

Aquíferos de extensão limitada, método das imagens*

Antonio Ferrer Jorba - 1980

INTRODUÇÃO

Na determinação das características hidrodinâmicas dos aquíferos pelos métodos comumente usados (Equilíbrio, Desequilíbrio), existem várias condições a serem satisfeitas, sendo que uma delas é a da extensão infinita dos mesmos. Dita condição, salvo em casos especiais ** , não existe na realidade, devido à presença de barreiras que interrompem o desenvolvimento do cone de rebaixamento e, portanto, limitam a extensão do aquífero.

As barreiras podem ser positivas ou negativas, de acordo com a sua natureza, sendo que as positivas estão condicionadas geralmente à existência de corpos de água que interceptam o cone os quais com capacidade suficiente para deter sua expansão, produzindo-se um fluxo da barreira ao aquífero. As barreiras negativas devem-se aos horst, às falhas, as dobras e a outros fenômenos geológicos que colocam o aquífero em contato com formações impermeáveis. Não existindo fluxo da barreira ao aquífero, detem-se o desenvolvimento do cone.

A maioria das barreiras não são abruptas nem seguem linhas retas. Considerando porém, que a relação entre a extensão do aquífero e do campo de poços é muito grande, a concepção de barreiras como descontinuidades abruptas e retas não introduz erros grandes na esquematização e na solução dos problemas.

O Método das Imagens é um instrumento muito útil na correção e ajuste dos efeitos das barreiras na avaliação de fluxos de água subterrânea em aquíferos de extensão limitada.

MÉTODO DAS IMAGENS

Baseia-se no princípio de superposição, que estabelece: "Quando dois ou mais cones de rebaixamento interfere-se, o cone de rebaixamento resultante obtém-se da soma algébrica dos rebaixamentos individuais no ponto de interesse".

Na Fig. 1-A mostra-se uma barreira positiva (rio) que limita um aquífero do ponto de vista hidrodinâmico. Quando o cone atingir a barreira, a razão de expansão do mesmo diminui. Continuando o bombeamento o cone se expande por dentro da barreira, até o poço receber a maior contribuição dela. Teoricamente o rio deveria penetrar totalmente o aquífero, o que na realidade dificilmente acontece, mas a situação mostrada na figura significa que a vazão do rio é maior que a do poço e que o aquífero tem capacidade para transmiti-la. A barreira é portanto, positiva com um rebaixamento nulo ($s = 0$) nela. Um sistema que satisfaça esta condição de limite resolve o problema.

Na Fig. 1-B indica-se este sistema hipotético. Substituiu-se o aquífero real por um de extensão infinita, com um poço imaginário de recarga no lado oposto à barreira e a mesma distância dela que o poço real. A vazão do poço imaginário é igual a do poço real mas com sinal negativo. O cone de rebaixamento produzido pelo poço imaginário é igual ao do poço real, mas invertido. No local da barreira, os dois efeitos de rebaixamento anulam-se satisfazendo a condição $s = 0$. O cone de rebaixamento resultante obtém-se da soma algébrica dos rebaixamentos dos dois cones, como se mostra na Fig. 1-C.

O caso de uma barreira negativa analisa-se em forma similar, colocando no aquífero de extensão infinita, um poço imaginário de extração, com uma vazão igual à do poço real no lado oposto da barreira e a mesma distância dela que o do poço real. O cone imaginário será igual ao real e somando os rebaixamentos obter-se-á o cone resultante. A Fig. 2-A-B-C mostra esta substituição.

Quando se tem várias barreiras procede-se na mesma forma, mas em casos complexos deve considerar-se que cada poço imaginário produz rebaixamento não compensados nas outras barreiras.

Estes desequilíbrios provocam gradientes teóricos e os fluxos correspondentes, o que não está de acordo com as condições de limite. Por este motivo dever-se-á aplicar uma segunda série de poços imagens para eliminar os efeitos residuais produzidos pela primeira série. Por sua vez a segunda série de poços gerará efeitos não compensados, e assim sucessivamente até o infinito. Na prática é necessário a adoção de poços imaginários somente até conseguir efeitos residuais desprezíveis em relação ao efeito total.

* — Desenvolvido por Lord Kelvin em seus trabalhos sobre teorias eletrostáticas.

** — Por exemplo, os de pequenas extrações, em aquíferos aluvionais de grande extensão.

POSIÇÃO DAS BARREIRAS

Os efeitos dos poços imagens que substituem as barreiras aparecem nos gráficos monolog s-t como mudanças de inclinação nas curvas em múltiplos da primeira inclinação. Explica-se este fato porque os poços imagens e o poço real obedecem aos mesmos parâmetros, por definição, e portanto quando o efeito de bombeamento do poço imagem atingir o poço de observação, a inclinação da curva se reduz à metade, ou aumenta ao dobro, dependendo do tipo da barreira, devido aos cones serem idênticos e se cumpre o princípio de superposição. Se existem outras barreiras seu efeito diminuirá ou aumentará a inclinação em múltiplos da primeira curva.

As barreiras positivas mudam a inclinação da curva tendendo à horizontal. Quando o cone atingir a barreira positiva mais próximo, a inclinação da curva inicial reduzir-se-a a metade. Se existir outra barreira a inclinação da curva reduzir-se-a a terceira parte da inclinação da curva inicial e assim sucessivamente. Ou seja:

$$(\Delta s_2 = \frac{1}{2} \Delta s_1, \Delta s_3 = \frac{1}{3} \Delta s_1, \text{etc.})$$

As barreiras negativas mostram-se no gráfico como mudanças de inclinação tendendo à vertical, com reduções do dobro, triplo, etc. da inclinação da curva inicial. ($\Delta s_2 = 2\Delta s_1, \Delta s_3 = 3\Delta s_1$, etc.)

