

SILVIO NAKAHIRA

Físico, F.F.C.L. da Universidade Mackenzie, 1969
Mestre em Engenharia, Escola Politécnica da USP, 1979

**UTILIZAÇÃO DO ^{199}Au , COM MARCAÇÃO SUPERFICIAL, NO ESTUDO DO
TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO EM
CANAL NATURAL DE GRANDE PORTE**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidad
de de São Paulo, para obt
tenção do Título de Dout
or em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto dos
Santos Nogueira
Professor Titular do Departam
ento de Engenharia Hidráuli
ca da EPUSP.

SÃO PAULO - 1987

À minha esposa e
aos meus filhos

R E S U M O

A determinação do transporte sólido de sedimentos em rios é importante na elaboração de projetos de obras hidráulicas. É útil também na conservação e estabilização dos leitos, na previsão do assoreamento de barragens e tomadas de água, entre outros.

O presente estudo, tem por objetivo apresentar um método para medição do transporte sólido por arrastamento de fundo utilizando a técnica de traçadores radioativos em canais de grande porte. O estudo descreve os aspectos básicos da aplicação de radioisótopos neste campo, dando ênfase ao uso de sedimentos marcados superficialmente com ^{199}Au . Este, aborda ainda, alguns aspectos teóricos, análise crítica, recomendações e comentários sobre a metodologia estudada.

A B S T R A C T

The determination of sediment transport rates in rivers is a problem of major importance in hydraulic engineering. Various sediment problems are often encountered in the design of hydraulic structures, the improvement or stabilization of rivers, the planning and design of reservoirs, purification of public water supplies, and others.

[The present study aims to present a method of measuring the bed load transport using a radioisotope technique in large natural channels. This study describes the basic principles of radioisotope application in this field, emphasizing the use of ^{199}Au for surface labelling of a natural sediment. Moreover, it presents the theoretical aspects, critical analysis, recommendations and comments on the methodology proposed.]

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

Ao Prof. Dr. Antonio Augusto dos Santos Nogueira pela orientação deste trabalho.

Ao Eng^o José Leomax dos Santos, da Gerência de Hidrologia da CETESB, pelo apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Eng^o Azor Camargo Penteado Filho, da Divisão de Aplicação de Radioisótopos da CETESB, pelo apoio e incentivos.

À Itaipu-Binacional pela permissão da utilização e divulgação dos dados de transporte sólido por arraste de fundo do Rio Paraná em Guaira.

À Marta Cinira de Freitas e Ana Claudia M. Martins pelo excelente trabalho de datilografia.

Aos colegas, Junzo Inoue e Miguel Monteiro pela elaboração dos desenhos.

Í N D I C E

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Considerações Gerais	01
1.2. Utilização de Sedimentos Marcados	02
1.3. Contribuição da Técnica de Traçadores Radioati <u>v</u> os em Sedimentologia Dinâmica	02
2. ASPECTOS BÁSICOS NA UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO DE TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO	04
2.1. Escolha do Traçador Radioativo	04
2.2. Marcação dos Sedimentos	05
2.3. Transporte e Imersão do Sedimento Marcado	09
2.4. Massa e Atividade dos Sedimentos a Injetar	09
2.5. Método de Detecção	12
2.5.1. Medição ponto a ponto	13
2.5.2. Medição contínua	14
2.6. Interpretação dos Resultados	14
2.6.1. Método de integração no espaço	14
2.6.2. Método de integração no tempo	15
3. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ...	16
3.1. Introdução	16
3.2. Transporte Sólido por Arraste de Fundo	18

3.2.1. Início de transporte sólido	18
3.2.2. Configurações do fundo nos escoamentos com fundo móvel	22
3.2.2.1. Critérios para caracterizar a existência das diversas configurações de fundo	23
3.2.3. Transporte por arrastamento	26
3.2.3.1. Equações do tipo Du Boys	26
3.2.3.2. Equações do tipo Schoklitsch	27
3.2.3.3. Equações de Einstein	30
3.2.3.3.1. Relação empírica (1942)	35
3.2.3.3.2. Formulação analítica (1950)	39
4. TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO UTILIZANDO DO TÉCNICA RADIOISOTÓPICA	45
4.1. Generalidades	45
4.2. Descrição Geral da Área de Interesse	46
4.3. Marcação dos Sedimentos	49
4.3.1. Ensaio de avaliação do grau de fixação do ^{198}Au	50
4.4. Imersão dos Sedimentos Marcados	50
4.5. Detecção dos Sedimentos Marcados	53
4.5.1. Ensaio preliminares	53
4.6. Análise e Processamento dos Dados Coletados	54
4.7. Calibração dos Equipamentos de Medição	58

4.8. Exemplo de Cálculo da Vazão Sólida por Arraste de Fundo	59
4.9. Resultados Obtidos	63
4.9.1. Dados complementares	66
5. CÁLCULO DO TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO UTILIZANDO AS FÓRMULAS TEÓRICAS	135
5.1. Fórmula de Meyer-Peter e Müller (1948)	135
5.2. Fórmula de Schoklitsch (1935)	137
5.3. Fórmula de Kalinske (1947)	138
5.4. Fórmula de Du Boys (1879)	140
5.5. Equação de Shields (1936)	141
5.6. Fórmula de Einstein - Relação Empírica (1942)	142
5.7. Equação de Einstein - Relação Analítica (1950)	143
5.8. Fórmula de Chang, Simons e Richardson (1967)	148
5.9. Fórmula de Frijling (1952)	150
5.10. Fórmula de Yalin (1963)	151
5.11. Fórmula de Bagnold (1966)	152
5.12. Descarga Sólida pelo Método de Colby-Hembre (1955)	154
5.13. Resumo dos Resultados Obtidos com a Aplicação de Fórmulas Teóricas com os Valores Experimentais	159
5.14. Análise dos Resultados Obtidos com a Aplicação das Fórmulas de Transporte Sólido	160
5.15. Verificação quanto a Configuração do Fundo	164
5.15.1. Critério de Blasius (1910)	164

5.15.2. Critério de Simons et alli (1961)	165
5.15.3. Critério de Simons et alli (1963)	166
5.15.4. Critério de Kondrat'ev (1962)	166
5.15.5. Critério de Znamenskaya (1969)	167
5.15.6. Critério de Engelund et alli (1966)	167
5.15.7. Comentários	168
6. ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA	172
6.1. Introdução	172
6.2. Sedimentos Marcados com ^{198}Au	172
6.3. Transporte e Imersão dos Sedimentos Marcados	173
6.4. Detecção dos Sedimentos Marcados	174
6.5. Calibração do Equipamento de Medição	176
6.6. Interpretação dos Resultados	176
6.7. Escolha do Traçador	179
7. COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES	188
8. CONCLUSÕES	195
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	198

LISTA DE SÍMBOLOS

- A = Atividade lida (cpm)
- A_o = Atividade corrigida (cpm)
- A_e = Constante - Fórmula de Einstein
- A_s = Atividade integrada (cpm.m)
- A_{si} = Atividade integrada na seção transversal, distante x_i da seção de inersão
- A_r = Atividade real detectada (cpm)
- A_{t0} = Atividade total para espessura zero (cpm)
- A_L = Constante de deslocamento unitário - Fórmula de Einstein
- B = Constante de escala
- B_e = Constante - Fórmula de Einstein
- C_L = Coeficiente de sustentação da partícula
- C_w = Coeficiente que depende da densidade, forma, arrumação das partículas e das propriedades do fluido
- D = Profundidade média na seção de medição
- d = Diâmetro da partícula
- d_m = Diâmetro médio dos grãos depositados
- E = Espessura da camada em movimento (cm)
- e_m = Espessura média da camada móvel
- $f_{,o}$ = Fator de geometria da unidade de detecção (cps/ μ Ci/m²)
- g = Aceleração da gravidade (m/s²)
- g_s = Vazão sólida, em peso por unidade de largura
- g'_s = Vazão sólida, sob peso de água, por unidade de tempo e largura
- H = Cota limnimétrica (m)

- i_s = Fração da camada móvel correspondente a um dado tamanho de grão
 i_b = Fração do material de fundo de um dado tamanho de grão
 I_γ = Constante de ionização do emissor escolhido (mF/h.Ci.m)
 K = Coeficiente de rugosidade global de Strickler
 K' = Coeficiente de rugosidade correspondente às partículas de fundo
 K_1 = Constante de área do grão
 K_2 = Constante de volume das partículas
 K_3 = Constante de escala de tempo
 L = Largura do Canal (m)
 l = Largura efetiva de detecção (m)
 $L(h/2)$ = Largura à meia altura da curva de frequência granulométrica (mm)
 M = massa de sedimentos radioativos imersa
 N_F = Número de Froude
 ρ = probabilidade de remoção
 P_d = Massa de sedimento marcado a ser depositada, para detecção dinâmica, para 1 Ci de traçador (kg/Ci)
 P_s = Massa de sedimento marcado a ser depositada, para detecção estática, para 1 Ci de traçador (kg/Ci)
 Q_l = Vazão líquida (m^3/s)
 $q = Q_{lm}$ = Vazão líquida por unidade de largura ($m^3/s.m$)
 Q_{sfm} = Vazão sólida de fundo em ton/d.m
 Q_{sf} = Vazão sólida de fundo em ton/d
 q_{cr} = Vazão líquida por unidade de largura, na qual os sedimentos começam a se mover ($m^3/s.m$)
 q_s = Vazão sólida por unidade de largura ($m^3/s.m$)

- R_e = Número de Reynolds
 R_{e*} = Número de Reynolds em função da velocidade de atrito
 R_h = Raio hidráulico da seção
 R_h' = Raio hidráulico da seção em relação aos grãos
 r = Coeficiente de correlação
 S = Declividade da linha de energia (m/m)
 S' = Perda de carga unitária devido a rugosidade do grão (m/m)
 S_o = Superfície de contagem do detector em detecção estática (m²)
 S_v = Unidade de dose equivalente
 t = tempo
 $T^{1/2}$ = Meia-vida do radioisótopo
 u = Velocidade média da água na seção (m/s)
 u_* = Velocidade de atrito (m/s)
 u_b = Velocidade efetiva da camada móvel
 v = Velocidade de detecção (m/s)
 V_m = Velocidade média de transporte (m/d)
 V_{ss} = Velocidade de sedimentação
 X = Coeficiente que depende das características do material de fundo
 x_g = abscissa do centro de gravidade
 x_1 = Distância entre o ponto de injeção e a seção transversal considerada
 Y = Fator de correção de pressão
 Z = Distância do detetor acima do fundo
 W = Velocidade de sedimentação do material
 γ = Peso específico da água (kgf/m³)

- γ' = Peso específico do material submerso (kgf/m^3)
 γ_s = Peso específico do sedimento (kgf/m^3)
 δ = Espessura do filme viscoso
 Δ = Altura ligada à rugosidade aparente do grão
 n = Função estocástica
 λ = Constante de decaimento do radioisótopo
 μ_0 = Coeficiente de absorção linear da radiação em água (cm^{-1})
 ν = Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)
 ξ = Fator de ocultação dos grãos - Método de Einstein
 ρ = Massa específica do fluido (kg/m^3)
 ρ_s = Massa específica do sedimento (kg/m^3)
 σ_r = Desvio padrão devido a variação estatística do número de grãos (cps)
 τ = Tensão de cisalhamento (kgf/m^2)
 τ_c = Tensão crítica de cisalhamento (kgf/m^2)
 ϕ^{*2} = Intensidade de transporte por arraste
 ϕ_* = Intensidade de transporte por arraste para um dado tamanho de grão
 ψ = Intensidade de cisalhamento
 ψ_* = Intensidade de cisalhamento para um dado tamanho de grão

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Radioisótopos Utilizados Frequentemente na Marcação dos Sedimentos	06
Tabela 4.1. Ensaio de Fixação do ^{199}Au pela Areia	51
Tabela 4.2. Transporte Sólido de Fundo - Rio Paraná - Canal Esquerdo - MD	63
Tabela 4.3. Transporte Sólido de Fundo - Rio Paraná - Canal Esquerdo - ME	64
Tabela 5.1.1. Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Fórmula de Meyer-Peter e Müller (1948).	136
Tabela 5.2.1. Cálculo de Vazão sólida por Arraste de Fundo - Schoklitsch (1935)	137
Tabela 5.3.1. Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Kalinske (1947)	138
Tabela 5.4.1. Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Du Boys (1879)	140
Tabela 5.5.1. Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Shields (1936)	141
Tabela 5.6.1. Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Fórmula Empírica de Einstein (1942) ...	143
Tabela 5.7.1. Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Relação Analítica - Einstein (1950) ...	145

Tabela 5.8.1.	Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de de Fundo - Chang et alli (1967)	149
Tabela 5.9.1.	Cálculo de Vazão Solida por Arraste de Fundo - Frijling (1952)	150
Tabela 5.10.1.	Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Yalin (1963)	151
Tabela 5.11.1.	Cálculo de Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Bagnold (1966)	152
Tabela 5.12.1.	Cálculo do Transporte Sólido por Arraste de Fundo - Método de Colby-Hembre (1955) .	155
Tabela 5.13.1.	Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Fó _r mulas Teóricas	159
Tabela 5.13.2.	Vazão Sólida por Arraste de Fundo - Resu _l tados Experimentais	160
Tabela 6.7.1.	Radioisótopos que podem ser Utilizados nos Estudos de Transporte Sólido por Ar _r raste de Fundo	181
Tabela 6.7.2.	Procedimento para Marcação de Sedimentos com ⁵¹ Cr	184
Tabela 6.7.3.	Procedimento para Marcação de Sedimentos com ¹⁹² Ir	185
Tabela 6.7.4.	Procedimento para Marcação de Sedimentos com ⁸⁵ Sc	185

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Comparação dos Critérios de Início de Transporte Sólido	20
Figura 3.2. Critérios de Liu, 1957; Albertson Simons' e Richardson, 1958; e Chauvin, 1962	24
Figura 3.3. Critérios de Garde e Albertson	25
Figura 3.4. Critérios de Garde e Raju	25
Figura 3.5. Equações de Meyer - Petter et alli	30
Figura 3.6. Equações de Einstein para Transporte Sólido de Fundo Formulação Empírica	38
Figura 3.7. Fator de Correção na Distribuição Logarítmica de Velocidade	42
Figura 3.8. Fator de Encobrimento	42
Figura 3.9. Correção da Força de Sustentação	42
Figura 4.1. Seção Guaira - Paraná	47
Figura 4.2. Grau de Rendimento da Fixação do ^{198}Au , nos Grãos de Areia	51
Figura 4.3. Injetor de Areia Marcada	52
Figura 4.4. Suporte do Detetor	52
Figura 4.5. Altura Leito-Sonda	55

Figura 4.6. Área Sensível do Detector	55
Figura 4.7. Atividade Integrada Longitudinalmente	57
Figura 4.8. Perfil Longitudinal de Atividade	61
Figura 4.9. Velocidade Média de Arraste	61
Figura 4.10. Curva de Calibração do Detector	62
Figura 4.11. Curva de Calibração Normalizada	62
Figura 4.12. Correlação entre a Vazão Sólida de Fundo e Vazão Líquida	68
Figura 4.13. Perfil Longitudinal de Atividade - 24.05.78 - Canal Esquerdo - MD	69
Figura 4.14. Perfil Longitudinal de Atividade - 26.05.78 - Canal Esquerdo - MD	70
Figura 4.15. Perfil Longitudinal de Atividade - 30.05.78 - Canal Esquerdo - MD	71
Figura 4.16. Representação das Curvas de Isoatividade - 20.05.78 - Canal Esquerdo - MD	72
Figura 4.17. Representação das Curvas de Isoatividade - 20.05.78 - Canal Esquerdo - MD	73
Figura 4.18. Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campa nha de 17.05.78 a 12.06.78 - Canal Esquerdo - MD	74
Figura 4.19. Representação da Curva de Calibração do Dete-	

	tor em Função da Espessura da Camada Móvel - 17.05.78 a 12.06.78 - Canal Esquerdo - MD	75
Figura 4.20.	Representação da Curva de Calibração Normaliza da do Detetor em Função da Espessura da Camada Móvel - 17.05.78 a 12.06.78 - Canal Esquerdo - MD	76
Figura 4.21.	Perfil Longitudinal de Atividade - 30.06.73 - Canal Esquerdo - MD	77
Figura 4.22.	Perfil Longitudinal de Atividade - 03.07.73 - Canal Esquerdo - MD	78
Figura 4.23.	Perfil Londitudinal de Atividade - 11.07.73 - Canal Esquerdo - MD	79
Figura 4.24.	Representação das Curvas de Isoatividade - 30.06.78 - Canal Esquerdo - MD	80
Figura 4.25.	Representação das Curvas de Isoatividade - 11.06.76 - Canal Esquerdo - MD	81
Figura 4.26.	Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 28.06.78 a 20.07.78 - Canal Esquerdo - MD	82
Figura 4.27.	Representação da Curva de Calibração do Detetor em Função da Espessura da Camada Móvel-28.06.78 a 20.07.78 - Canal Esquerdo - MD	83
Figura 4.28.	Representação da Curva de Calibração Normaliza da do Detetor em Função da Camada Móvel - 28.06.78 a 20.07.78 - Canal Esquerdo - MD	84

Figura 4.29. Perfil Longitudinal de Atividade - 04.07.78 - Canal Esquerdo - ME	85
Figura 4.30. Perfil Longitudinal de Atividade - 15.07.78 - Canal Esquerdo - ME	86
Figura 4.31. Curvas de Isoatividade - 04.07.78 - ME	87
Figura 4.32. Representação das Curvas de Isoatividade - 15.07.78 - Canal Esquerdo - ME	87
Figura 4.33. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 28.06.78 a 20.07.78 - Canal Esquerdo - ME	88
Figura 4.34. Representação da Curva de Calibração do Dete <u>tor</u> em Função da Espessura da Camada Móvel - 28.06.78 a 20.07.78 - Canal Esquerdo - ME	89
Figura 4.35. Representação da Curva de Calibração Normaliza <u>da</u> em Função da Camada Móvel - 28.06.78 a 20.07.78 - Canal Esquerdo - ME	90
Figura 4.36. Perfil Longitudinal de Atividade - 15.09.78 - Canal Esquerdo - MD	91
Figura 4.37. Perfil Longitudinal de Atividade - 17.09.78 - Canal Esquerdo - MD	92
Figura 4.38. Perfil Longitudinal de Atividade - 21.09.78 - Canal Esquerdo - MD	93
Figura 4.39. Representação das Curvas de Isoatividade - 15.09.78 - Canal Esquerdo - MD	94

Figura 4.40. Representação das Curvas de Isoatividade - 17.09.78 - Canal Esquerdo - MD	95
Figura 4.41. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 13.09.78 a 04.01.78 - Canal Esquerdo - MD	96
Figura 4.42. Representação da Curva de Calibração do <u>Det</u> <u>tor</u> em Função da Espessura da Camada Móvel - 13.09.78 a 04.10.78 - Canal Esquerdo - MD	97
Figura 4.43. Representação da Curva de Calibração Normaliza da do Detetor em Função da Camada Móvel - 13.09.78 a 04.10.78 - Canal Esquerdo - MD	98
Figura 4.44. Perfil Longitudinal de Atividade - 15.09.78 - Canal Esquerdo - ME	99
Figura 4.45. Perfil Longitudinal de Atividade - 20.09.78 - Canal Esquerdo - ME	100
Figura 4.46. Perfil Longitudinal de Atividade - 24.09.78 - Canal Esquerdo - ME	101
Figura 4.47. Representação das Curvas de Isoatividade - 15.09.78 - Canal Esquerdo - ME	102
Figura 4.48. Representação das Curvas de Isoatividade - 29.09.78 - Canal Esquerdo - ME	103
Figura 4.49. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 13.09.78 a 04.10.78 - Canal Esquerdo - ME	104
Figura 4.50. Representação da Curva de Calibração do <u>Det</u> <u>tor</u> - 13.09.78 a 04.10.78-Canal Esquerdo-ME...	105

Figura 4.51. Representação da Curva de Calibração Normalizada do Detetor - 13.09.78 a 09.10.78 - Canal Esquerdo - ME	105
Figura 4.52. Perfil Longitudinal de Atividade - 20.11.78 - Canal Esquerdo - MD	106
Figura 4.53. Perfil Longitudinal de Atividade - 24.11.78 - Canal Esquerdo - MD	107
Figura 4.54. Representação das curvas de Isoatividade - 22.11.78 - Canal Esquerdo - ME	108
Figura 4.55. Representação das Curvas de Isoatividade - 30.11.78 - Canal Esquerdo - ME	108
Figura 4.56. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 10.11.78 a 09.12.78 - Canal Esquerdo - MD	109
Figura 4.57. Curva de Calibração do Detetor - 10.11.78 a 09.12.78 - MD	110
Figura 4.58. Curva de Calibração Normalizada - 10.11.78 a 09.12.78 - MD	110
Figura 4.59. Perfil Longitudinal de Atividade - 20.11.78 - Canal Esquerdo - MD	111
Figura 4.60. Perfil Longitudinal de Atividade - 29.11.78 - Canal Esquerdo - ME	112
Figura 4.61. Representação das Curvas de Isoatividade - 21.11.78 - ME	113

Figura 4.62. Representação das Curvas de Isoatividade - 29.11.78 - ME	114
Figura 4.63. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 10.11.73 a 09.12.78 - Canal Esquerdo - ME	115
Figura 4.64. Curva de Calibração do Detetor - 10.11.78 a 09.12.78 - ME	116
Figura 4.65. Curva de Calibração Normalizada - 10.11.78 a 09.12.78 - ME	116
Figura 4.66. Perfil Longitudinal de Atividade - 07.01.79 - MD	117
Figura 4.67. Perfil Longitudinal de Atividade - 08.01.79 - MD	117
Figura 4.68. Representação das Curvas de Isoatividade - 07.01.79 - MD	118
Figura 4.69. Representação das Curvas de Isoatividade - 08.01.79 - MD	119
Figura 4.70. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 26.12.78 a 26.01.79 - Canal Esquerdo - MD	120
Figura 4.71. Curva de Calibração do Detetor - 26.12.78 a 26.01.79 - MD	121
Figura 4.72. Curva de Calibração Normalizada - 26.12.78 a 26.01.79 - MD	121
Figura 4.73. Perfil Longitudinal de Atividade - 05.01.79 -	

Canal Esquerdo - Canal Esquerdo - ME	122
Figura 4.74. Perfil Longitudinal de Atividade - 10.C1.79 - Canal Esquerdo - ME	123
Figura 4.75. Representação das Curvas de Isoatividade - 07.01.79 - Canal Esquerdo - ME	124
Figura 4.76. Representação das Curvas de Isoatividade - 11.01.79 - Canal Esquerdo - ME	124
Figura 4.77. Representação da Velocidade Média de Arraste de Fundo - Campanha de 26.12.78 a 26.01.79 - ME	125
Figura 4.78. Representação da Curva de Calibração de Detetor - Campanha de 26.12.78 a 26.01.79 - Canal Esquerdo - ME	126
Figura 4.79. Representação da Curva de Calibração Normaliza da do Detetor - Campanha de 26.12.78 a 26.02.79 Canal Esquerdo - ME	127
Figura 4.80. Correlações obtidas com os dados Relativos ao Período de 1977/1979	128
Figura 4.81. Correlação entre a Vazão Sólida em Suspensão e Vazão Líquida	129
Figura 4.82. Representação da Declividade da Linha D'água em Função da Vazão Líquida Média	130
Figura 4.83. Representação Gráfica da Curva Duração - Fre quência	131

Figura 4.84. Representação Gráfica da Tensão Tangencial de Arraste em Função da Vazão Líquida Média	132
Figura 4.85. Curva Granulométrica - Rio Paraná - Canal Esquerdo	133
Figura 4.86. Seção Transversal do Canal Esquerdo	134
Figura 5.3.1. Diagrama de Shields	139
Figura 5.3.2. Equação de Kalinske	139
Figura 5.6.1. Equação de Einstein	146
Figura 5.7.1. Fator de Correção X	146
Figura 5.7.2. Correlação entre ϕ e ψ	147
Figura 5.7.3. Fator ξ	147
Figura 5.7.4. Fator Y	147
Figura 5.8.1. Coeficiente de Arraste de Fundo	148
Figura 5.11.1. Fator de Eficiência do Transporte Sólido por Arraste de Fundo	153
Figura 5.11.2. Relação entre a Força Tangencial e a Força Normal	153
Figura 5.12.1. Obtenção de g'_{nm} a partir da Velocidade Média (u)	156
Figura 5.12.2. Obtenção de C_p a partir de u e de D	157

Figura 5.12.3. Obtenção de K a partir de C'_g/C_r	158
Figura 5.15.1. Velocidade de Queda versus Diâmetro da Partícula	169
Figura 5.15.2. Critério de Simons et alli (1961)	169
Figura 5.15.3. Critério de Simons et alli (1963)	170
Figura 5.15.4. Critério de Kondrat'ev	170
Figura 5.15.5. Critério de Znamenskaya	171
Figura 5.15.6. Critério de Engelund	171

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

A determinação da taxa de transporte de sedimentos em rios e canais é um problema importante em engenharia hidráulica. A avaliação destas taxas é necessária para o projeto e operação de estruturas hidráulicas adequadas, assim como na execução de obras e serviços.

Os sólidos transportados pelos rios são devidos, principalmente, à erosão do solo superficial. As chuvas, caindo em terrenos inclinados, desagregam as partículas e lavam o solo removendo a camada superficial, principalmente quando não há cobertura vegetal. Nos terrenos planos as partículas desagregadas são transportadas pelos ventos até os terrenos inclinados. A água transporta essas partículas desagregadas formando as enxurradas que vão até às calhas dos rios. Ainda existe o transporte devido à erosão das próprias calhas fluviais.

O transporte de sedimentos depende fundamentalmente da velocidade da corrente onde a aceleração causará a erosão, enquanto que a diminuição de velocidade provocará a sedimentação. A turbulência da corrente líquida, tendo componentes ascendentes e descendentes, atua sobre a partícula, mantendo-a em suspensão. A partícula cairá dependendo de seu peso, e percorrerá, depois de deslocada de sua posição inicial, maior caminho quanto menor for seu peso e maior quanto maior a velocidade. O transporte de arrasto é de tão difícil determinação quanto a determinação teórica. As partículas não tem a velocidade da corrente, rolam no leito, vão se fragmentando e adquirindo forma arredondada. Há uma velocidade limiar da corrente a partir da qual se dá o início de arrastamento, que depende também do diâmetro dos grãos. O arrastamento se faz por ondulações, quase paralelas entre si, e perpendicularmente à direção geral da corrente. Por maiores que sejam os conhecimentos sobre esses fenômenos, sempre permanecerão

incompletos e empíricos, sem poderem ser explicados completamente por uma teoria racional.

1.2. Utilização de Sedimentos Marcados

O uso de sedimentos marcados com traçadores radioativos para estudar o seu comportamento dinâmico no fundo dos rios e no litoral marinho, tornou-se uma técnica usual dentro do campo da sedimentologia. Em linhas gerais, a técnica consiste em injetar uma certa quantidade do sedimento marcado, em um ponto determinado do rio, e seguir o seu deslocamento por meio de um detector de radiação.

A primeira experiência empregando sedimentos marcados com traçadores radioativos realizou-se na Inglaterra por J.L. Putman e D.B. Smith⁽¹⁾ em meados de 1954, com objetivo de se estudar o comportamento dos sedimentos em uma zona de estuário do rio Tâmis.

Ao final do mesmo ano, realizou-se a primeira experiência francesa realizada por R. Hours⁽²⁾, no estudo do deslocamento das areias da praia em Canes.

A partir dessa data, o número de experiências realizadas cresceram rapidamente, estendendo-se a vários países.

1.3. Contribuição da Técnica de Traçadores Radioativos em Sedimentologia Dinâmica

Os resultados obtidos em numerosas experiências e nas mais variadas condições, tem demonstrado que a técnica de traçadores radioativos é uma ferramenta de grande utilidade no estudo de transporte de sedimentos.

