UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA
LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA

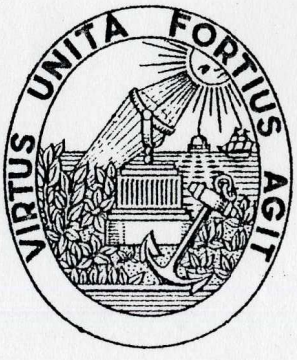
COMPLEMENTOS DE HIDRÁULICA APLICADA

CAUDAL SÓLIDO

por A. ÁLVARES RIBEIRO
(Professor Catedrático)

apontamentos de F. VELOSO GOMES
(Assistente F.E.U.P.)

Trabalho subsidiado pelo Instituto de Alta Cultura.
Projecto de Investigação Científica, P E/5.



PORTO, 1973

ÍNDICE

1 - SUSPENDED LOAD

2 - BED LOAD

3 - AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO CAUDAL SÓLIDO

4 - CAUDAL SÓLIDO MÉDIO ANUAL

4.1 SEDIMENT LOAD

4.2 BED LOAD

5 - ÁBACOS

6 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

6.1 BED LOAD

6.2 SUSPENDED LOAD

CAUDAL SÓLIDO

O estado actual do conhecimento sobre transporte sólido em rios, não permite a resolução dos respectivos problemas, com um grau de exactidão comparável ao conseguido em outros problemas hidráulicos.

Na literatura anglo-saxónica, são de assinalar duas designações, quando se considere o caudal sólido transportado por um rio : "suspended load" — caudal em suspensão, (caudal sólido que se movimenta acima do leito do rio) e "bed load" de arrastamento, (caudal sólido, movimentando-se sobre ou perto do leito). O"total load" engloba o "suspended" e o "bed load".

O estudo do caudal sólido foi e continua a ser objecto de intensas pesquisas, existindo uma enorme quantidade de bibliografia publicada, apresentando resultados laboratoriais e análises matemáticas, mas em geral relativa a casos de espécie.

O engenheiro, face a problemas concretos, deve ter sempre presente a complexidade do comportamento de um rio, em comparação com a simplicidade em que foram realizadas as experiências laboratoriais, nas quais se basearam muitos dos resultados apresentados em livros de especialidade.

1 - "Suspended load"

O "suspended load" é constituido por pequenas partículas em suspensão durante um período considerável.

A concentração deste sedimento num curso de água, pode ser avaliada por diversos processos (ver A. Ribeiro, Trabalhos Fluviais e Marítimos, vol. II, pág. 18) e é função do caudal. Essa função poderá ser estabelecida analiticamente, tendo sido apresentadas diversas teorias. Salientamos o estudo de Einstein, publicado em 1950. Devido à complexidade do fenómeno em causa (fenómenos de turbulência, eléctricos, temperatura, etc.) a aplicação desta teoria é muito laboriosa, com a agravante de conduzir a resultados que poderão ser afectados de graves erros, devido às hipóteses simplificativas que se consideram.

Poderíamos assim, ser levados a concluir que seriam muito mais vantajosas as relações obtidas a partir de dados experimentais. Contudo, as observações experimentais são caras e para que levem a resultados significativos, devem ser efectuadas durante um longo período.

A inexistência destas observações, ou a impossibilidade de as realizar, por falta de tempo ou fundos monetários, aconselhará a utilização de ábacos, como os que oportunamente serão apresentados.

Poder-se-á recorrer a ensaios em modelo. Esses

ensaios de fundo móvel, são complexos e exigem uma taragem prévia. Efectuam-se actualmente, por exemplo, ensaios deste tipo numa escala distorcida no LNEC.; são relativos ao futuro aproveitamento de Crestuma e suas implicações na zona de Zebreiros (abastecimento de água à cidade do Porto).

2 - "Bed load"

A partir de diversas fórmulas é possível prever o "bed-load", desde que se conheçam as características do escoamento e a composição granulométrica do material do leito do rio. A maioria dessas fórmulas baseiam-se em trabalhos laboratoriais. É no entanto muito difícil verificar o rigor da aplicação daquelas expressões, pela dificuldade em se conseguir obter instrumentos de confiança para a avaliação do "bed-load" (ver A. Ribeiro, Trabalhos Fluviais e Marítimos, pág. 12).

Apresenta-se na tabela I, relações entre o "total load" e o "bed load", como função do diâmetro dos grãos do leito e de altura do escoamento. Supõe-se que o curso de água tem uma largura indefinida e uma inclinação de 0,02%.

Altura de água (m)	DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS				
	0.84	0.42	0.21	0.11	0.07
2.13	1.1	1.2	2	20	300
3.35	1.2	1.4	3	200	2.000
4.27	1.3	1.6	4	400	4.000
4.88	1.4	1.7	6	800	6.000
5.49	1.5	2.0	12	2.000	12.000
6.71	1.7	3.0	40	5.000	22.000

TABELA I - Relação "total load" e "bed load"

Uma análise desta tabela, baseada na teoria de Einstein, permite verificar que :

— um decréscimo no diâmetro do material do leito de 1.0 mm, para 0,1 mm, conduz a um enorme incremento na relação "total load" / "bed load";

— Para $\emptyset$ = 1 mm, o "suspended load" é apenas uma função do "bed load".

