

RESPOSTA HIDRÁULICA DO AQUÍFERO AO BOMBEAMENTO

S. V. K. SARMA e TARCISO C. da SILVA

Departamento de Eng. Civil; Área de Engenharia de Recursos Hídricos; Universidade Federal da Paraíba; Campina Grande - Pb - Brasil.

INTRODUÇÃO

O projeto, construção e operação de estruturas hidráulicas exigem conhecimentos anteriores do comportamento do sistema sobre condições variáveis de operação. Uma vez que os métodos convencionais têm aplicações limitadas, deve-se desenvolver modelos baseados em características físicas para estimar sem dificuldades e prever os parâmetros de "imput" necessários para calibração e operação através de modelagem física, analógica e matemática.

O modelo deve comportar-se como uma ferramenta que representa a versão simplificada da realidade, com a representatividade dependendo da maneira que o mesmo simula as condições de campo. Assim, dados de campo são essenciais para fins de fazer previsões. Porém, uma tentativa com dados não adequados também pode ser útil para identificar as áreas onde os dados tem que ser coletados mais detalhadamente (Wang e Anderson), 1982).

MODELOS ANALÓGICOS E MATEMÁTICOS

Uma das mais recentes inovações em implantação e simulação das condições de campo é a modelação eletroanalógica do tipo R-C (Resistivo-Capacitivo). Enquanto esses modelos servem para estudar as condições de rendimento retardado de aquífero, rebaixamento repentino de reservatórios, etc, o ca

so tratado neste trabalho refere-se a regime permanente.

Modelos matemáticos consistem em conjuntos de equações diferenciais que governam o fluxo em águas subterrâneas. São feitas suposições simplificadas para se construir o modelo, uma vez que as condições no campo são muito complexas para serem simuladas exatamente e as suposições analíticas são restritivas. Para tratar com situações reais é necessário resolver os modelos matemáticos com métodos numéricos.

No caso do método dos elementos finitos e diferenças finitas, o sistema de nós é superposto sobre o domínio. As sub-áreas delineadas pelas linhas, que conectam os nós são chamadas elementos os quais são fundamentais para o desenvolvimento das equações dos métodos dos elementos finitos. Enquanto elementos triangulares são usados em algumas situações, elementos quadrangulares e outros também são adaptados. No método das diferenças finitas os nós podem ser localizados entre células ou nas interseções das linhas da rede. As propriedades e carga hidráulica são considerados constantes entre cada célula e a rede pode ser formada por nós ou blocos de resistores (modelos eletroanalógicos) como mostrado na figura 1. Independentemente da representação escolhida, as equações podem ser escritas com referência a cada nó, uma vez que a área abrange um dado nó não tem relação direta com o desenvolvimento de equações de diferenças finitas.

AQUÍFERO COM BARREIRA IMPERMEÁVEL

A malha da figura 1.a representa um aquífero confinado homogêneo e isotrópico com raio de influência r_i , bombeando com uma taxa de $Q(m^3/s)$, enquanto figuras 1.b a 1.d mostram o aquífero com barreiras impermeáveis a $1/6 R$, $1/2 R$ e $5/6 R$ do centro, com largura de $R/6$ e comprimento de $2/3 R$. A figura 1.e é um caso singular com barreira radial com a mesma geometria mas com uma extremidade tangenciando a periferia.

A Simulação do Aquífero na Rede R.C.

Embora condições não permanentes possam ser estudadas com a mesma malha, os casos aqui discutidos são com condições permanentes com malha de 5 cm X 5 cm de resistores de 51 Ω que representam uma área de 5 m X 5 m no campo. A correspondência entre a vazão Q, a carga hidráulica H e permeabilidade K e a corrente elétrica I, potencial V e inverso da resistência 1/R foi feita e os seguintes valores foram adotado.

Fator de conversão de potenciais = 5,71 V/6 m

Resistores usados = 51 Ω

Malha = 5cm X 5cm no modelo = 5m X 5m no campo

Voltagem na periferia = 5,71 V = Carga na periferia = 6 m

Voltagem no centro = 3,43 V = 3,6 m (60 % do valor da periferia)

Valor dos capacitores = 10 μ F

Número de nós sem barreiras = 144

Número de nós com barreiras = 140

Comprimento da barreira = 20 cm (modelo) = 20 m (campo)

Largura da barreira = 5 cm (modelo) = 5 m (campo)

Máxima corrente obtida no aquífero homogêneo = 84,2 m Amp., correspondente a uma vazão de 4,5 m³/dia.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos do modelo RC nos ensaios com e sem barreiras estão apresentados na tabela 1.

Para fins de comparação, o rebaixamento no poço foi conservado constante a 5,71 - 3,43 = 2,28 V o qual corresponde uma carga hidráulica de 6,0 - 3,6 = 2,4 m. A vazão para este rebaixamento foi calculado para cada um dos casos considerados. (fig. 1 a - e) (Bower, 1978).

Observa-se na tabela 1 que a vazão máxima conseguida foi de 4,5 m³/s caso do aquífero homogêneo. Nos demais casos (figuras 1 b - e) a vazão foi diminuindo com a colocação das barreiras na área de influência do poço. Para o caso com barreira a R/6 do centro a redução na vazão foi

máxima atingindo um valor de 33,3 % da vazão original deixando uma vazão de apenas 0,667 Q. No entanto, aumentando-se a distância da barreira ao centro de $R/6$ a $R/2$ e $5/6 R$, a produção recuperou-se para valores correspondentes a 90,7 % e 91,7 % do valor original. Assim a posição e a orientação das barreiras influenciaram consideravelmente na produtividade do poço. No caso da barreira radial com mesma geometria das demais com extremidade tangenciando a periferia, observou-se que esta não provoca praticamente nenhuma redução no rendimento do poço, diminuindo somente 4,4 % do valor original de Q. Portanto, as barreiras transversais à direção radial na área de influência do poço provocam maiores reduções na produção do que a barreira radial com mesma geometria.

Os casos de aquífero com uma ou mais barreiras oblíquas na área de influência tem bastante importância. Embora alguns experimentos também tenham sido conduzidos usando-se a teoria de Jacob, a discussão sobre tais casos não fazem parte deste trabalho.

CONCLUSÕES

A simulação de aquífero com barreiras impermeáveis montadas em malha RC proporcionou bons resultados, mostrando a viabilidade de se incorporar no modelo as condições de campo como barreiras impermeáveis e fontes de recarga. Simulando-se no computador as condições de contorno consideradas, os resultados obtidos concordaram bem com os obtidos no modelo RC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a área de Engenharia de Recursos Hídricos da Universidade Federal da Paraíba, bem como ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio recebido.

BIBLIOGRAFIA

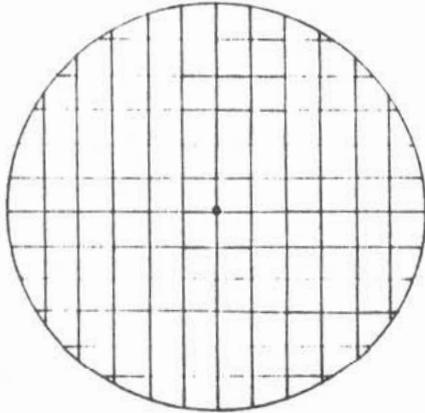
1. ANDERSON, M.P. e WANG, F. W. (1982) "Introduction to Groundwater Modelling", W.H. Freeman, 1-237.
2. BOWER, H (1962) "Analyzing Groundwater Mounds by Resistance Networks", J.Irr.Drain.Divison, Am. Soc. Civil Engg. 88 (IR 3) 15-36.
3. BOWER, H. (1978) "Groundwater Hydrology" Mc Graw Hill - 1 - 488.
4. GROUNDWATER MANUAL (1981). A Water Resources Technical Publication. U.S.D.A., Denver, Colorado , 1 - 479.

.x.x.x.x.x.x.x.x.x.x.x.

TABELA 1CARACTERÍSTICAS DE FLUXO HIDRÁULICO E ELÉTRICO DO MODELO

CARACTERÍSTICA	Aquífero Homogêneo	Barreira à Distância x do Centro			Barreira Radial
		x=R/6	R/2	5/6 R	
1. Vazão, m ³ /h	Q	0,667	0,907	0,917	0,956
2. Voltagem Periférica, V	5,71	5,71	5,71	5,71	5,71
3. Voltagem no Centro do Aquífero = 60% da Periferia, V	0,6x5,71	3,43	3,43	3,43	3,43
4. Carga Hidráulica na Periferia, m	6	6	6	6	6
5. Carga Hidráulica no centro, m	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
6. Corrente no Centro do Aquífero, mAmps.	84,2	56,2	76,4	77,2	80,5

a) POÇO EM AQUIFERO HOMOGÊNIO



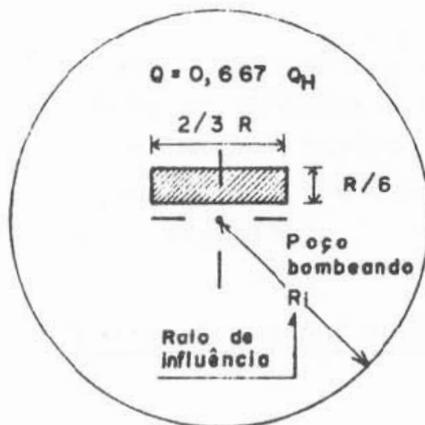
$$Q_H = Q_{\text{homogêneo}}$$

$$= \frac{H}{V} \cdot R / (1/k) \quad I =$$

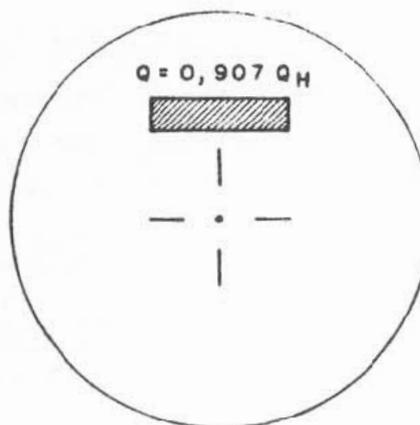
$$= \frac{6}{5,71} \cdot \frac{51}{1} \cdot \frac{84,2}{1000} = 4,5 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_H = 0,188 \text{ m}^3/\text{hr}$$

b) BARREIRA A R/6



c) BARREIRA A R/2



d) BARREIRA A 5/6 R



e) BARREIRA NA DIREÇÃO RADIAL

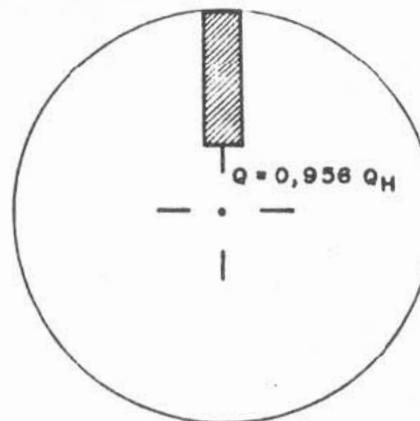


FIG 1 ESQUEMA PARA ESTUDO DA VARIAÇÃO DA VAZÃO COM DIVERSAS POSIÇÕES DA BARREIRA IMPERMEÁVEL.

ESTUDO PRELIMINAR DA HIDRODINÂMICA NA ZONA NÃO SATURADA DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL (CIDADE UNIVERSITÁRIA, SÃO PAULO)

SZIKSZAY, M.* , CONSONI, A.J.** , YOKOTA, H.K.* , ARAUJO, J.R.** , DUARTE, U.* e KANEHISA, M.S.*

ABSTRACT

This paper presents the preliminary results of 12 months monitoring of tensiometers and of water level variation measurements, in 2 piezometers and 1 well, situated at the Experimental Station, Campus of the São Paulo University.