Assim como em outras aplicações, os traçadores radioativos competem com várias outras substâncias utilizadas como traçadores no estudo das dinâmicas de um fenômeno natural. No ca

so do estudo de transporte sólido de fundo, utilizam-se também os traçadores fluorescentes, os materiais magnéticos e as areias coloridas artificialmente. Os traçadores radioativos apresentam algumas inconveniências tais como: eles não podem ser manipulados facilmente, apresentam problemas de proteção radiológica, e devido ao seu decaimento com o tempo podem provocar algumas dificuldades na detecção e medição.

Entretanto, em comparação a outros traçadores, os isótopos radioativos possuem algumas vantagens. Os custos não são altos, os equipamentos de medição encontram-se disponíveis no mercado, e está claro que num projeto onde o estudo com traçadores radioativos é necessário, não deixará de ser feito por problemas de custo. O uso de radioisótopos com meia-vida moderada acarreta a vantagem de podermos realizar outros estudos similares no mesmo local sem a interferência da contaminação da experiência anterior.

Os radioisótopos têm também a vantagem na identificação de diferentes grupos granulométricos no material do leito, usando para tal nuclídeos que emitam radiação de energias diferentes. Entretanto, a vantagem mais importante é a possibilidade de termos resultados contínuos e sem a necessidade de amostragem. Efetuando o mapeamento, torna-se mais fácil a localização dos pontos de amostragem quando da necessidade de um estudo quantitativo com retirada de amostras.

C A P Í T U L O 2

**ASPECTOS BÁSICOS NA UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS
NO ESTUDO DE TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO**

2. ASPECTOS BÁSICOS NA UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO DE TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO

2.1. Escolha do Traçador Radioativo

Atualmente, dispõe-se de uma grande variedade de radioisótopos adequados para a marcação dos sedimentos. Utilizam-se, de uma forma geral, os isótopos emissores de radiação gama, pois estes permitem as medições *in situ*.

A característica mais importante a ser considerada na escolha do traçador mais conveniente é a sua meia-vida (*), onde esta deve ser compatível com a duração da experiência.

Um dos critérios recomendados é o de se escolher um radioisótopo com meia-vida da mesma ordem de grandeza da duração da experiência.

Quando não temos condições de prever o tempo de duração da experiência, como acontece na prática para a maioria dos casos, baseia-se em outros critérios que podem ser os seguintes:

- a) Para o estudo de transporte de sedimentos finos em suspensão, utiliza-se um radioisótopo com meia-vida inferior a oito dias;
- b) Para o caso de sedimentos transportados por arrasto de fundo, é recomendável o emprego de isótopos de meia-vida mediana (^{51}Cr , ^{45}Sc , ^{192}Ir , etc.).

Por outro lado, se a duração previsível do transporte é pequena, ou quando se trata de realizar um ensaio preliminar, deve-se utilizar um isótopo de meia-vida curta, tal como o ^{198}Au ou o ^{137}La . A energia dos raios

(*) meia-vida é o tempo t em que a atividade de um isótopo radioativo decai pela metade.

gama emitidos pelo radioisótopo deve ser a mínima compatível com as necessidades experimentais, facilitando desta forma a manipulação do material radioativo. Por outro lado, quanto maior for a camada móvel de sedimentos maior deverá ser a energia da radiação gama;

- c) Quando se trata em estudar o transporte de materiais grossos (pedregulhos e seixos), é aconselhável o emprego de isótopos de meia-vida longa e com raios gama de elevada energia (^{187}Ta e ^{60}Co). Esta escolha é baseada no fato de que estes materiais se deslocam, geralmente, quando da ocorrência de grandes vazões. Portanto, em muitos casos, será preciso esperar um determinado período de tempo para detectarmos o deslocamento.

Na tabela 2.1, são mostradas algumas características dos radioisótopos utilizados com maior frequência.

2.2. Marcação dos Sedimentos

Uma vez escolhido o traçador quanto à sua meia-vida e a energia dos raios gama, segue-se a marcação dos sedimentos que pode-se realizar de duas formas: marcação em superfície e marcação em volume. Nos casos particulares de materiais grosseiros como pedregulhos e seixos, marcam-se individualmente, inserindo uma pequena fonte radioativa dentro de um orifício aberto com uma broca e fechada posteriormente com um cimento.

Os sedimentos marcados pelos processos acima descritos, devem possuir as seguintes características:

- a) Mesmo comportamento dinâmico dos sedimentos naturais.

O sedimento marcado deve ter a mesma distribuição granulométrica, densidade e forma que o sedimento natural. Esta condição é cumprida satisfatoriamente quando

TABELA 2.1 - RADIOISÓTOPOS UTILIZADOS FREQUENTEMENTE NA MARCAÇÃO DOS SEDIMENTOS

RADIOISÓTOPO	MEIA-VIDA	ENERGIA E ABUNDÂNCIA DE RAIOS γ MAIS IMPORTANTES (MeV) ⁻	FREQUÊNCIA RELATIVA DE UTILIZAÇÃO (%)
⁵¹ Cr	27,8 d	0,325 (9%)	25
¹⁹⁹ Au	2,7 d	0,41 (100%) 0,68 (1.1%)	16
⁸⁶ Sc	84,0 d	1,12 (~100%) 0,89 (~100%)	13,5
¹⁸² Ta	115 d	1,12 (100%) 1,19 (60%) 0,22 (19%) 0,15 (14%) 1,16 (99%)	9,5
¹⁹² Ir	74 d	0,32 (100%) 0,47 (64%) 0,30 (36%) 0,31 (35%) 0,61 (14%), etc	8,7
⁶⁰ Co	5,24 a	1,33 (100%) 1,17 (100%)	5,6
¹³³ Ba-La	12,8 d	1,6 (100%) 0,49 (50%) 0,82 (46%) 0,33 (40%) 0,54 0,31 , etc	3,2
^{110m} Ag	253 d	0,66 (100%) 0,88 (75%) 0,94 (25%) 0,76 (24%) 1,38 (20%) 0,71 (18%), etc	1,6
⁹⁵ Zn-Nb	65 d	0,77 0,76 0,73	0,8

a marcação é feita no sedimento natural, coletado no local onde se realizará a experiência. Se utilizarmos os sedimentos artificiais (vidros, resinas ou minerais radioativos), estes deverão atender aos requisitos acima descritos, cuja comprovação pode ser feita mediante ensaios de laboratório;

- b) Boa fixação do material radioativo no sedimento marcado.

O desprendimento parcial do radioisótopo por abrasão, ataque químico ou dissolução pode acarretar resultados insatisfatórios;

- c) Proporcionalidade entre atividade e massa de sedimento.

Para uma análise quantitativa do transporte de sedimento, é necessário que a atividade presente por unidade de peso seja constante, independente da fração de peso ou da fração granulométrica considerada.

As vantagens e desvantagens dos dois principais processos de marcação são resumidas abaixo.

A marcação superficial de um sedimento natural assegura que o traçador se comportará identicamente com o material a ser estudado. É possível marcar grandes quantidades de material (vários quilogramas) e a marcação neste caso é proporcional a $(\frac{d}{2})^2$. Esta é uma desvantagem de método, especialmente se o material não for uniforme em tamanho e forma. A marcação deve ser testada para a certificação de que a abrasão não remove o isótopo radioativo de forma significativa.

A marcação homogênea, em volume, de um material artificial oferece a vantagem de podermos escolher uma grande variedade de radioisótopos, principalmente quando utilizamos o vidro.

O traçador inativo é incorporado ao vidro fundido e depois de moído é feita a composição granulométrica. Este sedimento artificial é irradiado no reator atômico.

Neste caso, os ensaios em laboratório são necessários para a verificação se o material artificial comporta-se da mesma forma que o natural.

A marcação homogênea é proporcional a $(\frac{d}{2})^3$, qualidade esta recomendável para sedimentos de ampla distribuição granulométrica.

A perda de atividade devido a abrasão é desprezível. A principal desvantagem deste método é o custo, uma vez que a irradiação no reator atômico de grandes quantidades de material torna-se praticamente inviável.

A inserção de uma fonte radioativa dentro do material, por exemplo nos casos em que se estudam o deslocamento de pedregulhos ou seixos, é um método aplicável para pequenas quantidades de material. Utilizando-se fontes de mesma intensidade pode-se avaliar a quantidade e profundidade de penetração. Eventualmente pode-se marcar, com intensidade variada, para possibilitar a identificação da taxa de movimento para diferentes tamanhos de material.

Do ponto de vista teórico, o método ideal para marcação dos sedimentos deveria ser a ativação destes com neutrons em um reator nuclear, atendendo-se assim, satisfatoriamente, aos requisitos principais do traçador radioativo. Entretanto, com a irradiação dos sedimentos naturais, infelizmente obtém-se isótopos de meia-vida curta, tais como o ^{28}Si e o ^{24}Na que não são utilizáveis como traçadores. E por outro lado, a irradiação de quantidades superiores a 1 kg torna-se praticamente inviável devido a problemas técnicos e custos elevados.

2.3. Transporte e Imersão do Sedimento Marcado

Após a marcação dos sedimentos, estes deverão ser transportados para o local da experiência. Para isto, é imprescindível a utilização de grandes e pesados recipientes de chumbo. Os problemas de transporte são de difícil solução quando se trata de massas a injetar acima de 10 kg, onde nestes casos, recomenda-se que a marcação seja feita próxima ao local de experiência.

De uma maneira geral, o recipiente de chumbo que é utilizado para o transporte de sedimentos marcados deve ser também apropriado para imersão.

Do ponto de vista de comportamento dinâmico dos sedimentos, uma injeção ideal exigiria a distribuição uniforme destes na camada em movimento. Entretanto, na prática, este tipo de injeção é de difícil execução. Alguns pesquisadores têm utilizado uma técnica aproximada que consiste em misturar antes da imersão os sedimentos marcados com uma determinada quantidade de sedimentos naturais inativos.

Um procedimento aceitável consiste em injetar os sedimentos marcados de maneira que os sedimentos marcados se depositem uniformemente sobre o fundo formando uma camada tão delgada quanto possível.

Desta forma, os grãos ativos serão assimilados imediatamente após a injeção pela camada em movimento e submetidos às mesmas condições hidráulicas.

2.4. Massa e Atividade dos Sedimentos a Injetar

A massa e a atividade dos sedimentos a injetar em uma experiência são fatores decisivos para o êxito,

Ambos os fatores são interligados, se o número de grãos ativos é demasiadamente pequeno, o comportamento destes pode não ser representativo e uma vez dispersados na área em estudo, a sua detecção torna-se uma tarefa difícil.

Da mesma forma, uma atividade demasiadamente pequena e após uma certa dispersão, fará com que a detecção dos grãos ativos seja difícil ou em alguns casos impossível, mesmo que a quantidade seja elevada.

Não existe um limite máximo para a massa de sedimentos marcados a injetar. Teoricamente, quanto maior a massa mais representativo será a marcação, entretanto, deve-se tomar o cuidado para que não haja deposição no leito em forma de montículos. Na prática, devido a problemas de manipulação, transporte e blindagem dos sedimentos marcados, não é recomendável a utilização de uma massa maior que a necessária.

G. Courtois e G. Sauzay⁽³⁾, mostraram que a massa mínima de sedimentos a utilizar deve ser tal que a flutuação estatística do número de grãos no centro da "nuvem radioativa" seja da mesma ordem de magnitude da flutuação da resposta do detector devida ao caráter estatístico da desintegração radioativa. O cálculo exato do número de grãos necessários por metro para satisfazer esta condição deve levar em conta a sensibilidade do detector e a energia e frequência dos raios gama emitidos. Sauzay e Courtois apresentam a seguinte equação para um detector de NaI(Tl) de 1,5 x 1 polegadas, situado a 5 cm do fundo e com um limiar de discriminação de 0,05 MeV:

a) Detecção dinâmica

$$P_d = 1,25 \frac{d_m^3}{t \cdot v \cdot t} \cdot \frac{R_e}{f_0} \cdot \frac{1 - e^{-2 \alpha E}}{1 - e^{-\alpha E}} \cdot \left(\frac{\mu_0 \cdot I_\gamma}{\sigma_r} \right)^2 \left(1 + 1,05 \frac{L(h/2)}{d_m} \right)^2$$

(2.4.1)

b) Detecção estática:

$$P_s = 4,35 \frac{d_m^3}{S} \cdot \frac{R_e}{f_g} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha E}}{1 - e^{-\alpha E}} \left(\frac{\nu \cdot I_\gamma}{\sigma_r} \right)^2 \left(1 + 0,64 \frac{L(h/2)}{d_m} \right)^2$$

(2.4.2)

onde:

P_d = massa de sedimento a ser depositada, para detecção dinâmica para 1 Ci de traçador (Kg/Ci);

P_s = massa de sedimento a ser depositada, para detecção estática para 1 Ci de traçador (Kg/Ci);

d_m = diâmetro médio dos grãos depositados (mm);

S = superfície de contagem do detector em medição estática (m^2);

L = largura efetiva de detecção. Aproximadamente 1m para detector de NaI(Tl) 1,5x1" (detecção dinâmica e largura tomada perpendicularmente à direção de detecção)(m);

v = velocidade de detecção (m/s);

t = intervalo de tempo entre dois sinais (assumido igual a duas vezes a constante de tempo do escalímetro analógico (s);

R_e = limite da taxa de contagem (cps);

σ_r = desvio padrão devido à variação estatística do número de grãos, imposto pelo pesquisador (por exemplo: 10cps) (cps);

$f_{g,e}$ = fator de geometria da unidade de detecção (cps/ μ Ci/ m^2);

$$f = f_0 e^{-\mu_0 Z}$$

E = espessura da camada em movimento (cm);

μ_0 = coeficiente de absorção linear da radiação gama em água (cm^{-1});

I_γ = constante de ionização do emissor escolhido (mR/h por Ci a 1m);

$L(h/2)$ = largura à meia altura da curva de frequência granulométrica (mm);

Z = distância do detector acima do fundo (cm).

2.5. Método de Detecção

Originalmente os tubos Geiger-Muller eram utilizados para detecção de radioatividade nos serviços de campo, em virtude de serem mais robustos que os detectores de cintilação. Entretanto, atualmente, com a evolução da tecnologia, os detectores de cintilação são empregados em grande escala por possuírem maior sensibilidade e poder de discriminação de energias.

A medição dos sedimentos marcados é feita, basicamente, por dois métodos:

- a) com retirada de amostras, que são medidas individualmente na superfície;
- b) com medição no local, mediante um detector submerso.

A retirada de amostras permite maior precisão nas medidas e por outro lado, se estas são extraídas de forma que permitam uma perfilagem indeformada, é possível a determinação da distribuição em profundidade dos sedimentos marcados, e consti

tui num dado importante na determinação de resultados quantitativos. Entretanto, as operações para obtenção de amostras são bastante trabalhosas, razão pela qual o método não é empregado frequentemente. Estes são indicados apenas como complementação da medição direta.

Para a medida in situ, utilizam-se os detectores de cintilação com cristal de NaI(Tl), acoplado a um escalímetro registrador. Esta medição pode ser efetuada continuamente ou por ponto a ponto.

2.5.1. Medição ponto a ponto

A sonda de medição é colocada a uma distância fixa do fundo e a contagem é feita num determinado intervalo de tempo. Para que a medição se faça sempre na mesma geometria utiliza-se um suporte para a sonda cintiladora.

À medida que se eleva o detector, aumenta o campo de medida, mas também aumenta a atenuação dos raios gama na camada de água entre a superfície dos sedimentos e o detector.

A altura ótima do detector é determinada em cada caso e depende fundamentalmente da energia dos raios gama do radioisótopo.

Como vantagens mais importantes da técnica de medição ponto a ponto em comparação ao método de medição contínua podemos citar:

- maior precisão das medidas de radioatividade, uma vez que podemos controlar o tempo de medição;
- maior precisão na determinação da distribuição da radioatividade na camada de sedimentos.

2.5.2. Medição contínua

A medição contínua é feita com um equipamento tipo trenó que é arrastado por um barco, sobre a superfície dos sedimentos. A sonda detectora de cintilação fica acoplada ao trenó de forma que fique a uma altura ótima da superfície dos sedimentos. As contagens obtidas são registradas através de um registrador gráfico, e as trajetórias determinadas por um equipamento de teleposicionamento.

As principais vantagens desta técnica de medida em comparação com a medição ponto a ponto, são:

- maior rapidez na execução dos serviços;
- maior probabilidade de localização dos grãos radioativos com o detector;
- maior comodidade para a realização das medidas.

2.6. Interpretação dos Resultados

Os esforços realizados até o momento concentram-se em desenvolver os métodos para a marcação de sedimentos, os equipamentos para injeção e medição dos sedimentos marcados, de sorte que a evolução na análise e interpretação dos resultados ainda deixa muito a desejar. As razões são, de um lado, a dificuldade existente para o estabelecimento das leis que possam explicar o comportamento dinâmico do transporte de sedimentos por arraste de fundo, e de outro lado, o processo envolve uma série de parâmetros que variam no tempo e no espaço e geralmente de forma irregular.

2.6.1. Método de integração no espaço

A taxa de transporte por arraste de fundo é obtido multiplicando-se a velocidade linear pela seção transversal da cama

da móvel. Uma das dificuldades do método consiste no fato de que as curvas de isoatividade obtidas pelo rastreamento da nuvem radioativa não fornecem uma informação precisa da distribuição tridimensional do traçador.

Uma das maneiras para se determinar a espessura da camada móvel consiste em extrair amostras cilíndricas do leito móvel. No caso de completa mistura entre o traçador e a camada móvel, a curva de atividade decresce rapidamente para uma determinada profundidade, neste caso, a média das profundidades, obtidas em grande número de amostras, poderia ser adotada como espessura da camada móvel. Outra maneira para se obter a espessura da camada móvel consiste na obtenção da curva de calibração do equipamento de medição em laboratório, onde uma pequena alíquota de traçador é misturada com a areia natural. Determina-se a curva de calibração do equipamento, conhecendo-se os volumes adicionados de areia natural e as respectivas contagens, na mesma geometria de campo.

2.6.2. Método de integração no tempo

O método de integração no tempo utiliza a curva de passagem do traçador radioativo em uma determinada seção, utilizando para tal um ou mais detectores fixos a uma geometria ótima. Normalmente, quando se utiliza apenas um detector, é feita uma medição ponto a ponto ao longo da seção transversal considerada, em intervalos de tempo compatíveis com a velocidade de deslocamento da camada móvel.

C A P Í T U L O 3

CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

3. CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

3.1. Introdução

Nos escoamentos com fundo móvel observam-se duas modalidades de transporte sólido: por arrastamento e em suspensão.

No transporte por arrastamento as partículas sólidas escorregam ou rolam sobre outras partículas que constituem o fundo. Transporte em suspensão as partículas no seio do escoamento sem contactar com o fundo (saltit individual).

O movimento do material é unicamente condicionado pelas características do escoamento, onde a quantidade de material sólido transportada na unidade de tempo será diretamente proporcional a velocidade do escoamento.

À medida que o material é transportado a superfície do fundo modifica-se, formando-se geralmente uma série de ondulações irregularmente distribuídas. Modifica-se portanto a forma da fronteira do escoamento e altera-se conseqüentemente a sua rugosidade, o que vai influir no escoamento da vazão líquida. Além disso, para valores elevados da velocidade do escoamento, algumas partículas do fundo podem entrar em suspensão, perturbando a intensidade e distribuição das ações turbulentas e influenciando também o escoamento.

Uma ação recíproca entre os escoamentos líquidos e sólidos, condicionada por parâmetros relativos ao canal (geometria), ao escoamento (profundidade, perdas de carga), ao fluido (massa específica, viscosidade), ao material do fundo (massa específica, dimensões, forma) e às forças da inércia (aceleração da gravidade), dá ao mecanismo de transporte sólido um certo grau de complexidade de que não é atualmente susceptível de uma representação matemática definida.

Para melhor esclarecimento do mecanismo dos escoamentos de fundo móvel torna-se necessário prosseguir com as investigações teóricas e experimentais, principalmente melhorar os métodos de medição de vazão sólida na natureza de forma a possibilitar a verificação das hipóteses formuladas.

Em consequência das variações locais da turbulência, algumas partículas ora são arrancadas do fundo e transportadas em suspensão, ora se depositam no fundo e passam a ser transportadas por arrastamento.

Na prática não é possível definir uma separação nítida entre as duas modalidades de transporte, pois na realidade estabelece-se uma continuidade entre o material transportado por arrastamento e em suspensão, reduzindo-se progressivamente a concentração deste último do fundo para a superfície.

No final do século XIX iniciavam-se as primeiras tentativas para os estudos de transporte sólido de forma sistemática. Estes estudos eram empíricos, e a partir da observação do comportamento de um grande número de rios e canais procurava-se estabelecer regras para o projeto de novos canais.

No século XX surgiu uma nova via para o estudo dos problemas fluviais, que se pode chamar de via racional, por procurar estabelecer as leis físicas que determinam o mecanismo do transporte sólido.

A tendência atual, dentro da via racional, é começar por estudar o problema analiticamente com base nos conhecimentos da mecânica dos fluidos, e recorrer a ensaios laboratoriais para definir os coeficientes e as constantes que intervêm nas relações analíticas deduzidas. Sempre que possível procura-se uma confirmação dos resultados através de observações em protótipos, as quais contudo, em relação aos problemas fluviais, são normalmente dispendiosas e demoradas.

Modernamente a via racional procura lançar mão de uma nova ferramenta matemática que são os processos estocásticos. Com o emprego de computadores os processos estocásticos são um instrumento poderoso na elaboração e análise dos dados relativos ao transporte sólido e por outro adaptam-se especialmente bem ao estabelecimento de modelos matemáticos de fenômenos físicos aleatórios como são os do transporte sólido.

Outra ferramenta com grande perspectiva de sucesso nas medições de transporte sólido são os radioisótopos. Através do uso de traçadores radioativos adequados, o estudo qualitativo e quantitativo do transporte de sedimentos pode ser realizado com maior precisão.

3.2. Transporte Sólido por Arraste de Fundo

3.2.1. Início de transporte sólido

Na prática, é interessante conhecer as condições que determinam o início do transporte sólido num fundo móvel. O início de transporte, sobretudo se o material de fundo não tiver granulometria uniforme, como sucede sempre nos canais naturais, dá-se de uma forma progressiva. Assim, à medida que aumenta a velocidade do escoamento ou a tensão tangencial no fundo, começam a mover-se primeiro alguns grãos com menores dimensões ou mais expostos às solicitações do escoamento e só algum tempo depois se verifica um transporte generalizado. Esta circunstância torna de certo modo controversa e subjetiva a definição de início de arrastamento. LANE⁽⁴⁾, em 1953, propôs a definição da tensão tangencial crítica como sendo o valor obtido na extrapolação da curva de variação da vazão sólida versus tensão tangencial, onde a vazão sólida se anula.

A primeira investigação com objetivo de definir condições de início de arrastamento foi conduzida por SHIELDS⁽⁵⁾, 1936, que definiu experimentalmente uma relação entre os parâmetros:

$$\frac{\tau}{\gamma'_S \cdot d} \text{ e } \frac{u_* \cdot d}{\nu}$$

onde:

$$\gamma'_S = \gamma_S - \gamma$$

γ'_S = peso específico do material submerso;

γ_S = peso específico do sedimento;

γ = peso específico da água;

τ = tensão tangencial;

d = diâmetro da partícula;

u_* = velocidade de atrito;

ν = viscosidade cinemática do fluido.

Pela análise da forma da curva de SHIELDS (Figura 3.1) mostra-se que a partir de valores do número de Reynolds relativo à velocidade de atrito $Re_* = \frac{u_* d}{\nu}$ superiores a aproximadamente 500, pode-se considerar que a tensão tangencial é:

$$\tau_c = 0,06 \gamma'_S d \quad (3.2.1)$$

O que equivale a dizer que nos escoamentos naturais ($Re_* > 500$) se verifica uma proporcionalidade entre tensão tangencial crítica e a dimensão do material.

WHITE⁽⁶⁾, 1940, define também uma relação do mesmo tipo:

$$\tau_c = C_w \cdot \gamma'_S d \quad (3.2.2)$$

onde:

C_w = coeficiente que depende da densidade, forma de arrum
ção das partículas e das propriedades do fluido.

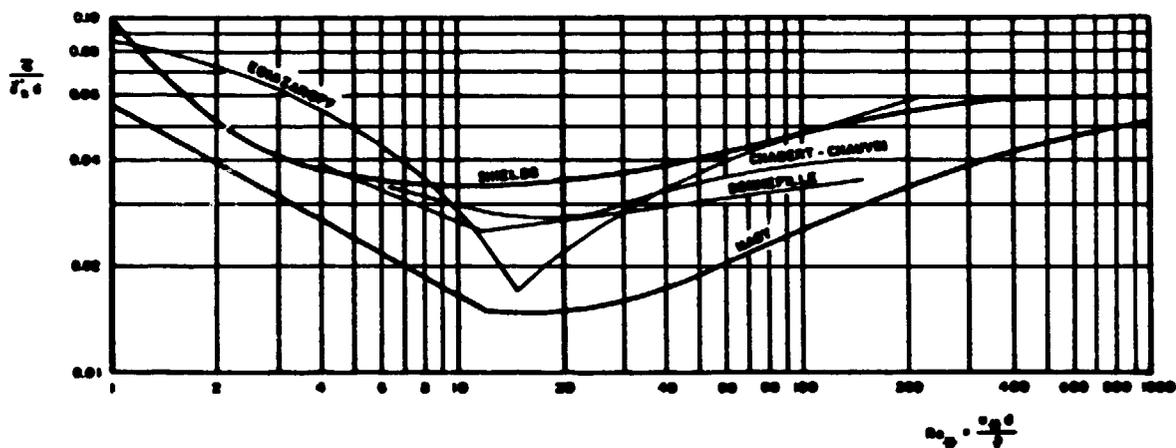


FIGURA 3.1 - COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE INÍCIO DE TRANSPORTE SÓLIDO

MEYER-PETER e MULLER⁽⁷⁾, 1948, a partir da sua fórmula de transporte sólido, mostrou que é possível, com $q'_s = 0$, obter uma expressão com a mesma forma de (3.2.2), fazendo $C_w = 0,047$.

RAMETTE e REUZEL⁽⁸⁾, 1962, utilizando traçadores radioativos fizeram determinações experimentais do coeficiente C_w , num trecho do rio Ródano, em que o material do fundo era fundamentalmente seixos e chegaram à conclusão que seu valor dependia do material transportado, variando entre: $C_w = 0,035$ para $d = 25\text{mm}$ e $C_w = 0,016$ para $d = 75\text{mm}$.

EGIAZAROFF⁽⁹⁾, 1957, definiu uma relação análoga de Shields (Figura 3.1), considerando $C_w = 0,06$ para $Re_* > 200$. Para valores de $Re_* < 200$, considerou ser preferível substituir a curva contínua de Shields por duas curvas (duas retas em coordenadas semilogarítmicas) que se encontram num ponto correspondente a $Re_* \approx 15$.

BONNEFILLE⁽¹⁰⁾, 1963, também definiu uma variação do mesmo tipo (Figura 3.1), admitindo duas retas em coordenadas logarítmicas intersectando-se para $Re_* \approx 12$.

Finalmente CHABERT e CHAUVIN⁽¹¹⁾, 1963, com base num grande número de ensaios realizados com materiais de pesos específicos diferentes, definiram também uma curva nas coordenadas adotadas por Shields (Figura 3.1) e com o mesmo andamento geral, mas fazendo $C_w = 0,04$ para $Re_* > 100$.

A comparação das diversas curvas da Figura 3.1, mostra uma certa disparidade entre os resultados apresentados pelos vários autores. Entretanto, com exceção da curva proposta por Nagy que se afasta muito das outras, pode-se considerar que a dispersão entre as diversas curvas não é exagerada e está de acordo com a dispersão habitual dos resultados relativos a escoamentos com fundo móvel.

3.2.2. Configurações do fundo nos escoamentos com fundo móvel

Quando a velocidade média de um escoamento com fundo móvel cresce progressivamente, o fundo vai apresentando várias configurações. A partir do repouso e por ordem sucessiva de ocorrência, à medida que a velocidade aumenta podem distinguir-se as seguintes configurações ou regimes de fundo: leito plano, rugas, dunas, transição e anti-dunas.