— Para $\emptyset$ = 0.1 mm, o "bed load" é apenas uma função do "suspended load".

Será no entanto de salientar que a quantidade absoluta do "bed load" geralmente cresce com o decrescimento do diâmetro dos grãos, mas a quantidade absoluta do "suspended load" sofre um incremento muito maior.

3 - Avaliação experimental do caudal sólido

Na avaliação experimental do caudal sólido, há alguns aspectos importantes a ter em conta, como :

— selecção das secções do rio onde deverão ser efectuadas colheitas de amostras;

— frequência de amostragem;

— utilização do método e instrumentos mais convenientes.

A colheita de amostras de água, pode ser efectuada por dispositivos do tipo "depth-integrated sediment samples" ou do tipo "point-integrated sediment samples". Os primeiros são lançados com velocidade uniforme desde a superfície livre até ao fundo do rio, com retorno. "Apanham" uma amostra contínua de água durante o percurso. Os segundos são descidos até um determinado ponto, previamente escolhido, procedendo-se então à abertura do bocal, permitindo a entrada de uma amostra de água. O bocal é fechado passados alguns segundos e o instrumento novamente içado.

Já foi referido, que os amostradores do "bed-load" até agora concebidos, não conduzem a resultados de confiança, já que a sua configuração causa perturbações no escoamento. Além disso, o movimento do "bed load" é bastante irregular. Será no entanto de referir o "bed-load sampler" e o bed-material sampler". Este, tem possibilidade de "apanhar" uma amostra do leito do rio. Essa amostra é então içada e analisada em laboratório, sendo determinada a sua composição granulométrica.

O "bed-load sampler" é colocado no fundo do rio, onde permanece durante um certo intervalo de tempo, "apanhando" o "bed-load" que por ele tem tendência a passar. O seu conteúdo, depois de pesado, dá indicações base para o cálculo do "bed-load".

No que diz respeito ao problema da localização dos

pontos de amostragem, podemos tecer breves considerações. O facto mais importante na selecção dos pontos e da fixação da frequência de amostragem, é a natureza do problema de sedimentação a resolver. Assim, por exemplo, se se pretende prever a sedimentação numa albufeira especial, interessa sobretudo avaliar o volume médio anual sólido que atinge o local do futuro reservatório. Será, em princípio, suficiente obter amostras diárias no local, durante um certo número de anos. Se o material do leito do rio é relativamente fino, de tal modo que o "bed load" é uma fracção desprezável do "total load", bastarão amostras "depth-integrated". Se o "suspended load" é uma fracção desprezável do "total load", bastará fazer avaliações do "bed load".

Contudo, quando o problema consiste em prever as variações das características de um canal como resultado de obras de regularização e canalização, não bastará ter ideia do volume do caudal sólido transportado, mas também interessa conhecer a composição do sedimento e o modo de transporte em todas as secções do troço do rio em causa. São necessárias amostragens do tipo "point-integrated" efectuadas em diversas verticais de uma dada secção, em diversos locais do rio, em conjunção com amostragens do material do leito e possivelmente com avaliações do "bed-load".

4 - Caudal sólido médio anual

4.1 - "Sediment load"

Façamos uma breve referência à avaliação da média anual de "sediment load" transportado através de uma secção.

Uma maneira "precisa" de efectuar tal avaliação, se-

rá através de amostragens do tipo "point-integrated" que permitem o conhecimento de concentração do "suspended load" em diversos pontos de uma vertical, para um determinado caudal.

Procedendo, na mesma vertical, a medições pontuais da velocidade, obtém-se a respectiva distribuição (ver Fig. 1 a e 1 b).

Da combinação dos dois conjuntos de dados, consegue-se avaliar a quantidade de "suspended load", ainda na mesma vertical. (Ver Fig. 1 c).

Repetindo as amostras em diversas verticais de uma dada secção e para o mesmo caudal, poder-se-á avaliar a quantidade total de "suspended load" transportado através da mesma secção.

Uma maneira menos refinada de conseguir idênticos objectivos é realizar amostragens do tipo "depth-integrated" em várias verticais. A quantidade transportada em cada secção de largura unitária poderá ser então determinada, multiplicando a concentração de amostra pela velocidade média e pela profundidade.

