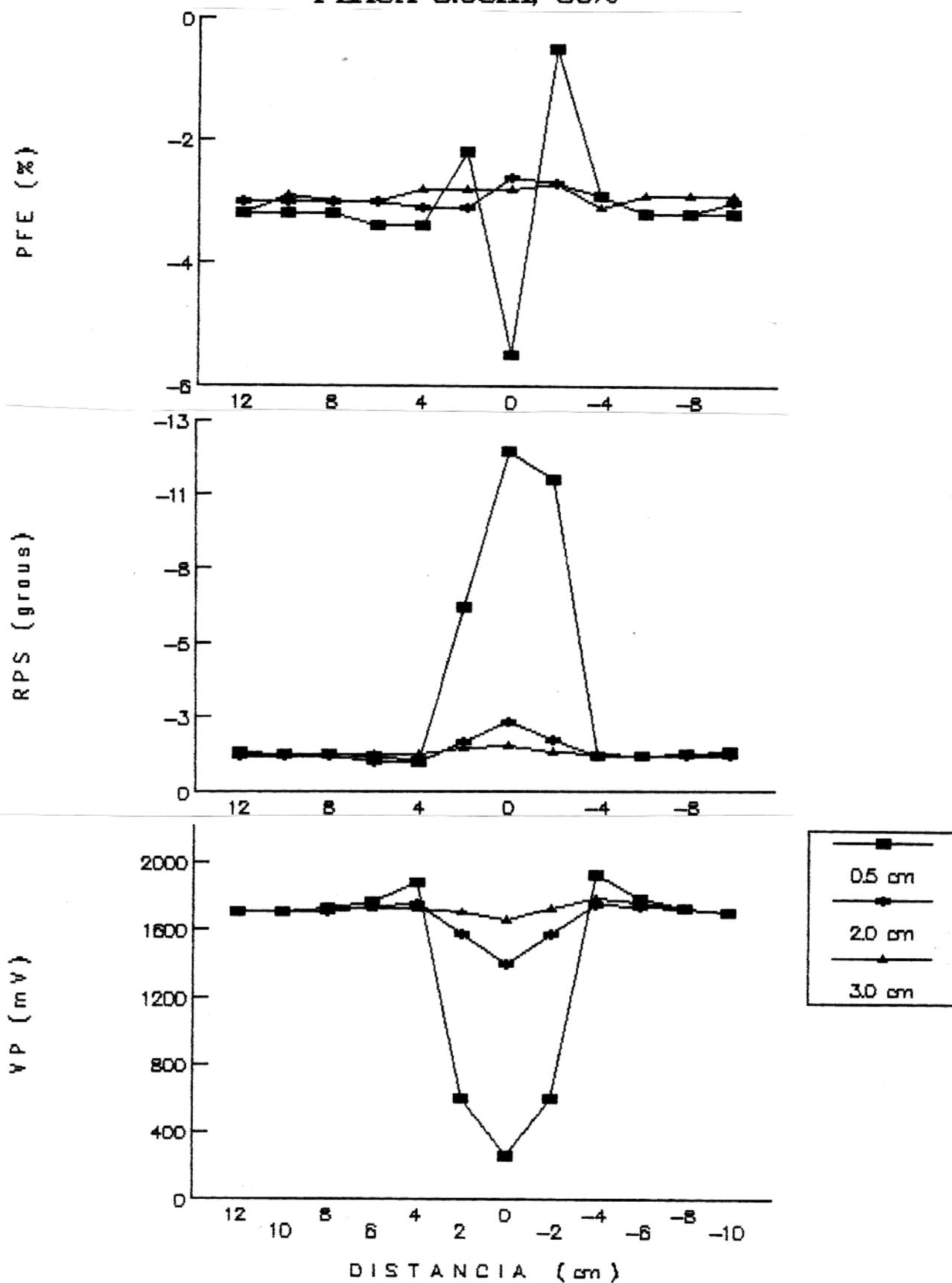


FIGURA 55

## VARIACAO DA ORIENTACAO

PLACA 3.0cm, 30%, ANG. 90, 30 E 45'

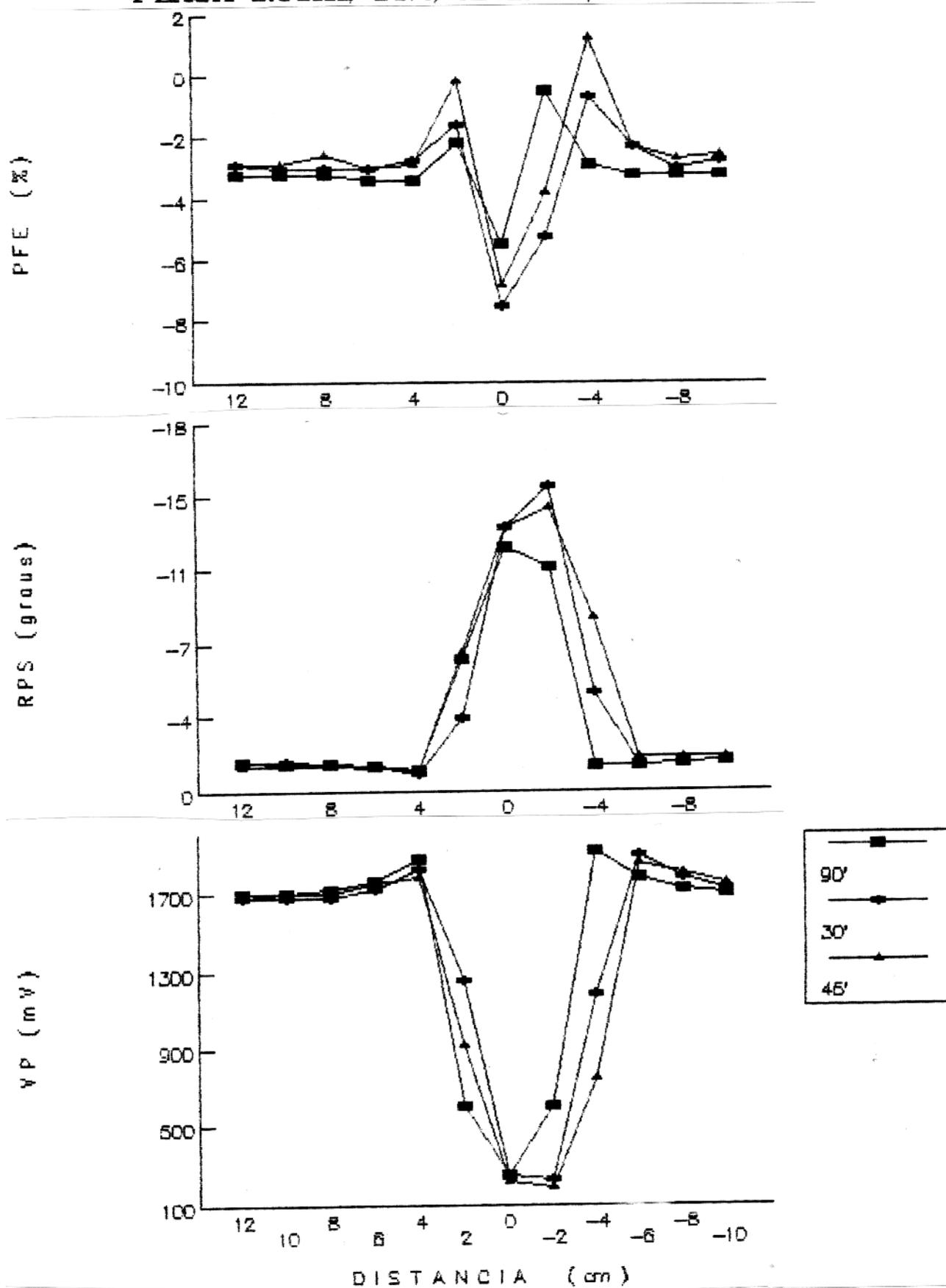


FIGURA 56

# VARIACAO DO MERGULHO (PROF.=0.5cm)

PLACA 2.0cm, 30%, ANG. 90, 30 E 45'

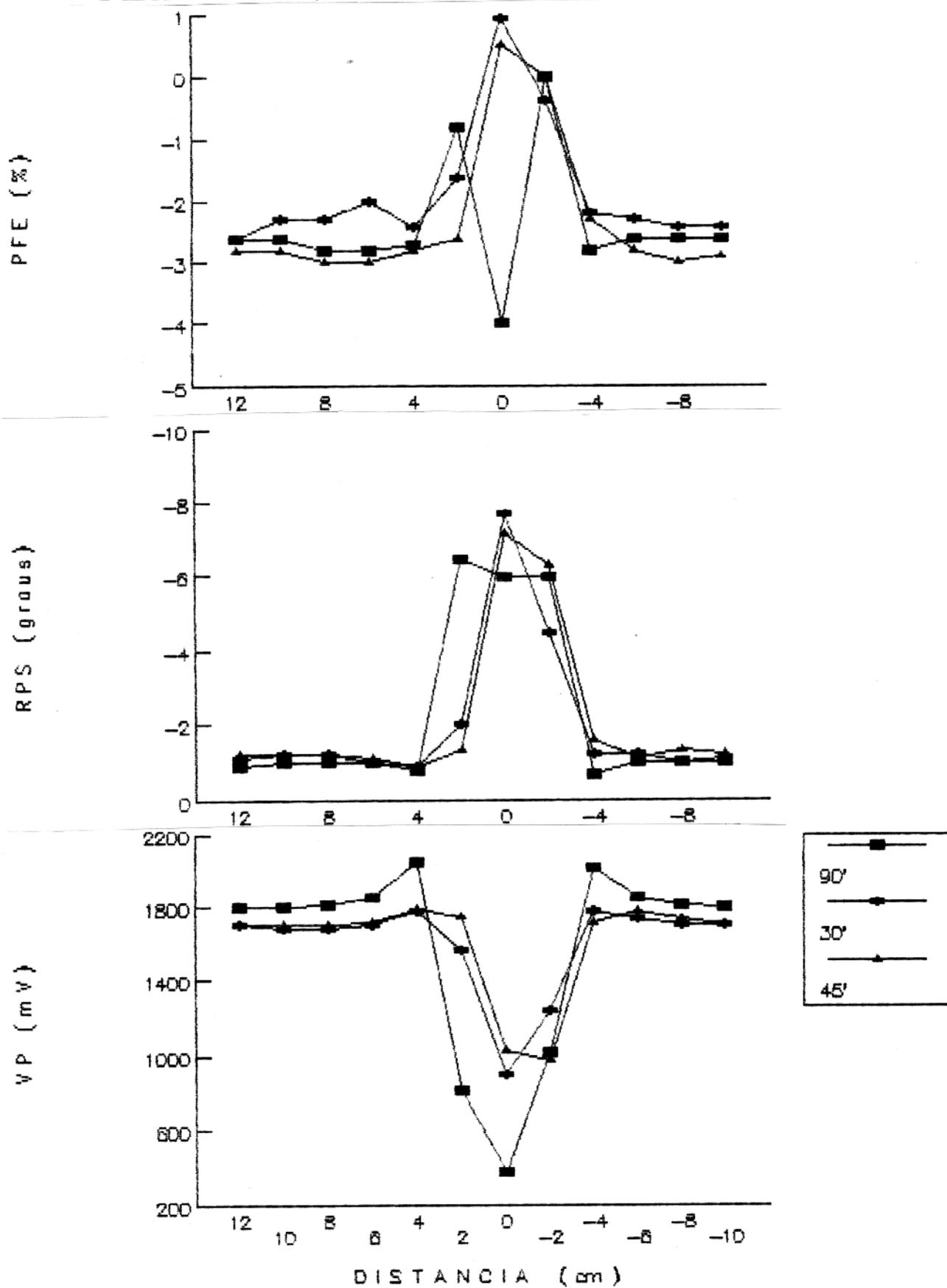


FIGURA 57

# VARIACAO DO MERGULHO (PROF.=0.5cm)

PLACA 3.0cm, 30%, ANG. 90, 30 E 45'