Assim que a velocidade do escoamento atinge o valor crítico de início de transporte, as partículas do fundo começam a deslocar-se, mantendo-se o leito plano durante algum tempo. Se a velocidade aumentar formam-se, no fundo, as configurações chamadas rugas, que são ondulações relativamente regulares com uma altura da ordem de centímetros.

Se o material do fundo for fino, as rugas formam-se em geral muito rapidamente logo que se inicia o movimento do material. Para materiais de diâmetros maiores, com dimensões da ordem de 1mm ou mais, não se formam normalmente rugas, mantendo-se o leito plano durante mais tempo até se dar o aparecimento de dunas.

As dunas são ondulações mais irregulares do que as rugas com altura da ordem dos decímetros e comprimento de onda da ordem dos metros, das dezenas ou mesmo centenas de metros. Às vezes designam-se por bancos as dunas de grandes dimensões. As dunas exibem geralmente um talude de montante suave e em talude de jusante áspero com inclinação correspondente ao ângulo de talude natural do material. Os comprimentos das cristas das dunas são geralmente da mesma ordem de grandeza do seu comprimento de onda.

Qualitativamente pode dizer-se que há afinidade entre as rugas e as dunas, distinguindo-se apenas pelas dimensões que são muito maiores nas últimas. Quando o material é relativamente fino, é normal a formação de rugas sobre a superfície das dunas.

Quando a velocidade aumenta as dimensões das dunas reduzem-se e o fundo tende para uma configuração sensivelmente plana que é chamada de transição porque posteriormente o fundo volta a apresentar ondulações.

Quando o escoamento ultrapassa as condições críticas e assume características de torrencial, desenvolvem-se no fundo ondulações, normalmente com forma aproximadamente senoidal, em fase com ondas da superfície livre sensivelmente estacionárias em geral de maior amplitude do que as configurações de fundo. Estas configurações designam-se por antidunas, por se deslocarem, geralmente, no sentido contrário ao das dunas, isto é para montante.

3.2.2.1. Critérios para caracterizar a existência das diversas configurações de fundo

LIU⁽¹²⁾, 1957, apresentou o primeiro critério para definir configurações de fundo, para caracterizar o aparecimento de rugas, utilizando uma relação entre os parâmetros $\frac{u_*}{w}$ e Re_* (Figura 3.2), onde w é a velocidade de sedimentação do material.

Na discussão do trabalho de Liu, ALBERTSON, SIMONS e RICHARDSON⁽¹³⁾, servindo-se dos mesmos parâmetros e com base em resultados laboratoriais, apresentaram curvas de separação entre regimes de rugas, dunas, transição e antidunas (Figura 3.2). Verificou-se que estas curvas não eram válidas para cursos de águas naturais e por isso outros autores procuraram substituí-las por outras mais adequadas.

CHABERT e CHAUVIN⁽¹⁴⁾, 1963, utilizando também as coordenadas de Liu, definiram outras curvas (Figura 3.2) com base em ensaios feitos com materiais de diversas granulometrias e pesos específicos. A Figura 3.2 evidencia que, em certas zonas do gráfico se passa do repouso ao regime de dunas através de rugas e noutras zonas as rugas nunca se chegam a formar.

BONNEFILLE⁽¹⁵⁾, 1965, com base numa análise dos dados de Chabert e Chauvin, mais sofisticada que a dos próprios autores, completou o critério correspondente definindo uma região de formação de rugas sobre dunas.

GARDE e ALBERTSON⁽¹⁶⁾, 1959, concordando com critério de Liu para o aparecimento de rugas mas discordando do critério de Albertson, Simons e Richardson, definiram curvas de separação das configurações de fundo relacionando $\frac{\tau}{\gamma'_s d}$, com o número de Froude $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ (Figura 3.4).

Posteriormente, GARDE e RAJU⁽¹⁷⁾, 1963, admitiram que a curva que na figura 3.3 separa a zona de transição da de antidunas poderia ser substituída com vantagem por uma reta com $Fr \geq 1$. Estes mesmos autores apresentaram também outro critério de definição das configurações de fundo com base nos parâmetros:

$$\frac{\tau}{\gamma'_s} \text{ e } \frac{R}{d} \text{ (Figura 3.4)}$$

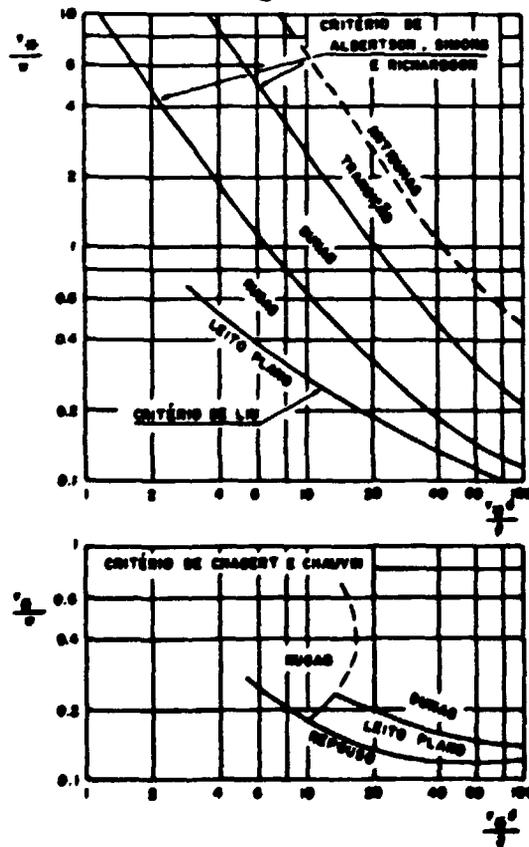


FIGURA 3.2 - CRITÉRIOS DE LIU, 1957; ALBERTSON, SIMONS e RICHARDSON, 1958; e CHABERT e CHAUVIN, 1963

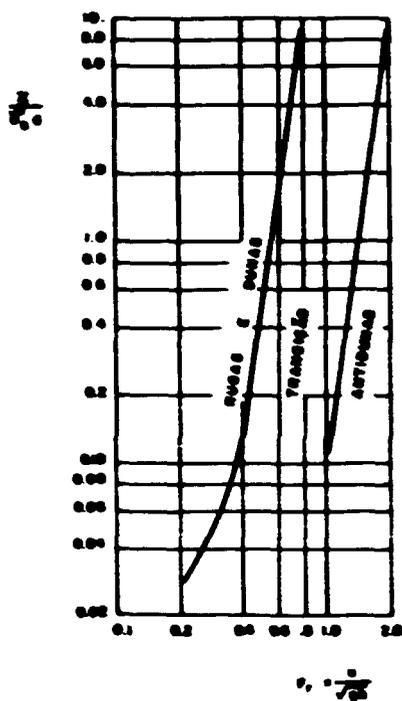


FIGURA 3.3 - CRITÉRIOS DE GARDE e ALBERTSON, 1959

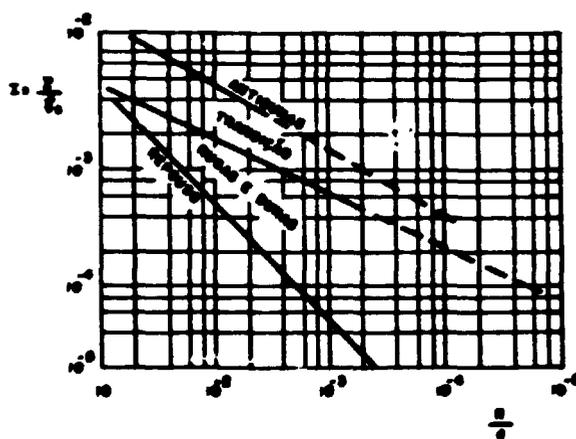


FIGURA 3.4 - CRITÉRIOS DE GARDE e RAJU, 1963

3.2.3. Transporte por arrastamento

O transporte sólido por arrastamento numa determinada seção de um escoamento depende das características hidráulicas do próprio escoamento, das propriedades do fluido e das propriedades dos sedimentos.

Têm sido propostas muitas fórmulas de transporte sólido, correlacionando-se a vazão sólida com parâmetros do escoamento, do fluido e do material de fundo. Na realidade, muitas das fórmulas não diferem essencialmente na sua estrutura e, se nas aplicações se depara por vezes com uma surpreendente diversidade de resultados, isso pode atribuir-se sobretudo ao fato de as várias expressões só serem válidas dentro das condições experimentais que serviram de base ao seu estabelecimento. Além disso, as fórmulas são em geral estabelecidas apenas com base em ensaios laboratoriais e, mesmo quando é tentada uma comparação com resultados da natureza, esta nunca é absolutamente confiável, dada a dificuldade que existe em medir a vazão sólida em escoamentos naturais.

As principais equações apresentadas podem ser classificadas em três grupos:

- 1) Equações do tipo Du Boys: considerando a tensão tangencial;
- 2) Equações do tipo Schoklitsch: considerando uma relação de descarga;
- 3) Equações do tipo Einstein: baseando em considerações estatísticas das forças de sustentação.

3.2.3.1. Equações do tipo Du Boys

DU BOYS⁽¹⁸⁾, 1879, admitiu que o sedimento se move em camadas, cada uma possuindo uma espessura. Estas camadas se movimentam em virtude da tensão crítica de cisalhamento, e a vazão sólida por unidade de largura é dada por:

$$q_s = \chi \tau (\tau - \tau_c) \quad (3.2.1)$$

onde:

q_s = vazão sólida por unidade de largura ($m^3/s.m$);

τ = tensão tangencial (Kgf/m^2)

τ_c = tensão tangencial crítica (Kgf/cm^2)

χ = coeficiente que depende das características do material de fundo.

A fórmula de Du Boys foi deduzida com base em hipóteses que à luz dos conhecimentos atuais não são corretas. Schoklitsch, 1914, mostrou que o modelo proposto por Du Boys apresentava divergências com as observações. Entretanto, pela sua simplicidade e principalmente pela boa concordância com os valores obtidos no campo e no laboratório, pode ser ainda útil em cálculos expedidos.

3.2.3.2. Equações do tipo Schoklitsch

SCHOKLITSCH⁽¹⁹⁾, 1930, sugeriu uma equação baseada em experiências laboratoriais:

$$q_s = \chi'' S^k (q - q_{cr}) \quad (3.2.2)$$

onde:

χ'' = coeficiente que depende das características do sedimento;

q_{cr} = vazão específica na qual o material começa a mover-se;

S = declividade do canal;

k = constante.

MEYER - PETER et alli⁽²⁰⁾, 1934, apresentaram uma relação empírica para grãos uniformes de areia, barita e linhita:

$$0.4 g_s^{2/3} / d = g^{2/3} S/d - 17 \quad (3.2.3)$$

onde:

g_s = vazão sólida em Kgf/s.m;

g = vazão líquida em Kgf/s.m;;

d = diâmetro médio em mm;

S = declividade do canal em m/m.

Esta equação foi desenvolvida com os dados do laboratório de hidráulica do E.T.H. (Eidgenossische Technische Hochschule), Suíça.

Conforme podemos observar na figura 3.5, tanto para dados do E.T.H. como para aqueles obtidos experimentalmente por Gilbert, verificam-se grandes desvios da equação (3.2.3) para grãos de diâmetros pequenos, o que limita a aplicabilidade desta equação somente para materiais grosseiros, excluindo os canais aluvionares.

Posteriormente, fazendo-se experiências com barita ($\gamma_s = 4,2$) e linhita ($\gamma_s = 1,25$), confirmou-se a forma geral da equação (3.2.3)

$$\frac{g_s^{2/3} S}{d} - 9,5 (\gamma_s - \gamma)^{1/3} = 0,462 (\gamma_s - \gamma)^{1/3} \frac{(g'_s)^{2/3}}{d} \quad (3.2.4)$$

onde:

g'_s = vazão sólida sob o peso de água, por unidade de tempo e largura;

$$g'_s = g_s (\gamma_s - \gamma) \gamma_s$$

MEYER - PETER e MULLER⁽⁷⁾, 1948, com base em extensos e acurados estudos experimentais, propuseram a seguinte fórmula de transpor

te sólido:

$$\frac{\gamma R_h (K/K')^{3/2} S}{d} - 0,047 (\gamma_S - \gamma) = 0.25 \frac{\sqrt{\gamma}}{g} \frac{(g'_S)^{2/3}}{d} \quad (3.2.5)$$

onde:

d = diâmetro médio da mistura;

R_h = raio hidráulico;

$(K/K')^{3/2} S$ = declividade da linha de energia corrigida;

K = coeficiente de rugosidade global de Strickler;

K' = coeficiente de rugosidade correspondente às partículas de fundo.

Esta fórmula corresponde à modificação de uma outra proposta anteriormente por Meyer - Peter et allí, em 1934, e apresenta como principal inovação a separação dos efeitos da rugosidade superficial e de forma e a conseqüente introdução do fator $(\frac{K}{K'})^{3/2}$ que afeta a tensão tangencial.

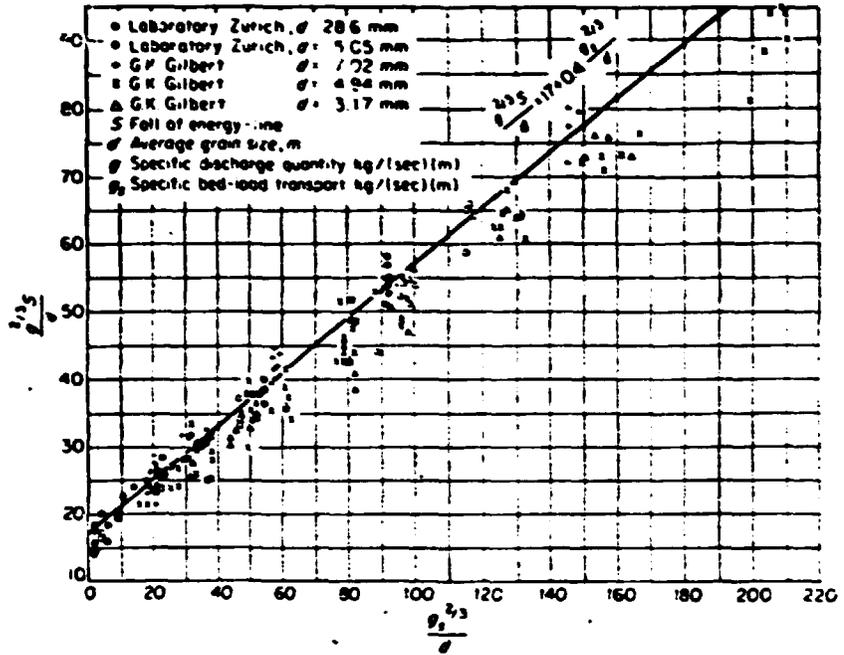
A fórmula de Meyer-Peter e Müller teve ampla aceitação, principalmente na Europa, em virtude dos novos conceitos introduzidos e da sólida base experimental.

Por outro lado, podemos notar que no fundo se trata de uma fórmula que deriva do conceito de tensão tangencial crítica.

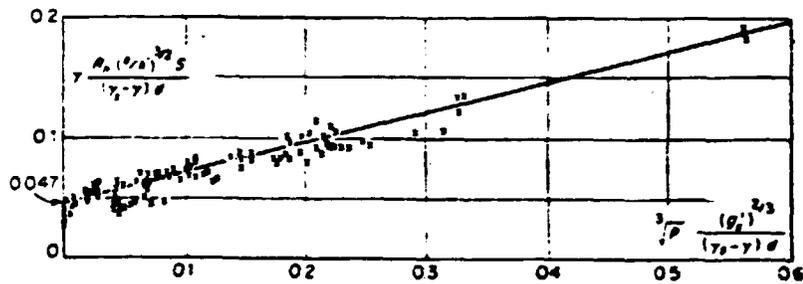
CHIEN⁽²¹⁾, 1954, mostrou que esta equação podia ser escrita na forma do tipo de Du Boys:

$$\tau - \tau_c = 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} g'_S{}^{2/3}$$

$$g'_S = \frac{1}{\left[0.25\left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3}\right]^{3/2}} (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (3.2.6)$$



(1934)



(1948)

FIGURA 3.5 - EQUAÇÕES DE MEYER - PETER et alii

3.2.3.3. Equações de Einstein

EINSTEIN⁽²²⁾, 1950, estabeleceu uma fórmula de transporte sólido, baseando-se por um lado na separação dos efeitos das resistências de forma e superficial, como fizeram Meyer - Peter e Müller, e por outro num conceito de probabilidade de movimento.

Através das observações experimentais, Einstein concluiu que:

- a) Existe uma intensa e estável troca de partículas entre o material do leito em repouso e o do leito em movimento;
- b) Os movimentos das partículas ocorrem em passos rápidos, entre meados de longos períodos de repouso;
- c) Em média, os passos dados pelas partículas carregadas são constantes, e aparentemente independem do estágio do escoamento líquido, sólido ou da composição granulométrica;
- d) A variação do transporte sólido é atribuída à mudança nos intervalos de tempo em que as partículas permanecem em repouso e à espessura da camada móvel.

Em 1942, baseando-se nesses conceitos, Einstein desenvolveu o seu método de natureza empírica. Posteriormente, em 1950, deu um tratamento analítico.

A - Modelo físico

O modelo físico idealizado por Einstein, para explicar o fenômeno, consiste em que o transporte sólido resulta da intensa troca entre as partículas que estão em movimento e as que estão em repouso. O equilíbrio destas trocas implica em que as quantidades de partículas retiradas e depositadas, por unidade de tempo e área, devam ser iguais.

A.1 - Deposição

Cada partícula com um dado diâmetro d , percorre uma distância $A_L d$, e deve ser admitido que seja depositada sobre uma área de comprimento $A_L d$ e largura unitária. O número de partículas que se depositam nesta superfície, por unidade de tempo e área é:

$$\frac{g_s i_s}{(A_L d) (\gamma_s K_2 d^3)} = \frac{g_s i_s}{A_L K_2 d^3 \gamma_s} \quad (3.2.7)$$

onde:

$g_s i_s$ = vazão sólida em peso por unidade de largura e por unidade de tempo, para um dado tamanho de grão;

$\gamma_s K_2 d^3$ = peso de uma partícula simples;

K_2 = constante de volume das partículas.

A.2 - Erosão

As partículas de diâmetro d deverão ser erodidas ou não em função de:

- a) Disponibilidade dessas partículas;
- b) Das condições do escoamento, especificamente do nível local de turbulência.

Se i_b é a fração do material de fundo com um determinado tamanho de grão, então, o número de partículas de diâmetro d na superfície de área unitária é dado por:

$$\frac{i_b}{K_1 d^2} \quad (3.2.8)$$

onde:

K_1 = constante da área do grão.

sendo:

P/t_e = probabilidade de remoção de uma partícula de diâmetro d na unidade de tempo.

Então, o número de partículas que são removidas por unidade de tempo e unidade de área pode ser expressa por:

$$\frac{i_b}{K_1 d^2} \cdot \frac{P}{t_e} \quad (3.2.9)$$

onde:

t_e = tempo consumido em cada troca.

$$t_e = \frac{d}{V_{SS}} = K_3 \sqrt{\frac{d \rho}{g(\rho_s - \rho)}} \quad (3.2.10)$$

V_{SS} = velocidade final de queda da partícula.

A.3 - Equilíbrio

Desde que as taxas de deposição e remoção estejam em equilíbrio, ou seja, que o transporte sólido esteja em regime, pode-se exprimir a relação:

$$\frac{g_s i_s}{A_L K_2 \gamma_s d^3} = \frac{i_b}{K_1 K_3 d^2} \sqrt{\frac{g(\rho_s - \rho)}{d \rho}} \quad (3.2.11)$$

Equação de H.A. Einstein (1942-1950)

A.4 - Probabilidade de troca

A probabilidade de remoção p é a fração de tempo durante a qual as forças de sustentação que agem sobre a partícula superam o seu peso. Einstein (1950), interpretou que p poderia ser usado para calcular a distância $A_L d$, na qual a partícula viaja entre locais consecutivos de repouso.

Se p é pequeno, a distância de percurso é virtualmente uma constante, e pode ser escrita:

$$A_L d = \lambda_b \cdot d \quad (3.2.12)$$

onde:

λ_b = constante de um salto simples, tendo o valor em torno de 100.

Se a probabilidade de remoção p é grande, apenas $(1-p)$ partículas se depositam após o percurso $\lambda_b d$, ao passo que p continuam em movimento. No percurso seguinte, correspondente a $2 \lambda_b d$, $p(1-p)$ se depositam, enquanto p^2 continuam em movimento.

No n -ésimo percurso, ou seja a $n \cdot \lambda_b d$, $p^{n-1}(1-p)$ se depositam, ao passo que p^n seguem o percurso.

Seguindo este raciocínio, o percurso máximo $A_L d$ para que haja uma troca total, expressa em termos de probabilidade de remoção é:

$$A_L d = \sum_{n=0}^{\infty} (1-p) p^n (n+1) \lambda_b d = \frac{\lambda_b d}{1-p} \quad (3.2.13)$$

A.5 - Equação de arrastamento

Introduzindo o conceito da equação (3.2.13) na equação de equilíbrio (3.2.11), e separando p no primeiro membro da equação, temos:

$$\frac{p}{1-p} = \frac{(K_1 K_3)}{K_2 \lambda_b} \frac{(i_s)}{(i_b)} \left(\frac{g_s}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \sqrt{\frac{1}{g_d}} \right) \quad (3.2.14)$$

ou

$$\frac{p}{1-p} = A_* \cdot \phi_* \quad (3.2.15)$$

onde:

$$A_* = \frac{K_1 K_3}{K_2 \lambda_b} \quad (3.2.16)$$

A_* = constante a ser determinada experimentalmente.

$$\phi_* = \frac{i_s}{i_b} \left(\frac{g_s}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \sqrt{\frac{1}{g_d}} \right) \quad (3.2.17)$$

ϕ_* = intensidade de transporte por arrastamento para um tamanho de grão (adimensional).

$$\phi_s = \left(\frac{i_s}{i_b} \right) \phi \quad (3.2.18)$$

São invariantes entre o modelo e o protótipo e podem ser usados em cada sistema consistente de unidades.

3.2.3.3.1. Relação empírica (1942)

A primeira formulação apresentada por H. Einstein em 1942, aplicável a sedimentos uniformes e misturas atuando como granulometria uniforme, apresenta uma certa similaridade com a equação (3.2.15), ou:

$$\frac{P}{1-P} = A_*^{0.2} \cdot \phi^{0.2} \quad (3.2.19)$$

onde:

$$A_*^{0.2} \phi^{0.2} = \left(\frac{K_1 K_2}{K_2 \lambda_b} \right)^{0.2} \frac{1}{F} \frac{g_s}{\gamma_s - \gamma} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \sqrt{\frac{1}{g \cdot d^3}} \quad (3.2.20)$$

onde:

F = Função adimensional de sedimentação, F = 0,816 para partículas de areia com $d \geq 1\text{mm}$ sedimentando em água à temperatura normal.

B - Determinação da probabilidade

A probabilidade de remoção de uma partícula do leito, como é sabido, depende da relação entre a força de sustentação e peso da partícula.

$$p = f \left(\frac{\text{peso efetivo da partícula}}{\text{sustentação hidrodinâmica}} \right) \quad (3.2.21)$$

ou

$$p = f \left[\frac{K_1 (\rho_s - \rho) g d^3}{C_L \cdot \frac{1}{2} \rho K_2 d^2 u_b^2} \right] \quad (3.2.22)$$

onde:

C_L = coeficiente de sustentação da partícula;

u_b = velocidade efetiva = velocidade na borda da subcamada viscosa, se a parede for lisa.

$$u_b \approx 11,6 u_* \approx 11,6 \sqrt{g \cdot R'_h \cdot S} \quad (3.2.23)$$

onde:

R'_h = raio hidráulico da seção em estudo em relação aos grãos.

Portanto, a equação (3.2.22) pode ser escrita:

$$p = f \left[\frac{K_2 (\rho_s - \rho) g \cdot d^3}{C_L \frac{1}{2} \rho K_1 d^2 (135 g \cdot R'_h S)} \right] \quad (3.2.24)$$

Einstein (1942), chamou:

$$\nu = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \frac{d}{S \cdot R'_h} \quad (3.2.25)$$

onde:

ν = intensidade de escoamento;

S = declividade da linha de energia do escoamento do canal.

e:

$$B_*^2 = \frac{K_2}{C_L K_1 135 \frac{1}{2}}$$

onde:

B_*^2 = constante universal de escala de ν , a ser determinada experimentalmente.

B.1 - Transporte fraco de sedimentos

Para este caso especial em que os valores de $\phi^{*2} < 0,4$, a equação (3.2.19), reduz para:

$$p = A_*^{*2} \phi^{*2} \quad (3.2.26)$$

Combinando as equações (3.2.26) e (3.2.24), temos:

$$A_*^{*2} \phi^{*2} = p = f(B_*^{*2} \cdot \tau) \quad (3.2.27)$$

As constantes A_*^{*2} , B_*^{*2} e a função f , são determinadas empiricamente. Na figura 3.6 para valores de $\phi < 0,4$, a equação da curva pode ser representada por:

$$0,465 \phi^{*2} = e^{-0,331\tau} \quad (3.2.28)$$

B.2 - Transporte forte de sedimentos

Para valores altos de ϕ ($\phi^{*2} > 0,4$), a equação (3.2.28) desvia-se consideravelmente dos dados. Este fato é de esperar, uma vez que nessas condições a hipótese da equação (3.2.28) não é mais válida. Para estes casos, a equação completa (3.2.19) deve ser utilizada, resultando na curva 2 da figura 3.6. o desvio da curva em relação aos dados observados é explicado pelo fato de que nestes estão incluídas parcelas de material em suspensão.

Posteriormente Brown (1950), revisando estes dados, sugeriu um ajuste da curva, válida para $\frac{1}{\tau} = \tau_* > 0,09$, através da expressão:

$$\phi = 40 \left(\frac{1}{\tau} \right)^3 \quad (3.2.29)$$

onde:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d} \quad (3.2.30)$$

τ_s = tensão de atrito total

As expressões (3.2.28) para $\tau_s < 0,09$ e (3.2.29) para $\tau_s > 0,09$ (figura 3.6) passaram a ser denominadas fórmulas de Einstein e Brown.

Nota-se que para valores de τ_s inferiores a $\tau_{s,cr} = 0,06$ ($\Psi = 17$), ocorre transporte apesar de pequeno, contrariando os resultados das fórmulas tradicionais que calculam o transporte em função do excedente de tensão acima da crítica.