These results permit to conclude that the rainwater infiltration is controlled, primarily by the permeability, consequently by the lithology and granulometry and secondarily by the topography.

The results of the 7 external and 6 internal tensiometers monitoring showed that the evaporation line is situated at a 0,5 m depth for the external and at 1,5 m depth for the internal tensiometers. The hydraulic charge is smaller at the autumn, winter and spring seasons, when the evaporation occurs principally and it is greater in the summer and beginning of autumn, when there is an infiltration corresponding to the groundwater recharge.

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados preliminares de 12 meses de monitoramento de tensiômetros e de medidas de variação do nível hidrostático de 2 piezômetros e 1 poço na Estação Experimental localizada no Campus da Universidade de São Paulo.

Estes resultados permitiram concluir que a infiltração da água da chuva é controlada primeiramente pela permeabilidade e conseqüentemente pela litologia e granulometria, e secundariamente pela topografia.

O resultado do monitoramento de 7 tensiômetros externos e 6 internos à Estação mostrou que a linha de evaporação se situa a 0,50 m de profundidade nos tensiômetros externos e a 1,50 m nos tensiômetros internos. A carga hidráulica é menor no outono, in-

* Instituto de Geociências IG/USP, São Paulo

** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, São Paulo

verno e primavera quando ocorre principalmente a evaporação e é maior no verão e começo de outono quando há a infiltração, portanto a recarga do aquífero.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Com o objetivo de estudar o movimento da água e a evolução da sua composição química na zona não saturada, uma Estação Experimental foi instalada no Campus da Universidade de São Paulo. Estações com semelhantes objetivos existem na França, Inglaterra e nos Estados Unidos da América do Norte, porém esta é a primeira tentativa no Brasil.

Os critérios usados na escolha da sua localização, assim como construção, instalação de aparelhos e os princípios de seus funcionamentos, estão descritos detalhadamente no trabalho de SZIKSZAY et al (1986).

O presente trabalho mostra resultados preliminares referentes à dinâmica da água na zona não saturada. Estes resultados referem-se a um monitoramento semanal durante 12 meses.

1.2. Geologia da Bacia de São Paulo

Com relação à geologia, a Estação Experimental localiza-se na borda da Bacia de São Paulo (Figuras 1a e 1b).

FIGURA 1a. Mapa geológico da Bacia de São Paulo

FIGURA 1b. Mapa de localização da Estação Experimental Viveiro de Plantas, USP, São Paulo

A Bacia de São Paulo (Figura 1a) é uma bacia tafrogênica apresentando arcabouço estrutural configurando semi-graben sobre blocos tectônicos basculados para NW (de MELO et al, 1985) desenvolvida no Cenozóico, produto de um soerguimento regional iniciado no Jurássico superior. Comporta-se, portanto, como um compartimento de Planalto mais rebaixado em relação ao conjunto, circundado por um relevo modelado em rochas mais antigas de natureza granítica, gnaissica ou xistosa, de onde sobressaem alguns pontos dominantes, que emolduram a região urbana da São Paulo.

De acordo com HASUI & CARNEIRO (1980) as linhas de fundo de depressões longilíneas configuram os paleovales principais

ã época da instalação da bacia e seus traçados são parecidos e próximos aos dos atuais rios Tietê, Pinheiros e Tamanduatei.

De acordo com de MELO et al (op.cit.), identifica-se na bacia uma fácies rudácea basal, atribuída a leques aluvionais, originadas nas bordas escarpadas de falhas da borda norte da bacia.

Os sedimentos da bacia são de origem fluvial, restritamente lacustrino, predominantemente arenosos em algumas áreas, tornando-se essencialmente silto-argilosas em outras (HASUI & CARNEIRO, op.cit.).

A espessura dos sedimentos varia segundo os autores de 320 m (de MELO et al, op.cit.) e 290 m (HASUI & CARNEIRO, op.cit.).

Estudos palinológicos em sedimentos indicam idade eocênica superior para pelo menos uma parte do preenchimento da bacia (de MELO et al, op.cit.).

Segundo SUGUIO, (1980), os sedimentos presentes estão divididos em:

a - Formação São Paulo - Nesta formação predominam as argilas, siltes e areias argilosas finas. Os sedimentos são muito pobres em estruturas sedimentares primárias. As estruturas secundárias mais proeminentes são as crostas limoníticas além de pequenas falhas.

b - Aluviões antigos - Estes aluviões tem uma espessura superior a 15 m e são constituídos predominantemente, de cascalhos com raras intercalações de argilas orgânicas. Estes sedimentos distribuem-se principalmente ao longo dos vales dos rios Tietê e Pinheiros.

c - Aluviões recentes - São corpos de 2 ou 3 m de espessura, e constituídos de siltes argilosos mais ou menos ricos em matéria orgânica.

1.3. Descrição do local

A Estação Experimental está implantada no terreno do Viveiro de Plantas da Prefeitura da Cidade Universitária no Campus da Universidade de São Paulo, por questão de facilidade de acesso aos diferentes aparelhos de medida (Figura 1b), porém não oferece condições físicas ideais para implantação dos tensiômetros. O terreno é bastante heterogêneo como mostraram as sondagens preliminares.

2. METODOLOGIAS

Para estudar a dinâmica da água na zona não saturada, os seguintes parâmetros foram analisados e correlacionados: pluviometria, medida de nível hidrostático, granulometria, medidas diretas de permeabilidade em laboratório e campo e medidas de carga hidráulica com os tensiômetros.

2.1. Pluviometria

Os dados de precipitação atmosférica utilizados na confecção de diversos gráficos (vide Figura 4) para correlacionamento, foram obtidos junto ao DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica), onde os aparelhos utilizados foram os seguintes: Pluviômetro R. Sfuess (diário); Pluviômetro Paulista com as seguintes características: área de captação 500 cm^2 e capacidade de reservatório de 21,5 l.

2.2. Medida do nível hidrostático

A medida do nível hidrostático no poço e nos piezômetros foi feita semanalmente com uma sonda tipo ALTRONIC Modelo: MDN-01.

2.3. Granulometria

A coleta de amostras para análise granulométrica foi feita de meio em meio metro em sondagem a trado, sendo recolhido aproximadamente 100 g de material por amostra (amostragem em duplicata).

Como tratamento prévio, todas as amostras foram secadas e, dependendo do tipo litológico predominante, procedeu-se a desagregação e tratamento com H_2O_2 (para destruição dos agregados argilosos). As amostras foram quarteadas (quarteador tipo Jones) e antes do ensaio por via úmida foi adicionado a cada amostra 1 g de pirofosfato de sódio para evitar a floculação.

Para a análise granulométrica foram utilizados os métodos de pipetagem (fração silte e argila) e peneiramento (fração areia).

A partir dos resultados dos ensaios granulométricos, expressos nas folhas de cálculo para análise total de um sedimento, foram obtidos os vários parâmetros estatísticos segundo FOLK & WARD (1957): diâmetro médio, desvio padrão, grau de assimetria, curtose; e ainda a classificação textural segundo

SHEPARD (1954) in SUGUIO (1973) e curva acumulativa para cada amostra. Este trabalho foi realizado utilizando-se um programa de computação em BASIC do Departamento de Paleontologia e Estratigrafia do IGUSP.

2.4. Medida de coeficiente de permeabilidade (K)

2.4.1. No laboratório

Foram realizados testes para determinação de coeficiente de condutividade hidráulica, tanto no laboratório, como "in situ". No laboratório os testes foram realizados em amostras indeformadas do solo (de 0,50 em 0,50 m até a profundidade da escavação, 3,5 m) em permeâmetros de carga constante, no Laboratório da Escola Politécnica, USP e no Laboratório de CEPAS do IGUSP.

2.4.2. Procedimento para determinação "in situ"

No local, a determinação de permeabilidade (K) foi realizada segundo a metodologia do ensaio de rebaixamento, no piezômetro situado dentro da escavação.

Inicialmente enche-se a perfuração até a boca do tubo, tomando-se este instante como tempo zero. Em ensaios realizados acima do nível de água no terreno, o nível de água da perfuração deve ser mantido na boca, estável por cerca de 10 minutos para "saturação". Interrompe-se o fornecimento de água e a intervalos curtos no início e mais longos em seguida, por exemplo, 15", 30", 1', 2', 3', 4' e 5', etc, acompanhando-se o rebaixamento do nível de água na perfuração. O ensaio foi dado por concluído quando o rebaixamento atingiu 20% da carga inicial aplicada ou 30 minutos de ensaio.

FIGURA 2. Ábaco para o cálculo de K (GILG & GAVARD, 1957)

Com a finalidade de comparação de resultados de permeabilidade obtidos em laboratório, foram abertas 2 perfurações (sem revestimento) a trado com diâmetro de 4". Estas perfurações foram ensaiadas nos intervalos 0-4 m e 0-1, 0-2, 0-3 e 0-4 m, respectivamente, contados a partir da superfície do terreno. Foram tomadas medidas de rebaixamento em função do tempo, através de régua graduada e cronômetro.

Os ensaios foram repetidos 6 vezes para o intervalo 0-4 m e 2 vezes para os demais.

O procedimento foi semelhante ao descrito acima. As medições tiveram seu início no instante do corte de fornecimento da água necessária para manter o nível máximo da água na perfuração.

A Figura 3 ilustra os parâmetros necessários para o cálculo de permeabilidade, para ensaios de rebaixamento sem revestimento nas perfurações.

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad \text{onde } R = \sqrt{(h + r^2)}$$

FIGURA 3. Esquema de perfuração sem revestimento

2.5. Medidas com os tensiômetros

As medidas da sucção da água do solo foram feitas por uma série de 7 tensiômetros externos e 6 internos (vide Figura 5).

Na presente pesquisa estão sendo utilizados os tensiômetros tipo APAGER (SZIKSZAY et al, 1986). Estes tensiômetros têm as seguintes características: canaleta de alumínio perfurado em U, alcance de escala 700 mm (graduação em mm), reservatório de mercúrio em acrílico com tampa de PVC; tubo reservatório de água de PVC 1/2".

O monitoramento dos tensiômetros é feito semanalmente e consiste de duas fases distintas. Primeiramente faz-se a leitura da altura de mercúrio, feita diretamente no aparelho; utilizando-se uma régua, tomando-se como referência o nível superior do mercúrio, no reservatório. Após essa fase, utilizando-se um frasco tipo "piceta", contendo água destilada e fervida (para eliminação de gases), procede-se a fluxagem dos tensiômetros, objetivando-se a eliminação de possíveis bolhas de ar que estejam no sistema e que irão interferir nos resultados.

As medidas tomadas são tabeladas e após os cálculos são utilizados na confecção de gráficos que permitem interpretar o movimento da água na zona não saturada.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos durante o monitoramento de 12 meses são os seguintes:

3.1. Correlação entre dados de chuva com os níveis hidrostáticos

Foram monitorados, durante 2 anos, os níveis d'água em 2 piezômetros e 1 poço (P_1 , P_2 e P, Figura 1b). As medidas do nível d'água foram realizadas semanalmente em cada um dos piezômetros e do poço e podem ser visualizados nos gráficos da Figura 4.

FIGURA 4. Variação de chuva e de níveis hidrostáticos

Na mesma Figura 4 estão plotados os dados de chuva diária, onde nota-se que existe uma correlação entre chuva e nível hidrostático dentro do poço e dos piezômetros.

Na tentativa de se quantificar esta correlação foram feitas regressões lineares entre níveis hidrostáticos e precipitação acumulada para cada piezômetro e poço.