Para obter os tempos de início da influência de cada barreira escolhem-se os trechos retos de cada curva, ($u < 0,01$) de acordo com o método simplificado de Theis, prolonga-se cada trecho até interceptar o eixo dos tempos na horizontal $s=0$ e têm-se diretamente os tempos de início ($t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots, t_{0n}$).

Por definição, os parâmetros dos aquíferos real e imaginário, são iguais pelo que, aplicando a equação de Theis:

$$s_r = s_i = \frac{225 \cdot T \cdot t_{01}}{r_1^2} = \frac{225 \cdot T \cdot t_{02}}{r_2^2} = \frac{225 \cdot T \cdot t_{03}}{r_3^2} = \frac{225 \cdot T \cdot t_{0n}}{r_n^2}$$

ou seja:

$$\frac{t_{01}}{r_1^2} = \frac{t_{02}}{r_2^2} = \frac{t_{03}}{r_3^2} = \frac{t_{0n}}{r_n^2}$$

e:

$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{t_{02}}{t_{01}}} \quad r_3 = r_1 \sqrt{\frac{t_{03}}{t_{01}}} \quad r_n = r_1 \sqrt{\frac{t_{0n}}{t_{01}}}$$

r_1 = distância entre o poço de bombeamento e o de observação.

r_2, r_3 = distância dos poços imagens aos poços de observação.

Com os tempos de início obtidos da leitura do gráfico e as distâncias (poço de bombeamento-poços de observação, podem ser calculadas as distâncias (poços imagens-poços de observação), usando as fórmulas acima. Como as barreiras estão situadas a meia distância entre o poço de bombeamento e os poços imaginários, estas podem igualmente ser localizadas.

Resumindo, o processo de localização de barreiras é o seguinte:

- Executa-se um teste de bombeamento a vazão constante, observando os níveis de água em um ou mais poços de observação.
- Plotam-se os resultados dos testes em papel monolog (s-t).
- Prolongam-se os trechos retos das curvas resultantes até interceptar a horizontal $s=0$ no eixo dos tempos e os tempos correspondentes: ($t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots, t_{0n}$), como explicado anteriormente.
- Calculam-se as distâncias (r_2, r_3, \dots, r_n) dos poços de observação aos poços imaginários usando a fórmula correspondente.
- Num plano à escala adequada, representam-se as posições dos poços de bombeamento e observação.

- Com centro em cada poço de observação que serviu de base para o cálculo da distância, traçam-se círculos de raio igual à distância calculada. A intersecção dos círculos localiza as possíveis posições dos poços imagens, e no centro da reta que liga cada poço imagem ao poço de bombeamento, localizam-se as barreiras.

À localização dos poços imagens e barreiras baseado nos tempos de intersecção com o eixo $s=0$, pode produzir erros consideráveis quando os dados de campo são dispersos e as inclinações das retas, muito pequenas. Também é freqüente as intersecções acontecerem em tempos de valores pequenos provocando erros de leitura que introduzem erros grandes no cálculo das distâncias.

O sistema seguinte evita os problemas mencionados:

Consideram-se dois poços de observação situados às distâncias r_1 e r_2 do poço de bombeamento. Os rebaixamentos s_1 e s_2 devidos ao bombeamento obtém-se usando a fórmula simplificada (Theis-Jacob):

$$s_1 = \frac{Q}{4\pi T} (-0.5772 - \ln U_1) \quad \text{ou} \quad s_1 = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt_{11}}{r_1^2 S} - 0.5772 \right)$$

$$s_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt_{12}}{r_2^2 S} - 0.5772 \right)$$

Se nos gráficos monolog são escolhidos s_1 e s_2 com o mesmo valor, ou seja: $s_1 = s_2$, se tem:

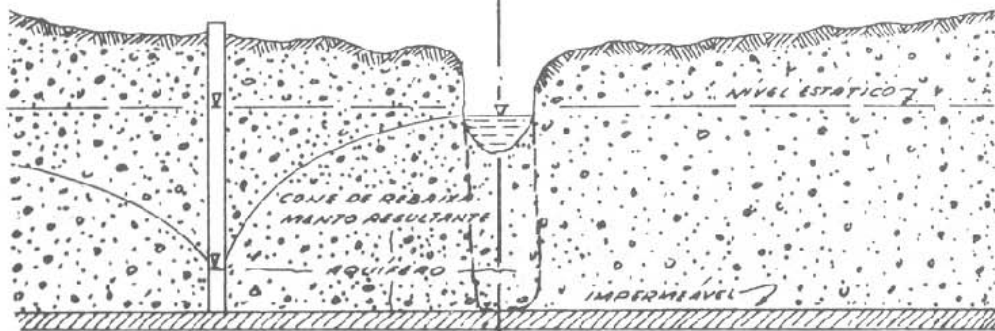
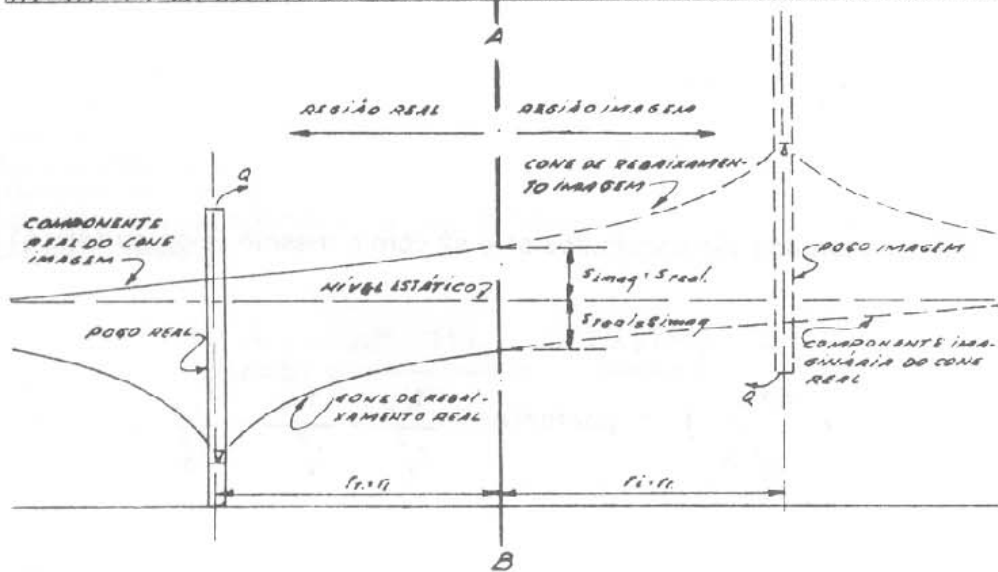
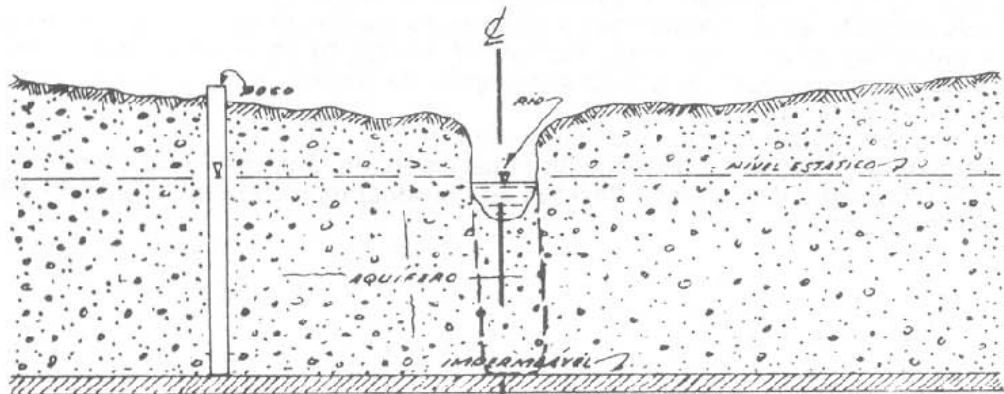
$$\ln \left(\frac{4Tt_{11}}{r_1^2 S} \right) = \ln \left(\frac{4Tt_{12}}{r_2^2 S} \right) \quad \text{e portanto:} \quad \frac{t_{1,1}}{r_1^2} = \frac{t_{1,2}}{r_2^2} = \frac{t_{1,3}}{r_3^2}, \dots, \frac{t_{1,n}}{r_n^2}$$

relação que é idêntica à derivada anteriormente, e indica que para um aquífero determinado, os tempos de rebaixamentos iguais variam diretamente com os quadrados das distâncias do poço de bombeamento aos poços de observação, e são independentes da vazão.

Os exemplos N.º 1 e N.º 2, de casos reais, demonstram a aplicação de Método das Imagens nos casos de barreiras positivas e negativas.