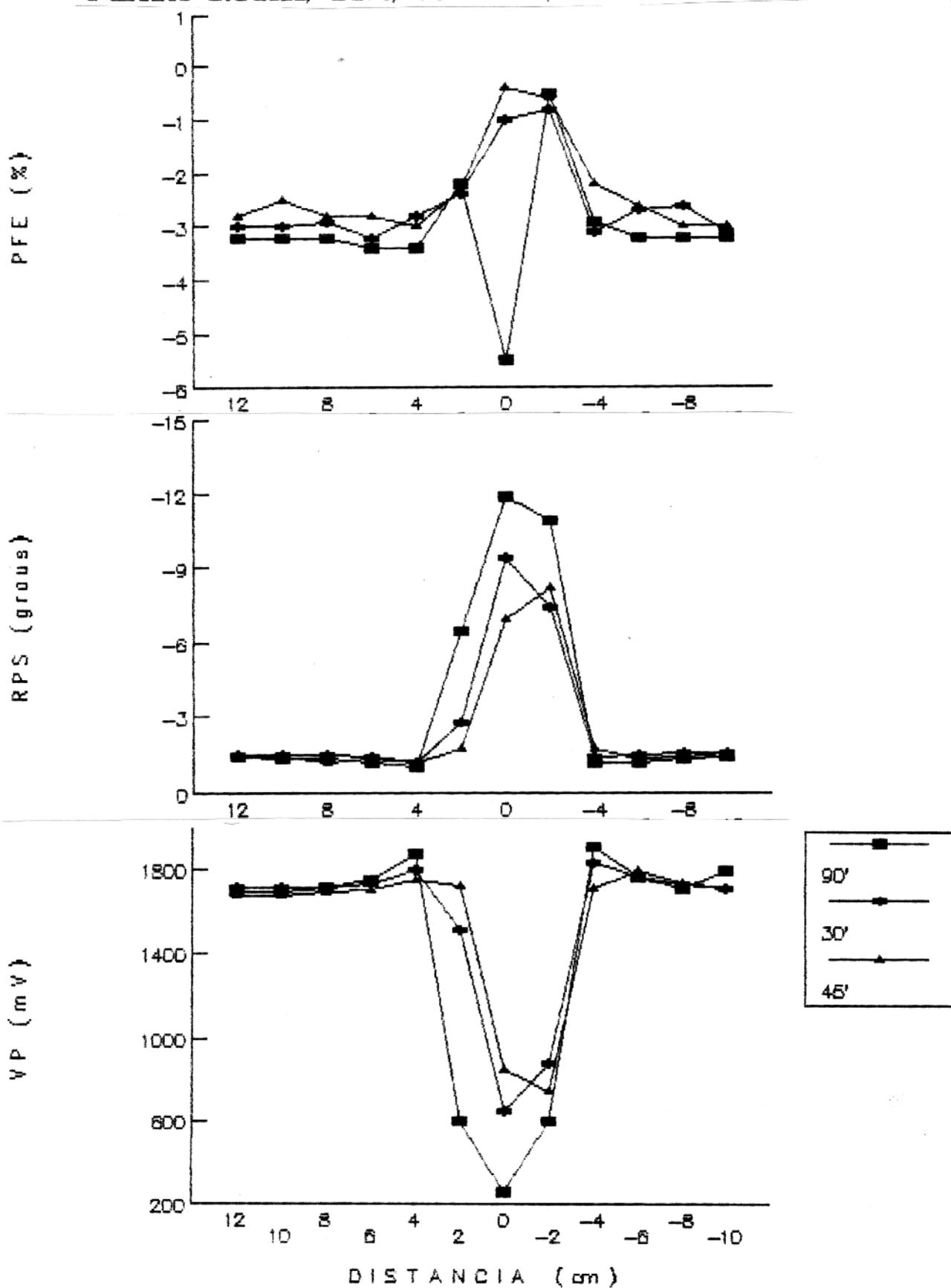


FIGURA 58

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A avaliação dos resultados realizada no capítulo anterior foi feita de acordo com a apresentação dos dados sob a forma de perfis completos e de maneira particularizada. Aqui será tentada uma análise de forma global, sob a forma de perfis sintéticos apresentando dados escolhidos e representativos do aspecto a ser analisado.

Nesta análise, foram considerados os valores pico a pico das anomalias, mesmo nos casos de valores negativos por entender-se que os mesmos não significam uma ausência de anomalia e sim exatamente o contrário. Os valores obtidos foram plotados em módulo, evitando-se assim uma interpretação equivocada do perfil sintético nos pontos referentes aos picos negativos.

### 5.1 Cilindros horizontais

#### 5.1.1 Efeito da variação do teor

As FIGURAS 59, 60 e 61 apresentam os gráficos correspondentes aos cilindros de 2,54; 3,81 e 5,08 cm, respectivamente, para os teores de 10, 20 e 30% de teor volumétrico de pó de grafita nas profundidades de 0,5 e 1,0 cm.

Os perfis de PFE evidenciam que o nível de detecção dos modelos claramente evolui com o aumento do teor, exceção feita para o cilindro de 2,54 cm à profundidade de 0,5 cm, onde acontece uma queda na amplitude da anomalia na passagem do teor 10% para 20%.

O parâmetro RPS revela um comportamento semelhante, mostrando que a amplitude da anomalia aumenta com o teor.

Os perfis Vp mostram que também este parâmetro evolui para valores de amplitude mais altos à medida que aumenta o teor em grafita, exceção feita para a passagem de teor de 10 para 20%, no caso do cilindro 5,08 cm à profundidade de 1,0 cm.

### 5.1.2 Efeito da variação de profundidade

Na FIGURA 62 são mostrados os perfis para os cilindros de 30% de teor com os diâmetros já citados que avaliam o nível de detecção dos modelos em função da profundidade.

O comportamento dos perfis de PFE, RPS e  $V_p$  é bastante semelhante e mostram que a detecção dos modelos diminui com o aumento da profundidade. Pela análise destes gráficos e também daqueles mostrados no item 4.2.1.1, pode-se afirmar que os parâmetros PFE e RPS detectam os modelos até a profundidade de 2,0 cm, que é igual ao espaçamento utilizado, enquanto que o parâmetro  $V_p$  detecta o modelo de 5,08 cm até a profundidade de 2,5 cm.

### 5.1.3 Efeito da variação do diâmetro

Para esta análise, foram escolhidas as profundidades de 0,5 e 1,0 cm, FIGURAS 63 e 64, respectivamente. Foram plotados nestas figuras os resultados referentes aos três teores estudados.

Observa-se que o parâmetro PFE para o teor de 30% assume comportamentos distintos para as duas profundidades, verificando-se que a maior intensidade de anomalia ocorre para os diâmetros de 2,54 cm à profundidade 0,5 cm e 3,81 cm à profundidade 1,0 cm. Outro dado interessante para este teor é que a intensidade da anomalia  $V_p$  é inversamente proporcional ao aumento do diâmetro, que é o oposto do que ocorre para os teores de 10 e 20%.

Quanto ao parâmetro RPS, verifica-se que na profundidade 1,0 cm, a intensidade da anomalia é diretamente proporcional ao aumento do diâmetro do modelo, o que não acontece para a profundidade 0,5 cm.

### 5.1.4 Efeito da variação da orientação

A FIGURA 65 mostra a comparação entre as orientações dos cilindros horizontais com relação ao perfil de medidas, para os ângulos de 90, 30 e 45°.

Os valores plotados nos gráficos são aqueles

correspondentes às diferenças medidas entre valores pico a pico das anomalias. Mesmo assim, parece que este não é o modo mais apropriado para avaliar-se a influência do ângulo do modelo em relação ao perfil de medidas. Não há aqui um parâmetro que reflita de maneira adequada a inclinação do modelo. Conclui-se daí, que o mais apropriado para uma melhor visualização da influência do ângulo é a análise dos perfis completos, já discutida no item 4.2.1.4.