Nestas correlações a metodologia utilizada foi fazer a somatória das precipitações ocorridas no "n" dias anteriores à cada data de medição de níveis e com esse valor fazer uma regressão linear com os níveis naquela data, para cada piezômetro e poço. O processo foi repetido para 7, 10, 15, 20 dias, etc. Nota-se em todos os piezômetros e no poço que a regressão linear, quantificada pelo coeficiente de Pearson ao quadrado, vai melhorando até atingir um valor máximo, após o que o coeficiente começa a diminuir. Este ponto máximo mostra o intervalo de tempo anterior que ocorreram precipitações que estão influenciando os níveis nos piezômetros e no poço naquela data.

Assim no piezômetro P_1 nota-se que a precipitação acumulada de 50 dias fornece o melhor coeficiente de correlação. Então supõe-se, por exemplo, que a precipitação que ocorreu a 60 dias anterior a um determinado dia, está servindo para atrapalhar a correlação, mostrando que não exerce mais influência sobre o nível hidrostático no piezômetro naquele dia.

No piezômetro P_2 o valor encontrado também foi de 50 dias e no poço P o valor foi da ordem de 170 dias. Isto quer dizer que no P o que choveu até cinco meses atrás estava influenciando o nível hidrostático de hoje.

Verifica-se que estes valores: 50 dias para P_1 , 50 para P_2 e 170 dias para P estão diretamente relacionados com a posição e topografia da localização dos piezômetros e do poço (Figura 1b).

Se os coeficientes de correlação fossem mais altos (acima de 0,8) poderiam ser obtidos funções que explicariam os níveis hidrostáticos em função de precipitação acumulada o que poderia ser de grande valia para geração de novos dados quando de uma simulação matemática, por exemplo. Os coeficientes encontrados são muito baixos (sempre inferior de 0,63), indicando apenas tendências e não uma correlação exata. Existem pelo menos duas hipóteses para explicar o pequeno valor destes coeficientes, ou seja, ou a correlação não é estritamente linear, devendo ser tentados novos graus de correlação, ou uma hipótese mais plausível é que estão sendo desprezados os tempos de resposta, que estatisticamente corresponde a se fazer correlações com precipitações acumuladas, mas deixando-se um intervalo ("lap"), que deve ser pesquisado em estudos futuros, entre o período de precipitação acumulada e a data de medição dos níveis. Fisicamente este intervalo corresponderia ao tempo de trânsito da água no meio não saturado até atingir o meio saturado.

O tempo de infiltração deve ser demorado porque, por exemplo, no caso de P_1 existe uma espessura muito grande (cca 10m) de sedimentos predominantemente argilosos (SZIKSZAY et al, 1986). No caso do P_2 a profundidade é menor mas são também sedimentos argilosos. E finalmente no caso de P admite-se que a posição topográfica juntamente com o fluxo preferencial ao longo do vale seria responsável pelo maior tempo de influência.

Observou-se que em lugares onde o terreno é acidentado, como no caso do local estudado, o escoamento das águas da chuva é rápido, como resultado do forte gradiente, portanto a quantidade de água infiltrada é baixa. Soma-se a este fato o do material ser argiloso, portanto, pouco permeável.

Estudos com trítio (^3H) artificial feitos por POLI, C. R. D. (IPEN, comunicação verbal) mostraram que durante um período de 5 meses o fluxo de trítio injetado chegou até 7 m de profundidade e que verificaram-se 2 picos de concentrações nas profundidades de $\pm 1,80$ e $\pm 3,2$ m, o que corresponderia a 2 camadas argilosas onde a água foi retida.

A infiltração calculada com este método foi de 600 mm de água em 5 meses.

3.2. Resultados das medidas de permeabilidade (K) em laboratório e no local

Os testes realizados para determinação de coeficiente de

condutividade hidráulica em amostras indeformadas forneceram uma variação de valores de $3,7 \times 10^{-3}$ cm/s nas camadas mais arenosas até $8,4 \times 10^{-6}$ cm/s nas mais argilosas.

Com referência a testes realizados no local as seguintes informações são pertinentes. Quando o ensaio de rebaixamento foi realizado no piezômetro situado no interior da Estação, este encontrava-se seco. Os valores de piezômetro são os seguintes: profundidade 8,90 m a partir do fundo da escavação, diâmetro do revestimento interno (d_1) = 0,094 m; diâmetro do revestimento externo (d) = 0,097 m e comprimento do filtro = 1,5 m.

Antes de iniciar o teste, o piezômetro foi saturado, a fim de melhor se adaptar aos testes e oferecer um melhor resultado.

Com a finalidade de melhor caracterizar o trecho ensaiado, foram realizados 2 testes de rebaixamento, utilizando-se mangueiras acopladas em torneira existente nas proximidades da Estação.

Os valores obtidos nos ensaios foram os seguintes:

<u>1º Ensaio</u>	<u>2º Ensaio</u>
$h_0 = 0,095$	$h_0 = 0,095$
$\Delta t = 1200$ s	$\Delta t = 1200$ s
$\Delta h = 6,96$ m	$\Delta h = 5,056$ m
$L = 1,5$ m	$L = 1,5$ m
$d_1 = 0,094$ m	$d_1 = 0,094$ m
$d = 0,097$ m	$d = 0,097$ m

Utilizando-se a equação da Figura 2, tem-se:

$$K_1 = 1,8 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \quad K_2 = 1,1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

obtendo-se por conseqüente uma permeabilidade média de ordem de:

$$K = 1,45 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

Os resultados do ensaio de permeabilidade realizado no local até 4 m de profundidade com perfuração sem revestimento são os seguintes:

0 - 1 m	$K = 2,5 \times 10^{-4}$ cm/s
0 - 2 m	$K = 4,2 \times 10^{-4}$ cm/s
0 - 3 m	$K = 1,9 \times 10^{-4}$ cm/s
0 - 4 m	$K = 3,4 \times 10^{-4}$ cm/s

Como se observa, pode-se admitir para o local da Estação Experimental uma permeabilidade média de 10^{-4} cm/s.

3.3. Resultados dos estudos granulométricos e correlacionamento

Na Figura 5 a coluna estratigráfica juntamente com os diâmetros (ϕ) correspondentes são colocadas ao lado do perfil da Estação Experimental para correlacionamento com os dados dos outros parâmetros. Como se observa se trata de um terreno heterogêneo consistindo de areias de granulação grossa até argilas com várias granulações intermediárias.

Ainda, foi verificada a variação do teor de água com a profundidade, também durante 12 meses. Este teor de água é extraído de cápsulas porosas destinadas à coleta na zona não saturada, para análises físico-químicas. Não se trata portanto de conteúdo de água (θ). Os valores médios de 12 meses das variações de teor de água encontram-se na Figura 5.

FIGURA 5. Perfil da Estação Experimental

Na Figura 5 observa-se o correlacionamento de litologia, granulometria, permeabilidade (K) e teor de água. Assim até + 1,5 m de profundidade com a permeabilidade de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s e a granulometria determinando solo areno-siltoso e argila arenosa, observa-se a diminuição do teor de água com a profundidade. Admite-se que nesta parte da zona não saturada a infiltração será rápida devido a granulometria e permeabilidade, assim como a inclinação do terreno.

Verificou-se um aumento de teor de água entre + 1,5 a 3,5 m de profundidade com permeabilidade de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s e a granulometria mostrando variação de litologia entre areia siltica e argila arenosa, com uma estreita camada de areia.

Entre 3,5 - 5,0 m de profundidade a granulometria passa abruptamente para valor de ϕ maior (camada de areia) o que evidencia-se com a diminuição do teor de água.

Entre 5,0 - 9,0 m de profundidade inicialmente o teor de água aumenta, depois entre 9,0 - 9,5 m diminui (camada de areia) e de novo observou-se aumento do teor de água até o aquífero.

Nestas variações de litologia, granulometria, permeabilidade e teor de água, admite-se que as areias com granulometria maior, portanto permeabilidade também maior, não retêm a água infiltrada na zona não saturada e que a água fique reti

da nas camadas de siltes, siltes argilosos e areias siltico-argilosas com permeabilidade menor. Essas permeabilidades menores influem diretamente no tempo de percolação, implicando numa permanência maior da água no meio não saturado, ou seja, um maior tempo para infiltração até o aquífero.

3.4. Resultados das medidas tensiométricas

Com os dados das medidas tensiométricas (outubro de 1985 a té novembro de 1986) foram confeccionados os gráficos das Figuras 7a, 7b, 8a e 8b. Antes de apresentar e discutir estes gráficos, para melhor entendimento, achou-se necessário uma pequena introdução com relação ao sentido do movimento da água.

3.4.1. Perfil do potencial (ϕ) e sentido do escoamento

O sentido de escoamento decorre do sinal da medida algébrica do vetor velocidade (V). Este último depende do sinal do gradiente de potencial. O perfil de potencial representa a distribuição vertical dos potenciais do solo. Na ordenada coloca-se a profundidade (Z) orientado positivamente para baixo, e na abcissa o potencial (ϕ), para direita (Figura 6). O exame dos perfis de potencial permite visualizar rapidamente o sentido dos escoamentos na parte não saturada de um terreno poroso, ou seja, entre a superfície do solo e a superfície freática.

FIGURA 6a, b e c. Perfis de potencial

A Figura 6a mostra uma inversão no sinal do gradiente de potencial. O ponto de inflexão localiza-se a cota Z nulo. Neste ponto $\delta\phi/\delta Z = 0$, sendo o fluxo nulo nessa profundidade.

Na região do perfil entre a superfície do terreno ($Z = 0$) e o ponto de fluxo nulo ($Z = Z$ nulo), o gradiente de potencial é positivo, o que implica que o gradiente de sucção é superior ao termo de gravidade e que os escoamentos são dirigidos no sentido da superfície do solo e da atmosfera. Na região entre as cotas Z nulo e Z_n , o gradiente do potencial é negativo implicando que o termo de gravidade é superior ao gradiente de sucção medido entre 2 pontos desta zona. O fluxo ocorre na direção do lençol freático.

Este tipo de perfil caracteriza os movimentos da água no solo no período de evapotranspiração e a drenagem do terreno se processa em profundidade.

O perfil da Figura 6b caracteriza igualmente o movimento de água no período de evapotranspiração, mas desta vez não há nenhuma drenagem.

A Figura 6c mostra um perfil típico observado durante uma inversão, ou seja, o gradiente do potencial sendo negativo sobre toda a extensão da zona não saturada, o escoamento é descendente em todos os pontos.

3.4.2. Representação gráfica das medidas das cargas hidráulicas

Utilizando-se um programa de representação gráfica para microcomputadores da linha IBM PC foram feitos 2 tipos de representações. Uma bidimensional apresentada nas Figuras 7a e 7b, dos tensiômetros externos, e 8a e 8b dos tensiômetros internos, onde plotou-se carga hidráulica (em centímetros de coluna d'água) versus profundidade de instalação dos tensiômetros (em metros) para cada dia de medição. O outro tipo de representação foi tri-dimensional, onde procurou-se integrar, num só gráfico, tempo, profundidade e carga hidráulica, para melhor visualização dos fenômenos (Figuras 9a e 9b).

FIGURAS 7a e 7b. Perfil de potencial - Tensiômetros externos

Nos gráficos das Figuras 7a e 7b dos tensiômetros externos, observa-se que a linha de evaporação ou linha de fluxo nulo se situa a uma profundidade de 0,5 m, em geral.

Observou-se também que nas épocas de seca prolongada a linha de fluxo nulo pode aprofundar-se para até 1,5 m, e que durante a época das chuvas, ou seja, nos meses de janeiro, fevereiro e março esta desaparece, porque há predomínio da infiltração. Porém, esta infiltração está várias vezes interrompida quando as chuvas cessam e novamente a linha de evaporação oscila, dependendo a precipitação momentânea.

FIGURAS 8a e 8b. Perfil de potencial - Tensiômetros internos

Nos gráficos das Figuras 8a e 8b, dos tensiômetros internos, observou-se que a linha de evaporação ou de fluxo nulo localiza-se a uma profundidade de 1,5 m a partir do fundo da escavação.