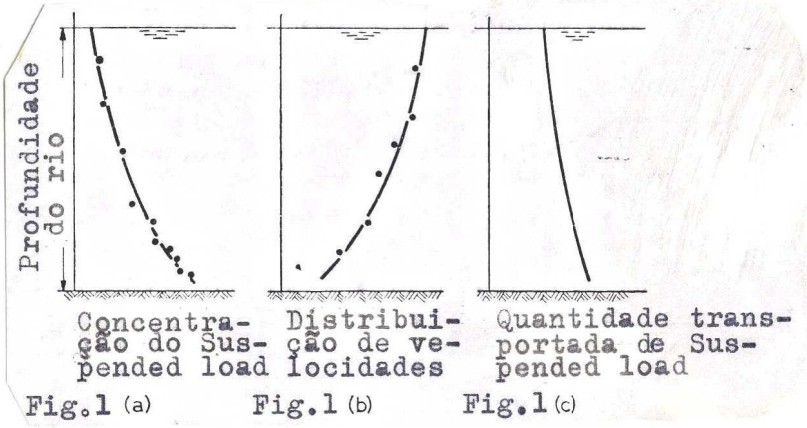


Fig. 1 (a) Fig. 1 (b) Fig. 1 (c)

Uma maneira ainda mais simples, mas menos rigorosa, de procedimento consiste em considerar uma amostragem do tipo "depth-integrated" na zona central do escoamento e multiplicar a concentração da amostra pelo causal que atravessa

a secção.

Este último procedimento é o mais vulgar na prática. Para se ter uma ideia da confiança a ter nos resultados, convirá aplicar várias vezes por ano o segundo método referido e algumas vezes o primeiro.

Poder-se-á então, se necessário, determinar um coeficiente de correcção a afectar os resultados obtidos pelo 3º método, de modo a chegar a valores mais próximos dos reais.

Repetindo o que se disse neste parágrafo, em relação a outros caudais, poder-se-á chegar, por amostragem, a uma curva do tipo 2.a.

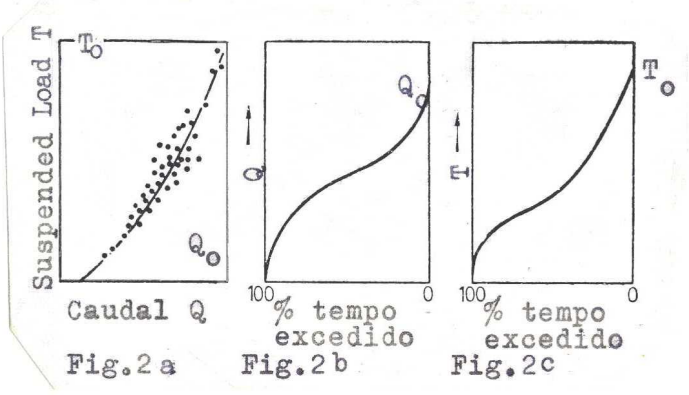


Fig.2a Fig.2b Fig.2c

Combinando esta curva, com a curva dos caudais classificados (Fig. 2 b) resultará uma curva que podemos apelar de curva dos caudais sólidos classificados. Será então simples obter o caudal sólido médio anual, como se ilustra com um exemplo, apresentado no final destas considerações.

4.2 - "Bed Load"

Quando o material do leito é relativamente grosseiro, será importante proceder à determinação do "bed load", quer por via experimental, quer aplicando fórmulas apropriadas, ou pelos dois processos.

Se o material do leito é relativamente fino, o "bed

load" será uma fracção do "total load" e pode ser simplesmente avaliado por extrapolação da curva da Fig. 1a em direcção ao leito.

5 - Ábacos

Já atrás foi referido o interesse de ábacos que relacionem as diferentes variáveis, para os valores mais comuns da inclinação do rio, caudal e dimensões dos elementos sedimentáveis D.

A Fig. 3 apresenta em escalas logarítmicas, o "bed load" em função do caudal Q e de inclinação do rio S.Tal como as que seguidamente se representam, esta carta baseia-se nos estudos de Einstein e apenas serve como uma orientação preliminar, permitindo, por exemplo, a taragem de modelos.

A Fig. 4 completa a Fig. 3 e mostra a relação entre o "total load" e o "bed load".

O valor D = 0.10 mm é o limite inferior para aplicações da teoria de Einstein. Verificou-se que os valores correntes de D variam entre 0,10 mm e 1.0 mm.

Os gráficos que se seguem, por questões de facilidade na sua elaboração, pressupõe que o material do leito do rio é uniforme e tem o diâmetro D, o que não corresponde à realidade.

Definindo coeficiente de uniformidade como sendo a raíz quadrada da razão entre D_{25} e D_{75} (D_n significa que n% dos grãos são de dimensões inferiores a D_n), mostra-se na Fig. 5, o efeito de uma distribuição não uniforme do material do leito.