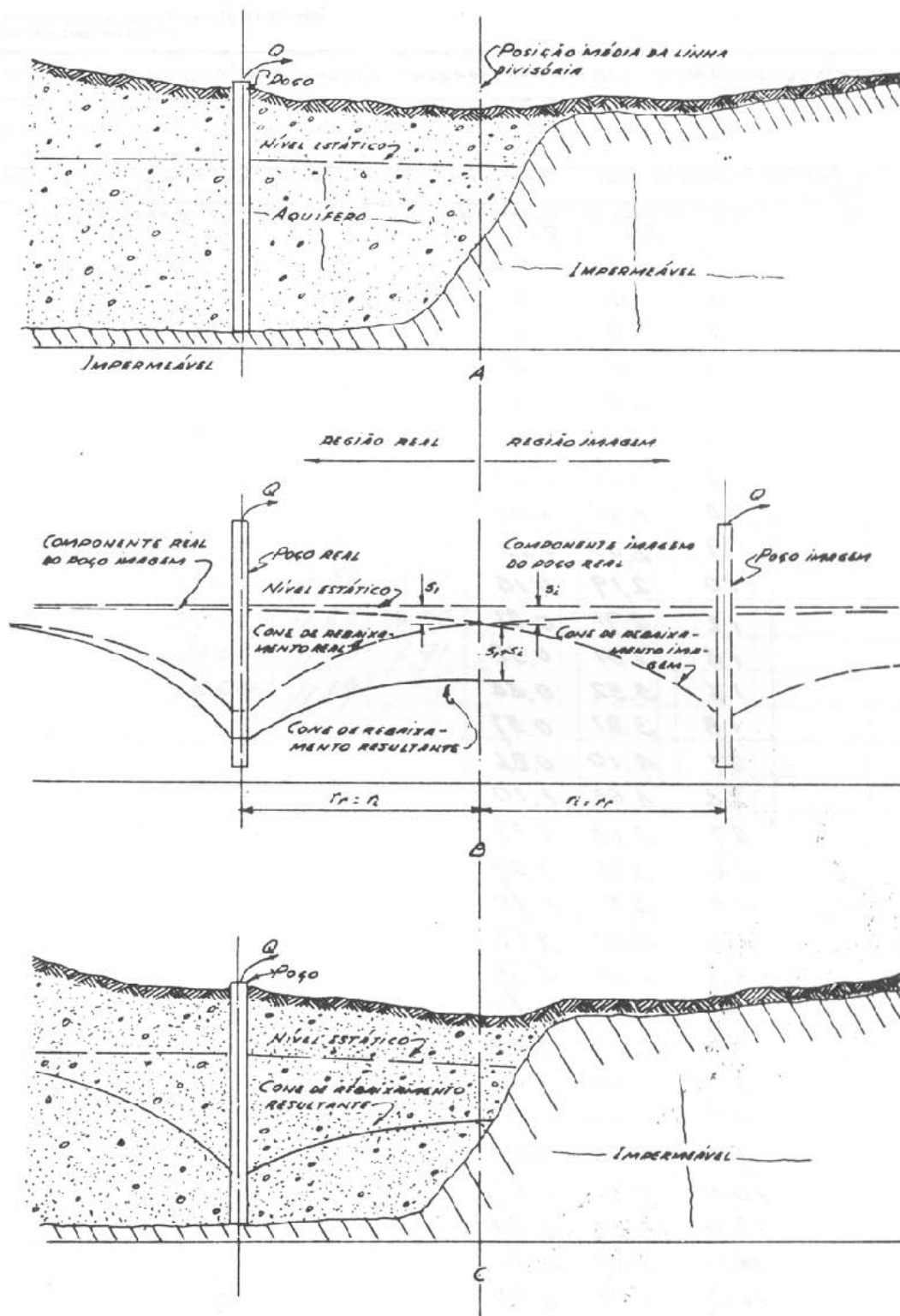
OBSERVAÇÕES

- Dependendo da quantidade dos poços de observação, as posições dos poços imagens podem ser determinadas com maior precisão. Como geralmente os poços de observação são poucos, usa-se o poço de bombeamento como de observação, especialmente nos casos de um único poço de observação, para ter-se um elemento a mais para a localização dos poços imagens.
- Os resultados obtidos com a aplicação do Método das Imagens geralmente são confirmados por inspeções de campo e eventualmente por interações no processo matemático.
- Quando os círculos não se cruzam, escolhe-se como a região dos poços imagens, aquelas onde os círculos mais se aproximam.
- Em certos casos podem-se confundir os efeitos da recarga dos aquíferos livres ou de aquíferos com os de uma barreira positiva. Na mesma forma podem confundir-se os efeitos de mudanças de transmissividade e de espessura no aquífero, com as de barreiras positivas ou negativas. Em ambos os casos, as evidências morfológicas ou geológicas podem resolver o problema, além da aplicação do fato já mencionado de que as inclinações das retas devem ter valores aproximadamente múltiplos do da primeira reta.



BARREIRA POSITIVA
FIG. 1

Ferreira
1980



BARREIRA NEGATIVA
Fig. 2

FERRER J.
1980

D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E
 E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E D&E

divisão de planejamento de recursos hídricos
 serviço de águas subterrâneas

medidas de teste de bombeamento *TEORIA DAS IMAGENS - EXEMPLO N.º 1 - (BARRERA POSITIVA)*

município _____ local _____ n. poço _____

proprietário _____ folha _____

medidas	rebaixamento % recuperação □	nível estático	data	hora	nível	data	hora	nível	data	hora	nível
data	hora	tempo (min.)	n. d'água (m) P.1	n. d'água (m) P.2	vazão (m³/h)			t/h'	observação		
		1	0	0							
		3	0	0							
		3	0	0							
		4	0	0							
		5	0.80	0							
		6	1.05	0							
		7	1.22	0.08							
		8	1.25	0.09							
		9	2.03	0.13							
		10	2.19	0.14							
		12	2.71	0.21							
		14	3.01	0.32							
		16	3.52	0.44							
		18	3.81	0.57							
		21	4.10	0.86							
		24	4.53	1.10							
		27	5.05	1.33							
		30	5.12	1.59							
		35	5.51	1.89							
		40	5.83	2.12							
		45	6.10	2.39							
		50	6.43	2.61							
		60	7.03	2.92							
		70	7.25	3.32							
		80	7.80	3.49							
		90	8.05	3.80							
		100	8.14	4.07							
		120	8.23	4.29							
		140	8.65	4.61							
		160	8.73	4.90							
		180	8.97	5.42							
		210	9.07	5.49							
		240	9.20	5.62							
		270	9.36	5.70							