O comportamento desta linha é semelhante ao dos tensiômetros externos, ou seja, a infiltração, muitas vezes, ocorre nas mesmas épocas do que as observadas com os tensiômetros externos, quando a quantidade de chuva é maior. Porém quando a precipitação é de menor quantidade, esta não é suficiente para chegar até profundidades maiores, então não se observa a infiltração e a linha de evaporação se aprofunda até 2,0-2,5 m de profundidade. Interessante de observar que apesar dos tensiômetros internos encontram-se num lugar coberto, evidencia-se um certo movimento de água, primeiramente, talvez lateral, depois vertical. Seria uma prova que a infiltração não é somente um movimento vertical mas existe um fluxo ou componente horizontal também.

FIGURAS 9a e 9b. Representação tri-dimensional de tensiômetros externos e internos - Variação da carga hidráulica no espaço e no tempo

As Figuras 9a e 9b são representações tri-dimensionais dos perfis dos gráficos das Figuras 7a, 7b, 8a e 8b. Essas figuras permitem uma melhor visualização dos dados representados nas figuras acima mencionadas, embora não se prestem para quantificar exatamente estes dados.

Observa-se na Figura 9a que a carga hidráulica é menor em todas as profundidades nos meses de outubro de 1985 até janeiro 1986, ou seja, na estação de primavera, correspondendo a evaporação. O mesmo se observa a partir dos meses de junho até outubro de 1986, ou seja, fim de outono e inverno. A carga hidráulica aumenta-se nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril 1986, na época das chuvas, o que corresponderia a recarga do aquífero.

Na Figura 9b observa-se o mesmo comportamento da Figura 9a, a não ser um atraso no tempo de evaporação, talvez devido à cobertura da Estação. A evaporação neste caso diminuiria sensivelmente, havendo predominantemente infiltração.

FIGURAS 10a e 10b. Representação plana de tensiômetros ex
ternos e internos

Nas Figuras 10a e 10b os mesmos dados das Figuras 9a e 9b são observados em planta, como um gráfico de isolinhas de cargas hidráulicas no tempo e no espaço.

Essas figuras mostram uma representação onde na or
denada aparece a variável tempo (em meses), na abcissa a variável profundidade de instalação das cápsulas dos tensiômetros (em metros), e as linhas dentro da área delimitada representam curvas de igual carga hidráulica (em centímetros de coluna d'água).

4. CONCLUSÃO

Os resultados preliminares apresentados neste trabalho que aborda os dois tópicos principais, tais como, a infiltração e o sentido do movimento da água, permitiram as seguintes conclusões:

- Quanto a infiltração:

Existe uma correlação entre a precipitação pluviométrica e a variação de nível hidrostático. A influência desta infiltração observa-se 50 dias após as chuvas nos piezômetros P_1 e P_2 e 170 dias no poço.

A razão deste atraso está relacionado tanto com a permeabilidade variável que está ao redor de 10^{-4} cm/s, conseqüentemente a granulometria e a litologia, que consiste predominantemente de argilas, siltes argilosos e areias argilosas, como com a situação topográfica e presença ou não de vegetação, do local, portanto não permitindo uma infiltração homogênea.

- Quanto ao movimento da água na zona não saturada:

As medidas tensiométricas forneceram os seguintes resultados:

- a linha de evaporação situa-se a uma profundidade de 0,50 m em ambiente aberto e a 1,50 m em ambiente fechado;

- a representação tri-dimensional permitiu visualizar que a carga hidráulica é menor em todas as profundidades nos meses de outubro 1985 até janeiro 1986 e de junho até outubro, ou seja, na estação de primavera e fim de inverno respectivamente, quando existe principalmente a evaporação. A carga hidráulica

crece nos meses de janeiro a abril 1986 (época das chuvas) o que corresponderia a recarga do aquífero.

Essas observações são válidas para o local onde a Estação Experimental se situa e poderiam ser extrapoladas para outras regiões com condições climáticas, vegetação e litologia semelhantes.

Aplicação do estudo

Este tipo de estudo poderia ser aplicado de um lado, para pesquisas na hidrogeologia, recarga de aquíferos, e na agricultura quando deseja saber a profundidade de penetração das chuvas ou da água de irrigação, e a profundidade da linha de evaporação portanto, para conhecer o sentido do movimento da água infiltrada no decorrer do tempo.

AGRADECIMENTOS

Queremos expressar os nossos, mais sinceros agradecimentos : a FAPESP (Fundação ao Amparo de Pesquisa no Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro que possibilitou esta pesquisa; ao engenheiro agrônomo Henry Lesjak MARTOS da Prefeitura da Cidade Universitária, pela sempre pronta ajuda solicitada; ao Prof. Dr. Armando M. COIMBRA pela orientação dos bolsistas de Iniciação Científica nos trabalhos de granulometria realizados no Laboratório de Sedimentologia do IGUSP; aos bolsistas de Iniciação Científica, Fábio SCAMBATO e Ronaldo M. FIGUEIRA pela participação nas análises granulométricas; aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica, USP, na orientação de bolsistas na determinação de permeabilidade e ao Professor engenheiro Nilson GUIGUER Jr., pela valiosa colaboração no tratamento dos dados, pelos programas de computação e suas interpretações.

BIBLIOGRAFIA

- ABGE - 1981 - Ensaio de Permeabilidade em Solos - 1^a tentativa - Boletim 04, pg 36.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. - 1957 - Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameter, Journal of Sed. Petrol., Nº 27, pg 3-27.
- HASUI, Y. & CARNEIRO, C.D.R. - 1980 - Origem e evolução da bacia sedimentar de São Paulo - In: Mesa Redonda: Aspectos geo-

- lógicos e geotécnicos da bacia sedimentar de São Paulo, S. P., pg 5-14 (Publ. Esp. SBG).
- de MELO, M.S., RICCOMINI, C., HASUI, Y., ALMEIDA, F.F.M. e COIMBRA, A.M. - 1985 - Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do sudeste do Brasil - Rev. de SBG - Vol. 15, Nº 3, pg 193-201.
- MUSKAT, M. - 1973 - The flow of homogeneous fluids through porous media - New York, MacGRAW-HILL, pg 763.
- SUGUIO, K. - 1973 - Introdução à Sedimentologia, São Paulo, Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, pg 71.
- SUGUIO, K. - 1980 - Síntese dos conhecimentos sobre a sedimentação da bacia de São Paulo - In: Mesa Redonda: Aspectos geológicos e geotécnicos da bacia sedimentar de São Paulo, S. P., pg 25-34 (Publ. Esp. SBG).
- SZIKSZAY, M., CONSONI, A.J., GUIGUER, N., HASSUDA, S., KIMMEL - MANN, A.A., PARISOT, E., SGAMBATO, F. e YOSHINAGA, S. - 1986 - Instalação de uma Estação Experimental para estudo da dinâmica e da evolução da composição química da água na zona não saturada - Revista ABAS, Nº 10, pg 5-20.

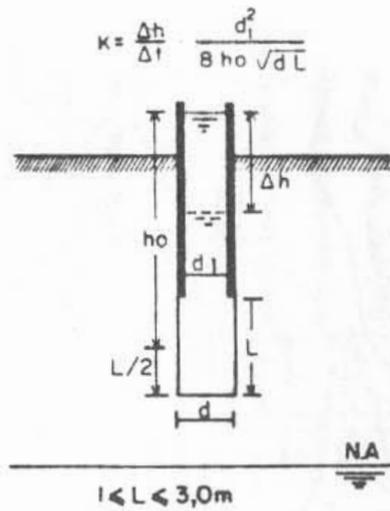


Fig. 2 - ÁBACO PARA CÁLCULO DE K:
(Gill, B. & Gavard, M. 1957)