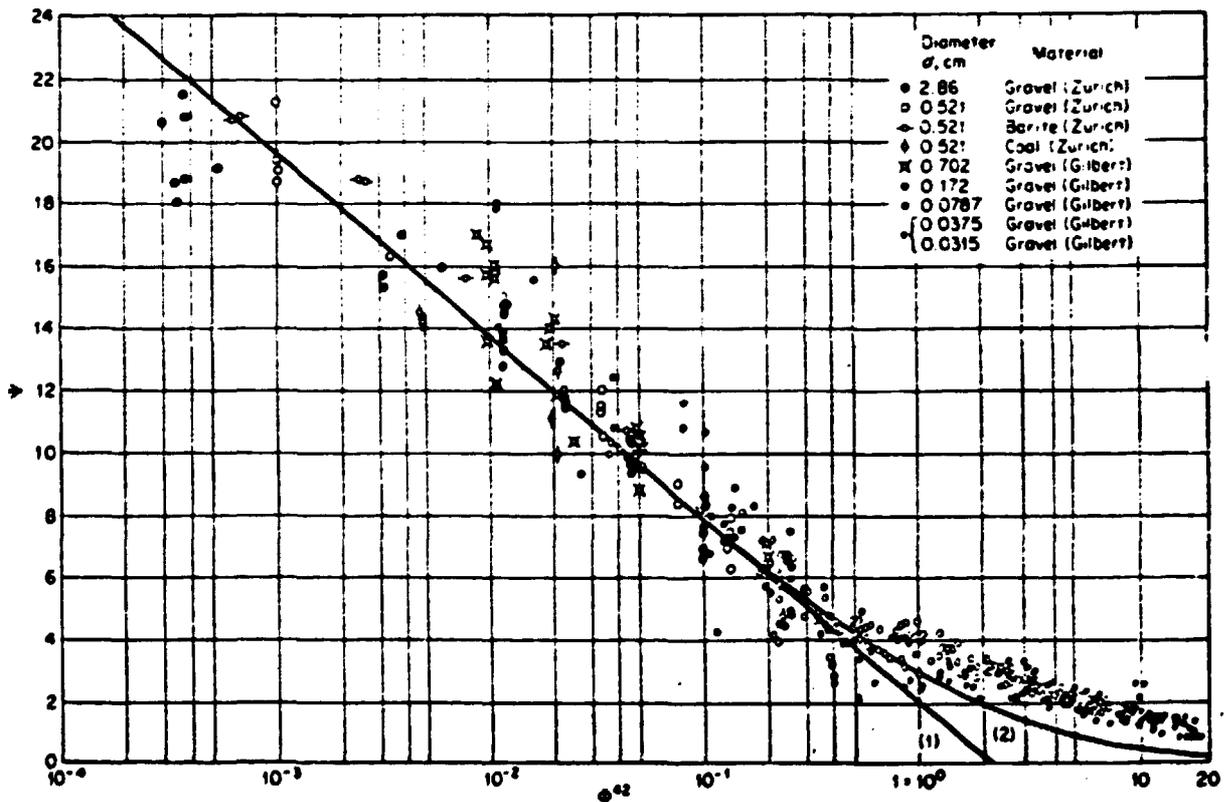


FIGURA 3.6 - EQUAÇÕES DE EINSTEIN PARA TRANSPORTE SÓLIDO DE FUNDO
FORMULAÇÃO EMPÍRICA

3.2.3.3.2. Formulação analítica (1950)

A relação empírica entre ϕ e τ apresentada por Einstein (1942) foi substituída por uma analítica em 1950. Esta nova formulação adquiriu um caráter mais abrangente, representando uma possibilidade mais generalizada para o cálculo do transporte de fundo.

C - Determinação da função da probabilidade de remoção

A probabilidade p de erosão pode ser expressa como a probabilidade de que a relação entre o peso efetivo da partícula e a força de sustentação ser menor que um.

$$1 > \frac{K_2 (\rho_s - \rho) g \cdot d^3}{C_L \frac{1}{2} \rho K_1 d^2 u_b^2 (1 + \eta)} \quad (3.2.31)$$

onde:

η = é uma função aleatória distribuída de acordo com a distribuição normal, com desvio padrão $\eta_s = 0,5$;

$C_L = 0,178$ (valor constante);

u_b = velocidade nas proximidades do leito, considerada a uma distância de $0,35 X$ do leito (teórico);

X = tamanho característico do grão da mistura.

A velocidade u_b , determinada a uma distância $0,35X$ do leito, com:

$$X = 0,77 \Delta \quad \text{se} \quad \Delta/\delta > 1,80$$

e

$$X = 1,39 \Delta \quad \Delta/\delta < 1,80$$

onde:

δ = espessura do filme viscoso

$$\delta = 11.5 \nu / u_*$$

Δ = ligado ao diâmetro da rugosidade aparente do grão.

Se u_b é expressa de acordo com a distribuição logarítmica de velocidade, temos:

$$u_b = u_* 5,75 \log \frac{(30,2) (0,35X)}{\Delta} \quad (3.2.32)$$

Substituindo na equação (3.2.31):

$$i > \frac{1}{1+n} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{d}{R'_h S} \right) \left[\frac{2K_2}{(0,178K_1) (5,75)^2} \right] \left[\frac{1}{\log^2 (10,6X/\Delta)} \right] \quad (3.2.33)$$

Com simplificações:

$$i > \frac{1}{1+n} \nu \cdot B \cdot \beta_x^{-2} \quad (3.2.34)$$

onde:

ν = intensidade de escoamento;

$$= \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \cdot \frac{d}{SR'_h}$$

B = constante de escala de ν ;

$$= \frac{2K_2}{(0,178K_1) (5,75)^2}$$

β_x^{-2} = valor a ser determinado da figura 3.7;

$$\beta_x^{-2} = \frac{1}{\log^2 (10,6 \frac{X}{\Delta})}$$

C.1 - Fatores de correção

Einstein introduziu na equação (3.2.34), o fator de correção ξ que considera o encobrimento de sedimentos finos por outros de maior tamanho ou pela camada limite laminar.

Neste caso a força de sustentação deverá ser corrigida por ξ^{-1} que é função de d/X , figura 3.3.

Um segundo fator (Y) foi introduzido para corrigir o coeficiente de sustentação, que varia nas misturas de sedimentos de diferentes rugosidades. Este fator Y é uma função de K_s/δ , figura 3.9. Para material de granulometria uniforme estes fatores são unitários. Ambos fatores foram determinados experimentalmente por Einstein et alii, em 1950.

Portanto, a equação (3.2.34) fica:

$$l > \frac{1}{1+\eta} \xi Y B' \frac{\beta^2}{\beta^2 X} \psi \quad (3.2.35)$$

onde:

$$B' = \frac{B}{\beta^2}$$

$$\beta = \log 10,6$$

e levando em conta que a sustentação é sempre positiva:

$$|(1+\eta)| > \xi Y B' \frac{\beta^2}{\beta^2 X} \psi \quad (3.2.36)$$

fazendo-se:

$$n_* = \frac{\eta}{\eta_0}$$

e, elevando ao quadrado e dividindo por η_0 , a equação 3.2.36 fica:

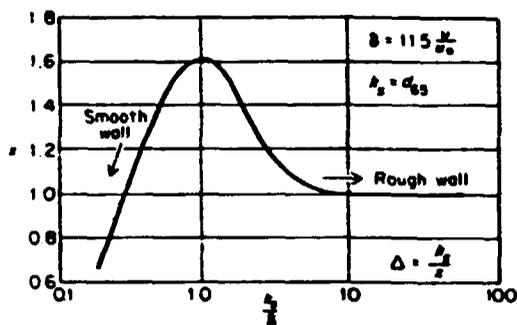


FIGURA 3.7 - FATOR DE CORREÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO LOGARÍTMICA DE VELOCIDADE

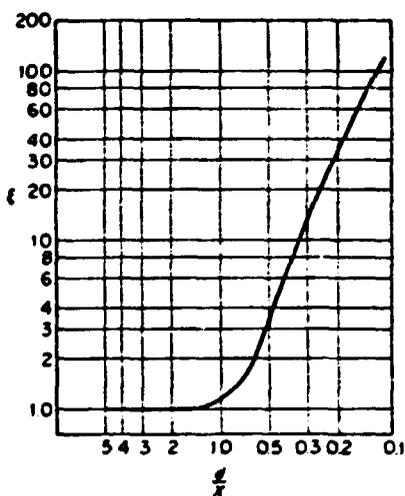


FIGURA 3.8 - FATOR DE ENCOBRIMENTO

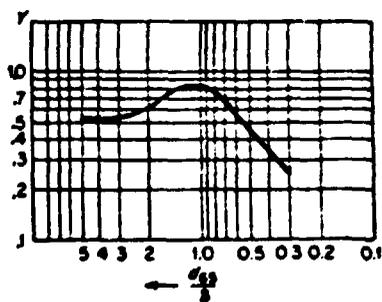


FIGURA 3.9 - CORREÇÃO DA FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

$$\left(\frac{1}{n_0} + \eta_*\right)^2 > B_*^2 \psi_*^2 \quad (3.2.37)$$

onde:

$$B_* = \frac{B'}{n_0}$$

$$\psi_* = \xi Y \left(\beta^2 / \beta_x^2\right) \psi$$

Da equação 3.2.37, o caso limite do movimento pode ser expresso por:

$$\left(\frac{1}{n_0} + \eta_*\right)^2 = B_*^2 \psi_*^2 \quad (3.2.38)$$

ou:

$$(\eta_*)_{\text{lim}} = \pm B_* \psi_* - \frac{1}{n_0} \quad (3.2.39)$$

Por outro lado, o grupo de Einstein concluiu que a distribuição da probabilidade de erosão está de acordo com a lei de Gauss:

$$p = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-B_* \psi_* - 1/n_0}^{+B_* \psi_* - 1/n_0} e^{-t^2} dt \quad (3.2.40)$$

onde:

t = variável de integração

C.2 - Transporte de sedimento

Combinando a equação (3.2.15) com a (3.2.40), resulta a segunda da equação de transporte de sedimentos por arrastamento sugerido por Einstein (1950):

$$1 - \frac{1}{\sqrt{v}} \left[\begin{array}{l} + B_* \psi_* - 1/\eta_* \\ - B_* \psi_* - 1/\eta_* \end{array} \right] e^{-t^2} dt = p = \frac{A_* \phi_*}{1 + A_* \phi_*} \quad (3.2.41)$$

onde:

A_* , B_* e η_* são constantes universais obtidas experimentalmente. A relação entre ϕ_* e ψ_* é mostrada na figura 3.10. Para sedimentos uniformes as constantes A_* e B_* foram obtidas utilizando os dados de Gilbert (1914) e de Meyer-Peter et alli (1934):

$$A_* = \frac{1}{0,023} = 43,5$$

$$B_* = \frac{1}{7} = 0,143$$

$$\eta_* = 0,5 \text{ (desvio padrão)}$$

O cálculo do transporte sólido, como foi visto, é feito individualmente para cada faixa granulométrica (i_s/i_b) da mistura, e o transporte total por arraste é determinado pela soma destes cálculos parciais. Entretanto, para misturas com predominância de sedimentos finos, o transporte total da mistura pode ser determinado diretamente adotando-se o d_s como o diâmetro efetivo.

C A P Í T U L O 4

TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO UTILIZANDO TÉCNICA RADIOISOTÓPICA

4. TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO UTILIZANDO TÉCNICA RA DIOISOTÓPICA

4.1. Generalidades

O uso de sedimentos marcados com traçadores radioativos, para o estudo da dinâmica do leito de rios ou de litoral marinho, teve um incremento realmente significativo, no campo da sedimentologia, a partir de 1972, por se constituir em uma técnica relativamente simples, de baixo custo e principalmente por fornecer resultados precisos.

O trabalho de campo foi realizado no Rio Paraná no posto denominado de seção Guaira. Este posto sedimentométrico fica localizado no canal esquerdo, a 1 km a montante da cidade de Guaira no Estado do Paraná, conforme mostrado na figura 4.1.

Na seção Guaira, o Rio Paraná é constituído de dois canais, Canal Esquerdo e o Canal Direito. O Canal Esquerdo, que margeia o Estado do Paraná, possui uma largura de 1070m (na seção Guaira e por onde passa uma vazão média da ordem de 2500 m³/s. O canal direito margeia o Estado do Mato Grosso, possui a largura de 760m e vazão média da ordem de 5000 m³/s. A ilha que divide o Rio Paraná em dois canais denomina-se Ilha Grande.

Os dados apresentados neste trabalho fazem parte de um estudo realizado para Itaipu/Binacional, no período de 1977 a 1979, para a avaliação do montante de sedimentos que poderia assorear o reservatório de Itaipu.

O assoreamento de um reservatório é consequência da deposição de todo material sólido transportado pelo curso de água, por suspensão e por arraste de fundo. Quando a vazão sólida é considerável, a vida útil do reservatório pode ser acentuadamente reduzida. Por isso, é importante conhecermos essa vida útil para se prever, da melhor forma possível a necessidade das obras de engenharia destinadas à atenuação do transporte sólido.

O transporte de sólidos pelo Rio Paraná se manifesta durante todo período do ano. O crescente desmatamento das terras agrícolas do Estado do Paraná e da Região Noroeste do Estado de São Paulo contribui para um aumento acentuado da erosão. Assim, analisando-se o perfil longitudinal do Rio Paraná, de Jupiá até Guaira, notam-se duas situações distintas, a saber:

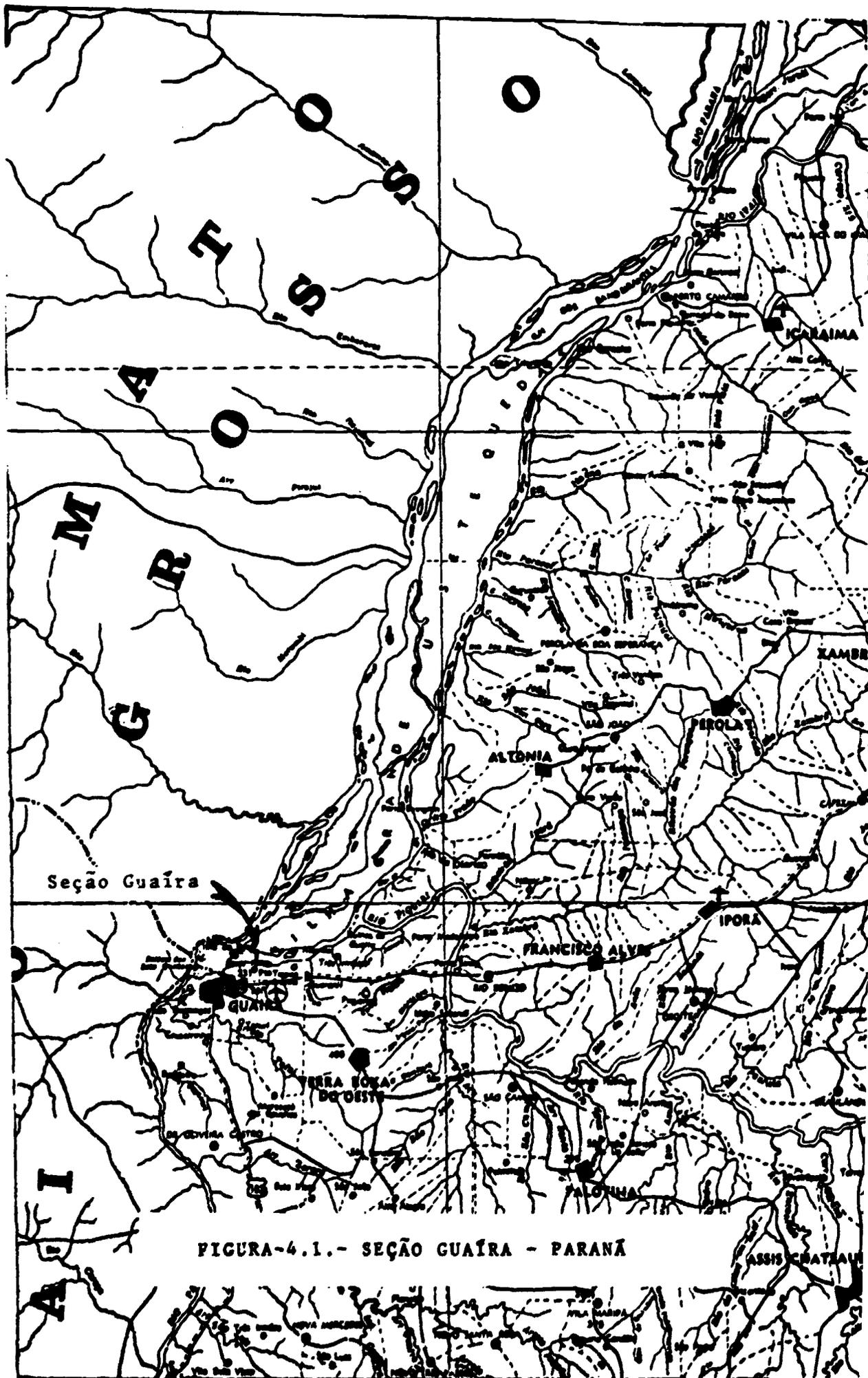
- a) A coloração das águas do lado da margem esquerda apresentam-se sempre com aspecto barrento, cuja tonalidade varia com a estação do ano;
- b) A coloração das águas que banham a margem direita é sempre clara, na maior parte do ano.

Realizaram-se 6 campanhas de medição de transporte sólido por arraste de fundo utilizando radioisótopo, obedecendo o seguinte cronograma:

- 1ª campanha: 12/12 a 20/12/77 - margem direita (MD);
- 2ª campanha: 17/05 a 12/06/78 - margem direita (MD);
- 3ª campanha: 28/06 a 20/07/78 - margem direita (MD);
- 4ª campanha: 13/09 a 04/10/78 - margem direita (MD)
margem esquerda (ME);
- 5ª campanha: 10/11 a 09/12/78 - margem direita (MD)
margem esquerda (ME);
- 6ª campanha: 26/12/78 a 26/01/79 - margem direita (MD)
margem esquerda (ME).

4.2. Descrição Geral da Área de Interesse

O estudo sedimentométrico realizou-se no Rio Paraná na Seção Guaira, seção esta localizada a 1 km a montante da cidade de Guaira no Estado do Paraná. (Figura 4.1)



A área de interesse para a interpretação racional dos dados obtidos nas medições do transporte sólido carregado pelas águas do Rio Paraná, abrange áreas pertencentes às sub-bacias dos rios Parapanema, Ivaí e Piqueri.

O rio Paraná inicia seu curso na confluência dos rios Parnaíba e Grande, possuindo até Jupiá, Guaira e o Sítio da Barragem de Itaipú, 474.000 km², 300.000 km² e 920.000 km², respectivamente. A jusante de Jupiá, a partir de onde se localizam as principais fontes de sólidos hidrotransportados que chegam até Guaira, o Paraná recebe a contribuição dos rios Parapanema, Ivaí e Piqueri, com bacias hidrográficas comportando áreas de 99.900 km², 35.800 km² e 23.400 km², respectivamente.

O assoreamento de um curso de água é consequência da erosão que se verifica nas terras que constituem sua bacia de drenagem e no próprio leito. A erosão se manifesta a partir do início de aproveitamento do solo, para desenvolvimento de culturas agrícolas que modificam o equilíbrio do ecossistema.

O desmatamento provoca a destruição da capacidade reguladora da floresta, que é substituída por atividades antrópicas, concentradoras de energia hídrica, que destrói as camadas superficiais do solo.

Estima-se que o aproveitamento do solo, em toda área de interesse, esteja distribuído assim:

- vegetação natural: 25%;
- agricultura: 45%;
- pastagem: 30%.

A agricultura ocupa a maior área dos solos.

A rápida mecanização da lavoura e a preparação da terra em épocas que coincidem com o início do regime das chuvas têm aumenta

do, consideravelmente, o ritmo da erosão.

4.3. Marcação dos Sedimentos

O material retirado do local de ensaio foram marcadas com ^{198}Au , pelo método de deposição superficial. O método empregado para marcação da areia usando ^{198}Au é uma combinação do método de Peter sen⁽²³⁾ (tratamento com cloreto estanhoso) e de Campbell⁽²⁴⁾ (tratamento com prata) após o pré-tratamento com ácido nítrico e soda. Por este método, é possível a deposição superficial de 125mg de ouro por quilograma de sedimento, com uma eficiência de deposição de 95%, usando a solução de ácido cloroáurico.

Inicialmente lavou-se a areia em água corrente, eliminando-se todas as impurezas em suspensão, e aplicou-se a seguinte metodologia para 1 quilograma de areia:

- a) destruição dos carbonatos e oxidação dos materiais orgânicos, utilizando-se uma solução de ácido nítrico (HNO_3) a 10%, durante 15 minutos a temperatura ambiente;
- b) lavagem com água até a neutralização do sobrenadante;
- c) ataque da sílica utilizando-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 5%, em ebulição, durante 30 minutos;
- d) lavagem com água até a neutralização do sobrenadante;
- e) secagem em estufa durante 12 horas a 100°C ;
- f) adsorção do estanho pelo sedimento, utilizando-se uma solução de cloreto estanhoso e ácido clorídrico (250g de $\text{Cl}_2\text{Sn}, 2\text{H}_2\text{O}$ em 120 cm^3 de HCl), durante 20 minutos, na temperatura ambiente;

- g) lavagem com água até o desaparecimento do estanho hidrolisado não absorvido pelo sedimento;
- h) deposição da prata sobre o sedimento utilizando-se uma solução de AgNO_3 (750mg de Ag em 100 cm^3 de água), uma solução redutora de sulfato de hidrazina (18 cm^3 a 1,25%) e 2 cm^3 de piridina, durante 5 minutos, na temperatura ambiente;
- i) o sedimento é conservado e transportado em água destilada. A marcação com ouro deve ser feita, de preferência, logo após a operação de prateação;
- j) deposição do ouro radioativo sobre o sedimento, utilizando-se uma solução de ácido cloráurico (HAuCl_4), com máximo 250 mg de ouro, durante 3 minutos, à temperatura ambiente.

4.3.1. Ensaio de avaliação do grau de fixação do ^{198}Au

Tomaram-se 100 mg de Au, em 50 ml de HCl , 1N e 5 alíquotas de 10g de areia prateada. Para cada frasco, contendo areia, adicionou-se 2,4,6,10 e 15ml de HAuCl_4 .

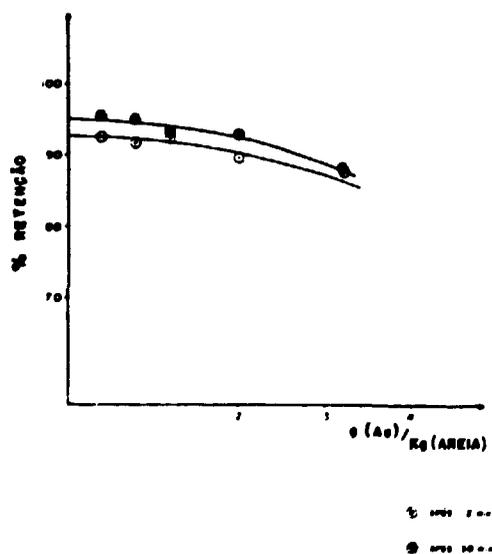
Considerando-se os tempos de retenção de 2 e 30 minutos, mediu-se a atividade do sobrenadante, em contador de cintilação, tipo "poço". Os resultados são mostrados na tabela 4.1 e na figura 4.2.

4.4. Imersão dos Sedimentos Marcados

A areia marcada com ^{198}Au foi transferida para o injetor (Figura 4.3). O injetor constitui-se de um recipiente-blindagem em cujo interior é preso um saco de polietileno para o armazenamento da areia. Quando o injetor toca no fundo o recipiente bascula e deposita a areia marcada no leito do rio.

TABELA 4.1 - ENSAIO DE FIXAÇÃO DO ^{199}Au PELA AREIA

FRASCO	HAuCl ₄ , (mL)	g/kg	RETENÇÃO (%)	
			2 minutos	30 minutos
1	2	0,4	92,8	95,5
2	4	0,8	91,7	95,0
3	6	1,2	92,3	92,9
4	10	2,0	89,7	93,1
5	15	3,0	87,6	37,6

FIGURA 4.2 - GRAU DE RENDIMENTO DA FIXAÇÃO DO ^{199}Au , NOS GRÃOS DE AREIA

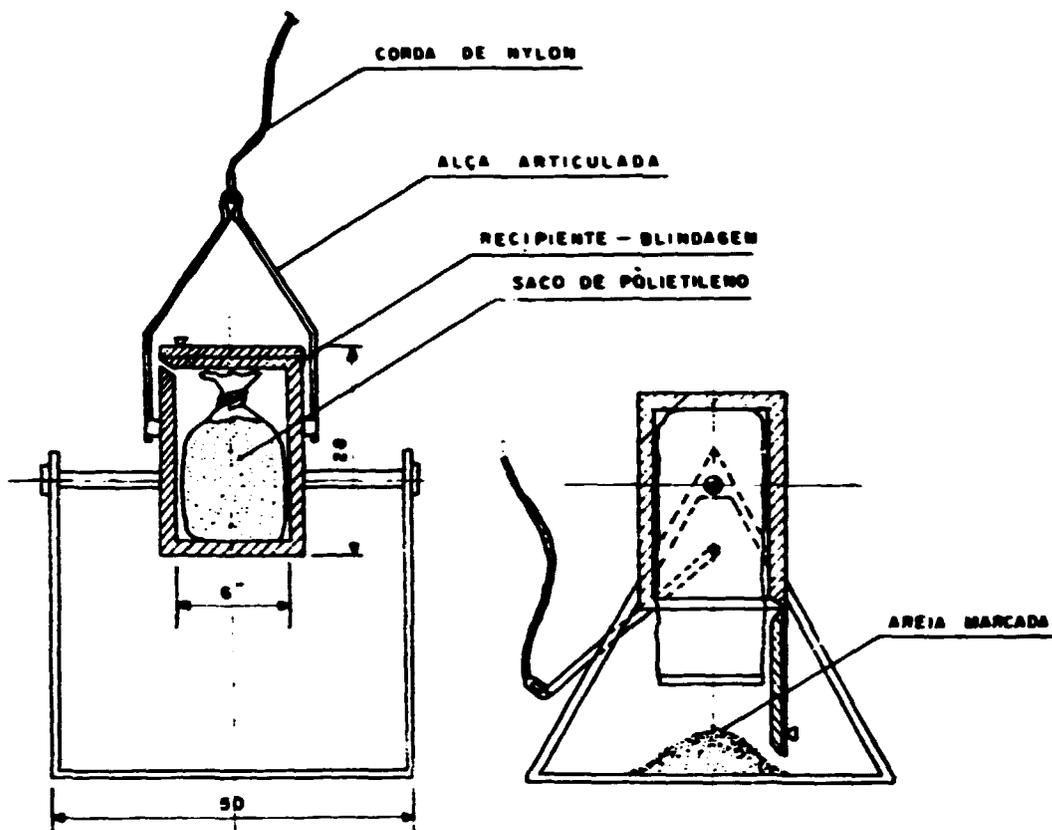


FIGURA 4.3 - INJETOR DE AREIA MARCADA

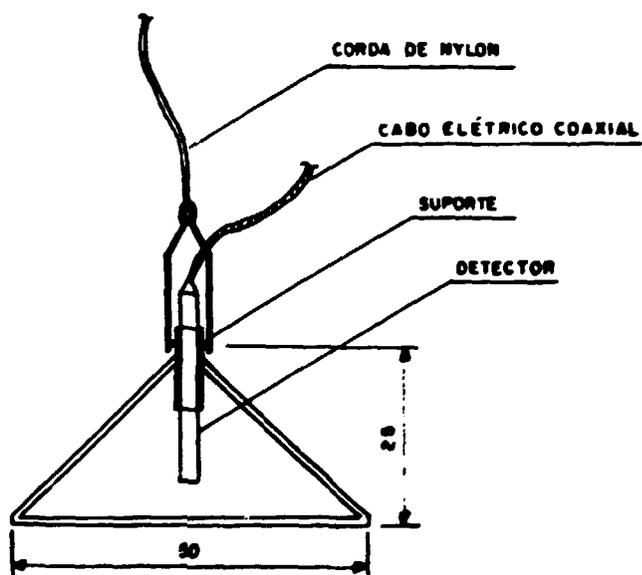


FIGURA 4.4 - SUPORTE DO DETECTOR

4.5. Detecção dos Sedimentos Marcados

O sistema de detecção dos sedimentos marcados constitui-se basicamente em uma sonda cintiladora com cristal de NaI (Tl) de 1" x 1" acoplada a um escalímetro de marca BASC.

A interação da radiação gama com o cristal de NaI (Tl) produz uma cintilação que amplificada numa válvula fotomultiplicadora e posteriormente transformada em corrente elétrica permite que os pulsos sejam lidos em termos de contagens por minuto.

Para mantermos a mesma geometria de medição, foi utilizado um suporte (Figura 4.4) com base de 50 x 50cm, e de forma que a sonda se posicionasse numa geometria ótima. No caso, a altura entre a sonda e a superfície do leito foi de 5cm.

Para este estudo utilizou-se a técnica de detecção estática, onde as leituras foram realizadas ponto a ponto ao longo das seções transversais a jusante de lançamento do sedimento marcado. Os pontos de medição foram marcados na plataforma flutuante em espaços de 50cm, e o posicionamento deste flutuante realizou-se por meio de dois teodolitos, sendo um para o alinhamento e o outro para a leitura do ângulo.

A detecção da radioatividade, ao longo das seções de medição permite obter curvas de isoatividade, semelhantes a curvas de nível. O deslocamento do centro de gravidade dessas curvas corresponde à velocidade média de caminhamento da camada móvel do material de fundo.