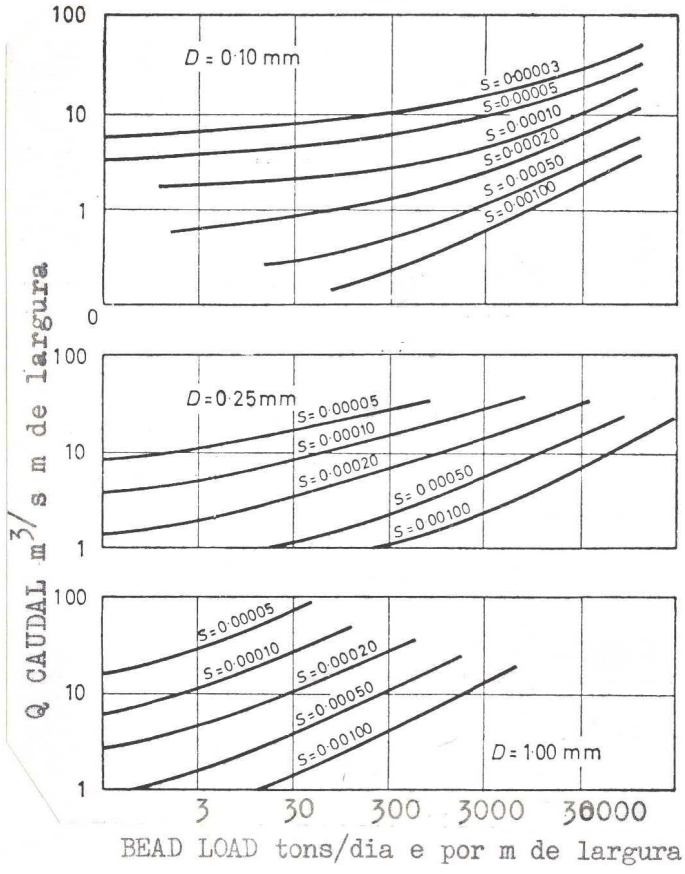


Fig 3

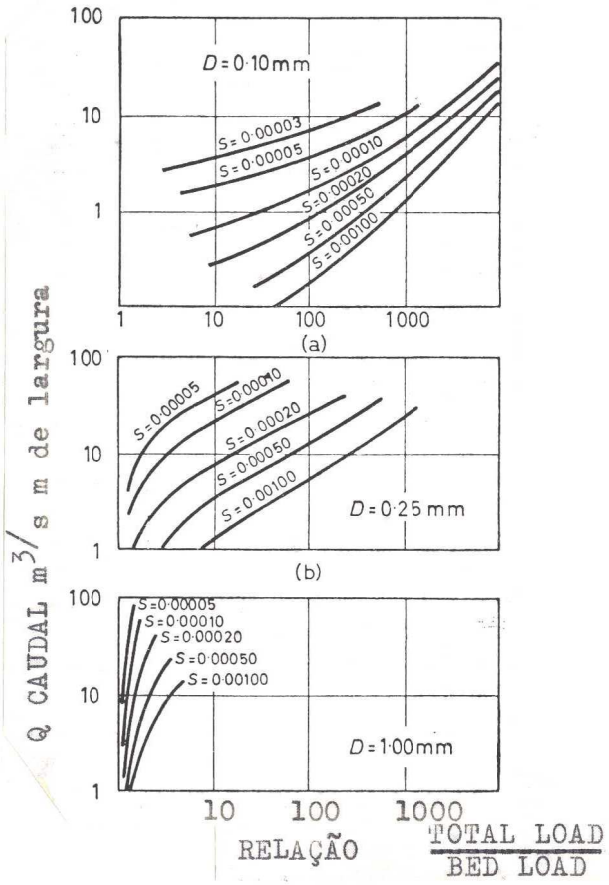


Fig 4

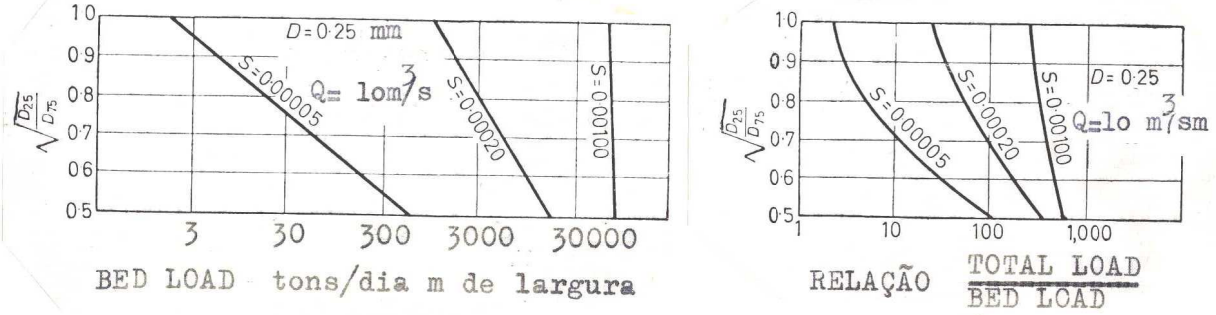


Fig 5

6 - Exemplo de aplicação

(Cálculo aproximado relativo ao aproveitamento de fins múltiplos de Crestuma no rio Douro a 14 Km do Porto)

6.1 - "Bed Load"

A partir dos perfis da cheia de 1962 e perfis relativos aos caudais de 500, 1500 e 5000 $m^3 s^{-1}$, obteve-se uma inclinação média S = 0,0003. (Fig. 9).