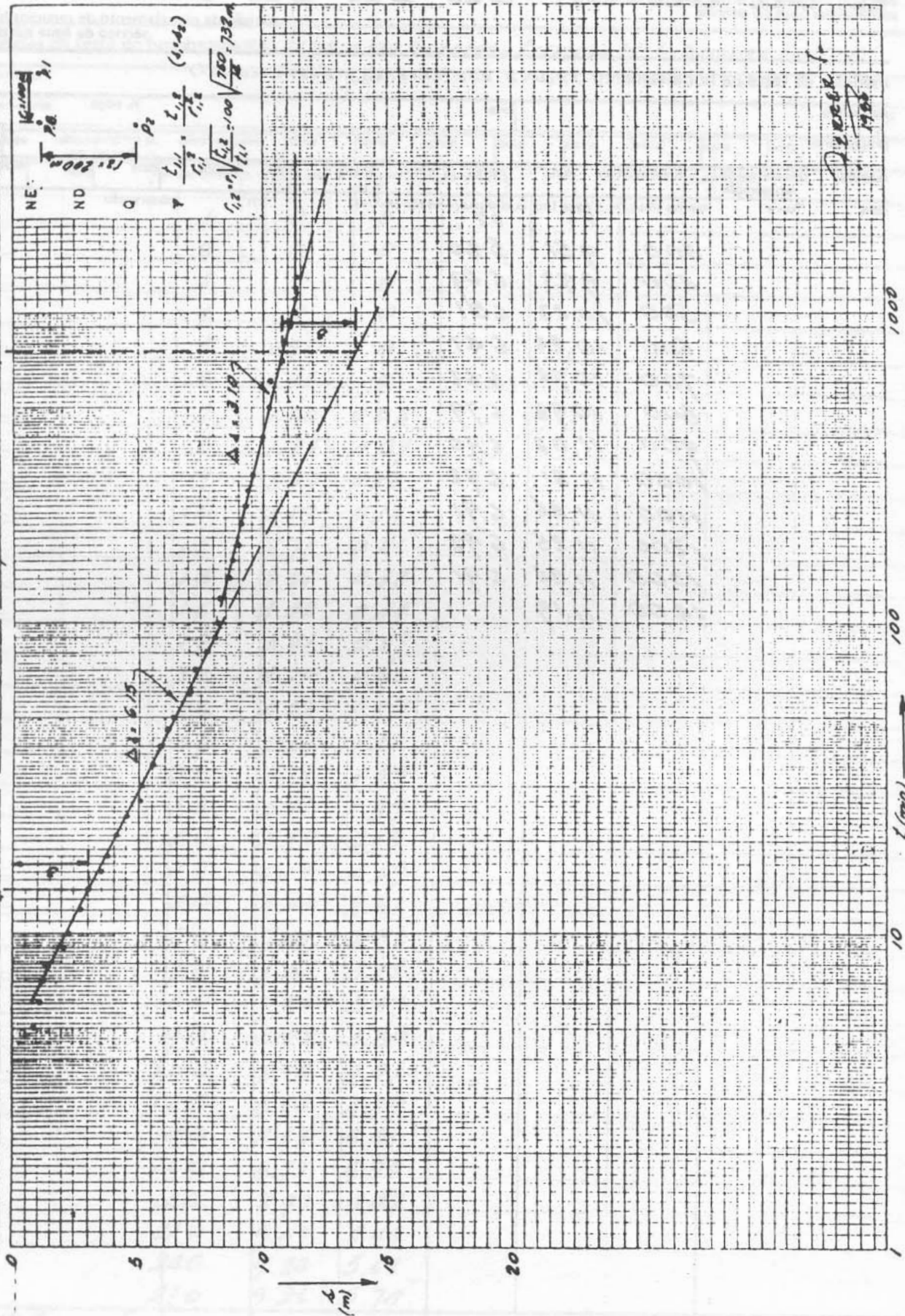
execução *FERRAZ*

data 1980

DAEE
 DEPARTAMENTO DE
 ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA
 DP - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
 Teoria dos Reservatórios - Exemplo N.º 1

TESTE Vazão c/m²
 Barricão positivo (recarga)