4.5.1. Ensaios preliminares

Altura leito-sonda

A taxa de contagem representa a concentração de grãos radioativos, em função da distância leito-sonda detectora.

Depositou-se no tanque de calibração, uma massa conhecida de areia radioativa, uniformemente distribuída sobre uma camada de 1 cm de areia inativa e recoberta por uma coluna de água com 40 cm de altura. Determinou-se a curva de variação da taxa de contagem em função da altura leito-sonda, conforme representada na figura 4.5.

Área sensível da sonda detectora

Determinou-se a área sensível da sonda detectora considerando-se uma altura leito-sonda detectora de 5cm, e admitindo-se uma fonte puntiforme de ^{198}Au com $5\mu\text{Ci}$ ($1,85 \times 10^5 \text{ Bq}$) aproximadamente. O ensaio foi realizado em um tanque com 40 cm de lâmina de água.

Determinou-se a curva de variação da taxa de contagem variando-se horizontalmente a distância fonte-sonda detectora, conforme mostrada na figura 4.6.

De acordo com o gráfico a da figura 4.6, podemos concluir que 98%, aproximadamente, da atividade detectada encontra-se em uma área cujo diâmetro é 0,25m, concêntrica ao centro geométrico da sonda detectora.

4.6. Análise e Processamento dos Dados Coletados

Correção do decaimento radioativo

As atividades medidas do ^{198}Au foram corrigidas quanto ao decaimento radioativo por intermédio da seguinte equação:

$$A_0 = A e^{\lambda t} \quad (4.1)$$

onde:

A_0 = atividade corrigida;

A = atividade lida;

$\lambda = \frac{0,693}{T}$, constante de decaimento radioativo;

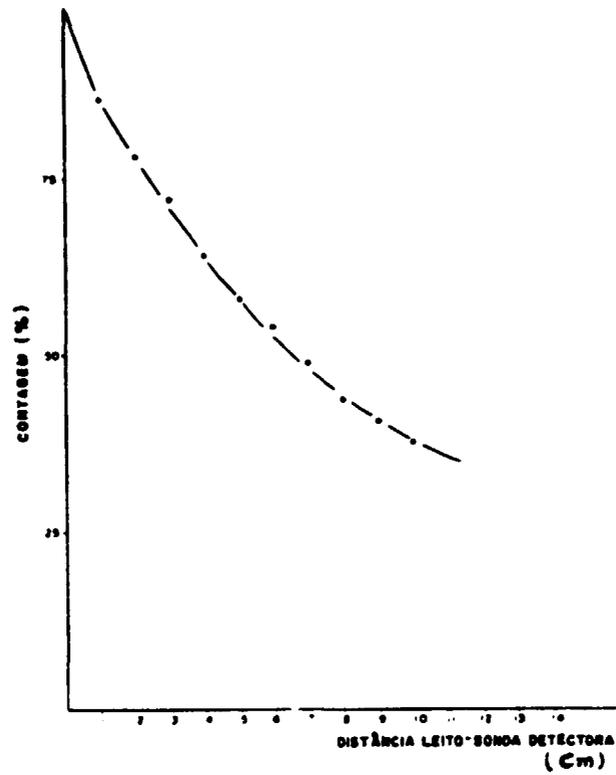
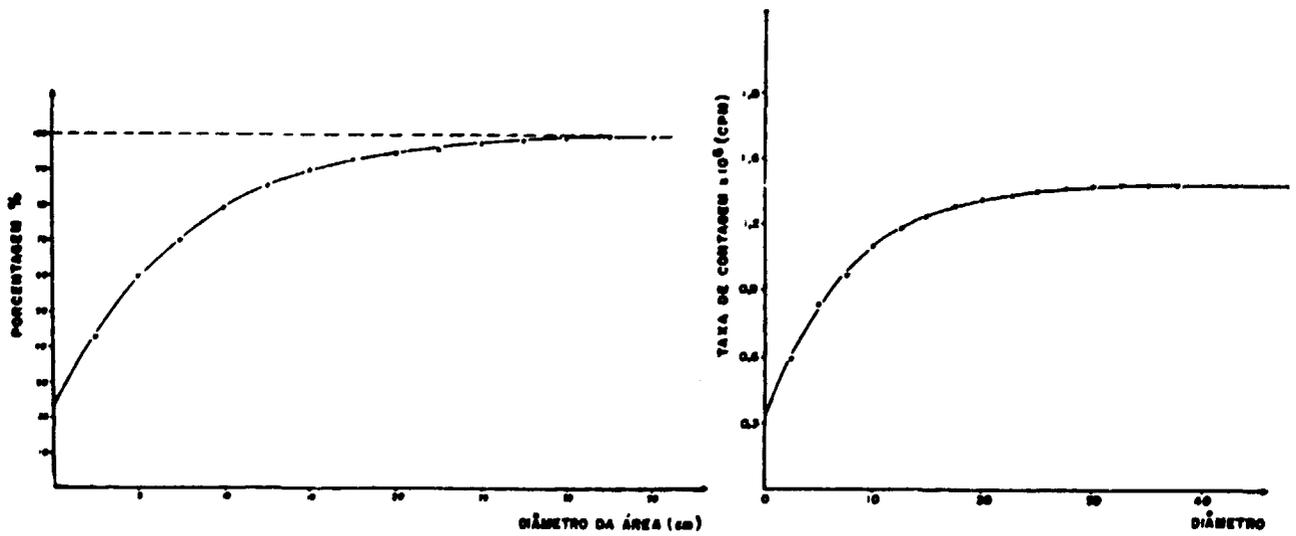


FIGURA 4.5 - ALTURA LEITO - SONDA



a - Representação da curva da área sensível do detector em função do deslocamento horizontal de uma fonte de ^{198}Au .

b - Representação da curva da área sensível do detector em função do deslocamento horizontal de uma fonte de ^{198}Au .

FIGURA 4.6 - ÁREA SENSÍVEL DO DETECTOR

t = tempo transcorrido entre a imersão e as detecções correspondentes;

$T^{1/2}$ = meia vida do radioisótopo, 2,7 dias para o ^{199}Au .

Velocidade média de transporte

Inicialmente, procedeu-se a integração da atividade total de cada uma das seções transversais, isto é:

$$A_s = \int A(l) \cdot dl \quad (\text{cpm.m}) \quad (4.2)$$

onde:

A_s = atividade integrada;

l = largura da seção transversal;

$A(l)$ = atividade correspondente à distância l , tomada ao longo da seção transversal.

Obtidos todos os valores de A_s , levando-se em conta todas as seções e todo o período de medição, desenharam-se curvas que representam a atividade integrada longitudinalmente, ou seja: A_s em função de x .

Assim, a velocidade média de transporte pode ser calculada em função da variação do centro de gravidade das curvas cpm.m x distância (Figura 4.7).

O centro de gravidade de cada figura foi calculado de acordo com a relação seguinte:

$$x_g = \frac{\int A_{s1} \cdot x_1 \cdot dx}{\int A_{s1} \cdot dx}$$

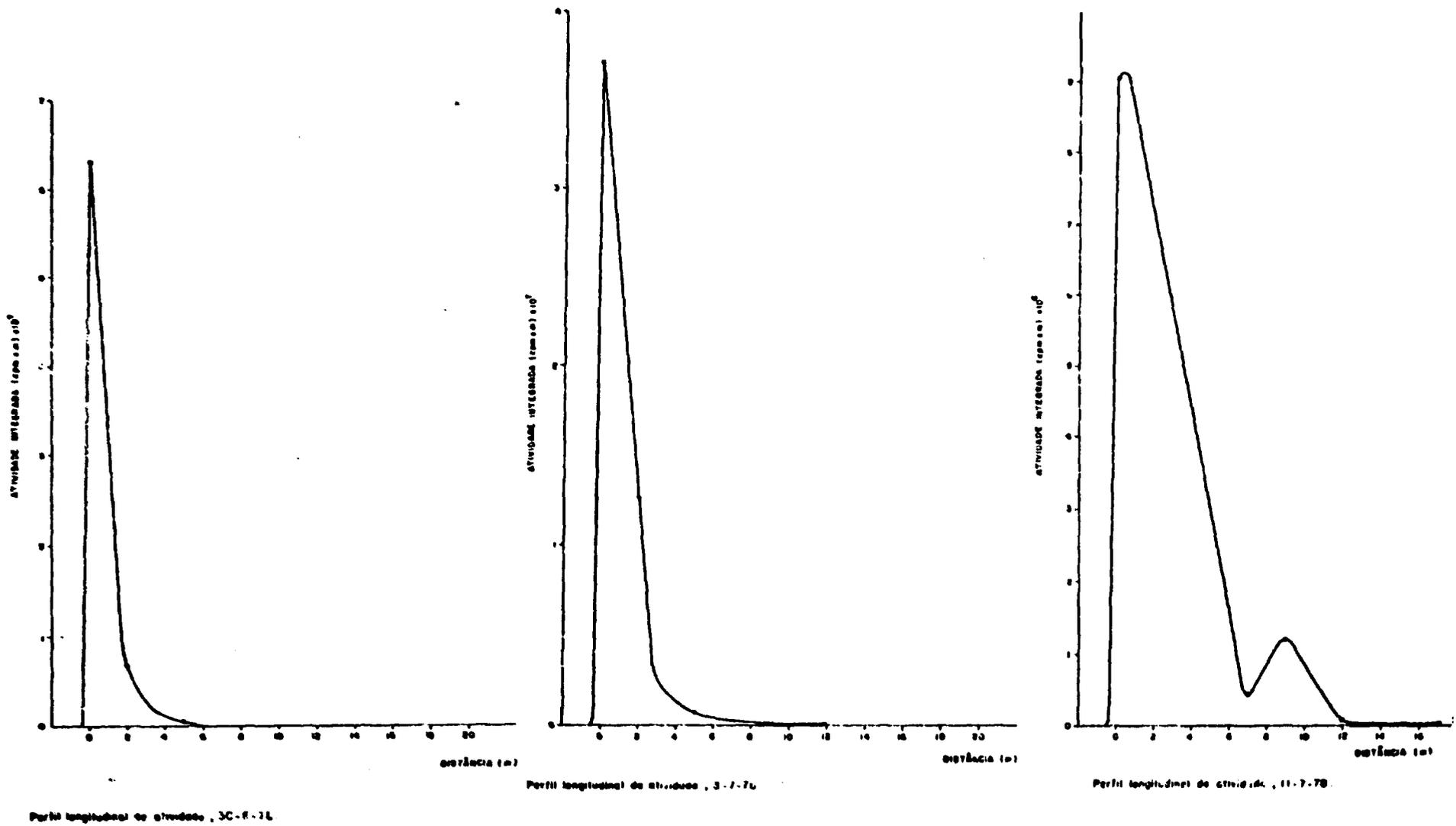


FIGURA 4.7 - ATIVIDADE INTEGRADA LONGITUDINALMENTE

onde:

x_g = abscissa do CG;

A_{s_i} = atividade integrada na seção transversal, distante x_i da seção de imersão;

x_i = distância entre o ponto de injeção e a seção transversal considerada.

A partir dos deslocamentos do CG em função do tempo podemos calcular a velocidade média de transporte.

4.7. Calibração dos Equipamentos de Medição

Para a calibração dos equipamentos de medição foi utilizado um tanque de madeira, com dimensões de 60 x 60 x 50cm, devidamente impermeabilizado, onde foram colocados sedimento e água.

A massa de areia radioativa padrão, usada na calibração, corresponde a uma pequena alíquota (aproximadamente 20g) retirada da massa total injetada.

Inicialmente, mediu-se a radiação natural de fundo (background), levando-se em conta uma camada com espessura de um centímetro de areia inativa, uniformemente distribuída no fundo do tanque. Posteriormente, adicionou-se a areia radioativa e homogeneizou-se a mistura. Medindo-se assim, a concentração de radioatividade com a mesma geometria utilizada no campo.

Repetiu-se a medição variando-se a concentração de areia marcada. Esta variação de concentração foi obtida acrescentado 1cm de areia inativa e homogeneizando mecanicamente. Desta forma, obteve-se uma curva de calibração espessura de areia versus concentração de radioatividade (Figuras 4.10 e 4.11).

4.8. Exemplo de Cálculo da Vazão Sólida por Arraste de Fundo

a) Dados de calibração obtidos em laboratório

- Massa de areia marcada (padrão), (M):

$$M = 15,43\text{g}$$

- Área de calibração (s):

$$s = 0,36 \text{ m}^2$$

- Atividade distribuída na camada de espessura zero (A_{eo}):

$$A_{eo} = 2,45 \times 10^6 \text{ cpm}$$

- Constante do equipamento (k):

$$k = \frac{A_{eo} \times s}{M} \quad (\text{cpm/g/m}^2) \quad (4.4)$$

$$k = \frac{2,45 \times 10^6 \times 0,36}{15,43} = 5,72 \times 10^4 \frac{\text{cpm.m}^2}{\text{g}}$$

Representa-se na figura 4.10 a curva de calibração do detector, para o cálculo da espessura da camada móvel de sedimentos.

b) Dados de campo

- Massa de sedimentos radioativos imersa (m):

$$m = 1100\text{g}$$

- Atividade total para espessura zero (A_{to}):

$$A_{to} = \frac{m.k}{s} \quad (4.5)$$

onde:

$S = \text{área da camada móvel}$

$$A_{to} = \frac{1.100 \times 5,72 \times 10^6}{S} = \frac{6.292 \times 10^7}{S} \text{ cpm}$$

- Atividade real detectada (A_r) (Figura 4.8):

$$A_r = \frac{1}{S} \int A_{si} dx \quad (\text{cpm}) \quad (4.6)$$

Nesta campanha de medição, obtivemos o valor médio para $\int A_{si} dx$:

$$\overline{\int A_{si} dx} = 4,31 \times 10^7 \text{ cpm.m}^2$$

portanto:

$$A_r = \frac{4,31 \times 10^7}{S} \text{ cpm}$$

- Relação atividade real detectada e atividade para espessura zero (f):

$$f = \frac{A_r}{A_{to}} = \frac{4,31 \times 10^7}{6.292 \times 10^7} = 0,68$$

- Espessura média da camada móvel (e_m):

Entrando na curva de calibração da figura 4.11, temos:

$$e_m = 1,4 \text{ cm}$$

- Velocidade média de transporte (V_m):

A partir da curva de variação do CG em função do tempo, figura 4.9, temos:

$$V_m = 0,37 \text{ m/dia}$$

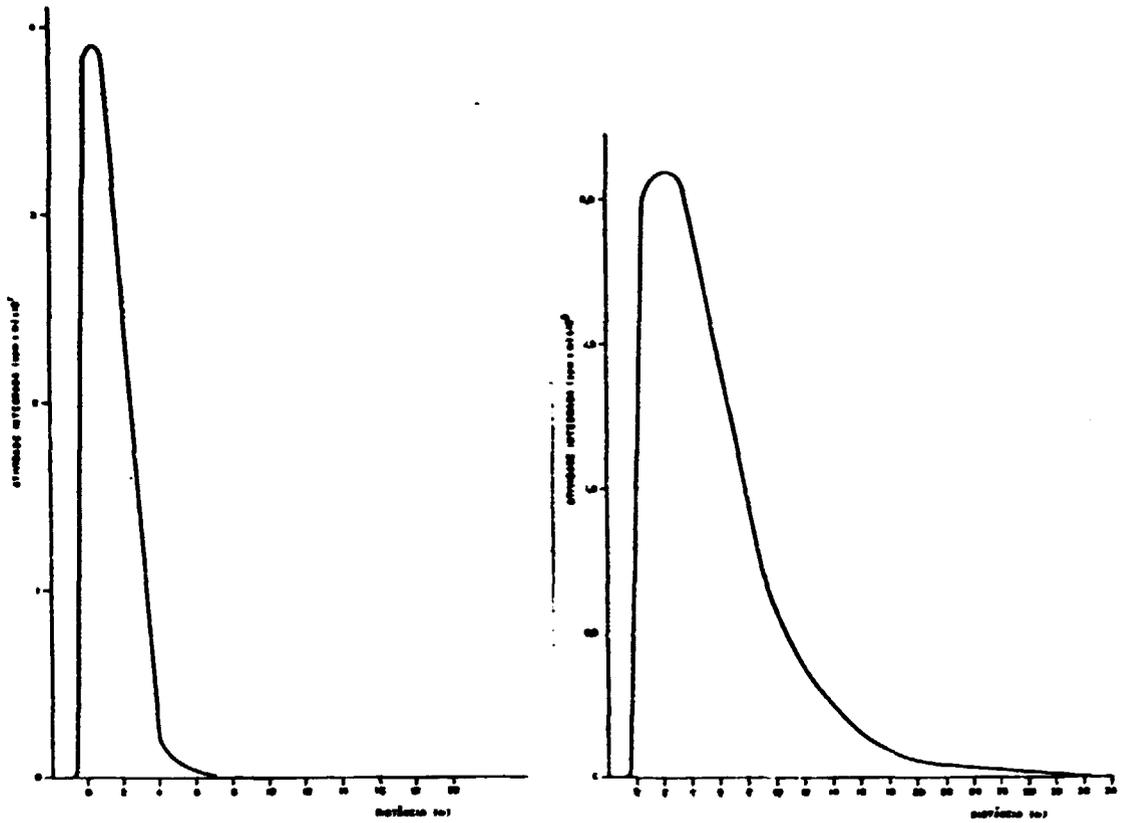


FIGURA 4.8 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE

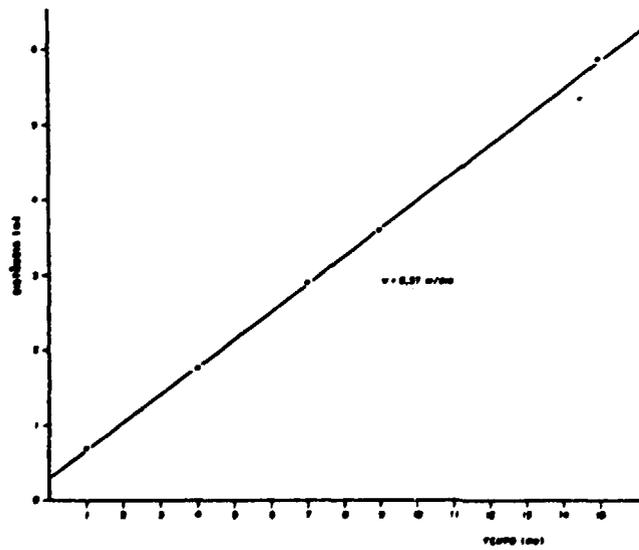


FIGURA 4.9 - VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE

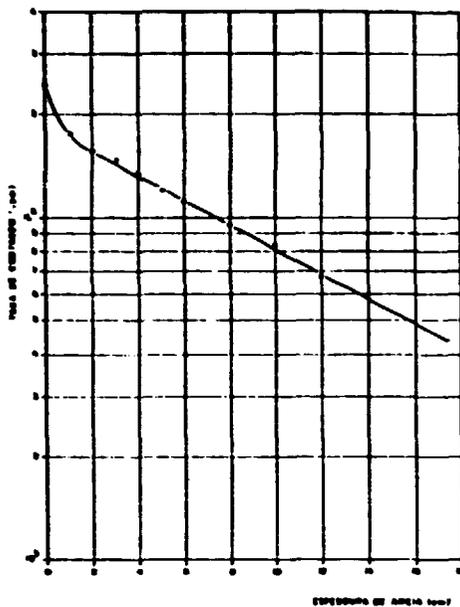


FIGURA 4.10 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR

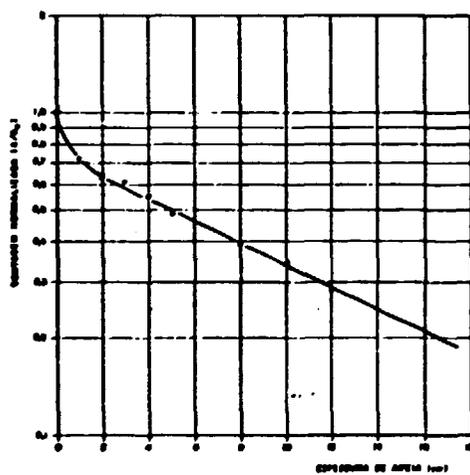


FIGURA 4.11 - CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA

- Vazão sólida por unidade de largura (g_s):

$$g_s = 0,014 \times 0,37 \times 1.700 = 9 \text{ kgf/m.dia}$$

4.9. Resultados Obtidos

Após 6 campanhas de medição no canal esquerdo, obtivemos 11 valores de vazão sólida de fundo, para vazão líquida variando de 1491 m³/s a 4733 m³/s. As medições foram realizadas a 100m da margem direita e 200m da margem esquerda.

Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 4.2 e 4.3.

TABELA 4.2 - TRANSPORTE SÓLIDO DE FUNDO - RIO PARANÁ
CANAL ESQUERDO - 100m da Margem Direita

PERÍODO	\bar{H} (m)	\bar{V} (m/d)	\bar{e} (cm)	Q_{sfm} (ton/d.m)	Q_L (m ³ /s)	Q_{Lm} (m ³ /s.m)
12.12.77 a 20.12.77	2,32	21,3	17,3	6,170	4.158	3,9
19.05.78 a 01.06.78	1,34	1,33	4,2	0,095	1.913	1,8
14.09.78 a 30.09.78	1,49	1,40	4,8	0,114	2.223	2,1
19.11.78 a 06.12.78	1,30	0,56	7,0	0,070	1.833	1,7
19.11.78 a 06.12.78	1,34	1,01	7,0	0,120	1.913	1,8
05.01.79 a 19.01.79	1,59	2,14	13,6	0,495	2.437	2,3

TABELA 4.3 - TRANSPORTE SÓLIDO DE FUNDO - RIO PARANÁ
CANAL ESQUERDO - 200m da Margem Esquerda

PERÍODO	\bar{H} (m)	\bar{V} (m/d)	\bar{e} (cm)	Q_{sfm} (ton/d.m)	Q_l (m ³ /s)	Q_{lm} (m ³ /s.m)
30.06.78 a 15.07.78	1,24	0,37	1,4	0,009	1.714	1,6
13.09.78 a 30.09.78	1,49	1,34	6,0	0,187	2.223	2,1
19.11.78 a 05.12.78	1,30	0,52	4,4	0,040	1.833	1,7
19.11.78 a 05.12.78	1,34	0,67	4,4	0,050	1.913	1,8
05.01.79 a 19.01.79	1,59	3,31	8,6	0,484	2.437	2,3

onde:

\bar{H} = cota da régua limnométrica da secção;

\bar{V} = velocidade média de transporte;

\bar{e} = espessura média de transporte;

q_{sfm} = vazão sólida por arraste de fundo por unidade de largura;

Q_l = vazão líquida;

Q_{lm} = vazão líquida por unidade de largura.

A partir dos resultados obtidos foram traçadas as seguintes curvas de correlação, e definidas as suas respectivas equações:

a) Vazão sólida por unidade de segmento em função da vazão líquida por unidade de segmento, do canal esquerdo:

$$Q_{sfm} = 2,670 \times 10^{-3} Q_{lm}^{0,720} \quad (4.9.1)$$

onde:

Q_{sfm} = vazão sólida de fundo por unidade de segmento
(t/d.m);

Q_{lm} = vazão líquida por unidade de segmento ($m^3/s.m$);

r^2 = 0,95

r = 0,97

r = coeficiente de correlação.

Gráfico correspondente na figura 4.12.

b) Vazão sólida de fundo no Canal Esquerdo em função da vazão líquida:

$$Q_{sf} = 8,528 \times 10^{-10} Q_l^{0,777} \quad (4.9.2)$$

onde:

Q_{sf} = vazão sólida de fundo (t/d);

Q_l = vazão líquida (m^3/s);

r^2 = 0,94

r = 0,97

Da figura 4.13 a figura 4.79 são mostrados os perfis longitudinais de atividade, velocidade de deslocamento do centro de gravidade, curva de calibração e curvas de isoatividade, obtidas durante as 6 campanhas de medição de descarga sólida por arraste de fundo.

4.9.1. Dados complementares

Durante o período de estudos foram levantados os parâmetros hidráulicos e sedimentológicos, tais como: vazão líquida, transporte de sedimentos em suspensão, declividade da linha de água, etc.

a) Vazão líquida em função da cota limnimétrica (Q_L):

$$Q_L = 1.264,74 H^{1,1111} \quad (4.9.3)$$

onde:

Q_L em m^3/s ;

H em m.

b) Velocidade média de escoamento em função da vazão líquida (u) (Figura 4.80):

$$u = 4,85 \times 10^{-3} Q_L^{0,66} \quad (4.9.4)$$

onde:

u em m/s;

Q_L em m^3/s .

c) Largura média do canal em função da vazão líquida (L) (Figura 4.80):

$$L = 994,95 Q_L^{0,1111} \quad (4.9.5)$$

onde:

L em m;

Q_L em m^3/s .

d) Vazão sólida média em suspensão em função da vazão líquida (Q_{SSM}) (Figura 4.81):

$$Q_{SSM} = 2,385 \times 10^{-3} Q_L^{2,176} \quad (4.9.6)$$

onde:

Q_{SSM} em t/d.m;

Q_L em m^3/s .

e) Declividade da linha de água em função da vazão líquida (S) (Figura 4.82):

$$S = 6,256 \times 10^{-6} Q_L^{0,220} \quad (4.9.7)$$

onde:

S em m/m;

Q_L em m^3/s .

f) Curva duração-freqüência (Figura 4.83).

g) Curva da tensão tangencial de arraste (τ) em função da vazão líquida (Q_L) (Figura 4.84).

h) Curvas granulométricas da Seção Guaira (Figura 4.85).

i) Seção transversal do Canal Esquerdo (Figura 4.86).