As aluviões são essencialmente constituidas por

areias grossas com diâmetros médios variando de 1.72 mm a 2.13 mm.

Na Fig. 4, podemos concluir que praticamente o "bed load" iguala o "total load", já que para D = 1.00 mm tal se verifica.

Segundo a tabela I, para uma altura de água de 5 m e D = 0.84 mm, temos um cociente "total load" / "bed load" = = 1.4.

Nessas condições seria então "bed load" igual a 2.5× × "suspended load", o que significa que quase todo o caudal sólido é transportado junto ao leito do rio. Para maiores diâmetros, como é o caso em estudo, da análise dessa tabela será de prever ainda maior percentagem de "bed load".

Pelo ábaco da Fig. 3 poder-se-á ter uma ideia da quantidade de "bed load", expresso em toneladas por dia e por metro de largura do rio.

$Q = 2000\ m^3\ s^{-1}$ temos um caudal de $7\ m^3\ s^{-1}\ m^{-1}$ (caudal por metro de largura) a que corresponde pelo ábaco 27 ton/dia m de "bed load".

6.2 - "Suspended Load"

Podemos organizar o seguinte quadro :

CAUDAL $m^3 s^{-1}$	% TEMPO EXCEDIDO FIG. 6	% TEMPO INTERVALO (1)	SUSPENDED LOAD TON/DIA (2)	MÉDIA DO SUSPENDED LOAD TON/DIA (3)	CONTRIBUIÇÃO PARA O TOTAL TON / DIA (4)
50	100		430		
		50		1890	950
388	50		3350		
		30		5570	1670
900	20		7780		
		10		20640	2060
1550	10		33500		
		5		58050	2920
2450	5		82600		
		3		138300	4150
3650	2		194000		
		1		282500	2830
4850	1		371000		
		0.6		578500	3470
7000	0.4		786000		
		0.3		907000	2700
8500	0.1		1028000		
		0.1		1487000	1490
11000	0.0		1950000		
					24960

(2) Ver Figs. 7 e 8,

O caudal sólido indicado na Fig. 8 está em ton s^{-1} pelo que se multiplicou por 86 400s.

(4) = (1) × (3)

Admitindo-se ser 1.44 ton m^{-3} o peso específico aparente, temos que o "suspended load" por ano será :

$$\frac{24\ 961}{1,44} = 365 = 6,3 \times 10^6\ m^3$$

O cálculo efectuado refere-se ao caso de as comportas estarem totalmente fechadas. Ora, para caudais superiores a 6000 $m^3\ s^{-1}$ as comportas estarão totalmente abertas; não havendo praticamente obstrução, o caudal passará através da barragem móvel. Mesmo para caudais de 4000 $m^3\ s^{-1}$ as comportas estarão já muito abertas.

Assim, considerando no quadro anterior apenas os caudais até 4850 $m^3\ s^{-1}$, temos na última coluna :