RESERVOÁRIO
 Folha 3

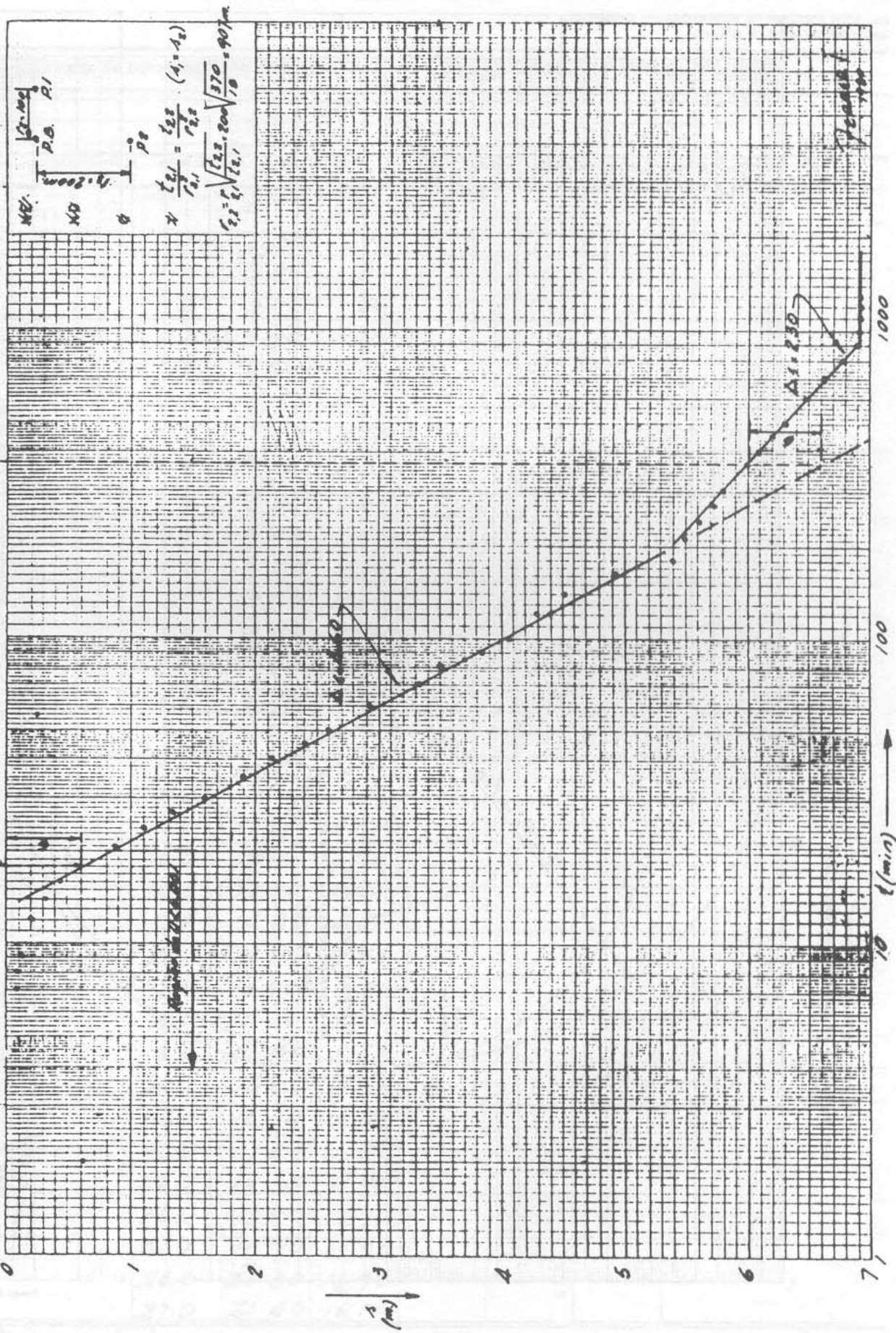


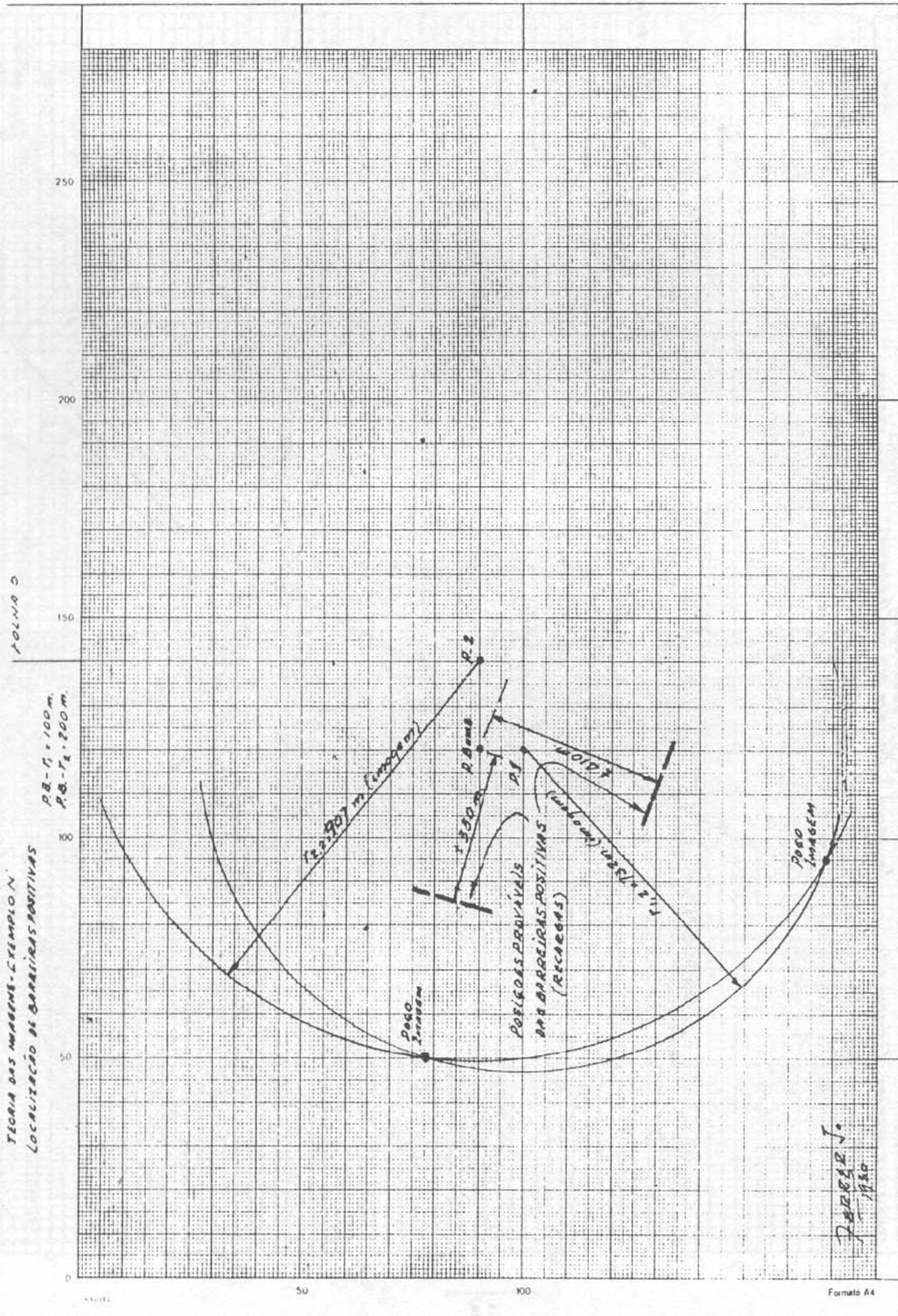
DAEE
 DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA
 DP - ÁGUAS SUBTERRÂNEAS
 Teste das injeções - Exemplo N.º 1
 (cm³/min)

POLO P.2 (plumação) 1270m.
 TESTE Vasão esgot.
 Barreira positiva (recarga)

INÍCIO
 TERMINO
 12.2.370 min.