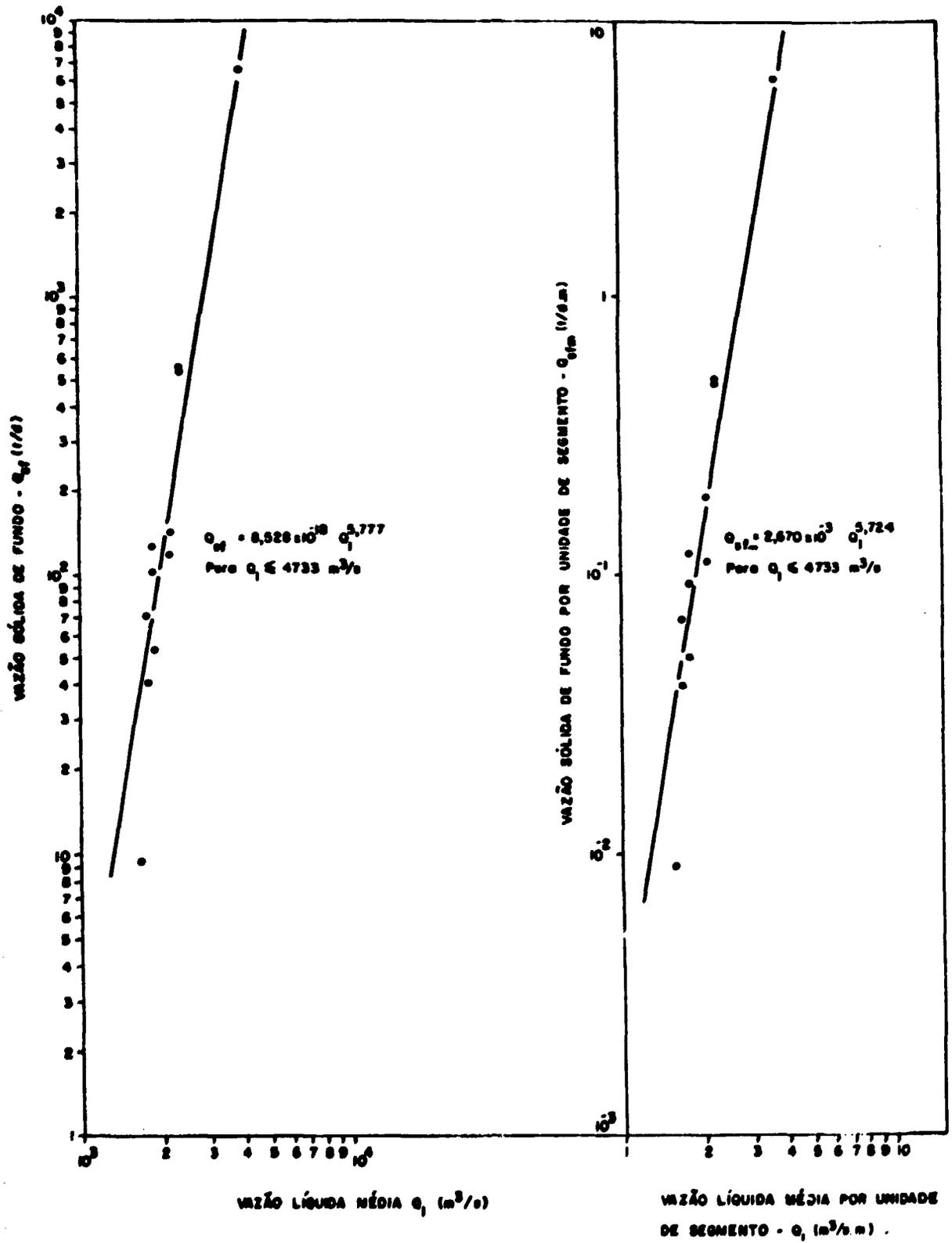


FIGURA 4.12 - CORRELAÇÃO ENTRE A VAZÃO SÓLIDA DE FUNDO E VAZÃO LÍQUIDA

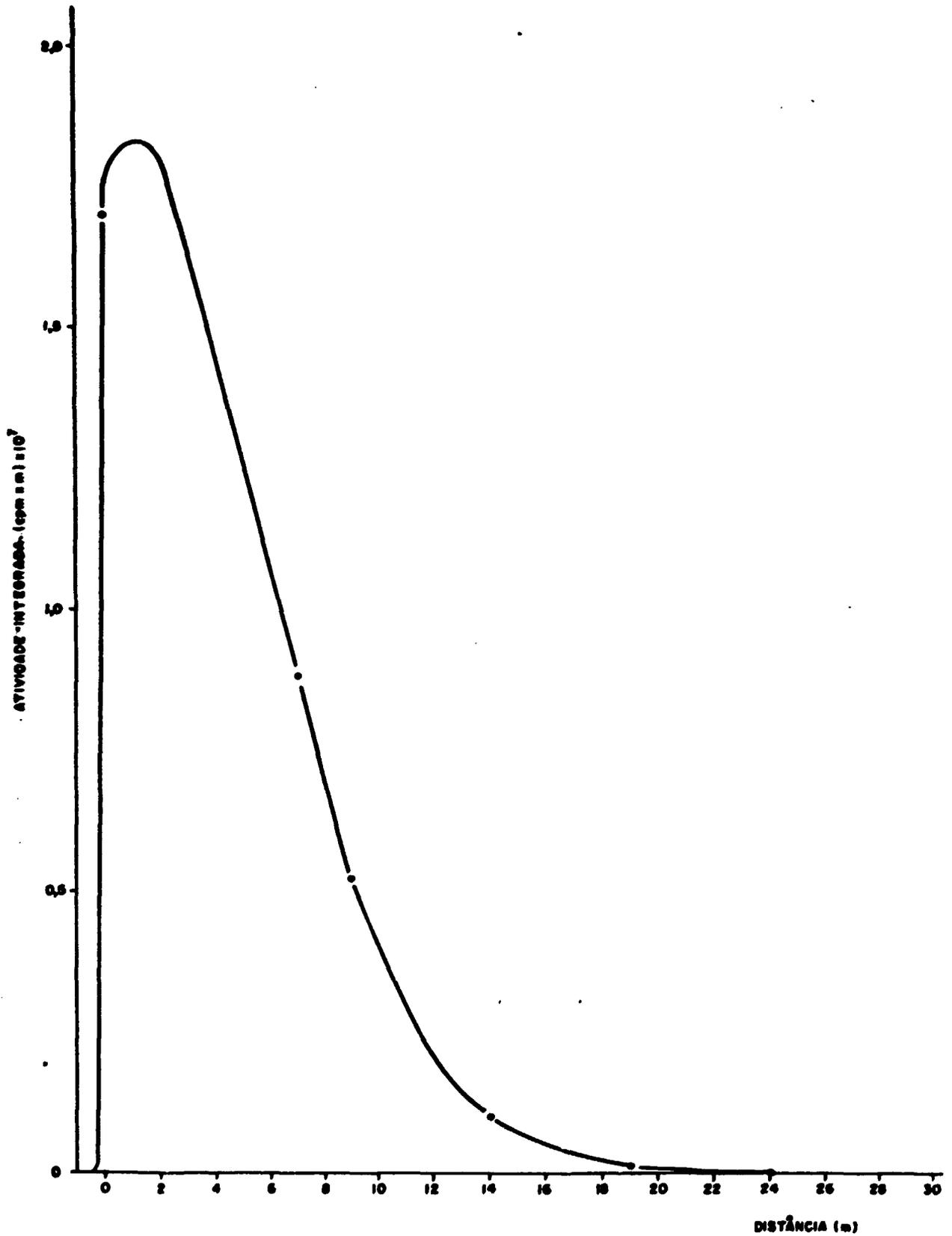


FIGURA 4.13 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 24.05.78
CANAL ESQUERDO - MD

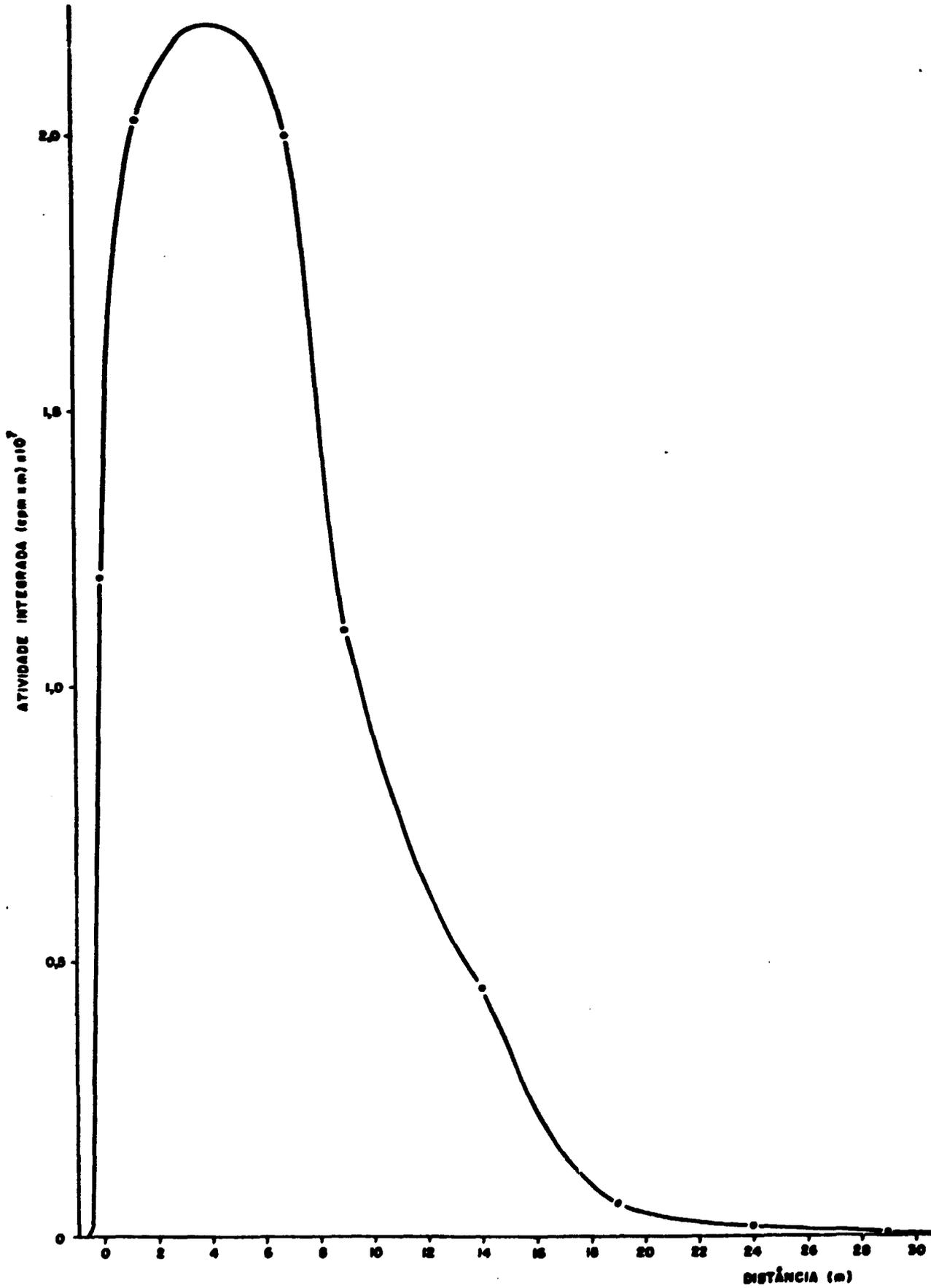


FIGURA 4.14 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 26.05.78
CANAL ESQUERDO - MD

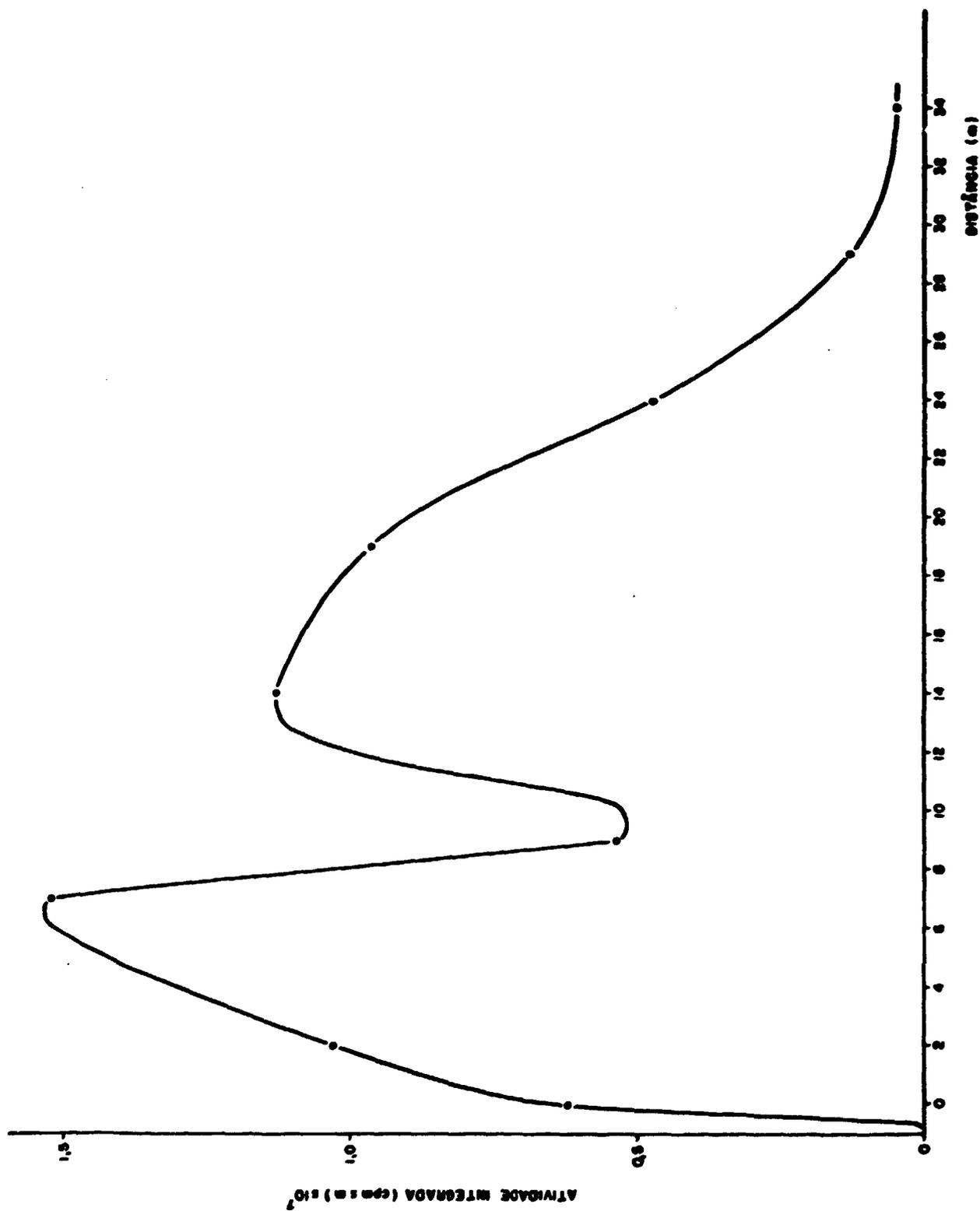


FIGURA 4.15 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 30.05.78
CANAL ESQUERDO - MD

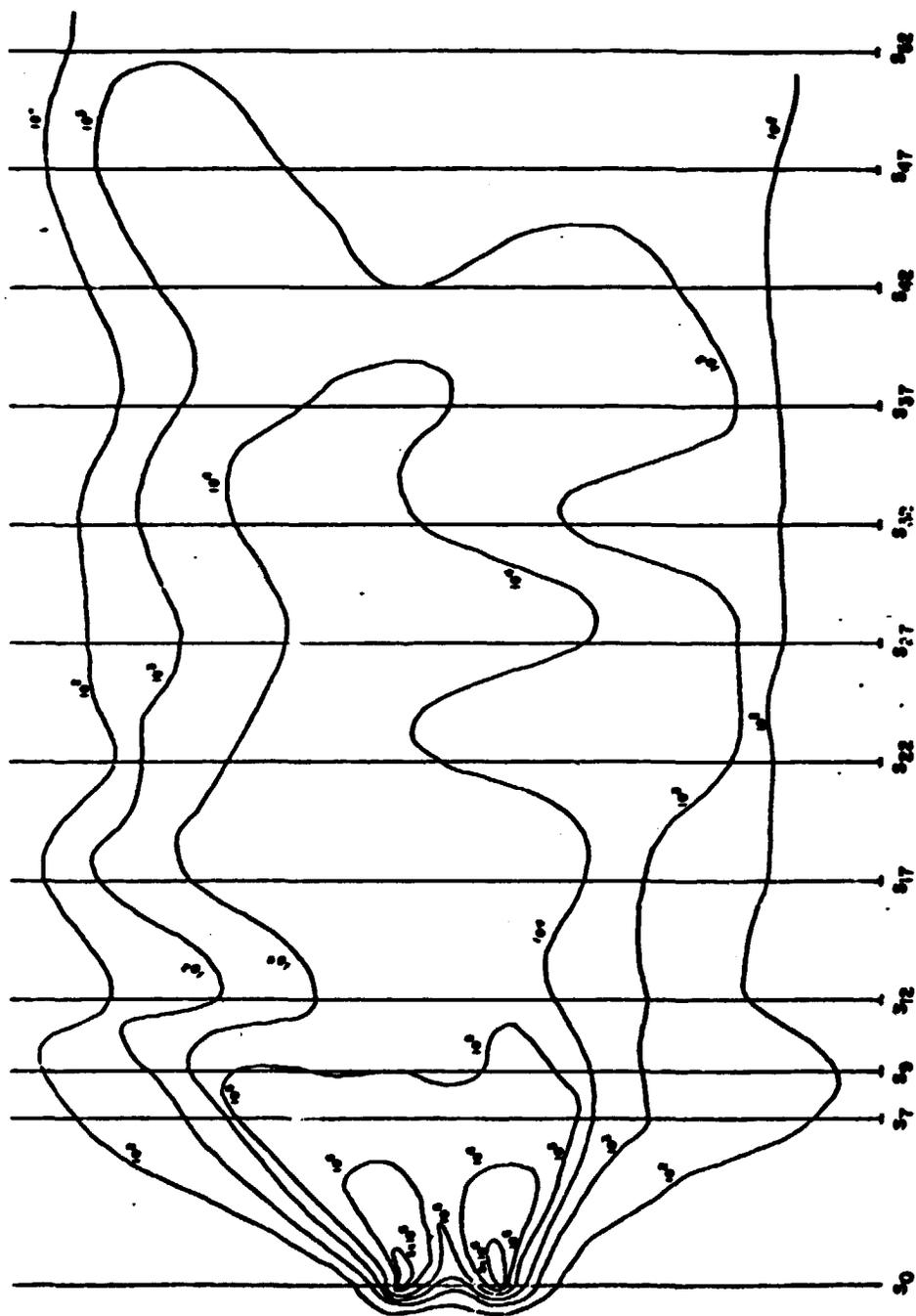
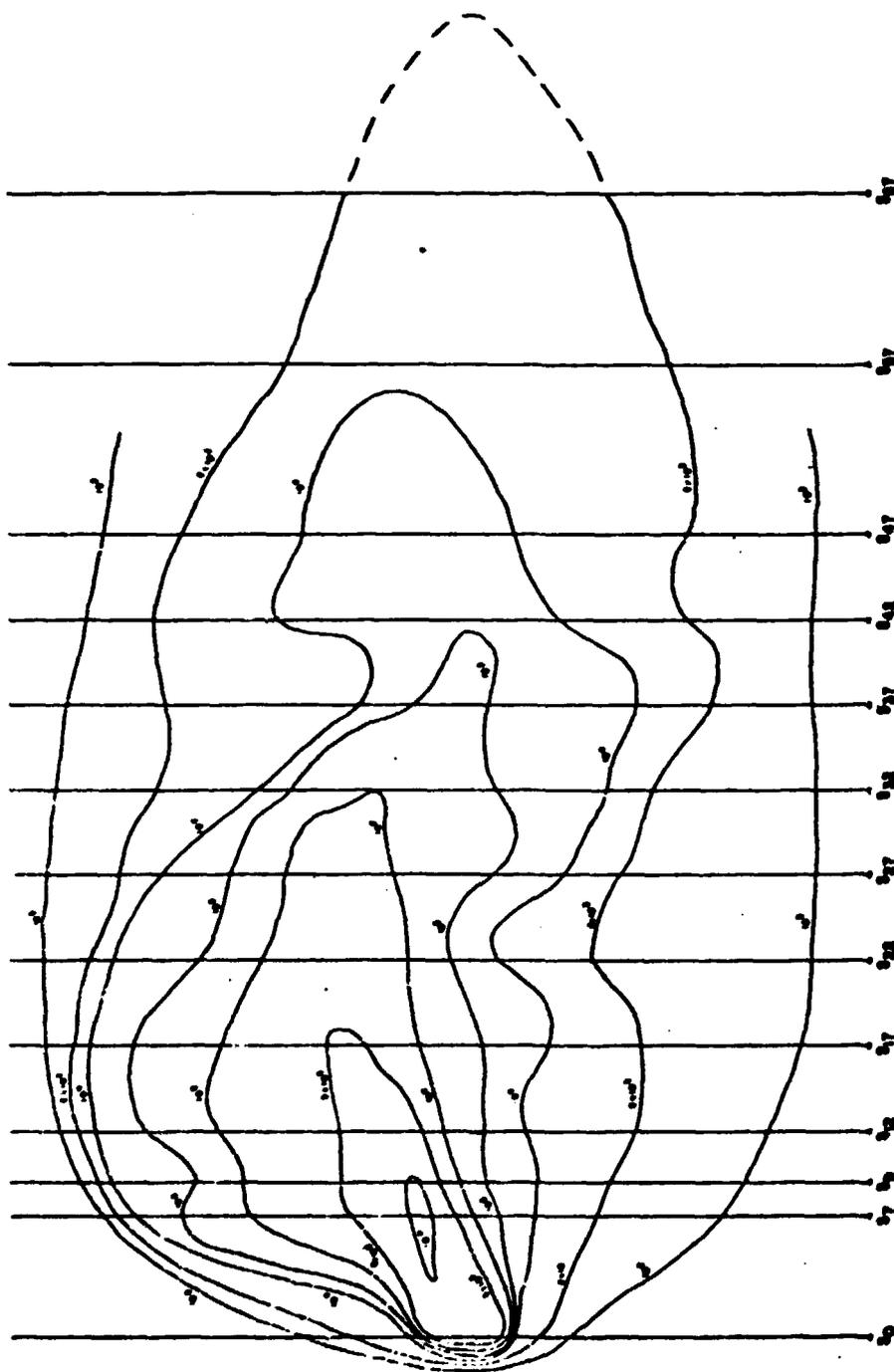


FIGURA 4.16 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 20.05.78
CANAL ESQUERDO - MD



**FIGURA 4.17 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE
30.05.78 - CANAL ESQUERDO - MD**

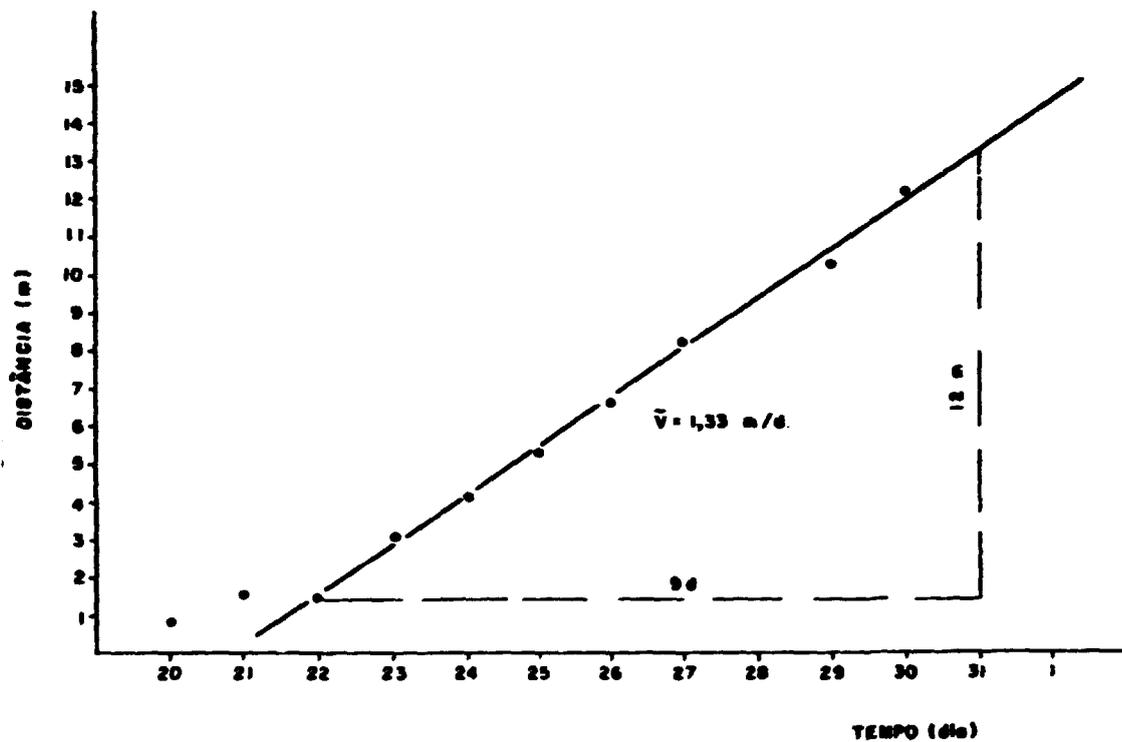
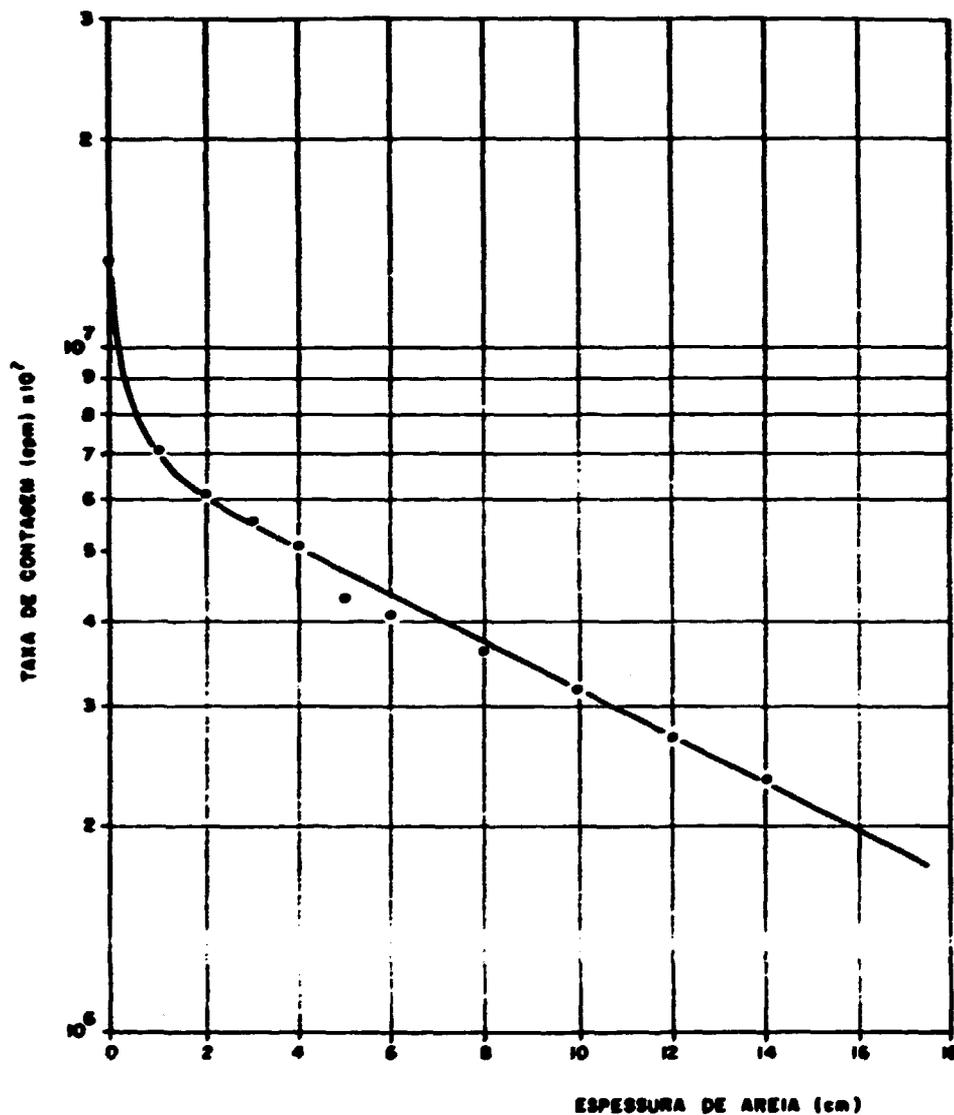
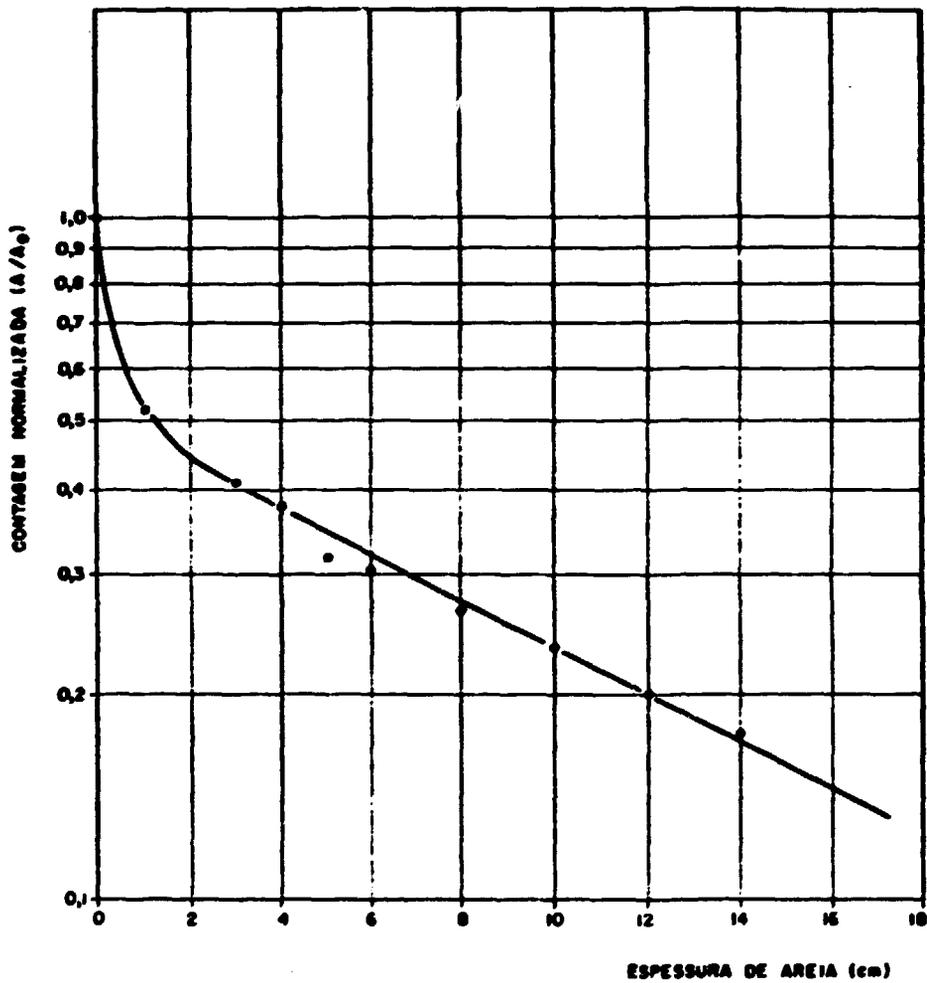