$$24\ 960 - 7660 = 17\ 300 \text{ ton/dia}$$

a que corresponde um "suspended load" de

$$\frac{17\ 300}{1,44} \times 365 = 4,4 \times 10^6\ m^3 \text{ / ano}$$

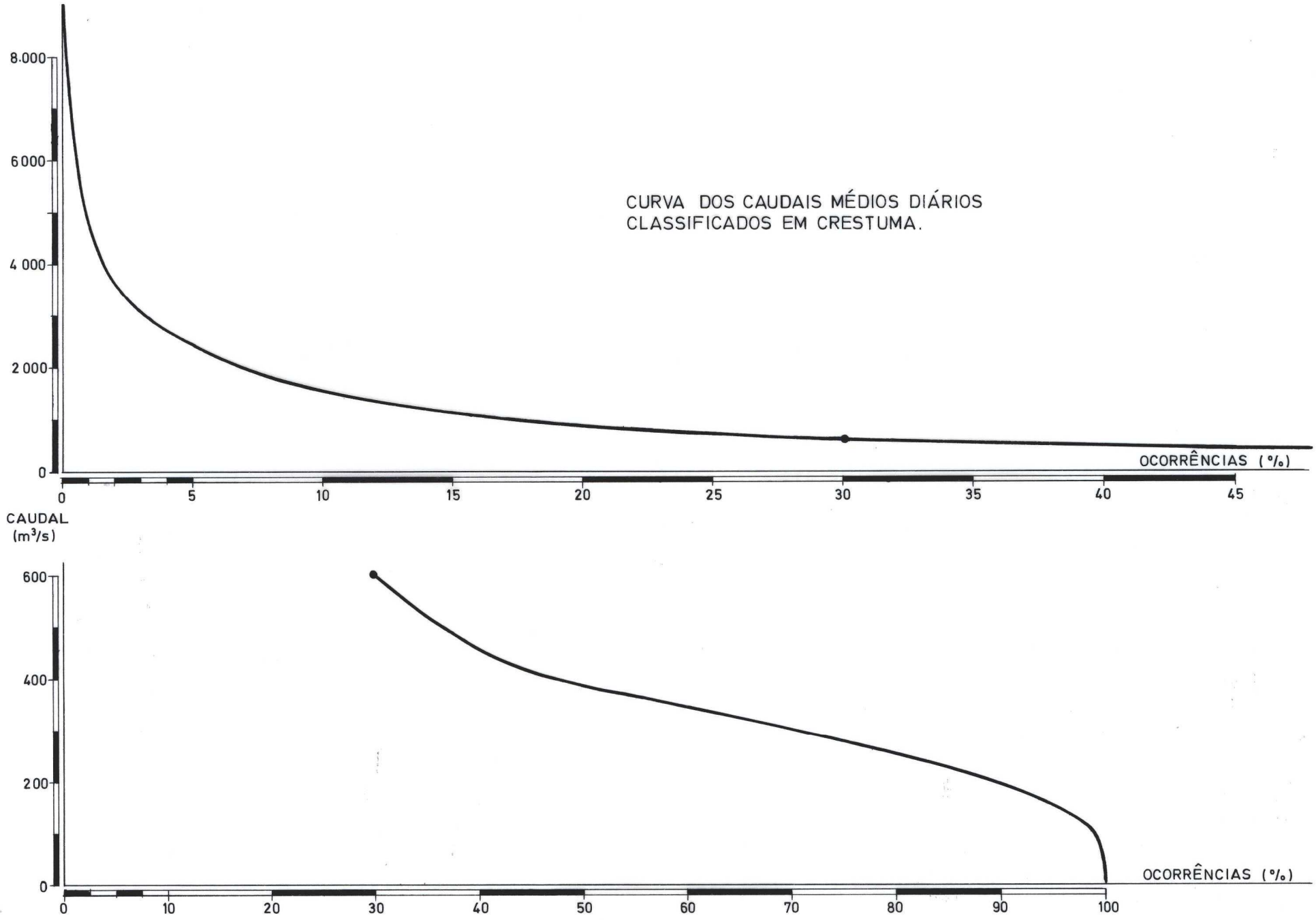

CURVA DOS CAUDAIS MÉDIOS DIÁRIOS
CLASSIFICADOS EM CRESTUMA.
8.000
6 000
4 000
2 000
0
CAUDAL
(m³/s)
OCORRÊNCIAS (%)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
600
400
200
0
OCORRÊNCIAS (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