## VARIACAO DO TEOR

CILINDRO 2.54cm

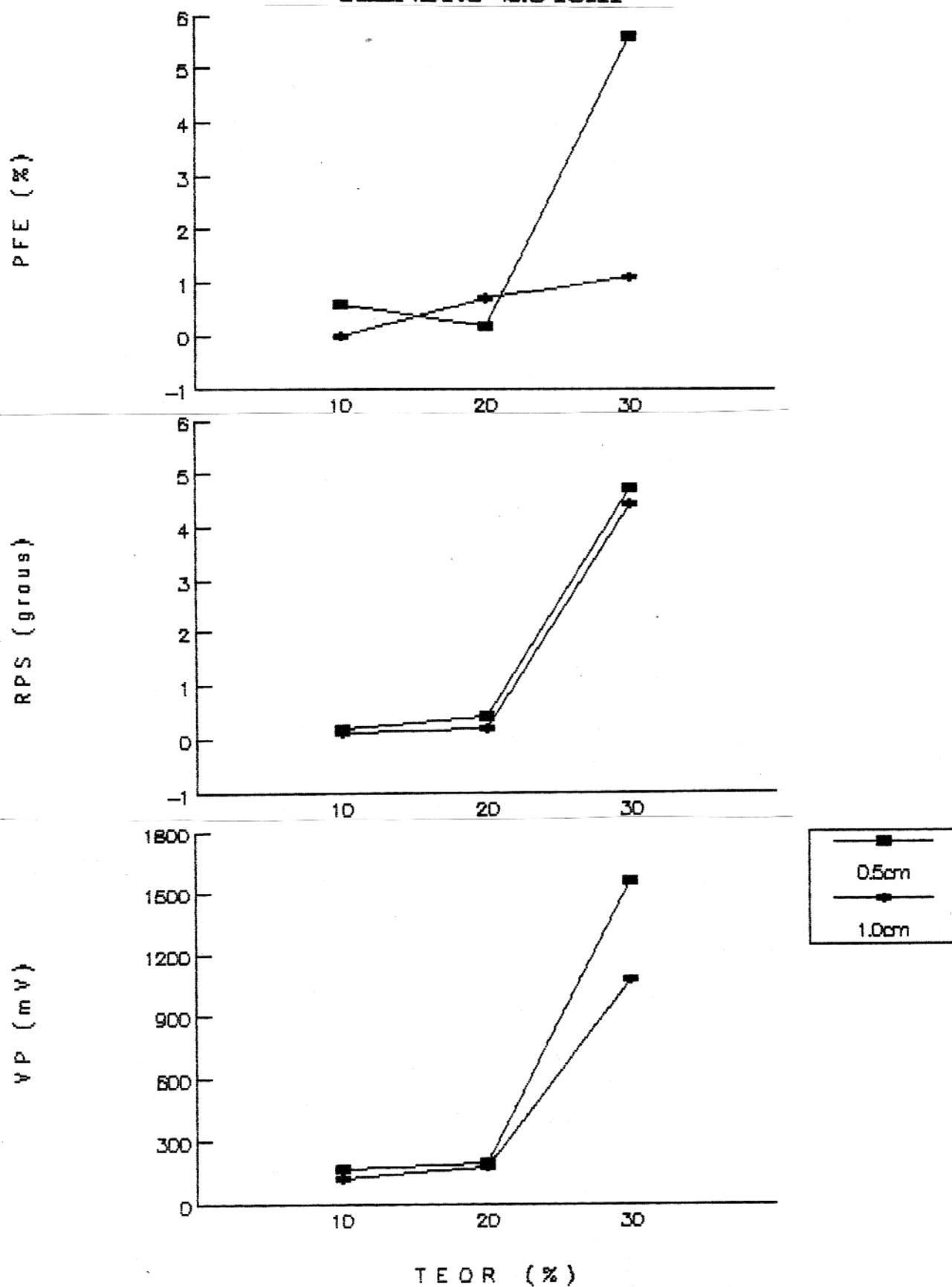


FIGURA 59

# VARIACAO DO TEOR

## CILINDRO 3.81cm

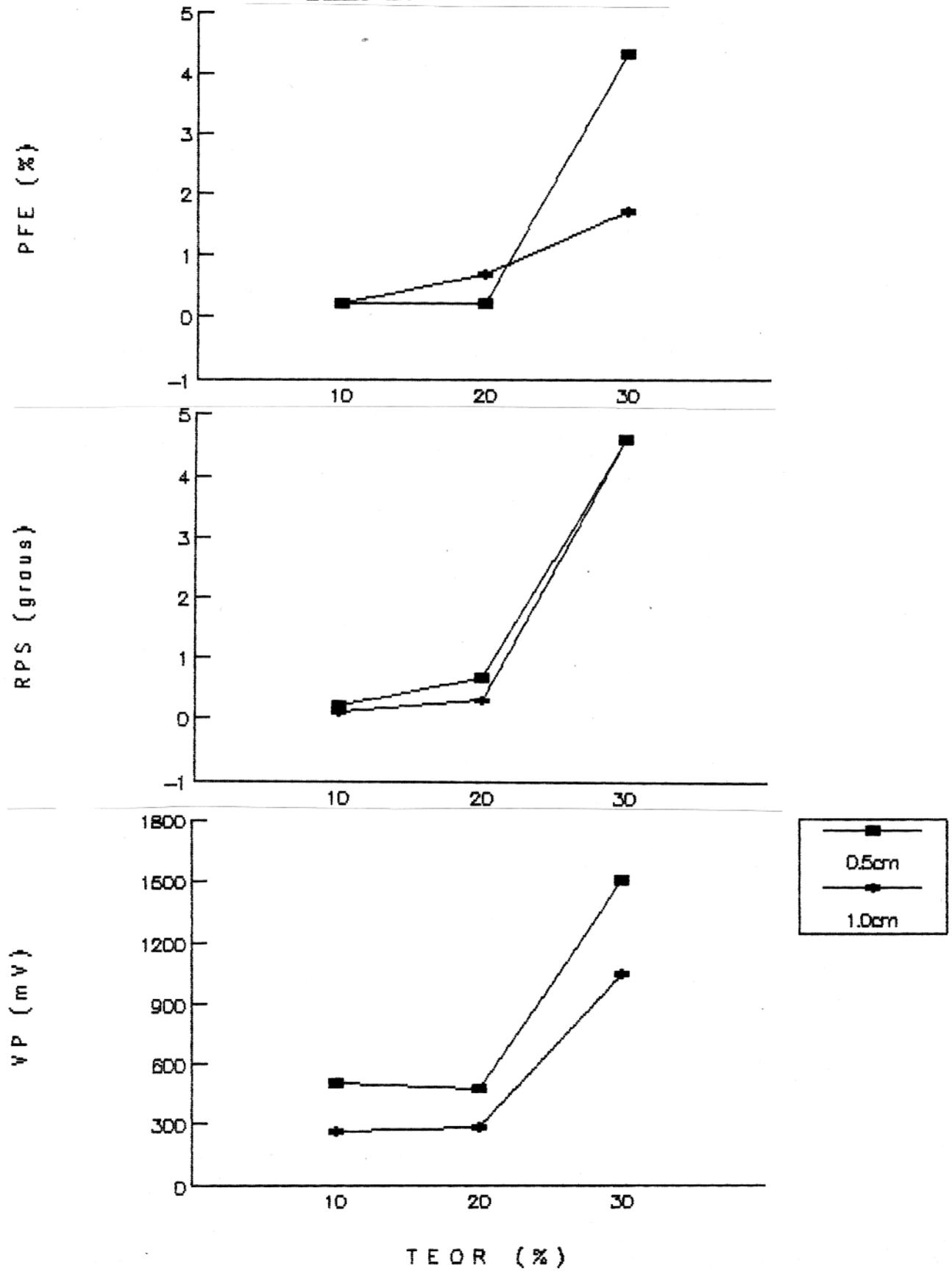


FIGURA 60

## VARIACAO DO TEOR

## CILINDRO 5.08cm

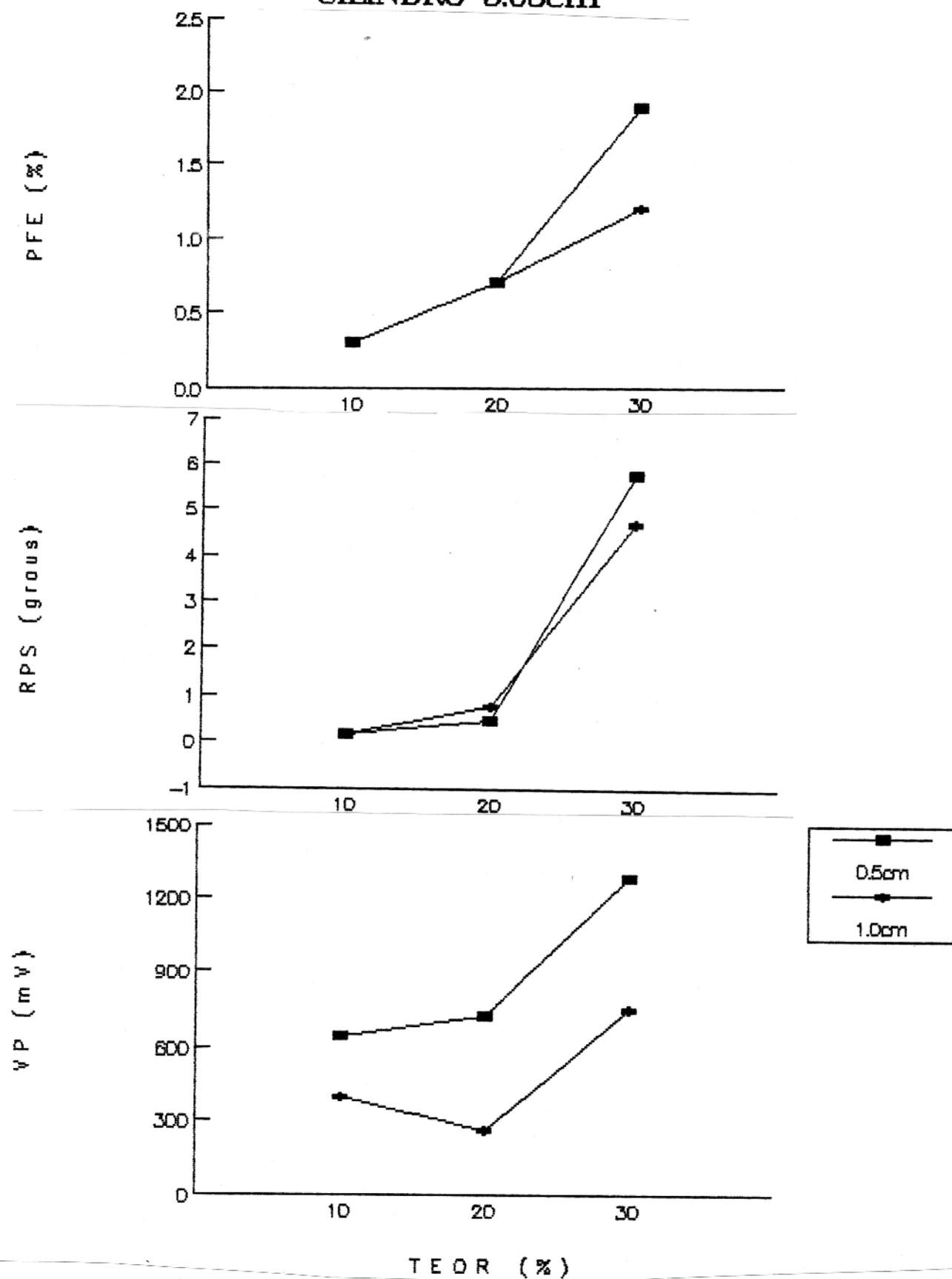


FIGURA 61

# VARIACAO DA PROFUNDIDADE

CIL 5.08, 3.81 E 2.54cm, 30%

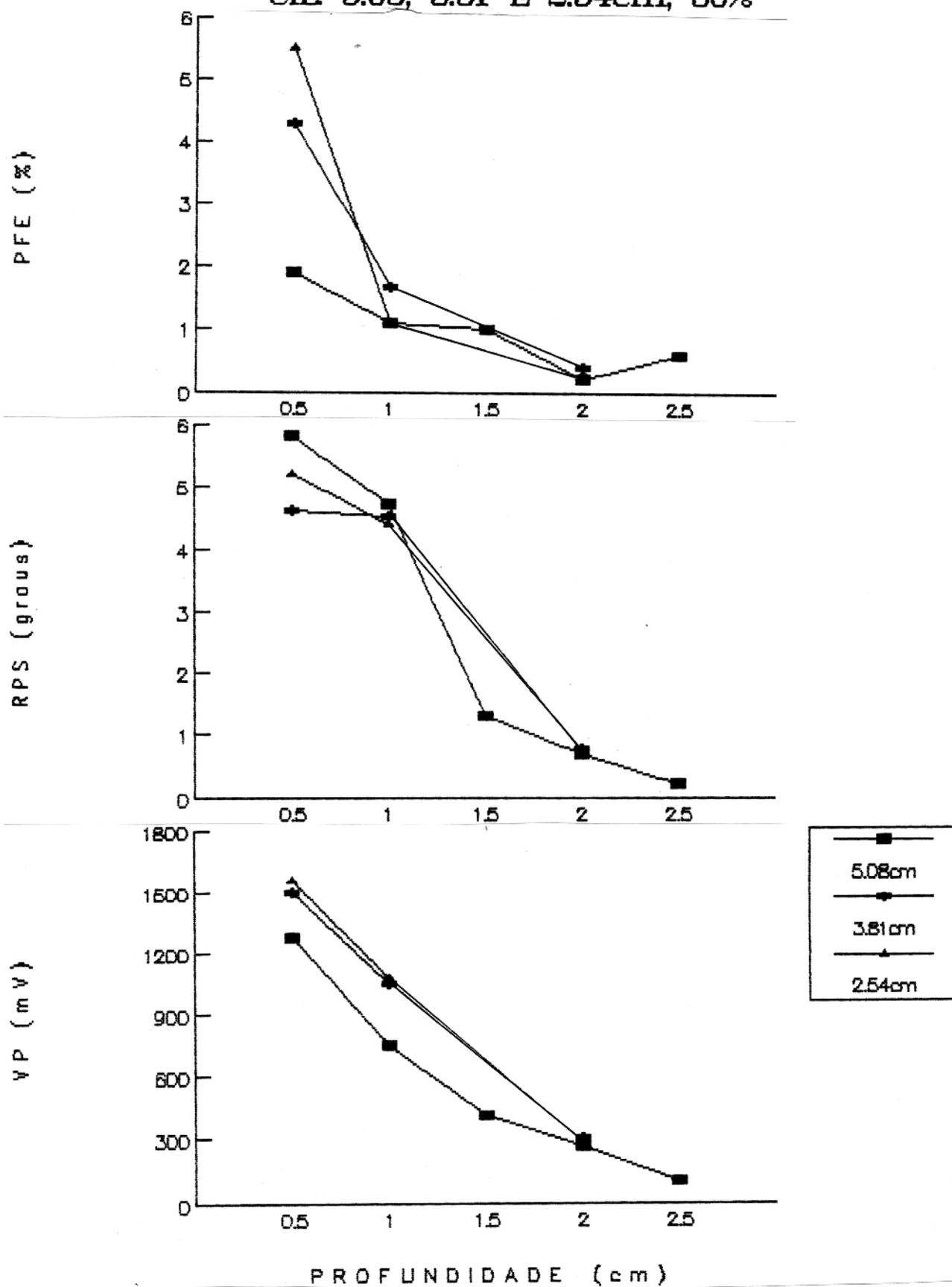


FIGURA 62

# VARIACAO DO DIAMETRO, PROF.=0.5cm

## CILINDROS TEORES 30, 20 E 10%

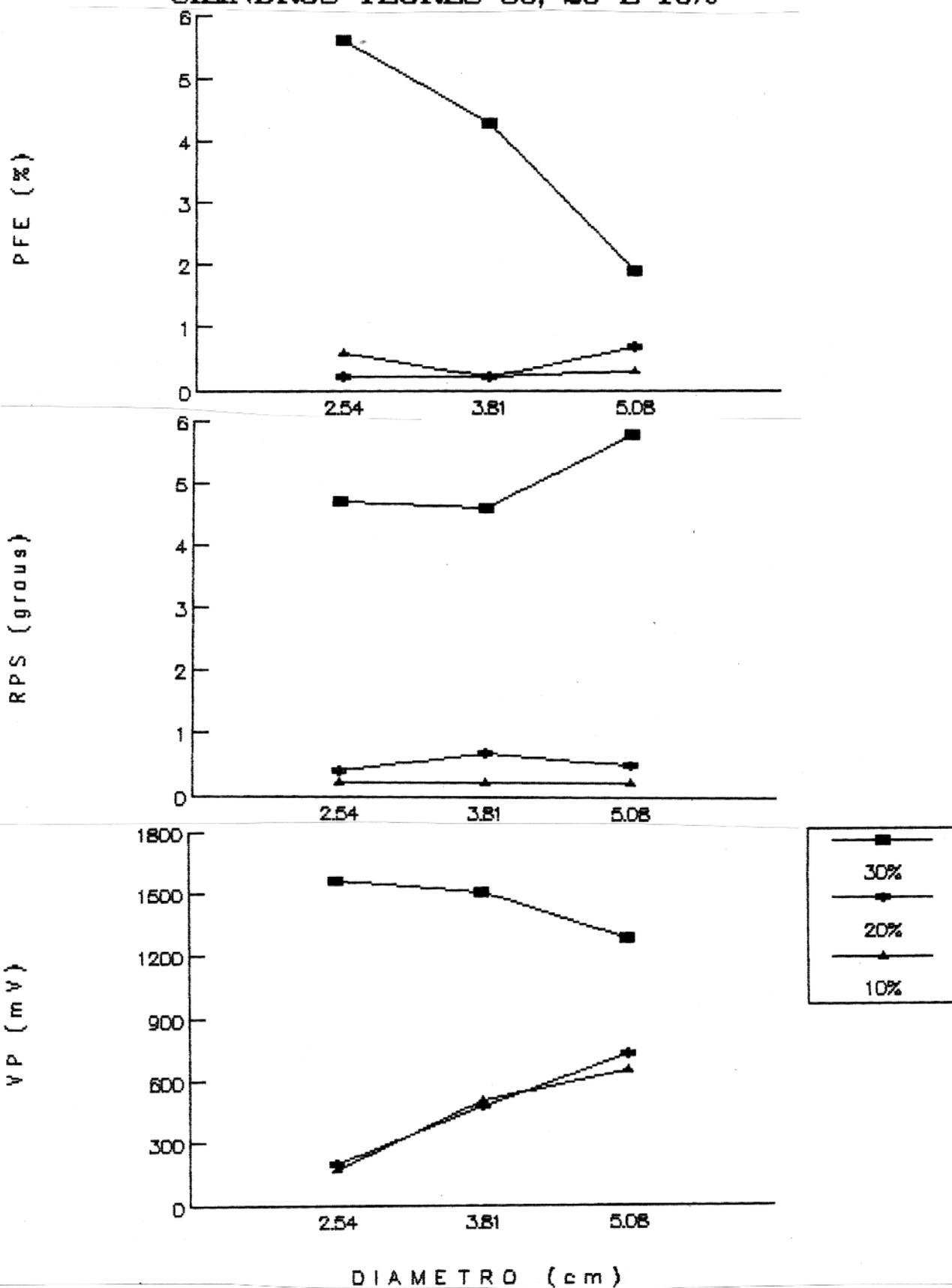


FIGURA 63

# VARIACAO DO DIAMETRO, PROF.=1.0cm

## CILINDROS TEORES 30, 20 E 10%

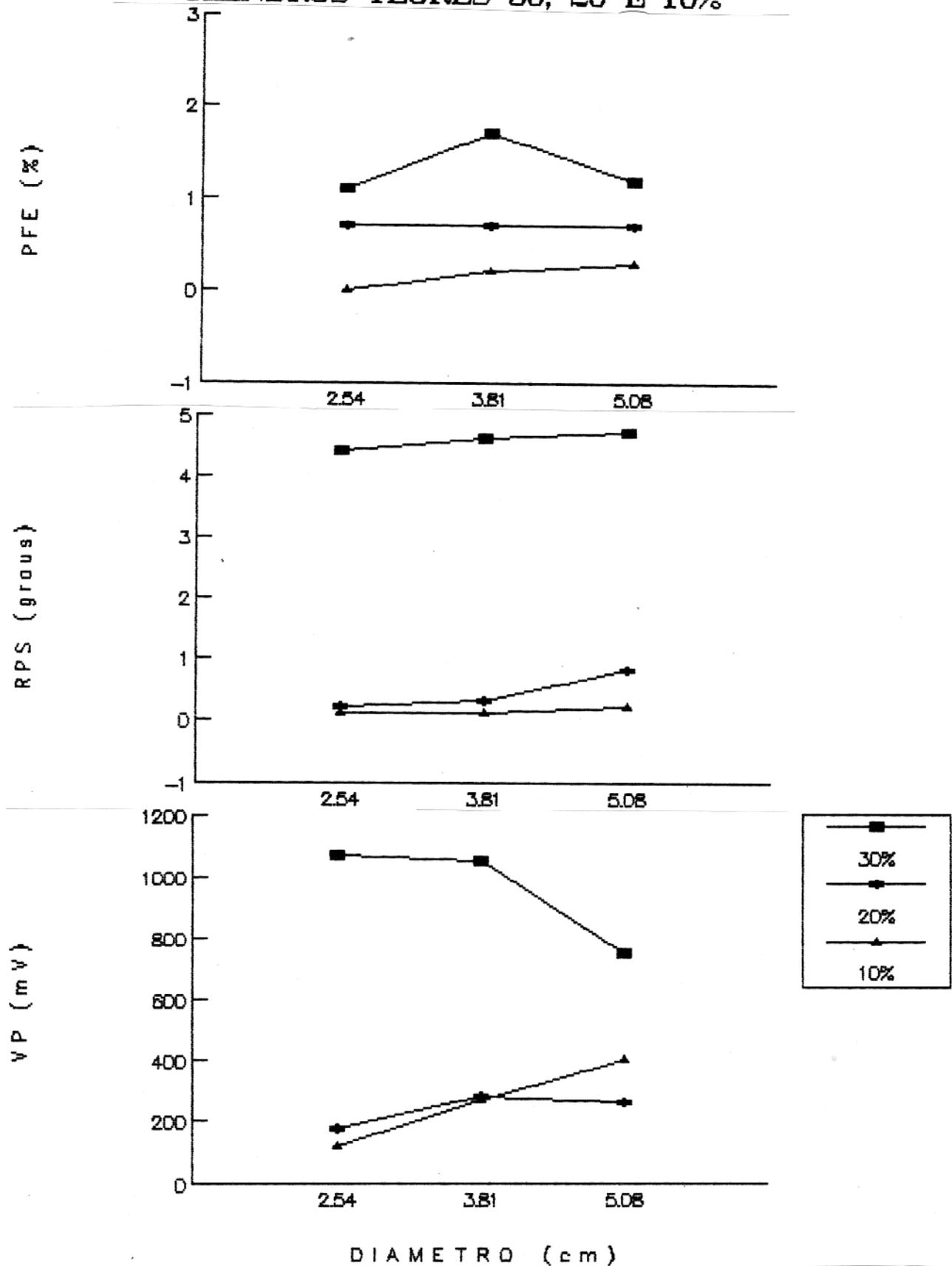


FIGURA 64

# VARIACAO DA ORIENTACAO (PROF.=0.5cm)

CIL 2.54, 3.81 E 5.08cm, 30%

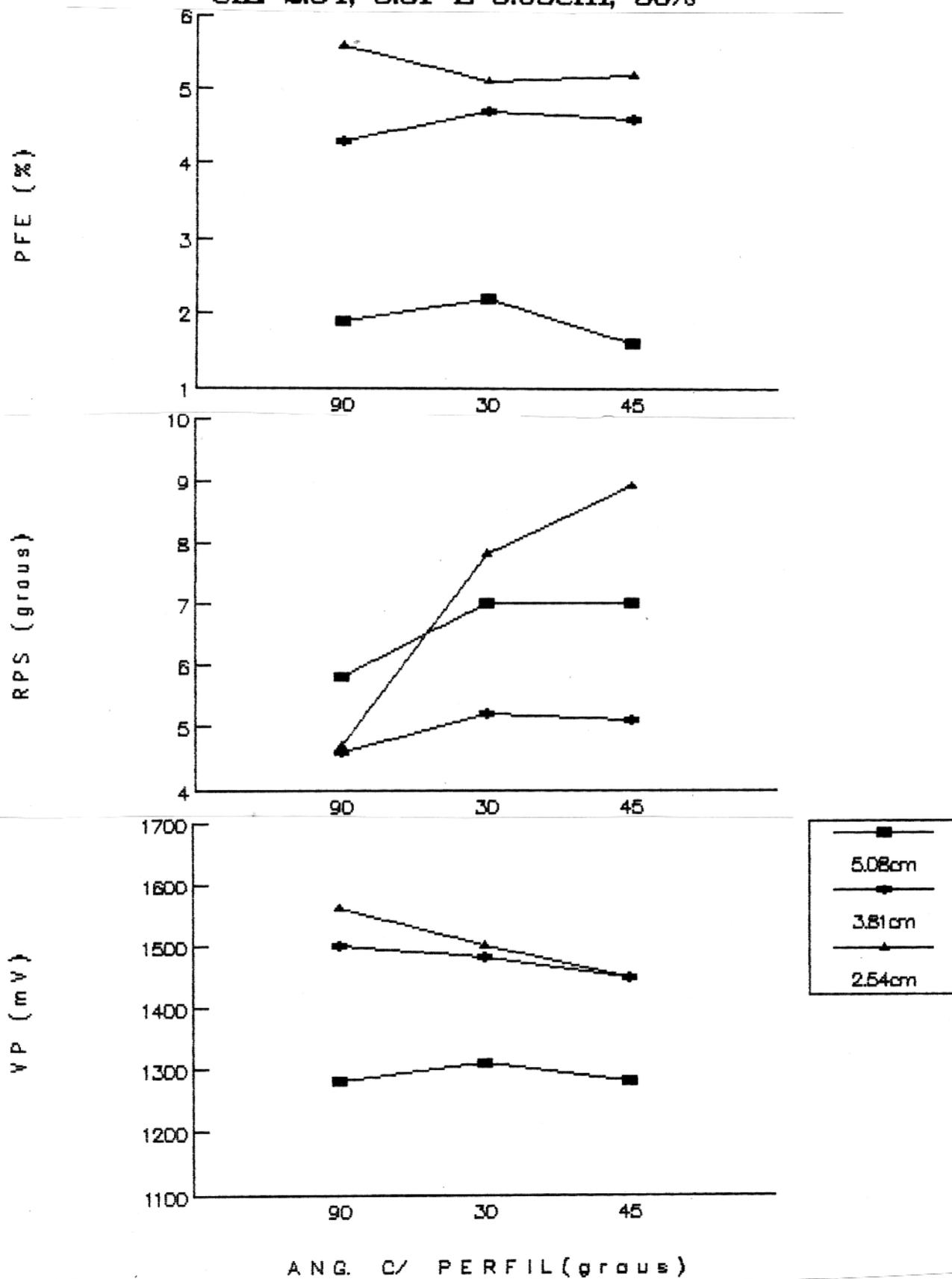


FIGURA 65

## 5.2 Os modelos tabulares (placas)

### 5.2.1 Efeito da variação do teor

As FIGURAS 66 e 67 trazem os perfis correspondentes à influência do teor em grafita para as placas de 2,0 e 3,0 cm, respectivamente. Para esta avaliação, foram escolhidas as profundidades de 0,5 e 1,0 cm.

Como já observado para o caso dos cilindros horizontais, aqui também ocorre de maneira ainda mais clara a melhora do nível de detecção com o aumento do teor volumétrico em pó de grafita para os modelos tabulares. Isto é verificado nos perfis de PFE, RPS e  $V_p$ . Os únicos pontos onde não se observa uma linearidade do aumento da anomalia com o teor é no parâmetro  $V_p$  para a placa de 2,0 cm à profundidade de 1,0 cm e placa 3,0 cm para as profundidades 0,5 e 1,0 cm.

### 5.2.2 Efeito da variação da espessura

Os efeitos da variação da espessura são apresentados nas FIGURAS 68 e 69, para as profundidades de 0,5 e 1,0 cm respectivamente.