FIGURA 4.16 - VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO
CAMPANHA DE 17.05.78 a 12.06.78
CANAL ESQUERDO - MD



**FIGURA 4.19 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CAMA DA MÓVEL - 17.05.78 a 12.06.78
CANAL ESQUERDO - MD**



**FIGURA 4.20 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA MÓVEL - 17.05.78 a 12.06.78
CANAL ESQUERDO - MD**

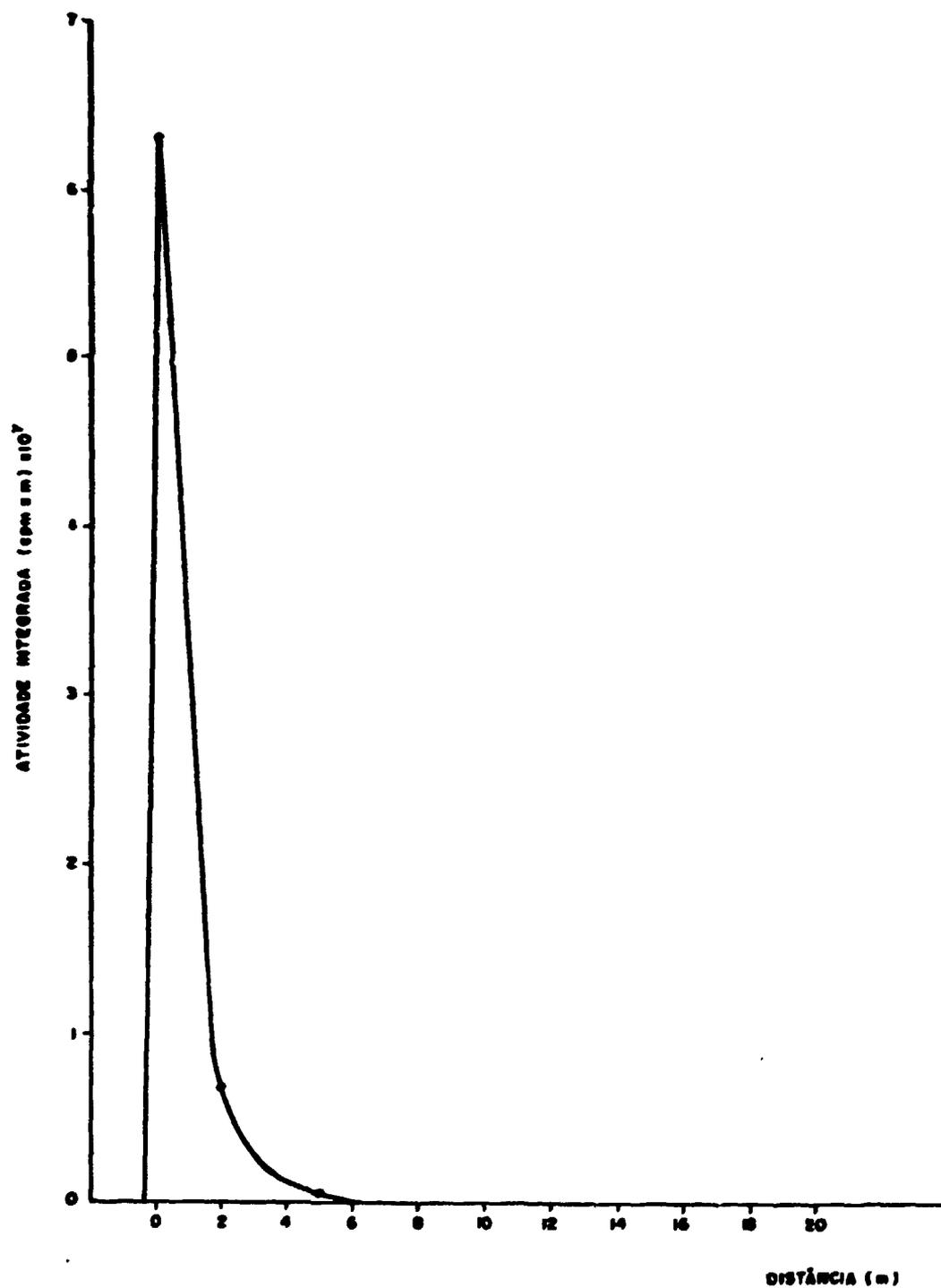


FIGURA 4.21 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 30.06.78
CANAL ESQUERDO - MD

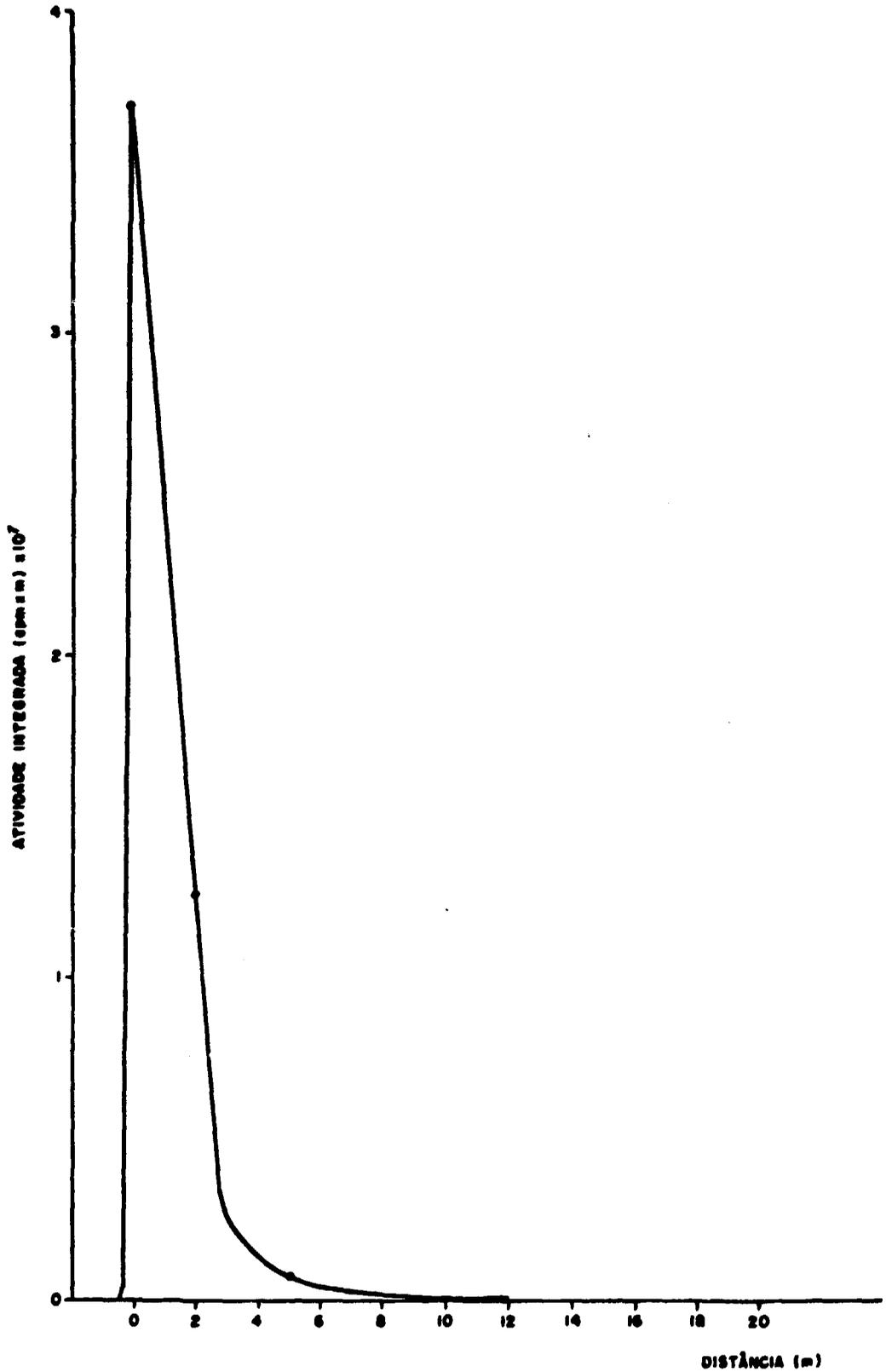


FIGURA 4.22 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 03.07.78
CANAL ESQUERDO - MD

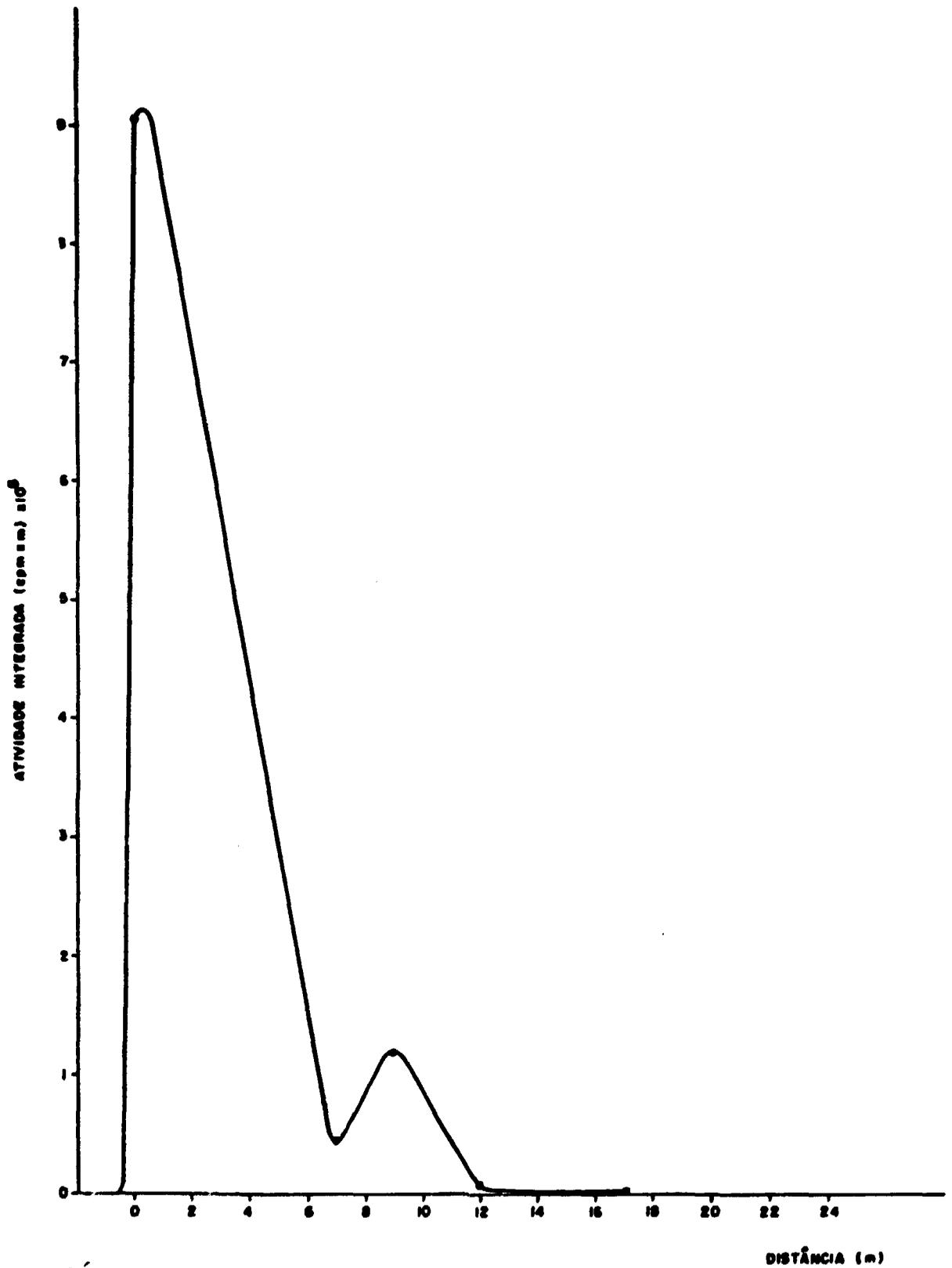


FIGURA 4.23 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 11.07.78
CANAL ESQUERDO - MD

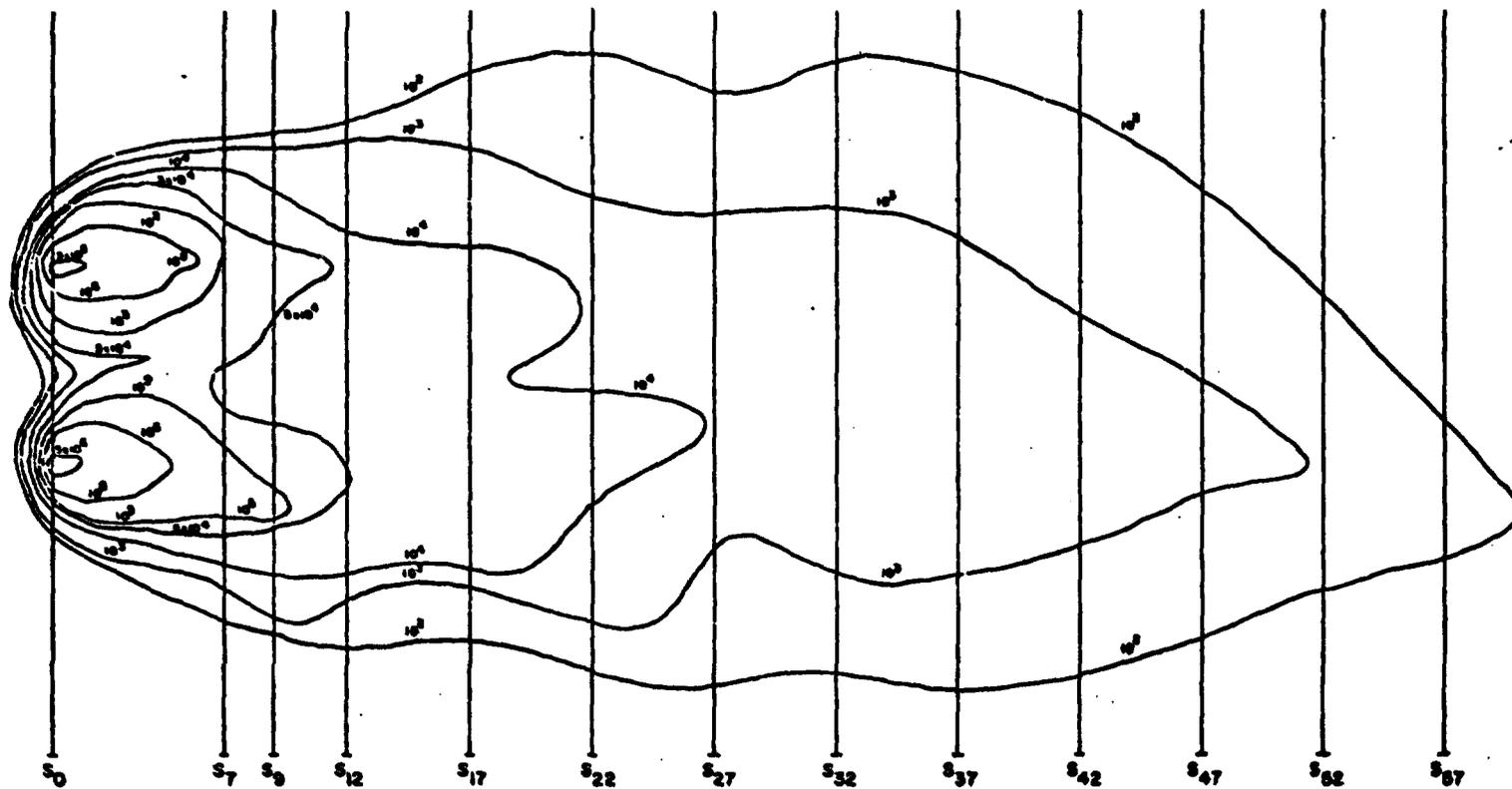


FIGURA 4.24 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE
30.06.78 - CANAL ESQUERDO - MD

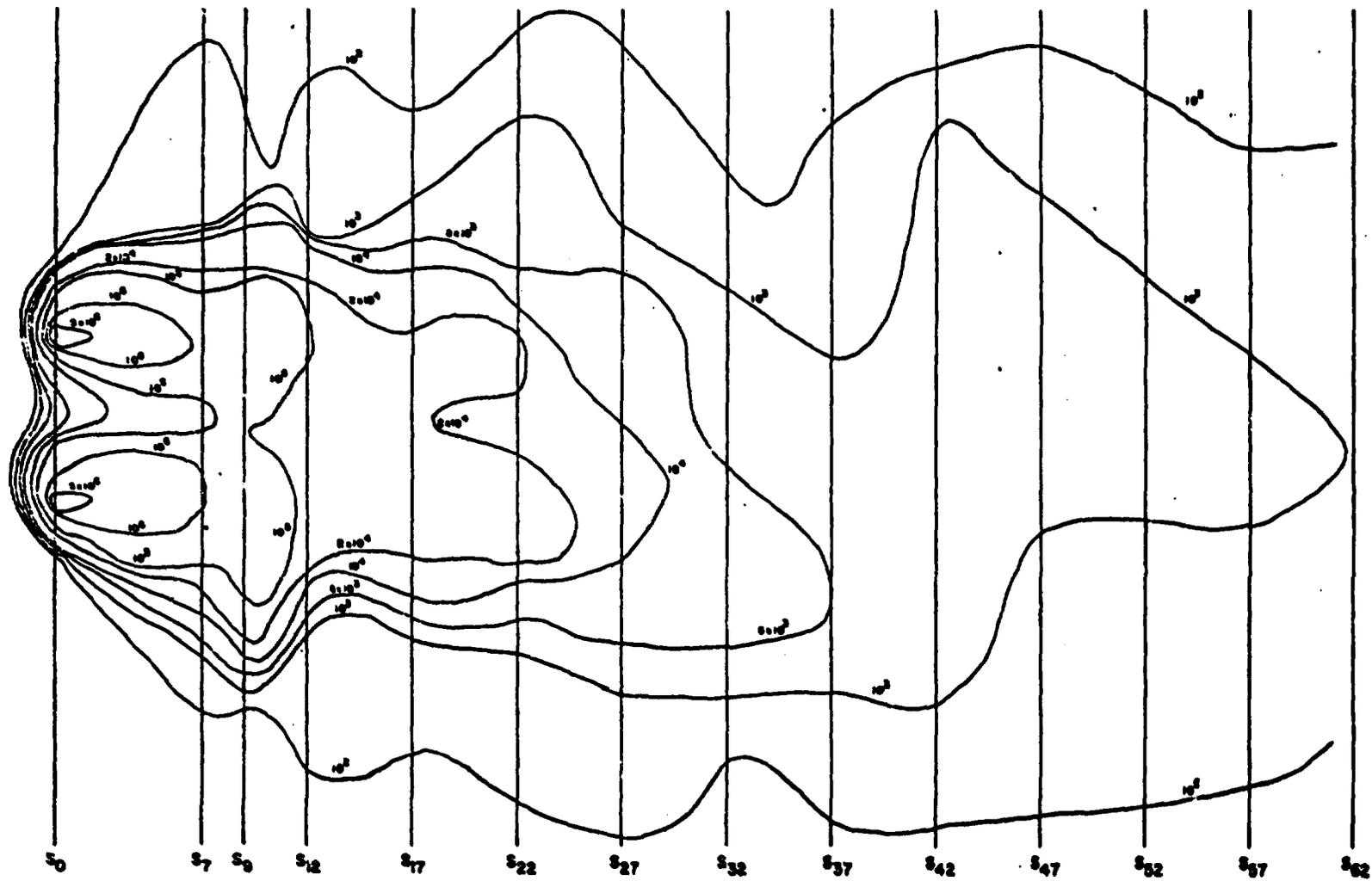


FIGURA 4.25 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE
11.06.78 - CANAL ESQUERDO - MD

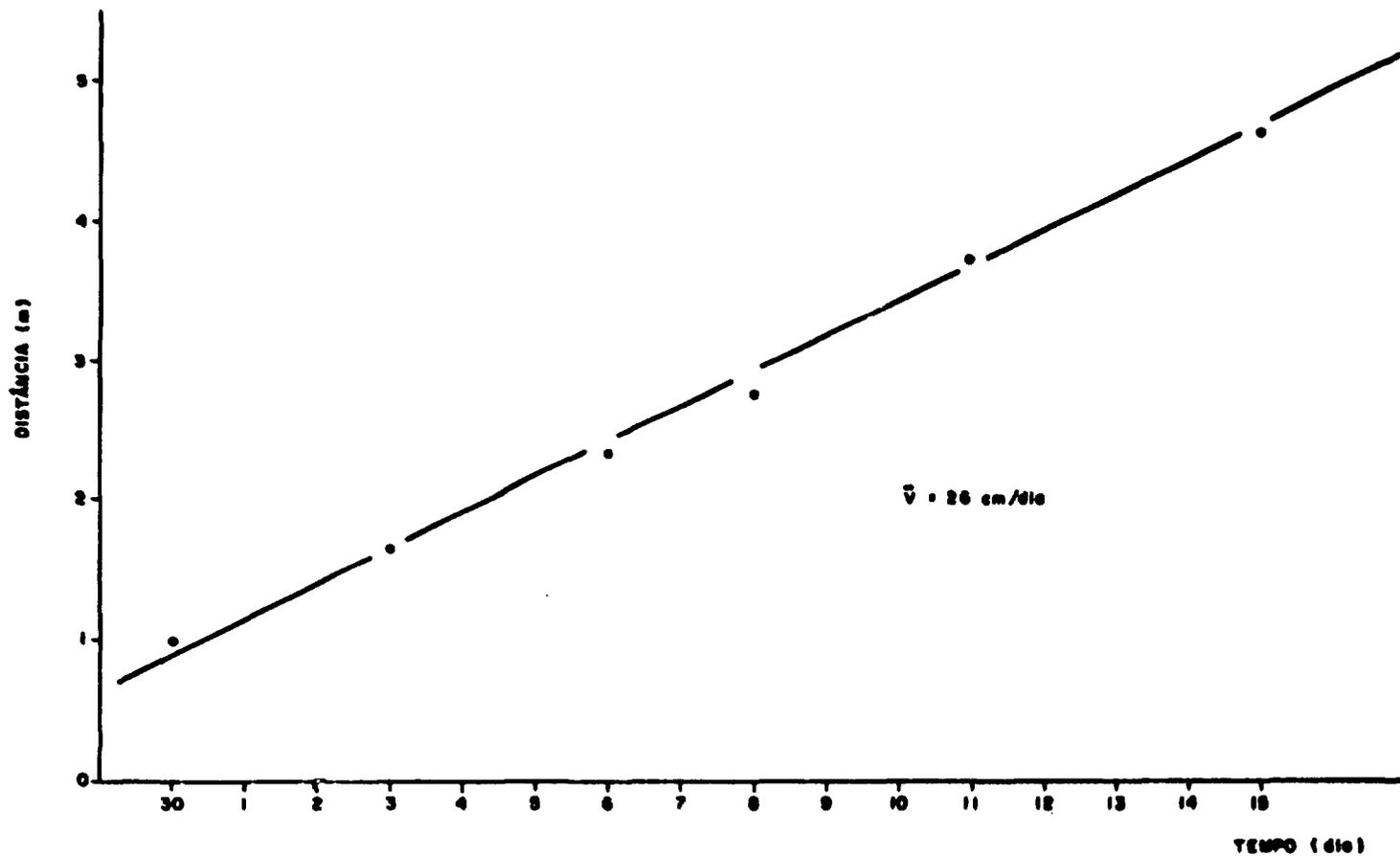


FIGURA 4.26 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MEDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 28.06.78 a 20.07.78 CANAL ESQUERDO - MD

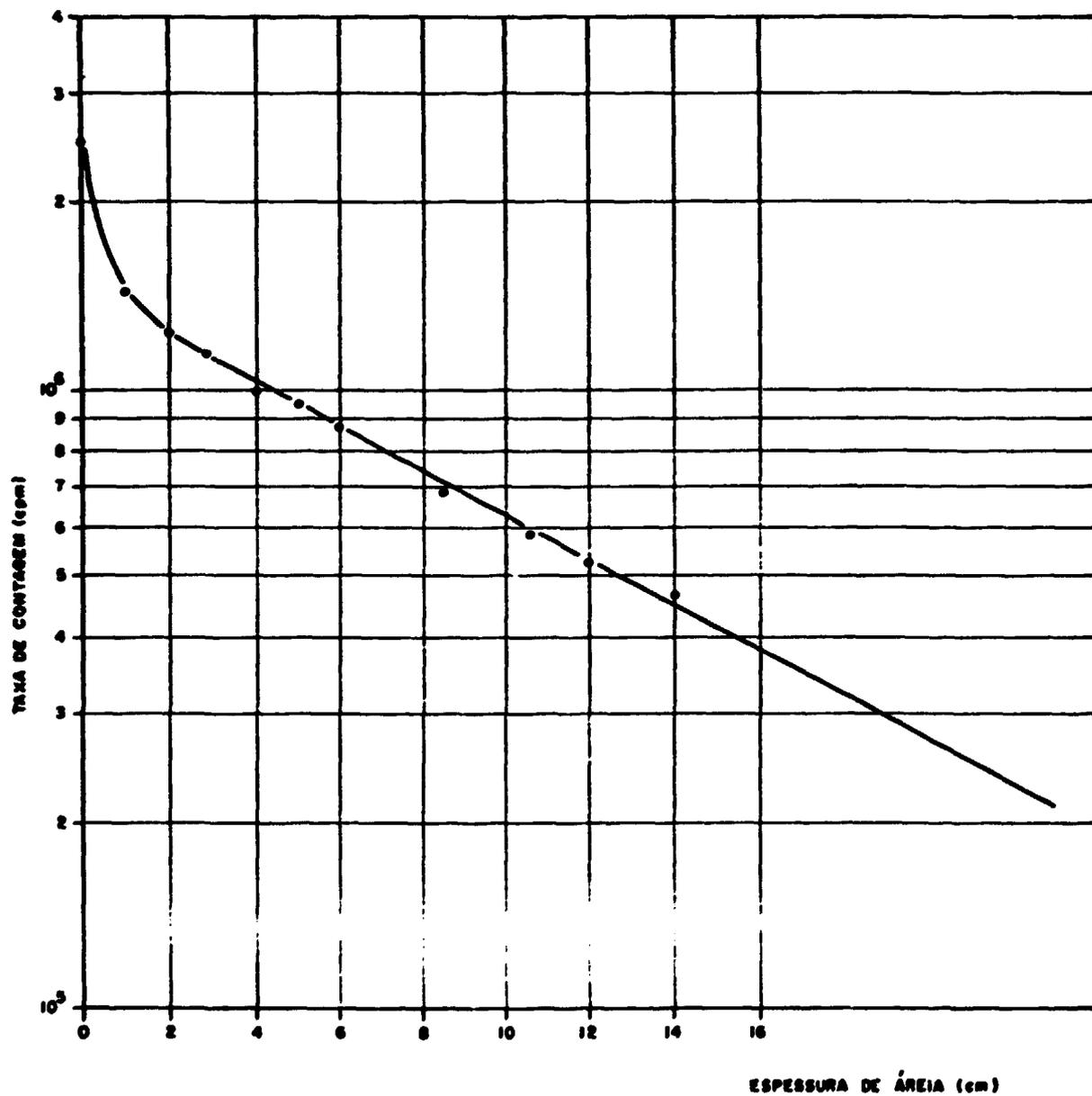


FIGURA 4.27 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA MÓVEL - 28.06.78 a 20.07.78 - CANAL ESQUERDO - MD