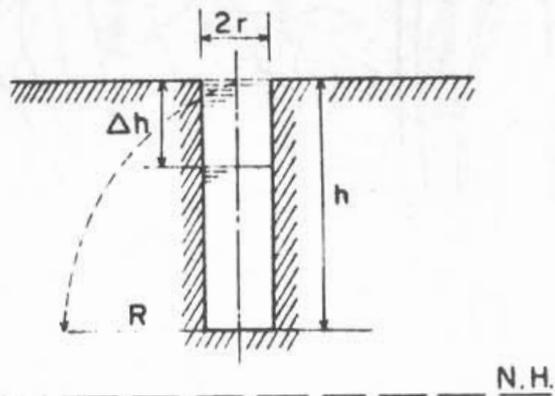


Fig. 3 - ESQUEMA DE PERFURAÇÃO SEM REVESTIMENTO

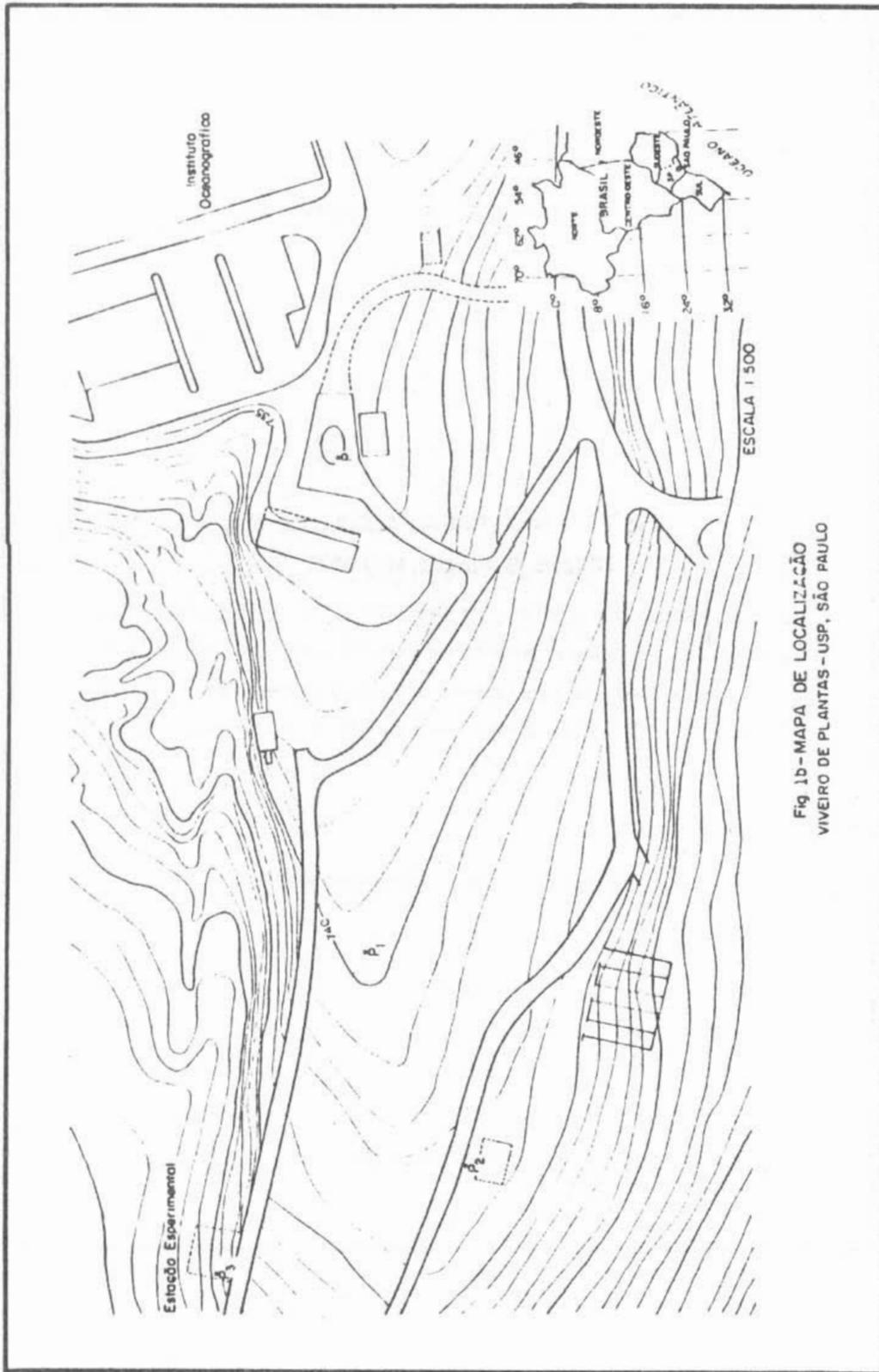
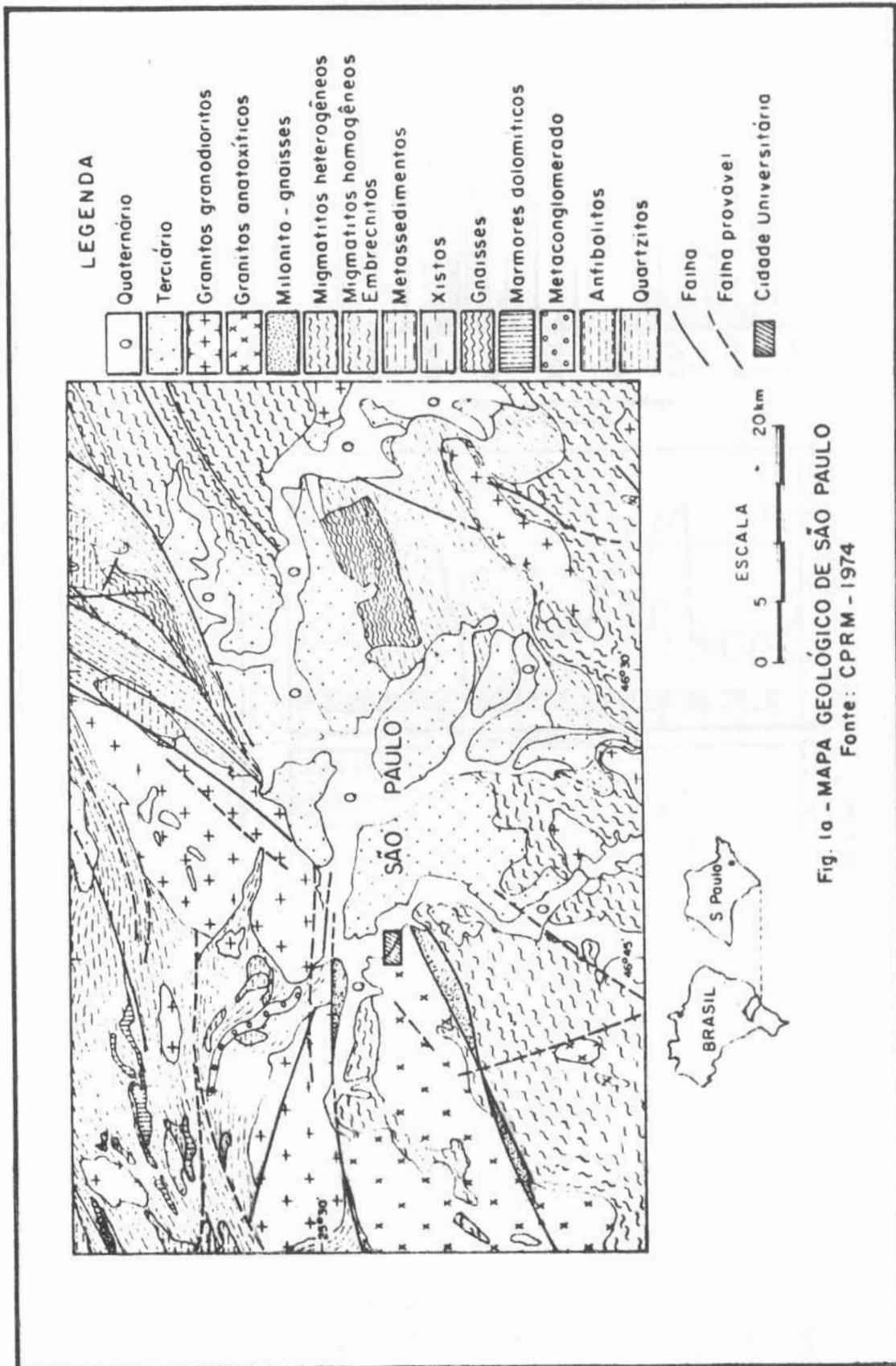
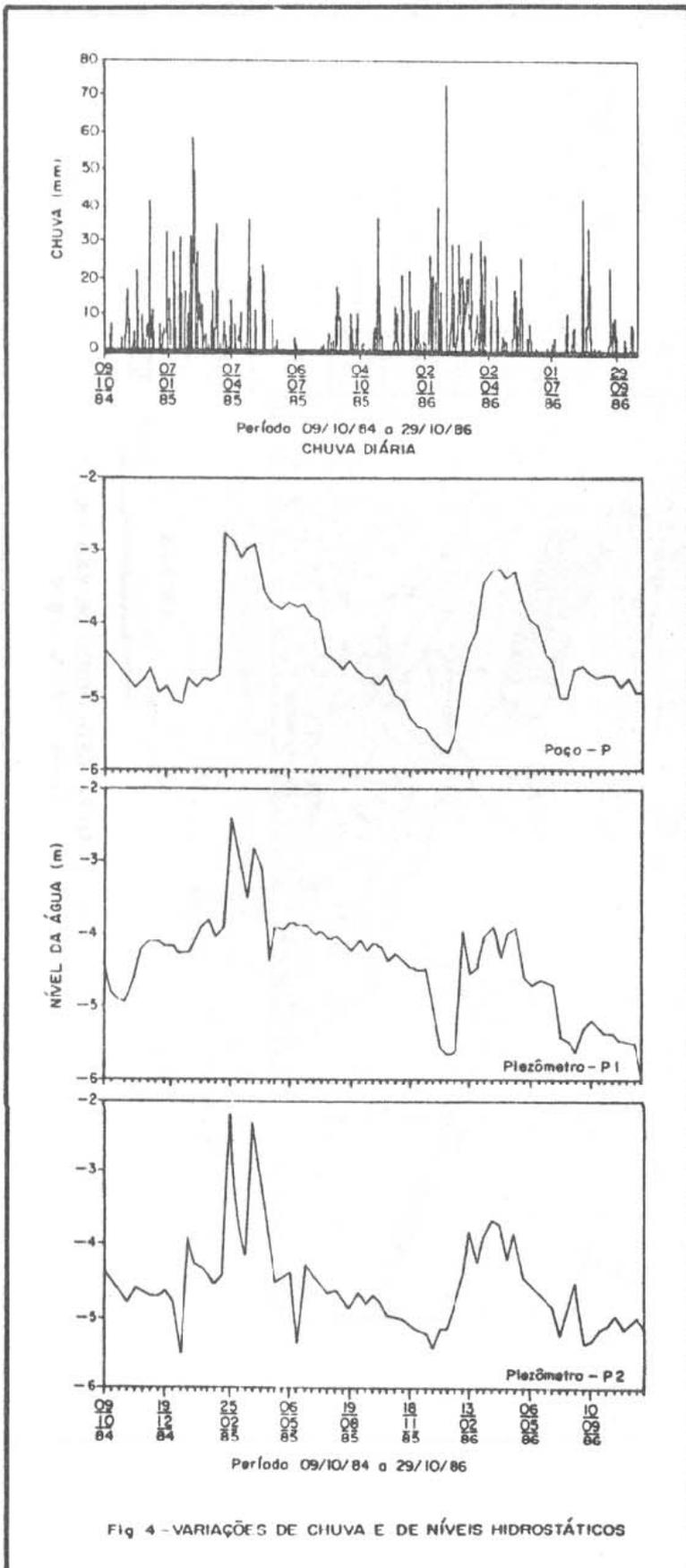