O parâmetro PFE mostra uma detecção diretamente proporcional ao aumento da espessura para os teores de 20 e 30% e inversamente proporcional para o teor 10%.

No caso do parâmetro RPS, observa-se que o aumento do nível de detecção é diretamente proporcional ao incremento da espessura do modelo, à exceção do teor 20% à profundidade 1,0 cm. No parâmetro  $V_p$ , vê-se que a detecção do modelo a 20% de teor também é inversamente proporcional para as duas profundidades. Os teores de 30 e 10% mostram que o nível de detecção é o mesmo para as duas espessuras nas profundidades de 0,5 e 1,0 cm respectivamente e diretamente proporcional nas profundidades 1,0 e 0,5 cm.

### 5.2.3 Efeito da variação da profundidade

Os gráficos sintéticos representativos da detectabilidade dos modelos tabulares em função da profundidade são apresentados na FIGURA 70.

O comportamento dos gráficos PFE, RPS e  $V_p$  mostram-se

de maneira semelhante ao constatado para o caso dos modelos cilíndricos, ou seja: o nível de detecção dos modelos diminui com a profundidade, assumindo depois de um determinado nível uma característica assintótica. Apesar do comportamento dos gráficos ser o esperado, deve-se notar que nem sempre o aspecto da curva apresenta-se homogêneo como um todo, havendo um ponto no perfil de RPS que destoa do conjunto, no caso da profundidade de 1,0 cm para a placa 2,0 cm.

#### 5.2.4 Efeito da variação da orientação

A FIGURA 71 apresenta os gráficos quanto à variação da orientação para a placa de 3,0 cm de espessura, a uma profundidade de 0,5 cm, onde variou-se a orientação deste modelo com relação ao perfil de medidas, nos ângulos de 90, 30 e 45°.