FOLHA 4





DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE
 EE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE DAEE

divisão de planejamento e controle de recursos hídricos
 serviço de água subterrânea

medidas de teste de bombeamento *TEORIA DAS IMAGENS - EXEMPLO Nº 2*

município _____ local _____ número _____

proprietário _____ folha 2

medidas	rebaixamento x recuperação	nível estático	data	hora	nível	data	hora	nível	data	hora	nível
date	hora	tempo (m.n.)	n. d'água (m)	n. d'água (m)	vazão (m ³ /h)	1/1'	observação				
			P1	P2							
		300	22.00	17.01							
		400	23.80	18.73							
		500	25.15	21.50							
		600	26.50	23.22							
		700	28.00	24.90							
		800	29.20	26.05							
		900	30.30	27.04							
		1000	31.10	27.98							
		1100	32.00	28.92							
		1200	32.90	29.51							
		1300	33.50	30.40							
		1400	34.10	31.08							
		1500	35.00	31.60							
		1600	35.50	32.21							
		1700	36.00	32.89							
		1800	36.60	33.40							
		1900	37.10	33.93							
		2000	37.50	34.19							
		3000	41.30	38.07							
		4000	43.90	40.78							
		5000	46.00								
		6000	46.50								
		7000	48.50								
		8000	50.00								

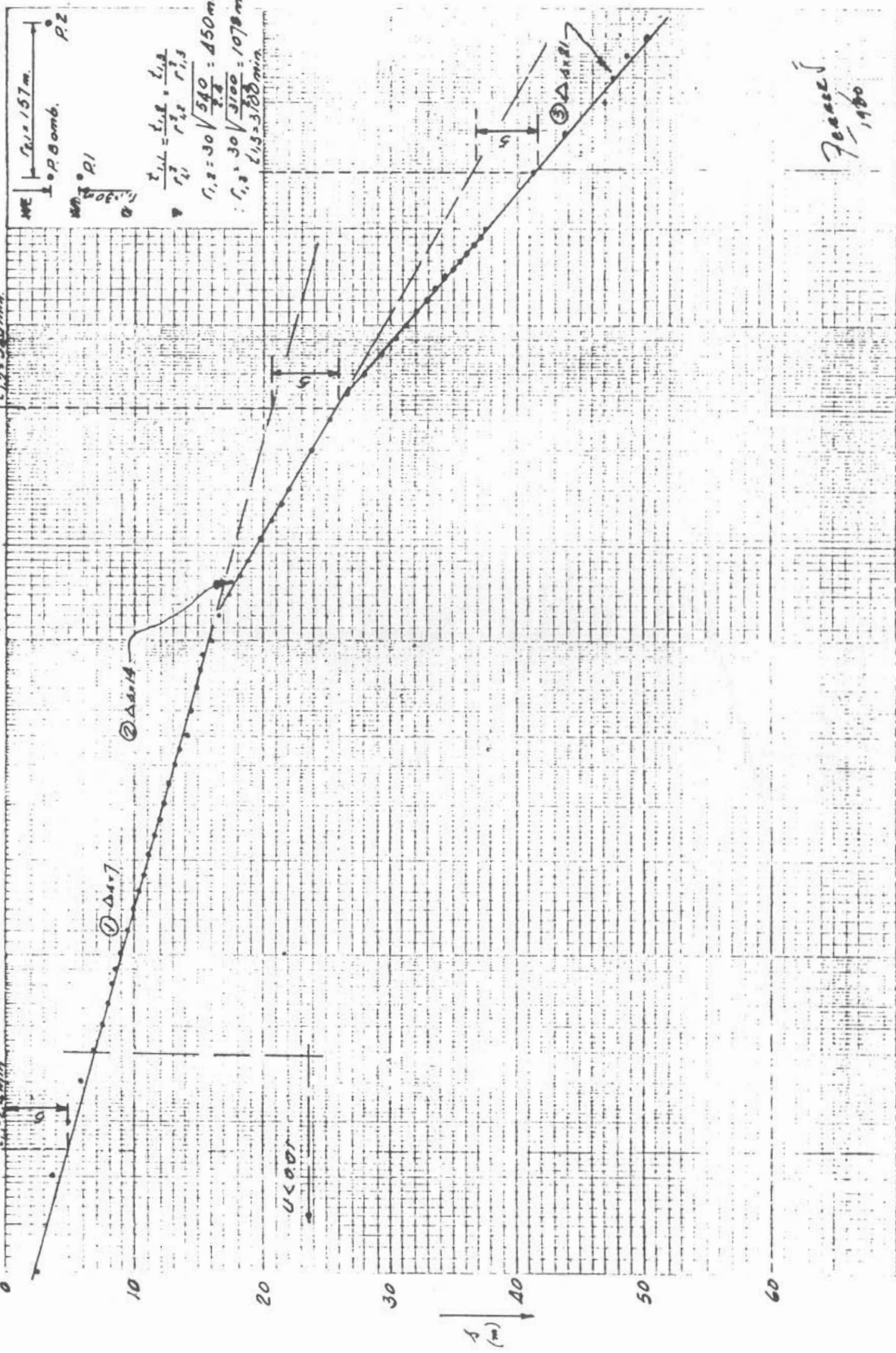
execução *Francis*

data *7/80*

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA
 DE - LOUA - HIDRÔLICAS
 Teoria das Injeções - Exemplo Nº 2