FIG. 6

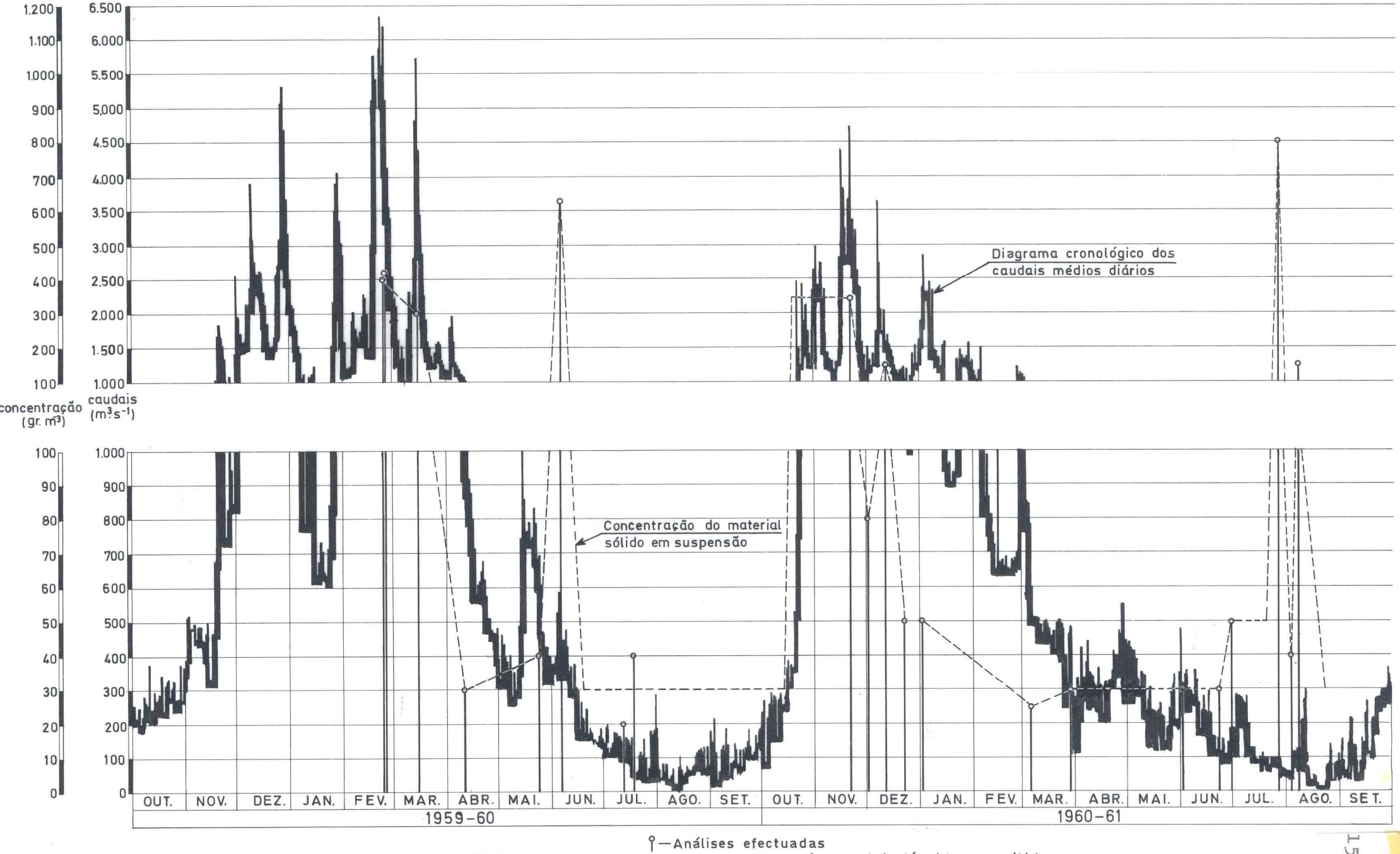


FIG. 7 — RIO DOURO. CARRAPATELO. Relação caudais líquidos e sólidos.