O que se constata é que a amplitude dos valores das anomalias é claramente aumentada de acordo com o incremento do ângulo do modelo no parâmetro PFE. As medidas RPS mostram que a maior amplitude de anomalia ocorre para o ângulo de 30° e a menor para o de 90°. As medidas de  $V_p$  mostram a maior amplitude para o ângulo reto e a menor para o ângulo de 30°. Como já mencionado no item 5.1.4, que trata dos modelos cilíndricos, o mais adequado para ter-se uma melhor visualização do efeito angular sobre o modelo em estudo é a plotagem dos perfis completos, como já feito para este caso no item 4.2.2.4.

#### 5.2.5 Efeito da variação do mergulho

Os gráficos apresentados na FIGURA 72 referem-se à representação resumida do efeito de mergulho para as placas de 2,0 e 3,0 cm de espessura, teor de 30% em pó de grafita e uma profundidade de 0,5 cm.

Para os perfis de PFE, nota-se que a amplitude pico a pico da anomalia é maior nas duas espessuras para o ângulo reto. Os ângulos de 30 e 45° mostram amplitudes iguais para a placa 3,0 cm. Para a placa 2,0 cm, a amplitude do PFE é maior no ângulo 30° do que no ângulo 45°.

O parâmetro RPS reflete o comportamento da amplitude inversamente proporcional para a placa de 3,0 cm. No entanto, no caso do modelo tabular de 2,0 cm, o comportamento do gráfico é aproximadamente inverso (diretamente proporcional), mas a maior amplitude é para o mergulho de 30°.

O perfil Vp evidencia para ambos os modelos que a amplitude da anomalia diminui com o crescimento do ângulo. De qualquer modo, vale observar novamente que a melhor representação, também para o caso de efeito de mergulho, é a visualização completa dos perfis observados, que constam no item 4.2.2.5.

## VARIACAO DO TEOR

PLACA 2.0cm (PROF.=0.5 E 1.0cm)

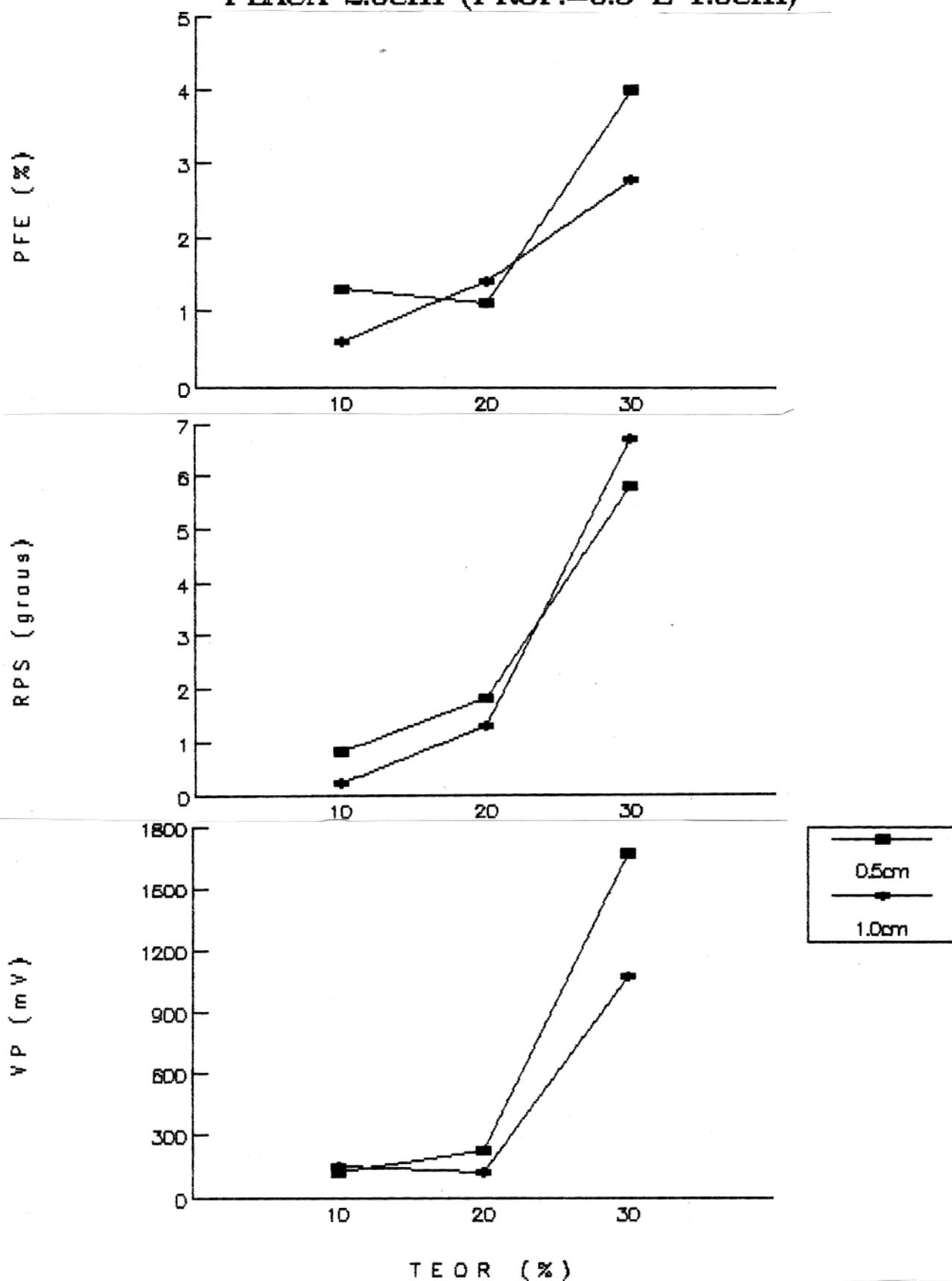


FIGURA 66

## VARIACAO DO TEOR

PLACA 3.0cm (PROF.=0.5 E 1.0cm)