Fig 1b-MAPA DE LOCALIZAÇÃO
VIVEIRO DE PLANTAS - USP, SÃO PAULO





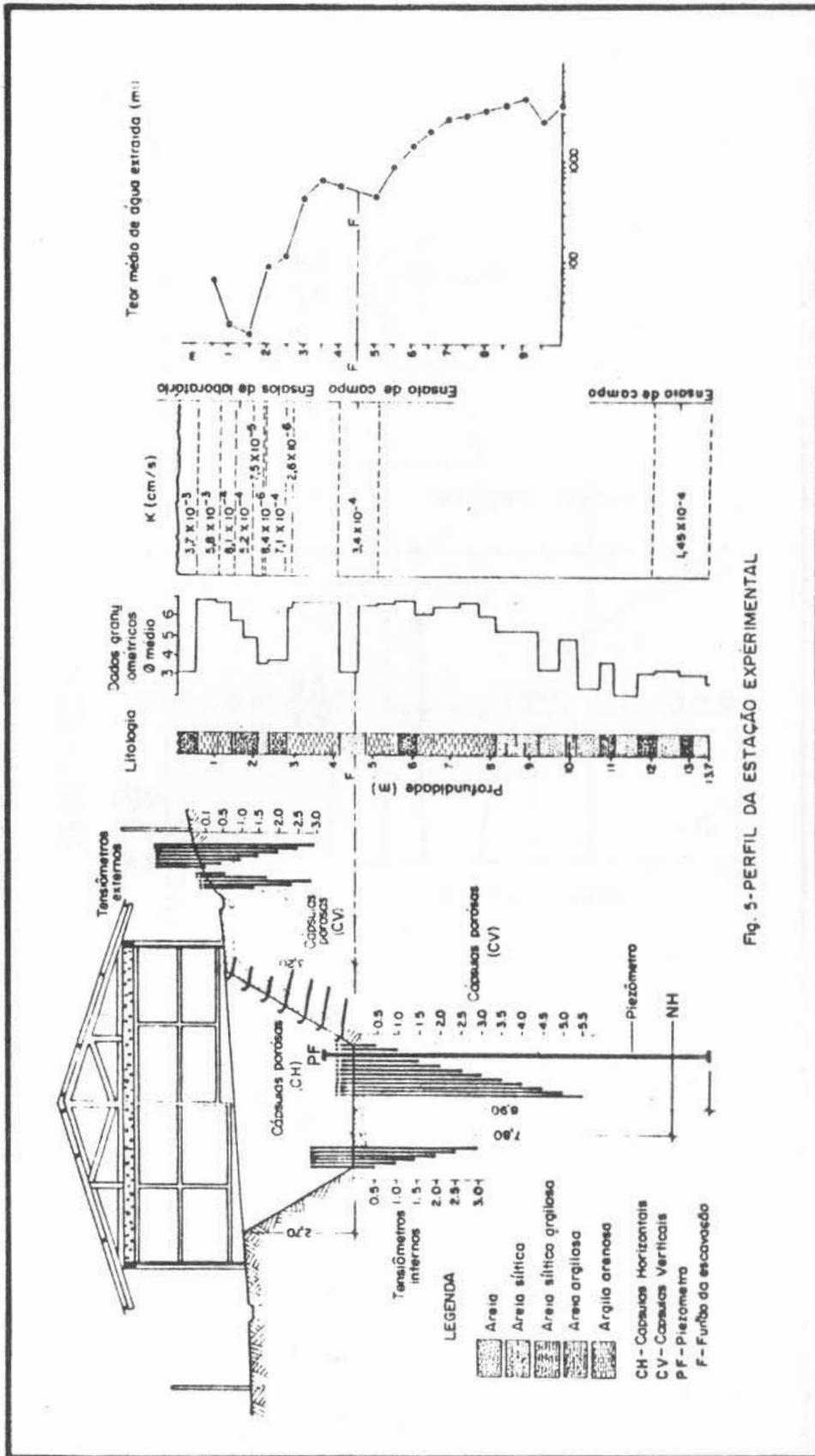
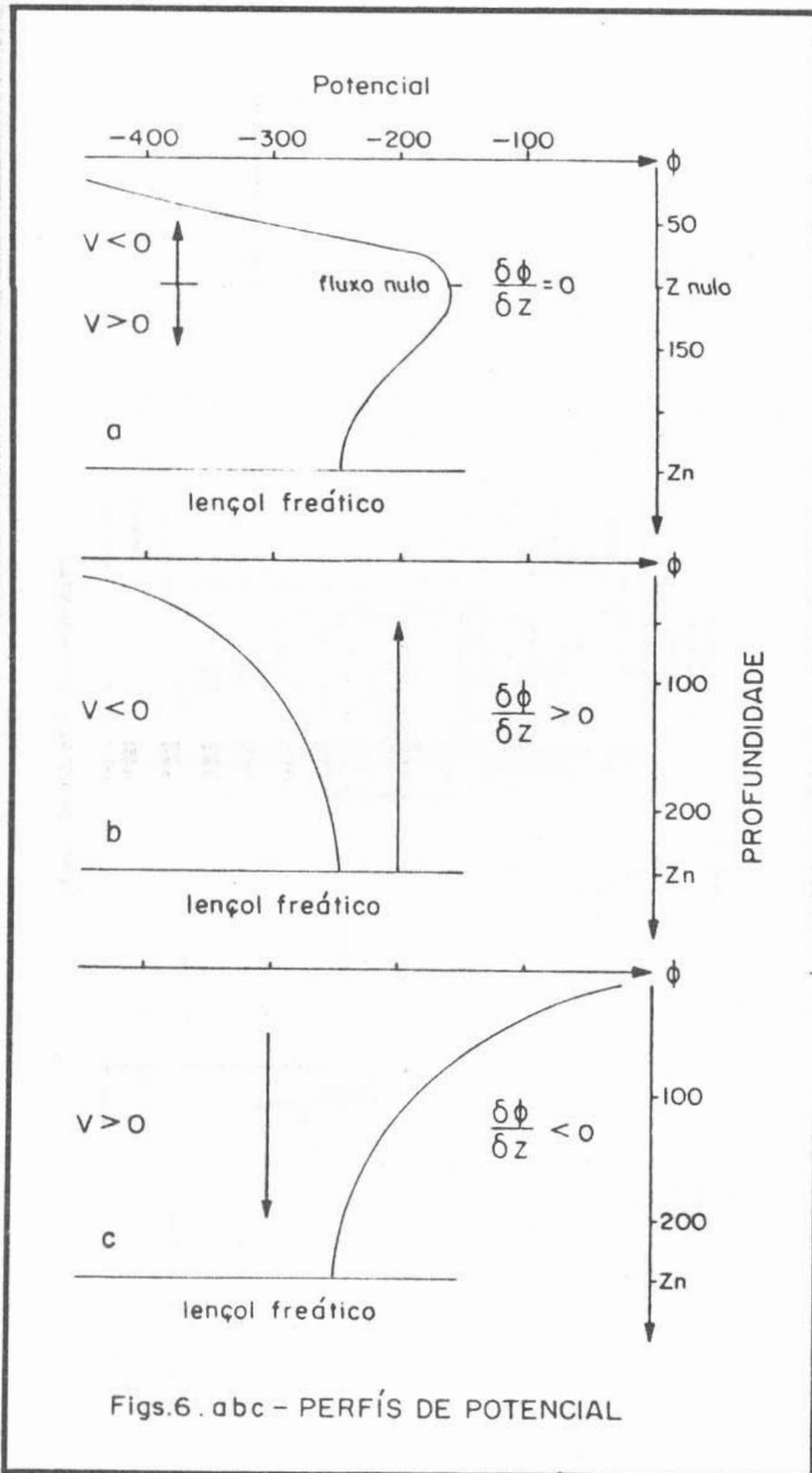
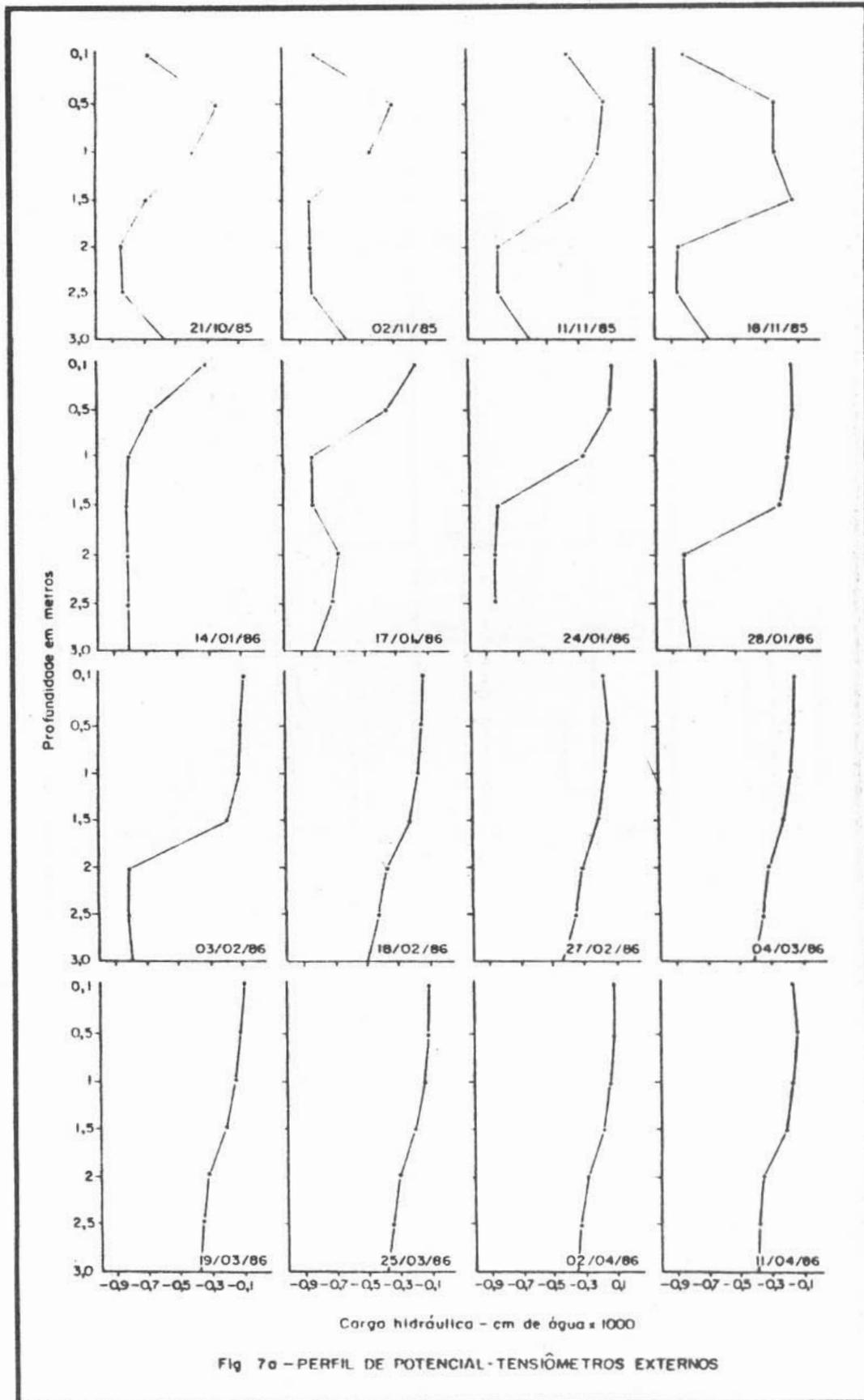
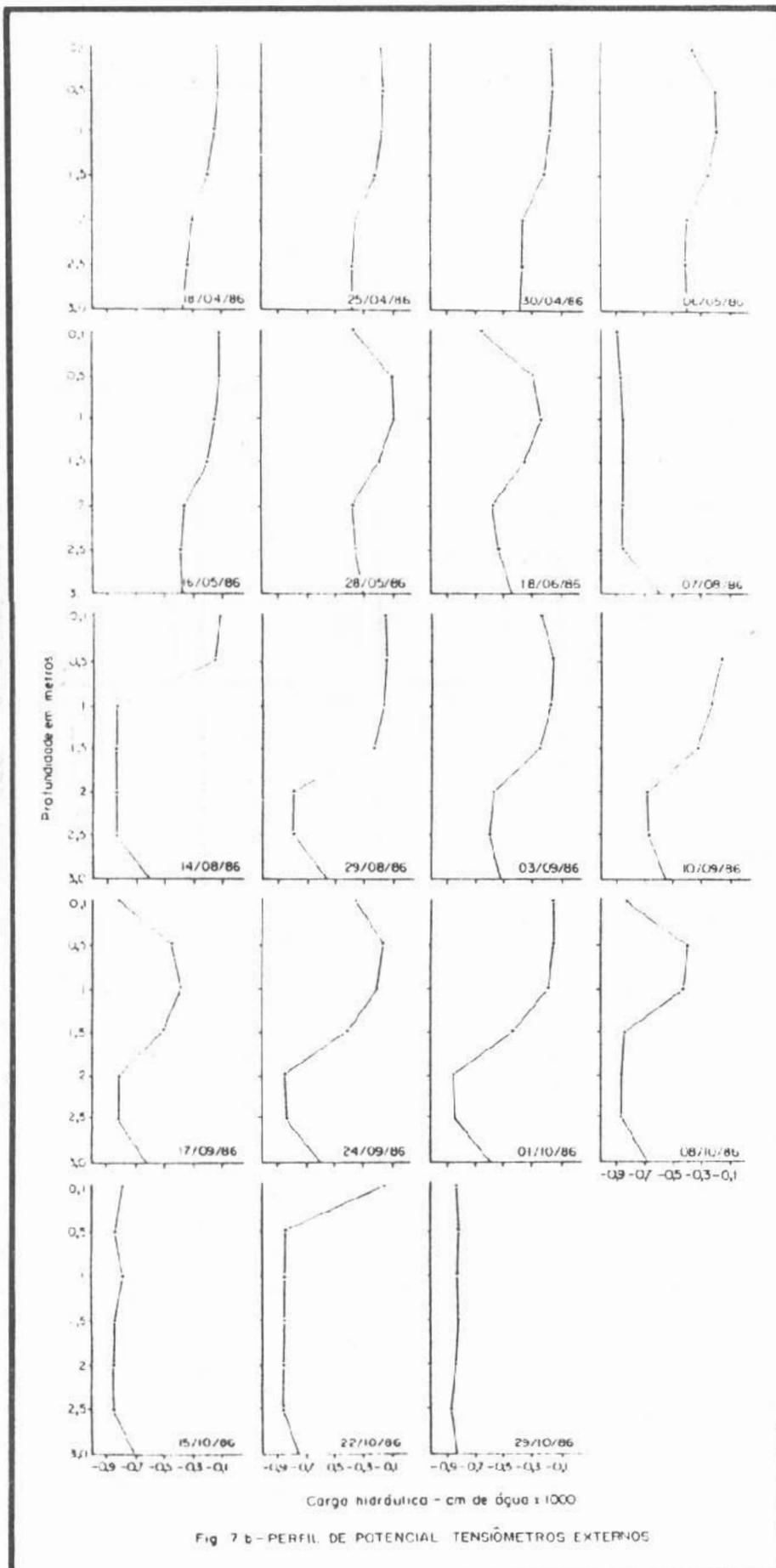