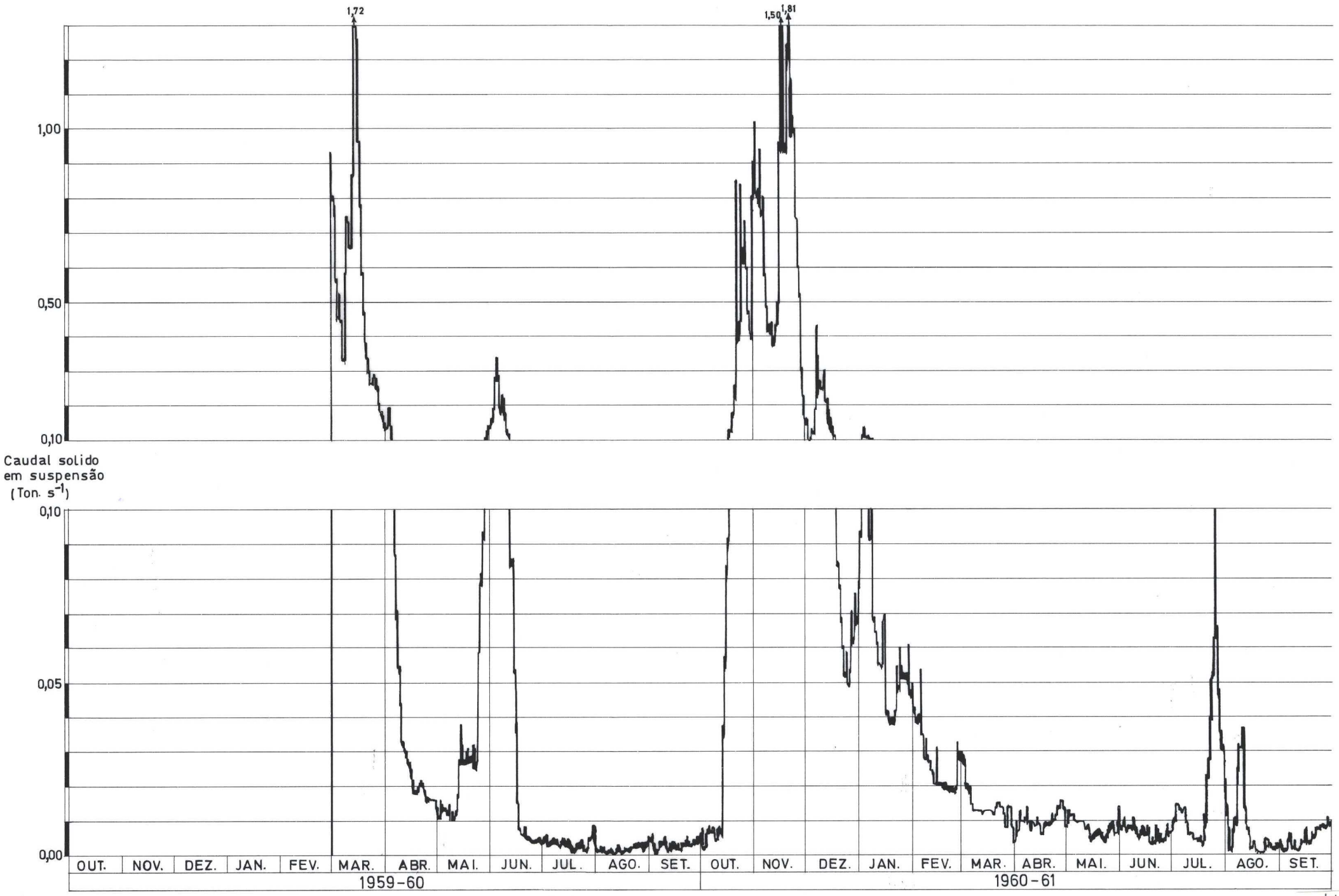


FIG. 8 — RIO DOURO. CARRAPATELO.
Caudal sólido em suspensão.

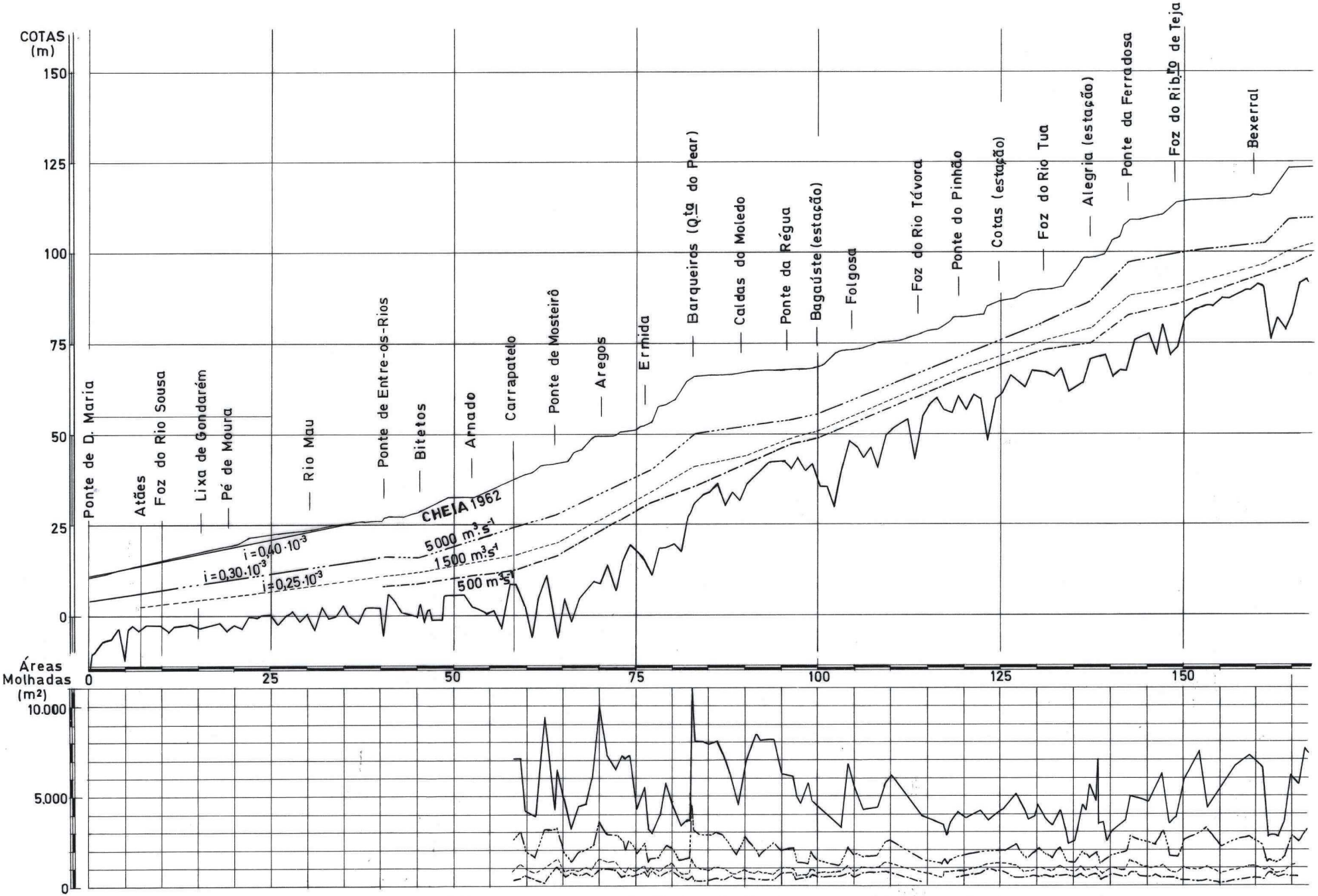


FIG. 9 — RIO DOURO. Perfil longitudinal e superfície livre da água.