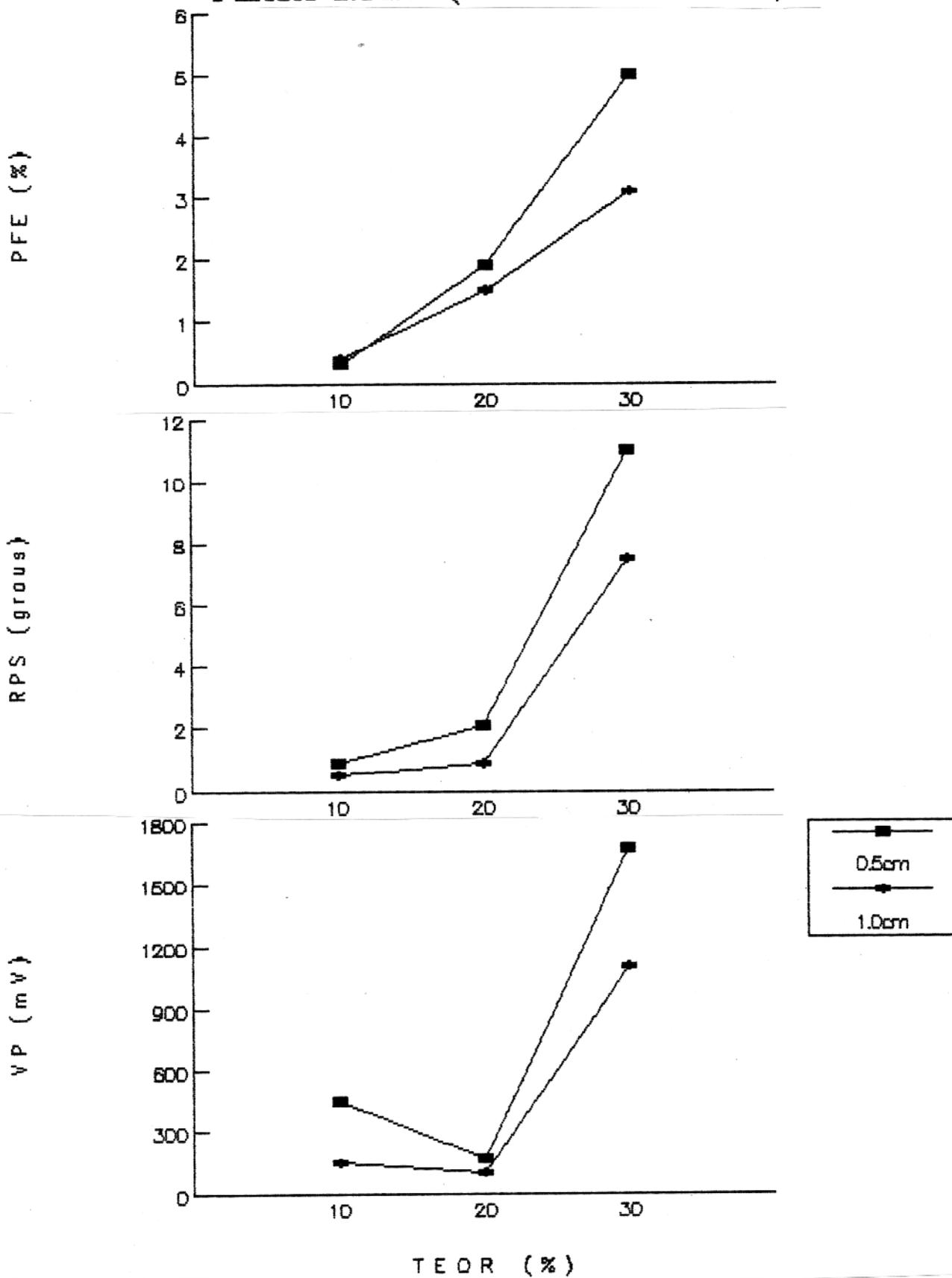


FIGURA 67

# VARIACAO DA ESPESSURA, PROF.=0.5cm

## PLACAS TEORES 30, 20 E 10%

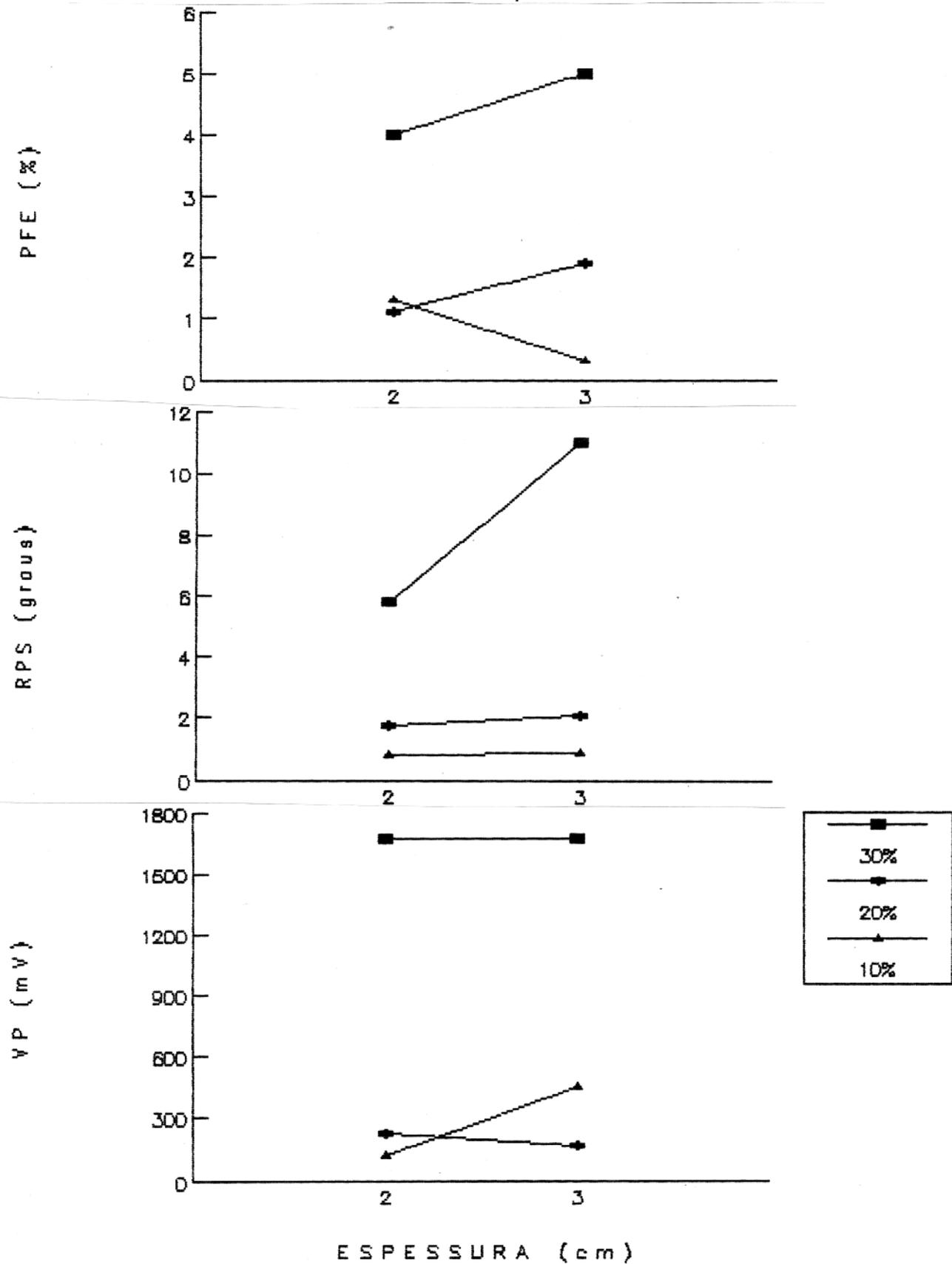


FIGURA 68

# VARIACAO DA ESPESSURA, PROF.=1.0cm

## PLACAS TEORES 30, 20 E 10%

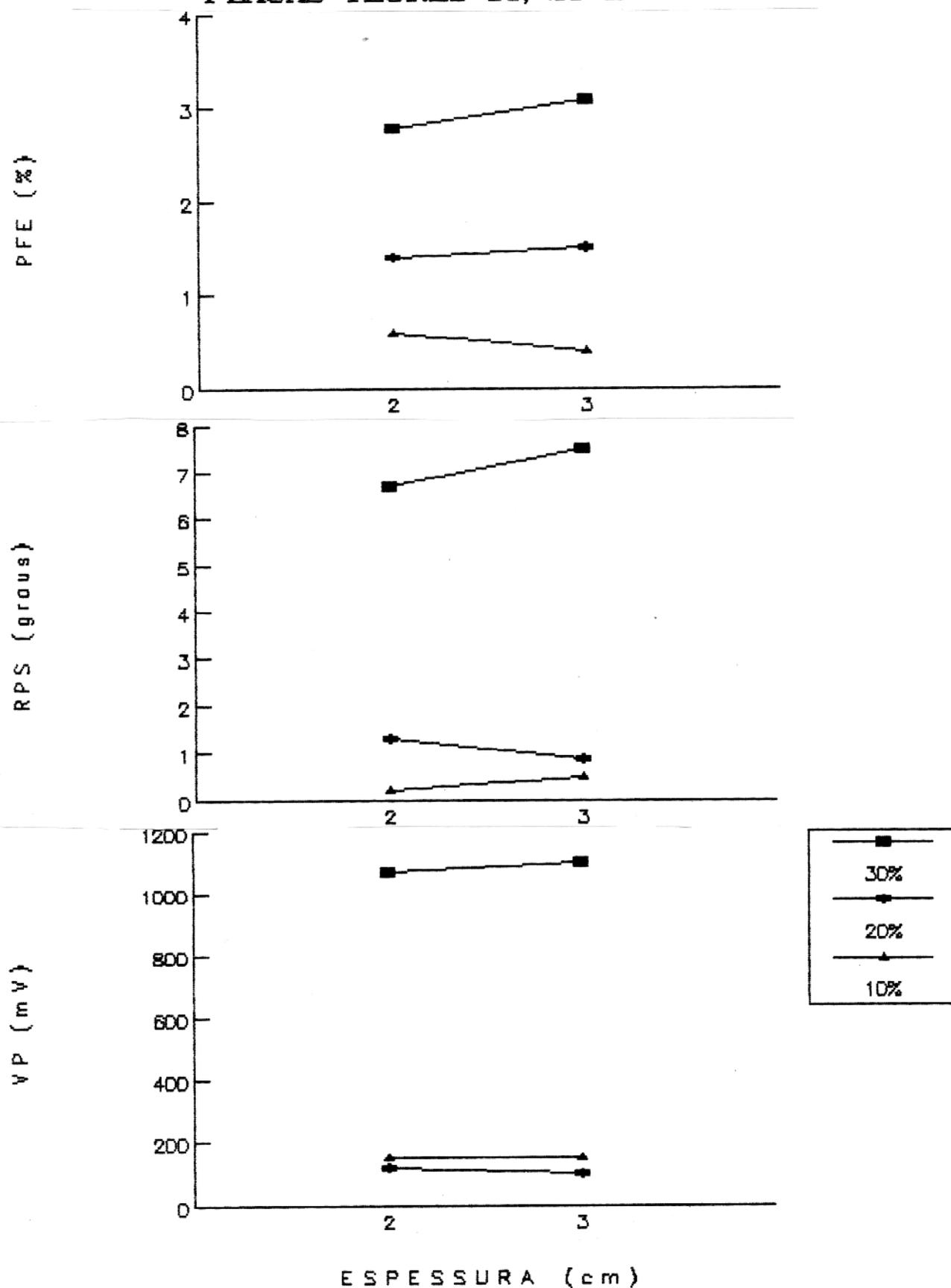


FIGURA 69

# VARIACAO DA PROFUNDIDADE

## PLACAS 2.0 E 3.0cm, 30%

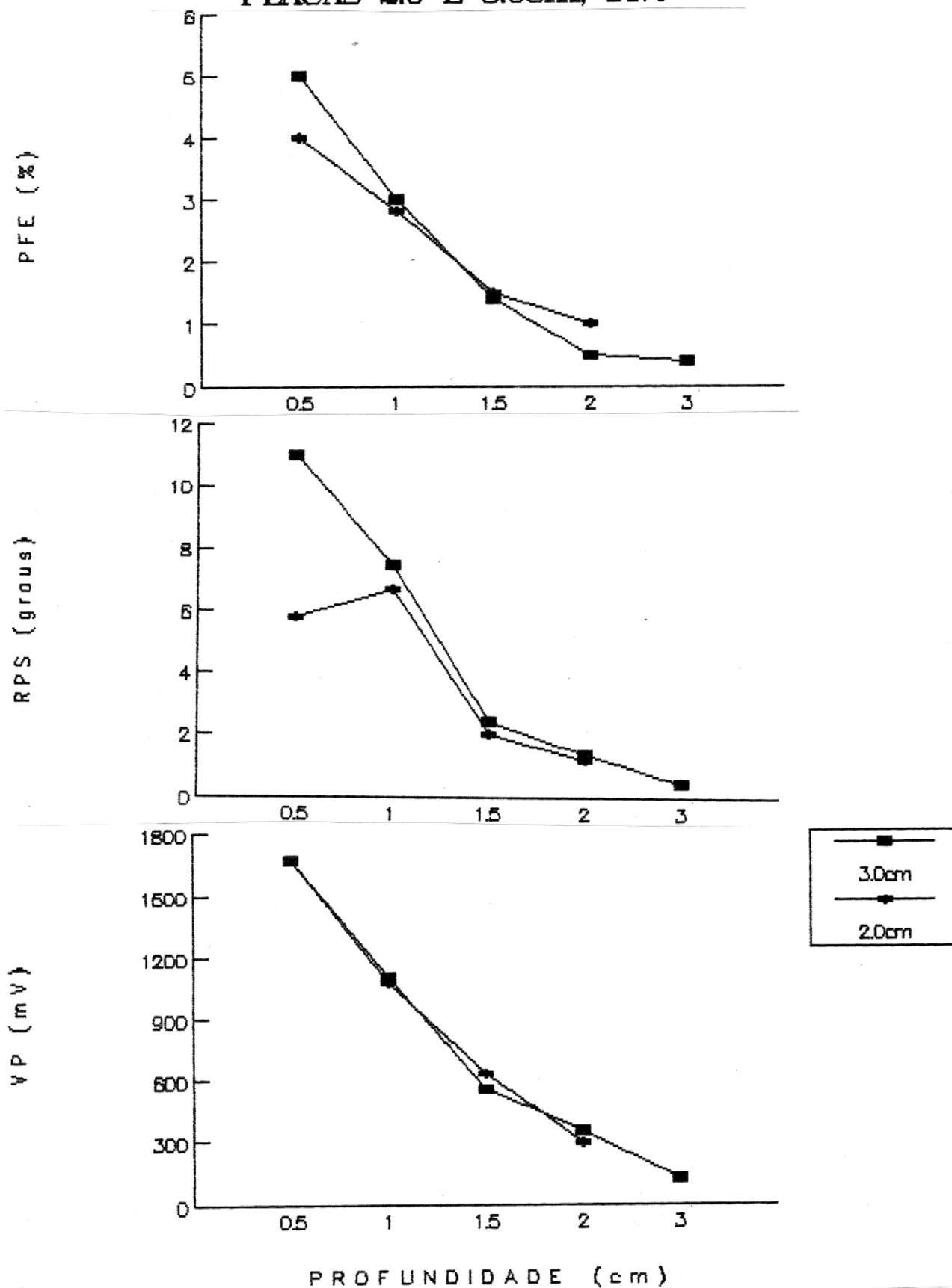


FIGURA 70

## VARIACAO DA ORIENTACAO (PROF.=0.5cm)

PLACA 3.0cm, 30%

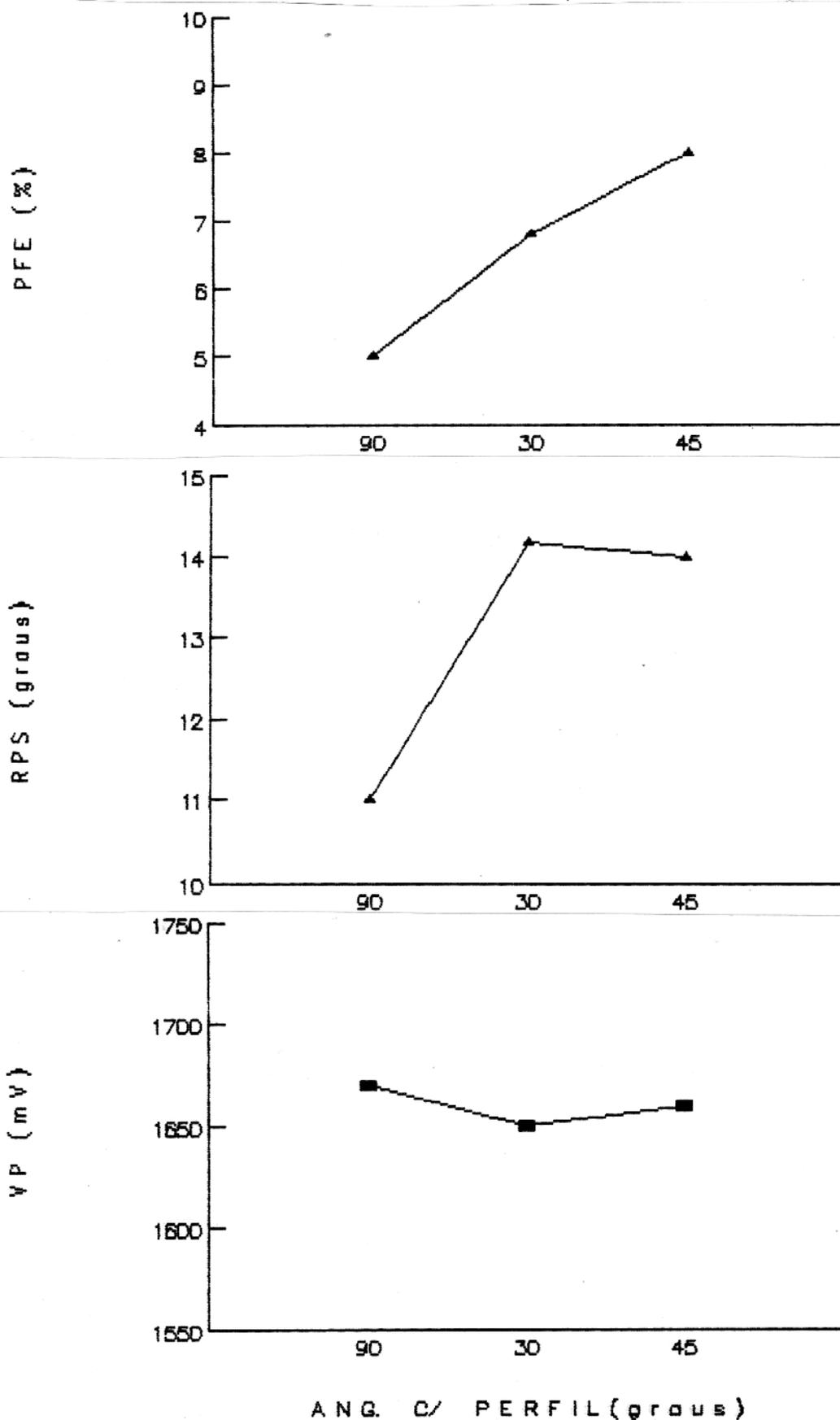


FIGURA 71