Fig. 5 - PERFIL DA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL







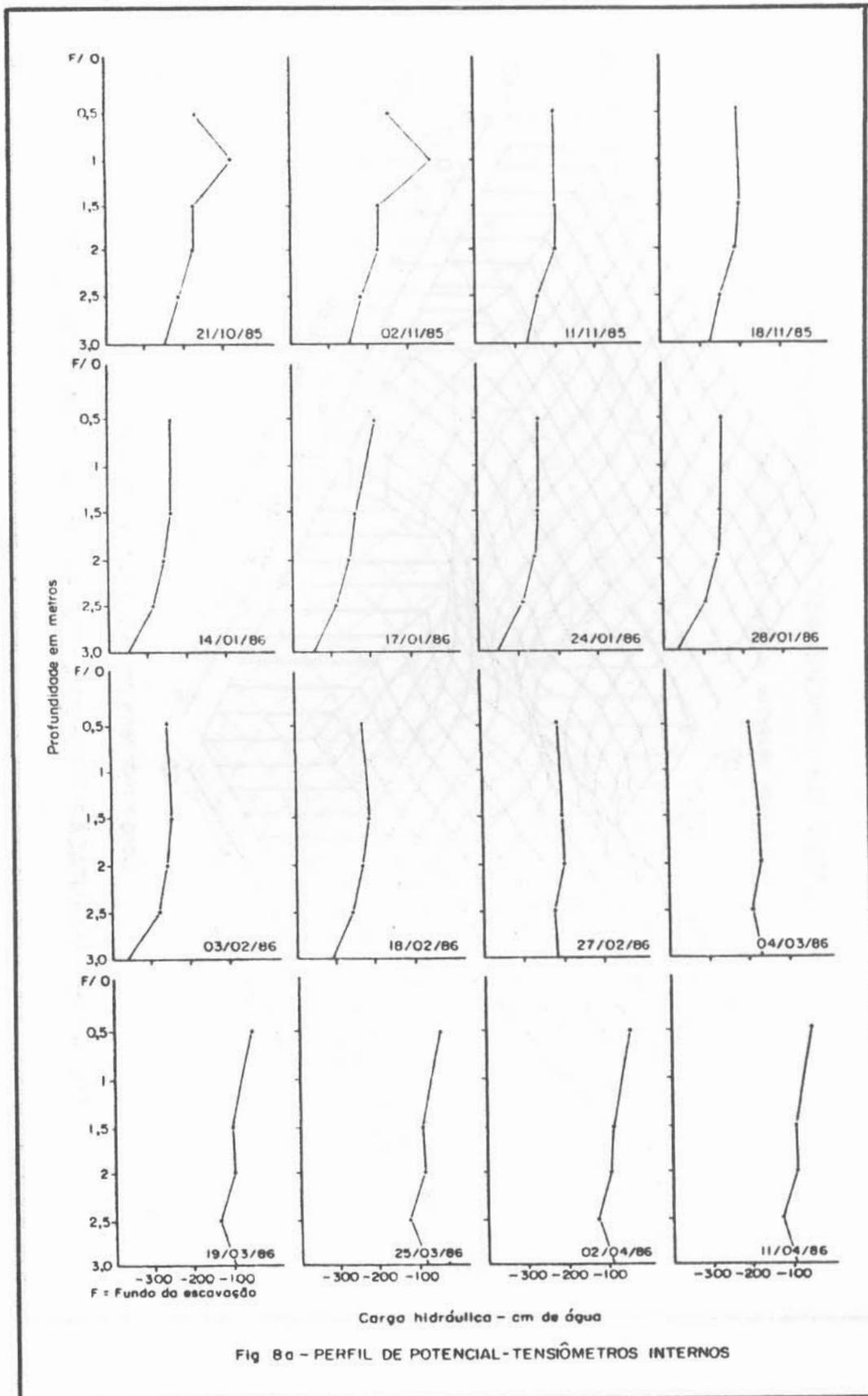


Fig 8a - PERFIL DE POTENCIAL - TENSIÔMETROS INTERNOS

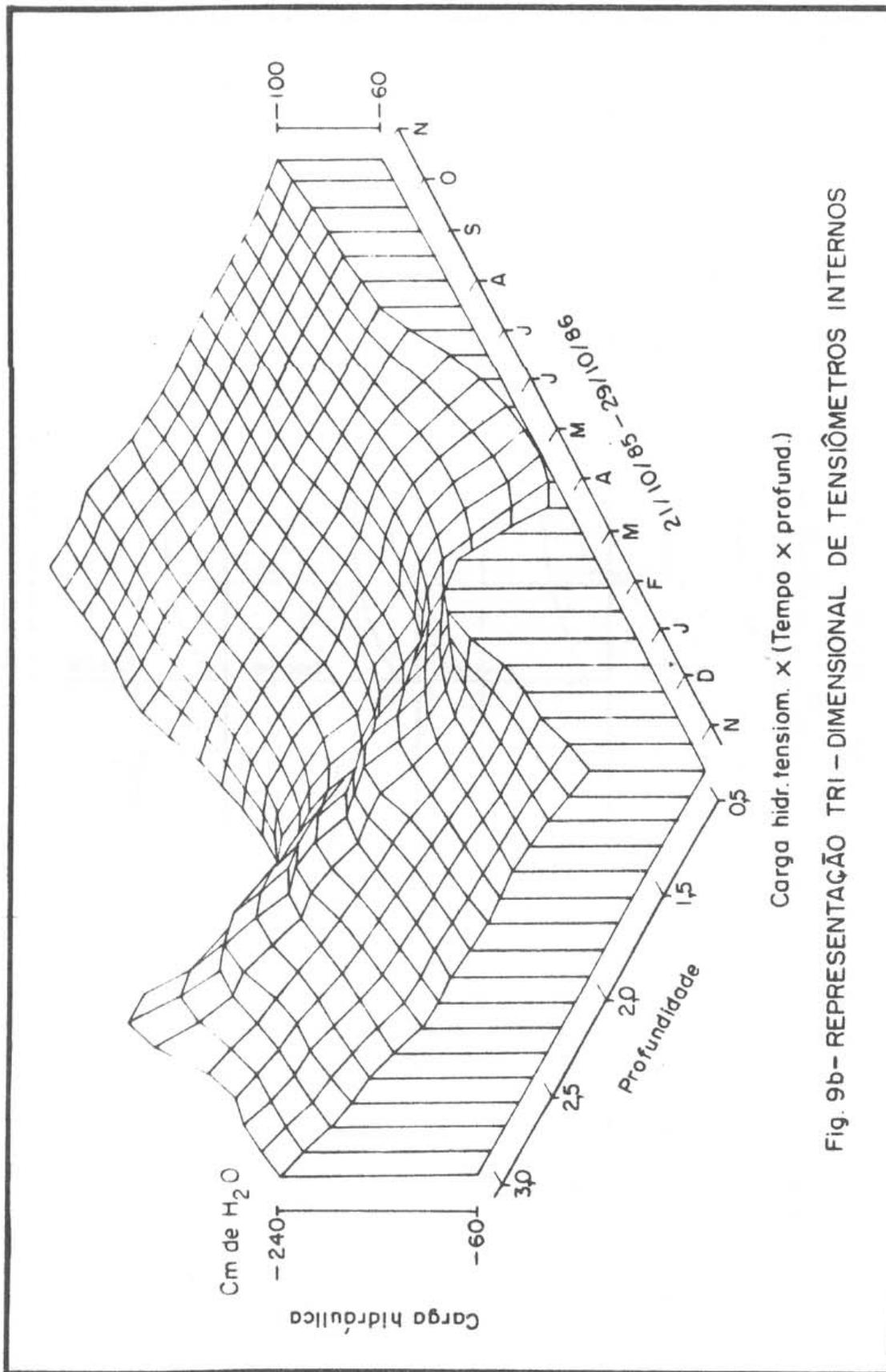
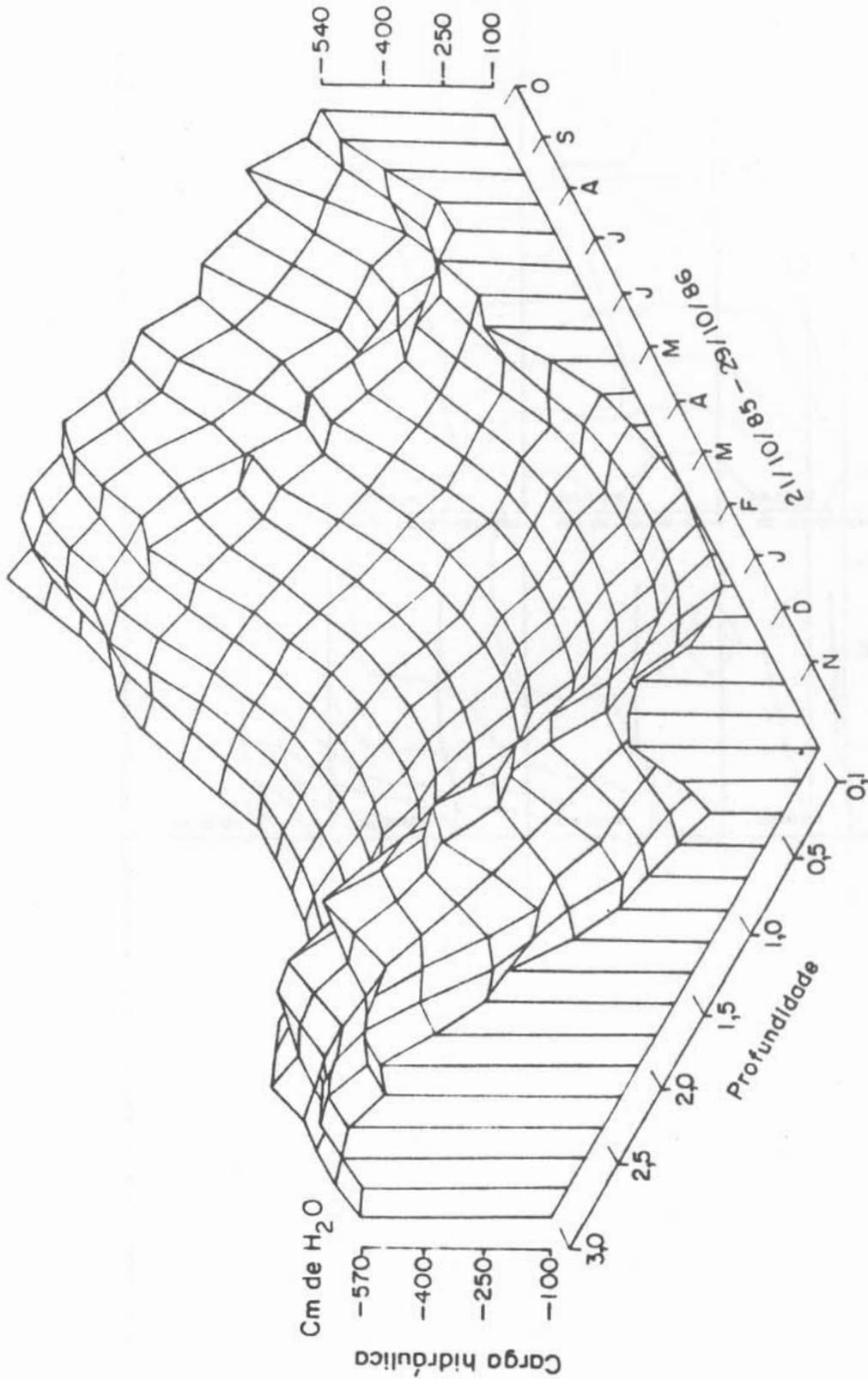


Fig. 9b - REPRESENTAÇÃO TRI - DIMENSIONAL DE TENSÍÔMETROS INTERNOS



Carga hydr. tensiom. x (Tempo x profund.)