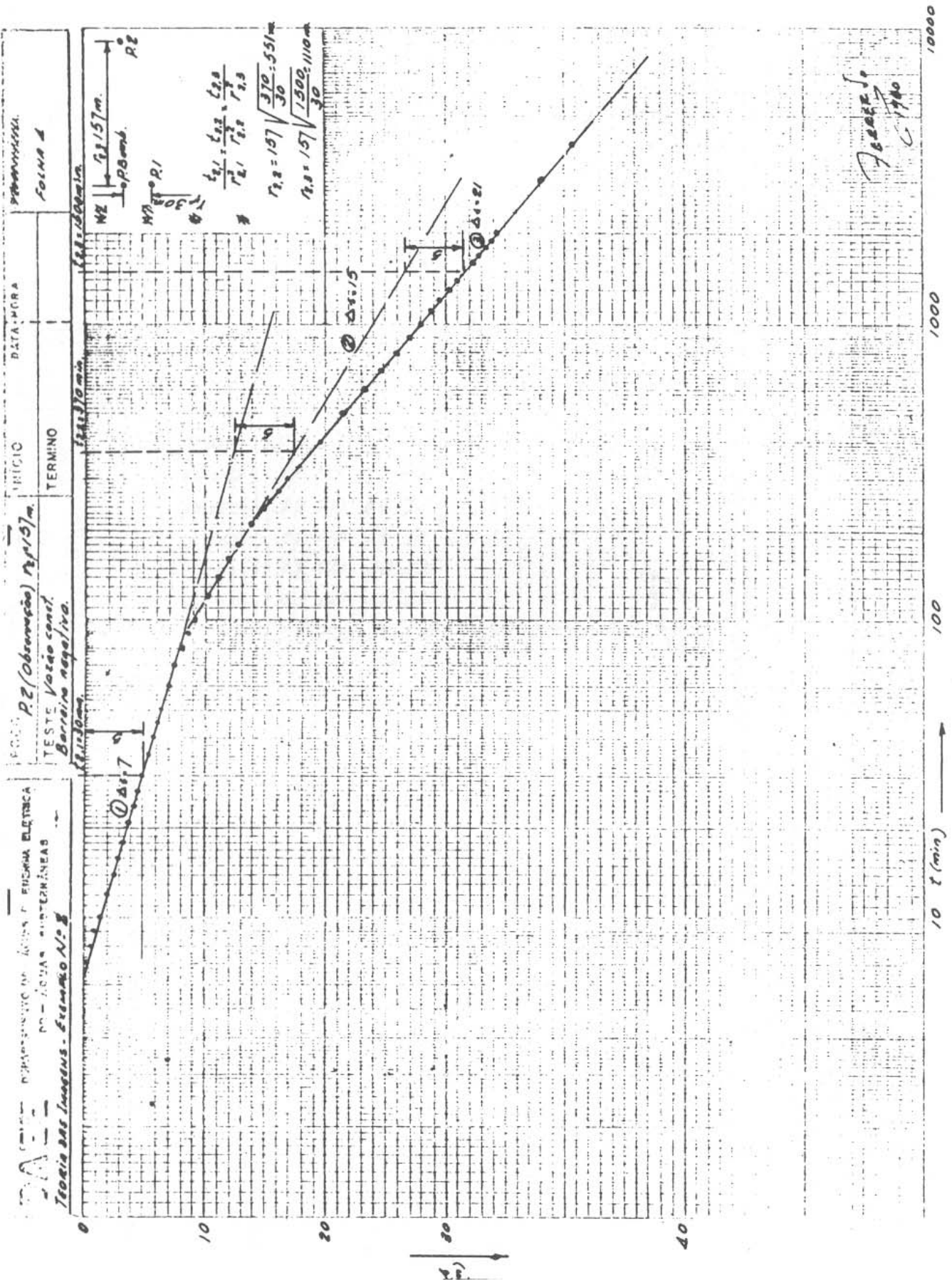
FIG. 1 (Observação) 4.30m
 TESTE Vazão const.
 Barrileiro negativo

LOCAL: P.1
 DATA-HORA: FOLHA 3



$r_{1,1} = \frac{t_{1,1}}{r_{1,1}^2} = \frac{t_{1,2}}{r_{1,2}^2}$
 $r_{1,2} = 30 \sqrt{\frac{540}{\frac{t_{1,1}}{r_{1,1}^2}}} = 450 \text{ m}$
 $r_{1,2} = 30 \sqrt{\frac{3100}{\frac{t_{1,2}}{r_{1,2}^2}}} = 1070 \text{ m}$
 $t_{1,2} = 3180 \text{ min}$

FERRER
 1960



TEORIA DAS IMAGENS - EXEMPLO N.º 2
LOCALIZAÇÃO DAS BARREIRAS NORTINAS
FOLHA 5
CONDICÕES NOMINAIS
DAS BARREIRAS
BA - 1 - 30 m
PB - 1 - 157 m