# VARIACAO DO MERGULHO (PROF.=0.5cm)

## PLACAS 2.0 E 3.0cm, 30%

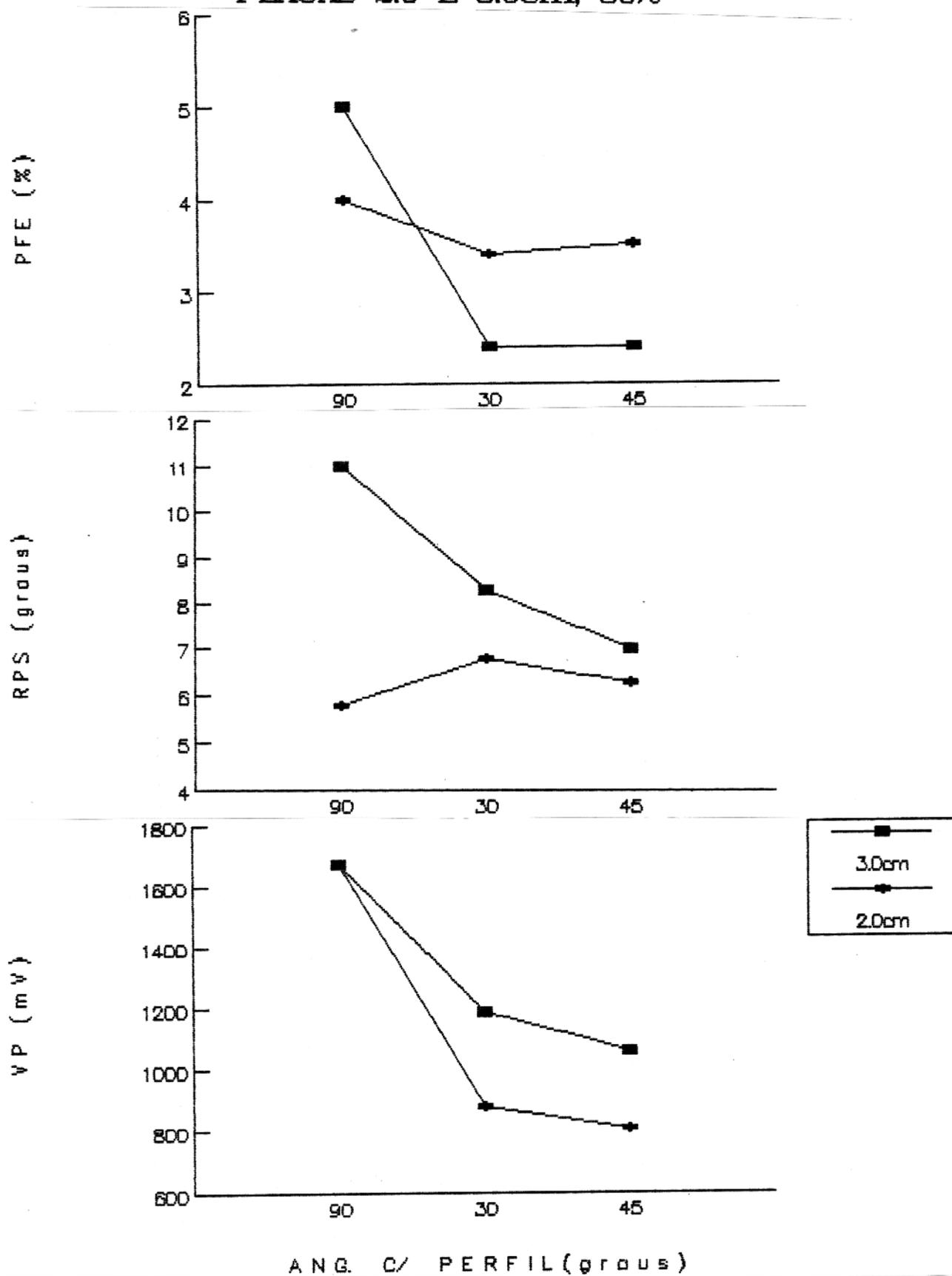


FIGURA 72

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De uma maneira geral, verifica-se que os modelos com teores em pó de grafita de 10% não são detectáveis pelos parâmetros PFE e RPS, à exceção dos modelos tabulares. Já o parâmetro  $V_p$  consegue marcar anomalias sobre os modelos em todos os casos. Por outro lado, este parâmetro não é indicativo da presença de corpos polarizáveis anômalos, que são o principal objetivo na prospecção de jazidas de sulfetos metálicos e disseminados.