Fig. 9a - REPRESENTAÇÃO TRI - DIMENSIONAL DE TENSÍÔMETROS EXTERNOS

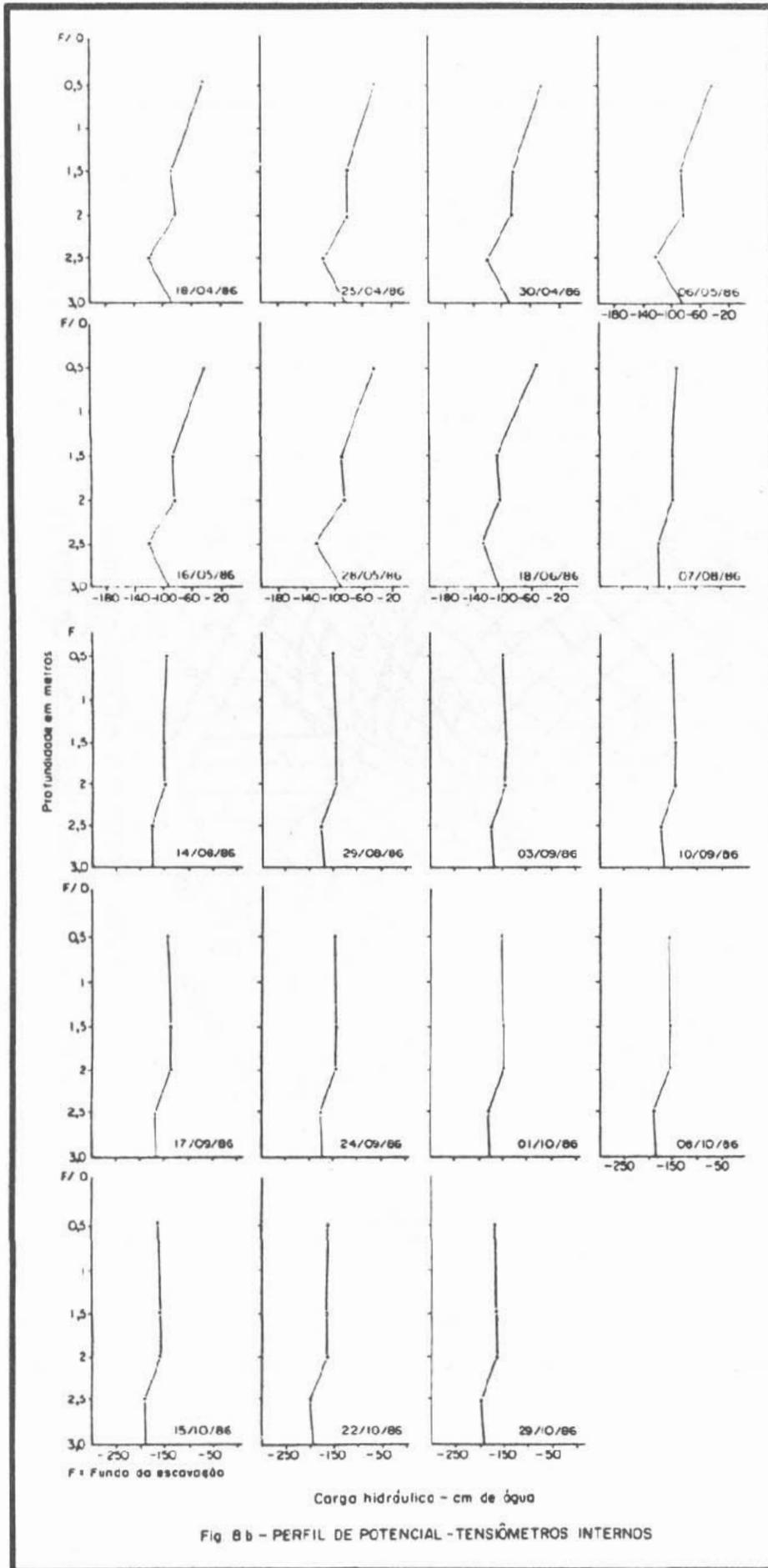
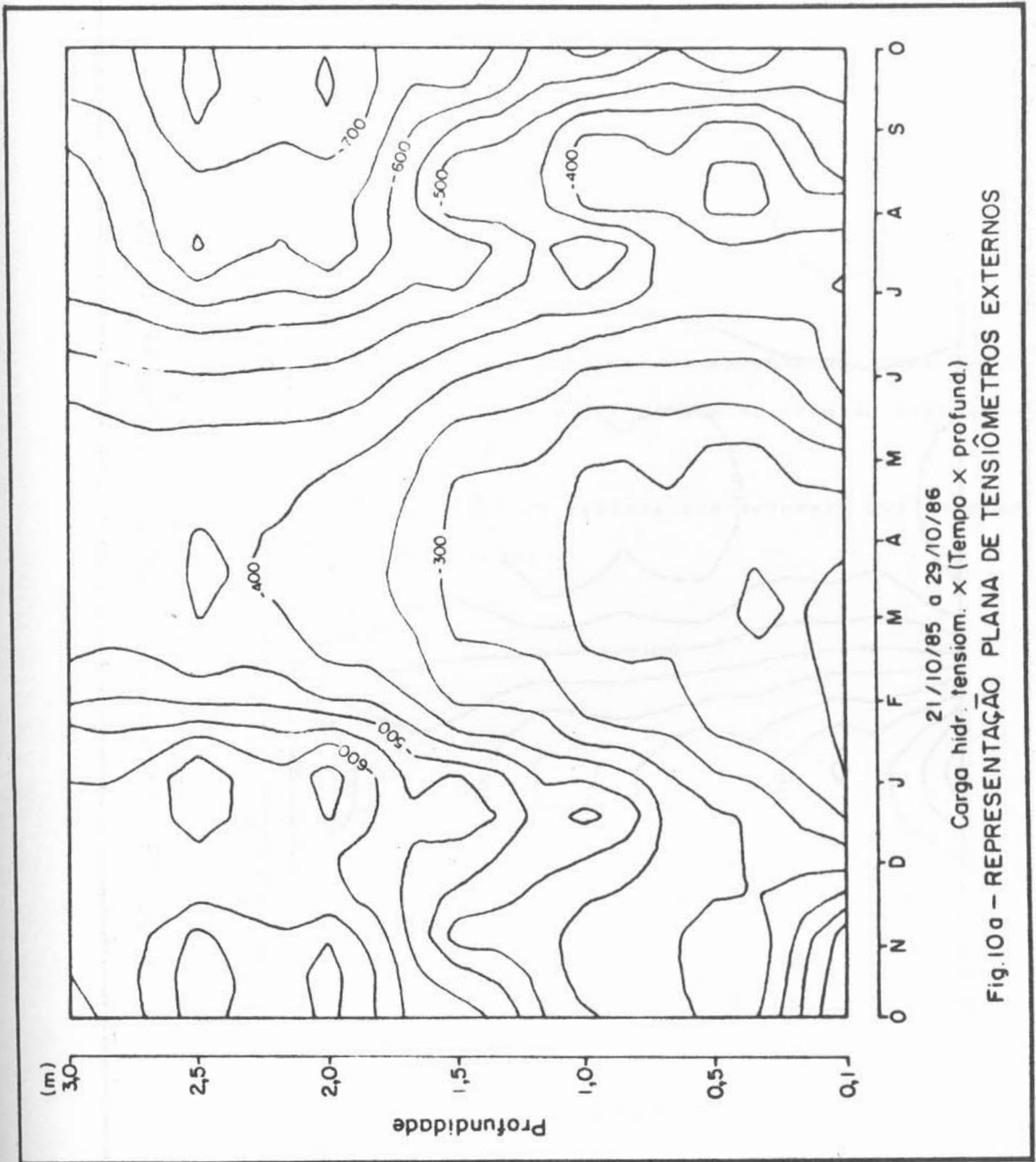


Fig 8b - PERFIL DE POTENCIAL - TENSÍÔMETROS INTERNOS



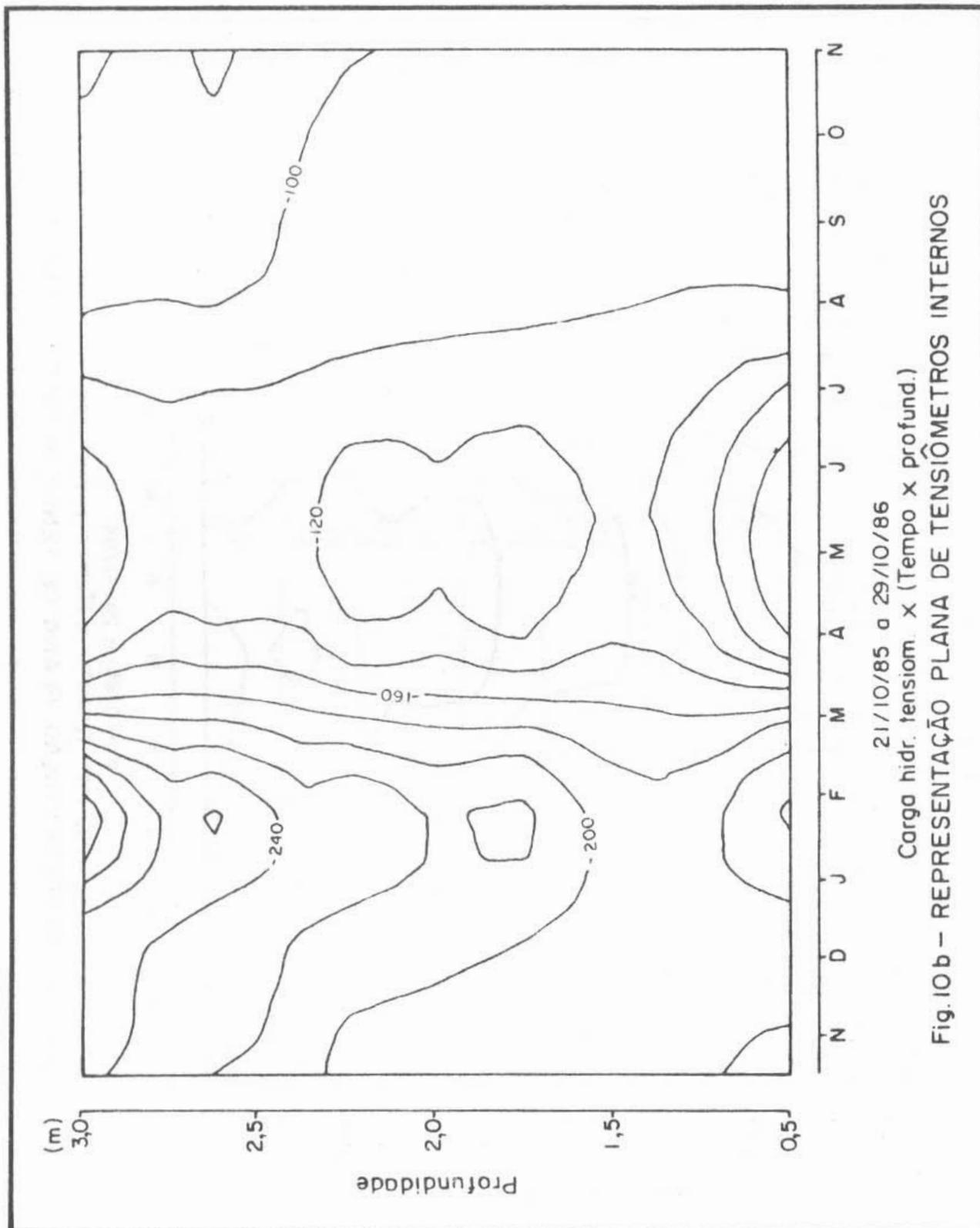


Fig.10 b - REPRESENTAÇÃO PLANA DE TENSÔMETROS INTERNOS