Outro resultado interessante observado, foi que o parâmetro RPS mostrou-se tanto ou mais eficaz que o tradicional PFE, verificando-se na maioria dos casos, que o RPS apresenta maiores amplitudes de anomalias e um melhor índice de detecção com a profundidade.

Também generalizando-se, pode-se dizer que os modelos tabulares apresentam melhor detectabilidade que os modelos cilíndricos. Isto deve-se ao fato de que estes modelos apresentam continuidade na vertical, ao contrário dos cilindros.

Uma outra constatação, é a de que quando os modelos estão a profundidades maiores, as anomalias tornam-se mais simétricas, tanto para os parâmetros de PFE e RPS como  $V_p$ .

No caso das variações de orientação e/ou mergulho, é conveniente que os perfis sejam avaliados conjuntamente e comparados, pois mesmo nos casos de ângulos retos com o perfil ou com a vertical, as anomalias tendem a apresentar assimetrias. Neste caso, estas devem ser atribuídas a eventuais imprecisões quanto as medidas dos modelos e erros de espaçamento. Estes erros, embora muito pequenos, ocorrem porque nas dimensões trabalhadas, qualquer imprecisão pode tornar-se crítica.

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que é possível o modelamento analógico volumétrico IP em laboratório, utilizando-se modelos porosos. Os modelos obtidos foram bastante satisfatórios no sentido de alcançar os objetivos propostos.

No entanto, é preciso um aperfeiçoamento ainda maior em modelamento analógico IP. Acredita-se que o próximo passo

neste sentido, seria a obtenção de pseudo-seções dos valores investigados, ao invés dos perfis obtidos neste trabalho. Para tanto, é preciso desenvolver novos equipamentos e possivelmente modificações na solução onde os modelos são imersos. O desenvolvimento de equipamentos refere-se a estabilizadores de corrente e amplificadores que permitam trabalhar-se com absoluta precisão, perfeito controle de deriva e maiores amplitudes de sinais enviados à solução e recebidos pelo equipamento de medida.

De todo modo, os modelos com matriz de cimento e areia quartzosa e diferentes teores de grafita são plenamente satisfatórios e podem ser utilizados com segurança em futuros trabalhos de modelamento analógico IP.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- AIKEN, C.L.; HASTINGS, D.A.; STURGUL, J.R. - 1973 - Physical and Computer Modeling of Induced Polarization, Geophysical Prospecting, 4: 763-782.
- BERTIN, J. & LOEB, J. - 1976 - Experimental and Theoretical Aspects of Induced Polarization: Geopublication Associates. Berlin, Gebruder Borntraeger.
- COLE, K.S. & COLE, R.H. - 1941 - Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Fields, J. Chem. Phys., 9:341.
- DOLAN, W.M. & Mc LAUGHLIN, G.H. - 1967 - Considerations Concerning Measurements Standards and Design of I.P. Equipment. In: Proceedings of the Symposium on Induced Electrical Polarization, Berkeley, University of California, 2-31.
- ESKOLA, L.; ELORANTA, E.; DURANEN, R. - 1984 - A Method for Calculation IP Anomalies for Models with Surface Polarization, Geophysical Prospecting, 32: 79-87.
- FOX, R.C.; HOHMANN, G.W.; KILLPACK, T.J.; RIJO, L. - 1980 - Topographic Effects in Resistivity and Induced Polarization Surveys, Geophysics, 45: 73-93.
- FRASER, D.C.; KEEVIL, N.B. Jr.; WARD, S.H. - 1964 - Conductivity Spectra of Rock 1 from the Craigmont Ore Environment, Geophysics, 29: 832-847.
- GOUDSWAARD, W. - 1957 - On the Effect of the Tank Wall Material in Geoelectrical Model Experiments, Geophysical Prospecting, 5: 272-281.
- GUPTASARMA, D. - 1983 - Effects of Surface Polarization on Resistivity Modeling, Geophysics, 48: 98-106.
- HALLOF, P.C. - 1967 - An Appraisal of the Variable Frequency IP Method after Twelve Years of Application, Symp. on Induced Electrical Polarization, Eng. Geosc., Dept. Mineral Tech., Univ. of California, Berkeley, 1967, Proc., 51-92.

- HALLOF, P.C. - 1970 - Theoretical Induced Polarization and Resistivity Studies Scale Model Cases, Phase III, Mc Phar. Geophysics 112.
- HALLOF, P.C. - 1974 - The IP Phase Measurement and Inductive Coupling, Geophysics 39: 650-665.
- KLEIN, J.D. & SHUEY, R.T. - 1978 - Nonlinear Impedance of Mineral - Electrolyte Interface, Geophysics, 43:1222-1249.
- MADDEN, T. & CANTWELL, R. - 1967 - Induced Polarization, a Review Min.Geophysics, 32: 373-400.
- MAJUMDAR, R.K. - 1985 - Simulation of Surface Percentage Frequency Effect and Metal Factor Contours Over Thin Dykes Using Physical Modeling, Geoexploration, 23: 183-192.
- MAJUMDAR, R.K. & DATTA, S. - 1981 - IP and Resistivity Model Studies Over Thin Dykes, Geophysical Prospecting, 29: 438-450.
- PELTON, W.H.; SMITH, R.J.; HALLOF, P.C. - 1972 - Parameters to Describe Second-order in the Frequency Domain; Toronto, Mc Phar Geophysics, 10.
- PELTON, W.H.; WARD, S.H.; HALLOF, P.C.; SILL, W.R.; NELSON, P.H. - 1978 - Mineral Discrimination and Removal of Inductive Coupling with Multifrequency IP, Geophysics, 43: 588-609.
- ROY, K.K. & ELLIOT, H.M. - 1980 - Resistivity and IP Survey for Delineating Saline Water and Fresh Water Zones, Geoexploration, 18: 145-162.
- SEIGEL, H.O. - 1959 - Mathematical Formulation and Type Curves for Induced Polarization, Geophysics, 24: 547-563.
- SEIGEL, H.O. - 1974 - The Magnetic Induced Polarization (MIP) Method, Geophysics, 39: 321-339.
- SEIGEL, H.O. - 1980 - Some Recent Magnetic Induced - Polarization Developments, Geophysics, 45: 37-55.
- SNYDER, D.D. & MERKEL, R.H. - 1977 - A Method for Modeling the Resistivity and IP Response, Geophysics, 41: 997-1015

- SUMNER, J.S. - 1976 - Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration, New York, Elsevier Scientific Publishing, 277.
- SWIFT, C.M. - 1973 - The L/M Parameter of Time Domain IP Measurements - A Computational Analysis, Geophysics, 38: 61-67.
- WYNN, J.C. & ZONGE, K.L. - 1975 - EM Coupling, Its Intrinsic Value, Its Removal and The Cultural Coupling Problem, Geophysics, 40: 831-850.
- ZONGE, K.L.; SAUCK, W.A.; SUMNER, J.S. - 1972 - Comparison of Time, Frequency and Phase Measurements in Induced Polarization, Geophys.Prosp., 20: 626-648.
- ZONGE, K.L. & WYNN, J.C. - 1975 - Recent Advances and Applications in Complex Resistivity Measurements, Geophysics, 40: 851-864.

APPENDICE I

## apêndice

### Princípio de operação do IPRF-2

O instrumento IPRF-2 opera no princípio da comparação simultânea de amplitude e fase de dois ou mais componentes harmônicos transmitidos simultaneamente em uma onda quadrada simples. O equipamento faz as medidas de  $V_p$  (amplitude da forma de onda recebida), PFE (Efeito Percentual de Frequência entre dois harmônicos ímpares), também o novo parâmetro RPS (Deslocamento Relativo de Fase entre dois harmônicos ímpares).

Em resumo, o receptor IPRF-2 de domínio da frequência IP apresenta as seguintes características:

- 1) Opera com uma onda quadrada única, permitindo uma rapidez no trabalho.
- 2) Apresenta muito pouca sensibilidade à pequenas mudanças na voltagem presente no meio investigado, o que reduz a dependência da estabilização da corrente primária.
- 3) Realiza simultaneamente as medidas de PFE e RPS (Relative Phase Shift).
- 4) As medidas de RPS são realizadas sem a necessidade de uma referência de tempo por rádio ou sincronização de cristais de tempo com a unidade de transmissão.

### Quantidades medidas pelo IPRF-2

- a) A amplitude ( $A_3$ ) do sinal da onda quadrada, i. é,  $V_p$ .
- b) O PFE é definido como:

$$PFE = \frac{A_1 - 3 A_3}{3 A_3} \times 100\%$$

onde  $A_1$  e  $A_3$  são as amplitudes do fundamental e 3º harmônico do sinal do solo, respectivamente.

c) O Deslocamento Relativo de Fase (RPS), definido como:

$$RPS = 3 \phi_1 - \phi_3$$

onde,  $\phi_1$  é o ângulo de fase da voltagem medida no harmônico fundamental e  $\phi_3$  é o ângulo de fase da voltagem medida no terceiro harmônico, relativos aos componentes transmitidos pela corrente.

O significado do PFE já foi discutido anteriormente, tratando-se do IP domínio da frequência clássica, se bem que trata-se de uma diferença de frequência de um fator três, ao invés do fator mais comum ser igual a dez. Por conseguinte, O PFE observado é da ordem da metade daquele observado entre frequências separadas de uma década.

Este decréscimo no valor observado é compensado pelo fato de que:

- a) o nível de ruído instrumental básico é menor que 0,05% PFE e 0,05° RPS.
- b) as medidas são feitas simultaneamente sobre os componentes de uma única onda quadrada.

### Especificações básicas do IPRF-2

Frequência de operação: 0,1; 0,3; 1,0; 3,0 Hz.

Impedância de entrada: 3 M $\Omega$ .

Intervalo  $V_p$ : 100  $\mu$ V a 10 V em 6 escalas de sensibilidade.

Ruído referente à entrada: 0,5  $\mu$ V pico a pico sem zero de off-set.

Sensibilidade absoluta de  $V_p$ : 3% do fundo de escala entre 0,1 mV e 10 V de entrada.

Resolução  $V_p$ : acima de 0,1%.

Escalas de PFE: 5%; 15%; 50%.

Sensibilidade PFE: 3% do fundo da escala entre 0,1 mV e 10 V de entrada.

Filtro de rejeição 50/60 Hz: maior que 50 db ( $\times$  300) amplitude máxima de 3 V

de pico nas escalas de  
0,1; 1 e 10 V.

Intervalo de temperatura para operar:  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$ .