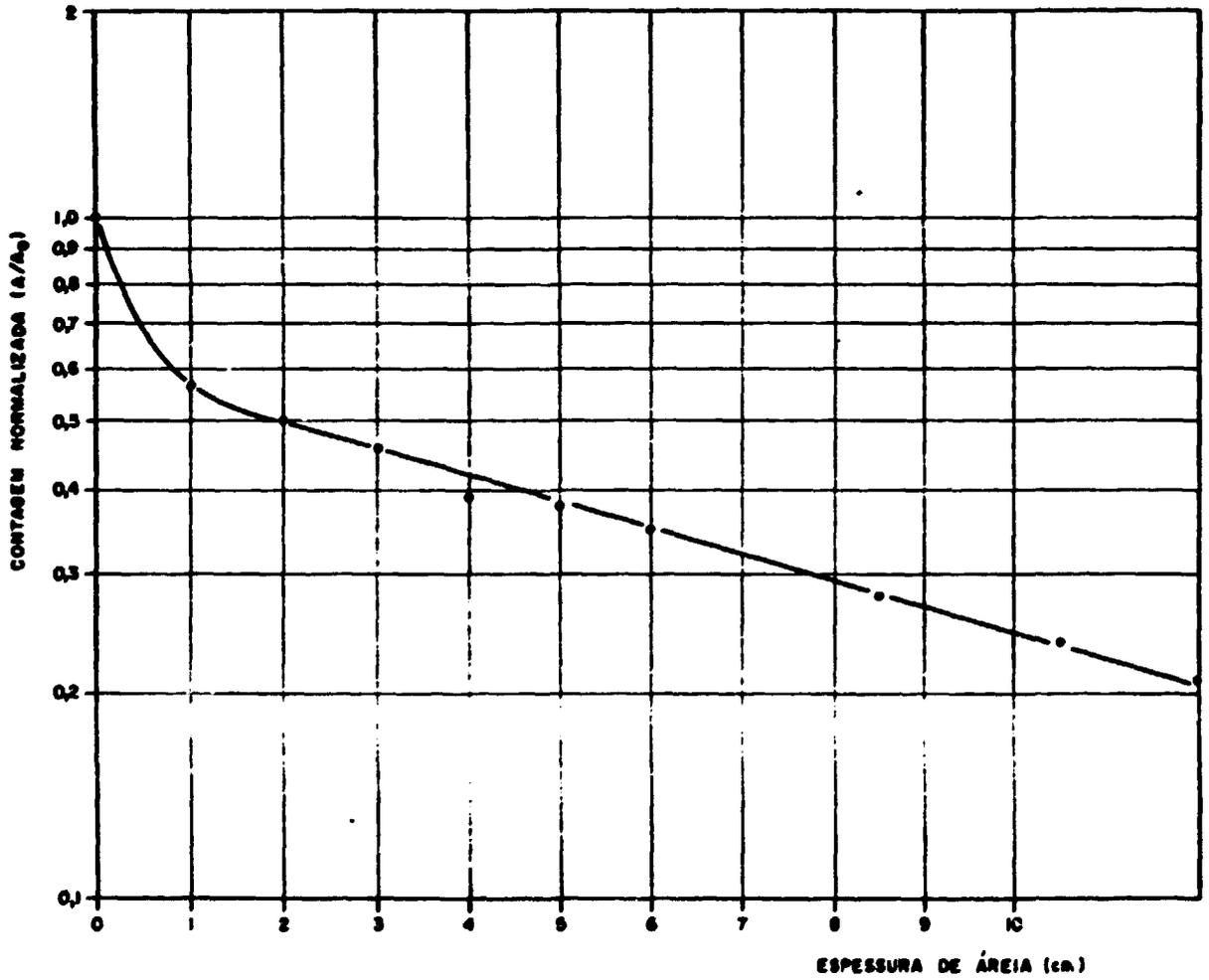


FIGURA 4.28 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA CAMADA MÓVEL - 28.06.78 a
20.07.78 - CANAL ESQUERDO - MD

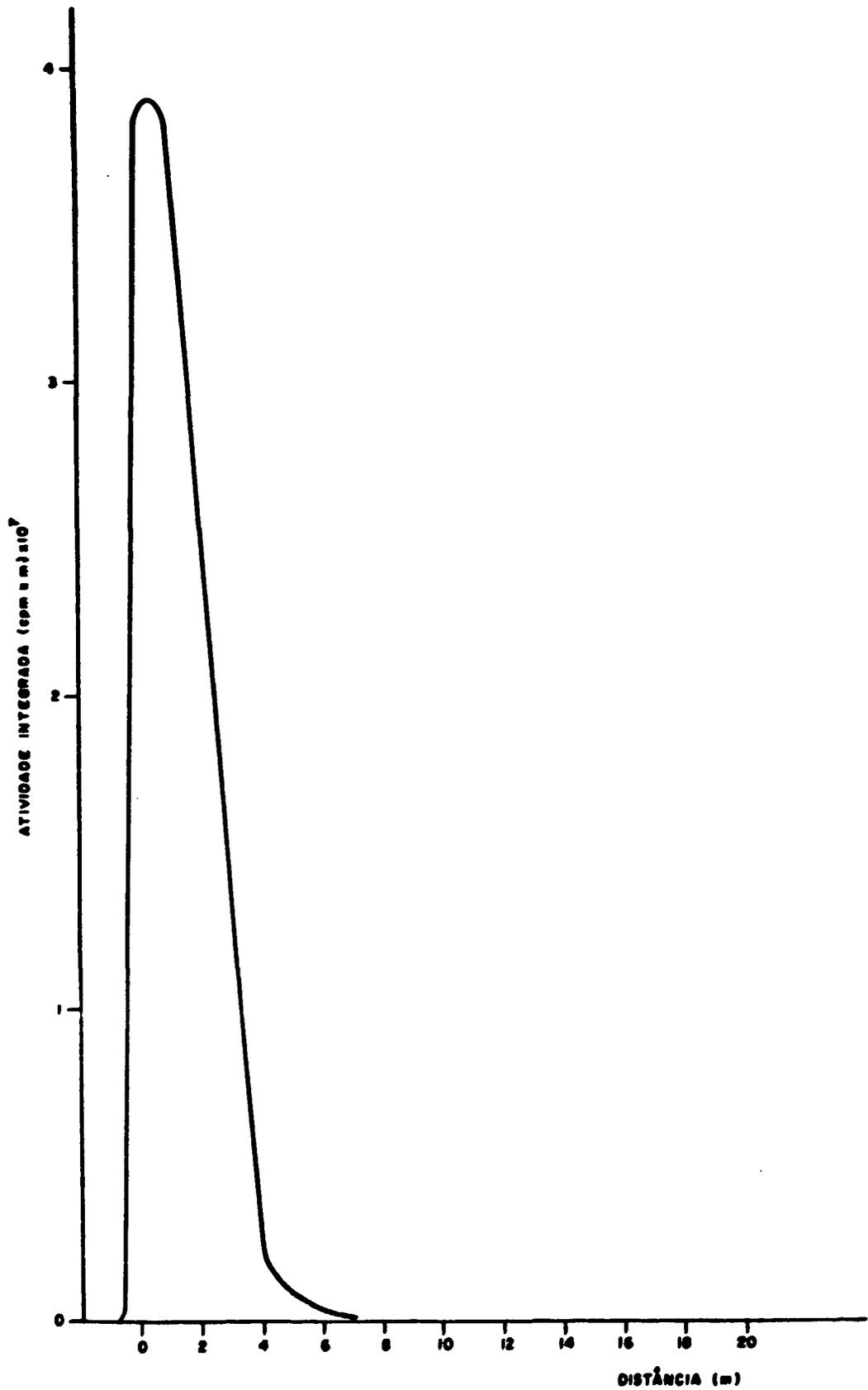
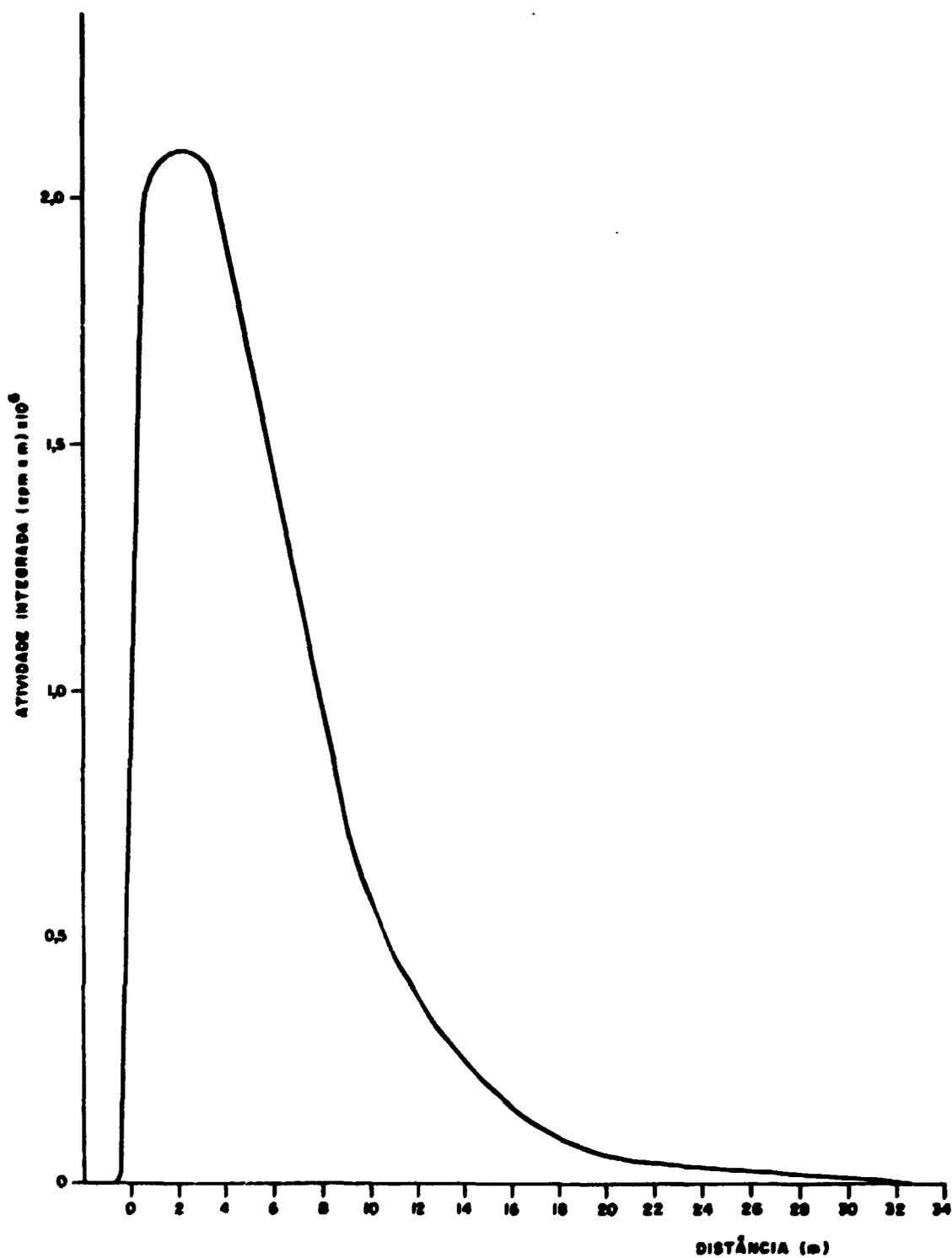


FIGURA 4.29 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE
04.07.78 - CANAL ESQUERDO - ME



**FIGURA 4.30 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE
15.07.78 - CANAL ESQUERDO - ME**

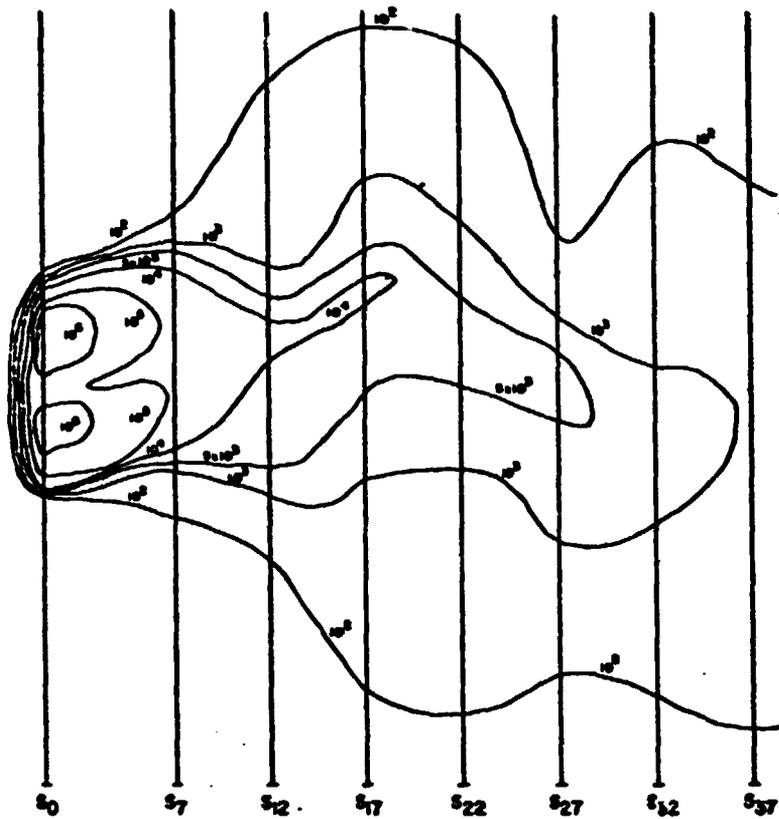


FIGURA 4.31 - CURVAS DE ISOATIVIDADE - 04.07.78 - ME

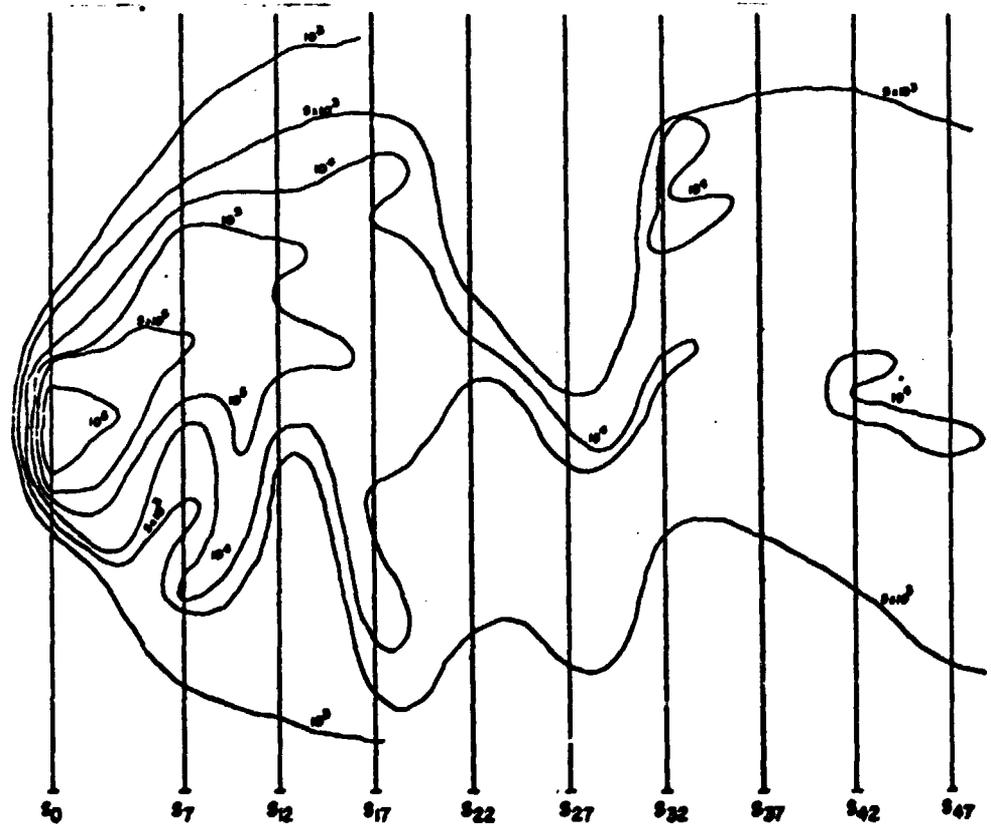


FIGURA 4.32 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE
15.07.78 - CANAL ESQUERDO - ME

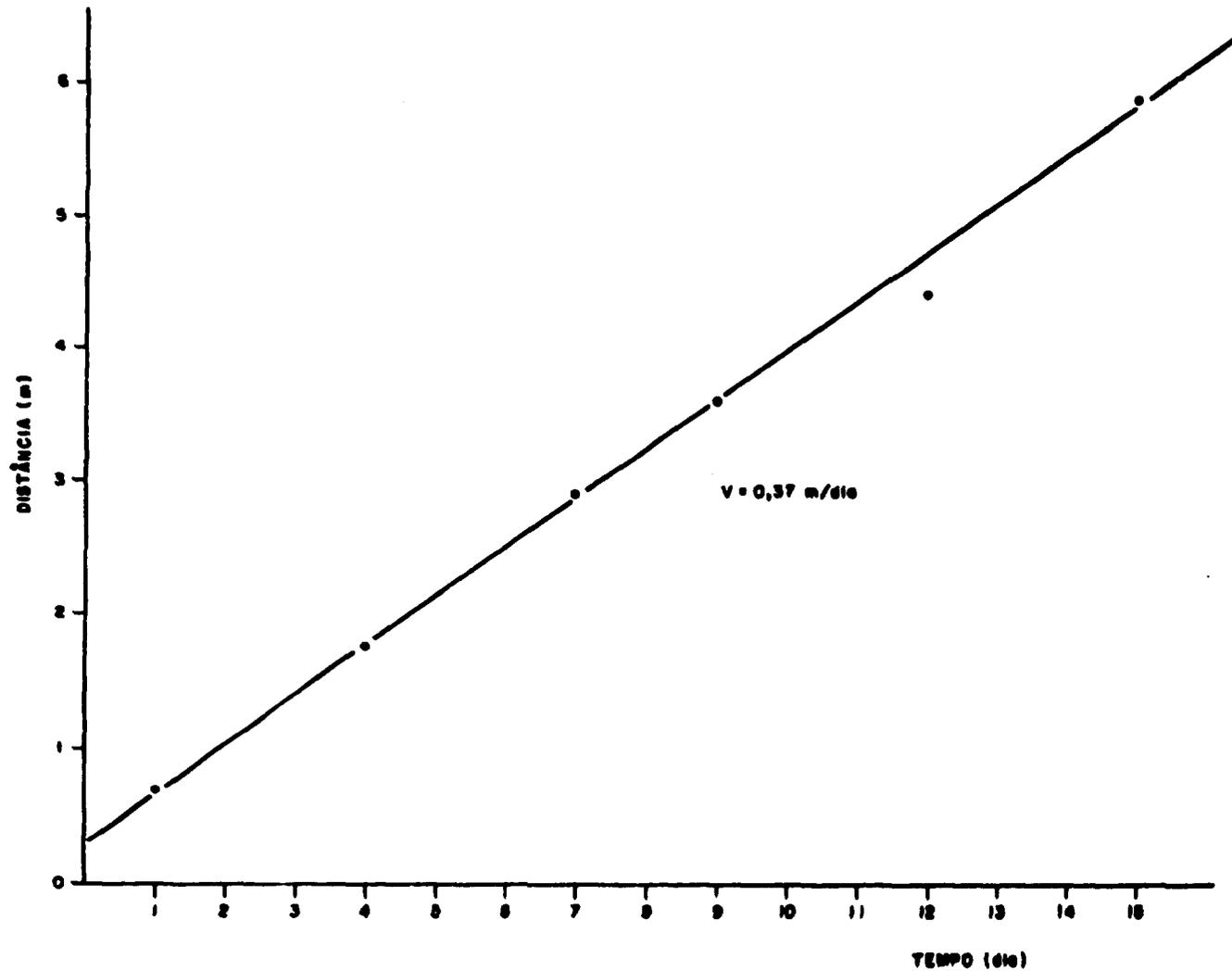


FIGURA 4.33 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 28.06.78 a 20.07.78
CANAL ESQUERDO - ME

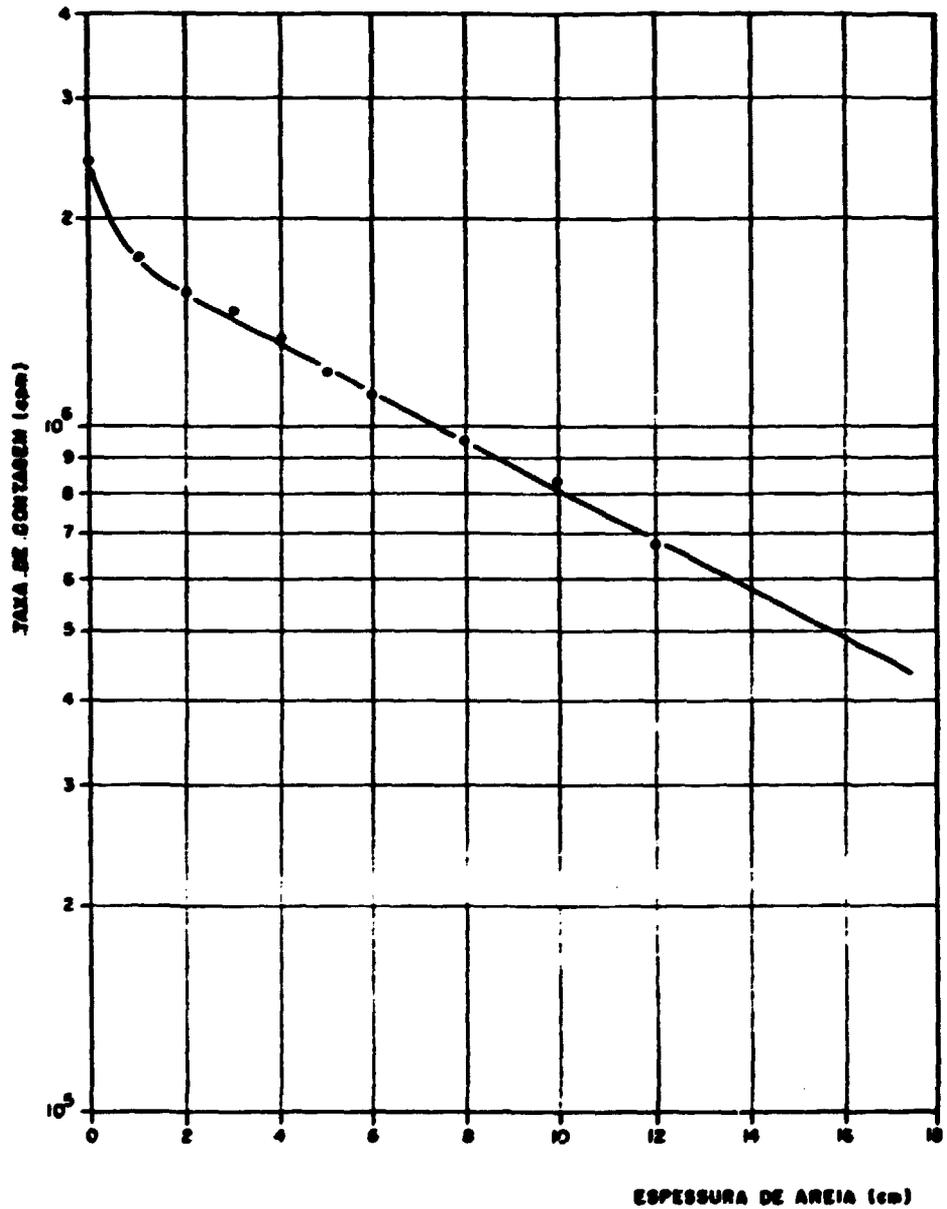


FIGURA 4.34 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA MÓVEL - 28.06.78 a 20.07.78 - CANAL ESQUERDO - ME

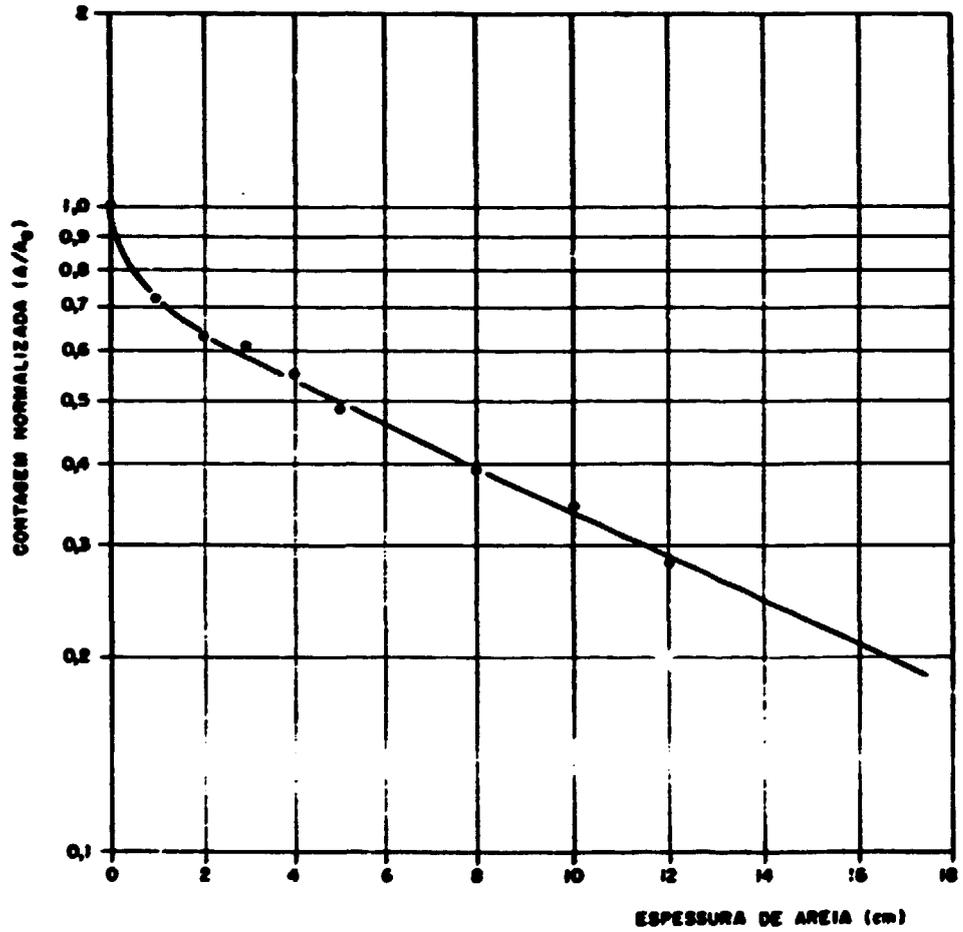


FIGURA 4.35 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA EM FUNÇÃO DA CAMADA MÓVEL - 28.06.78 a 20.07.78 CANAL ESQUERDO - ME

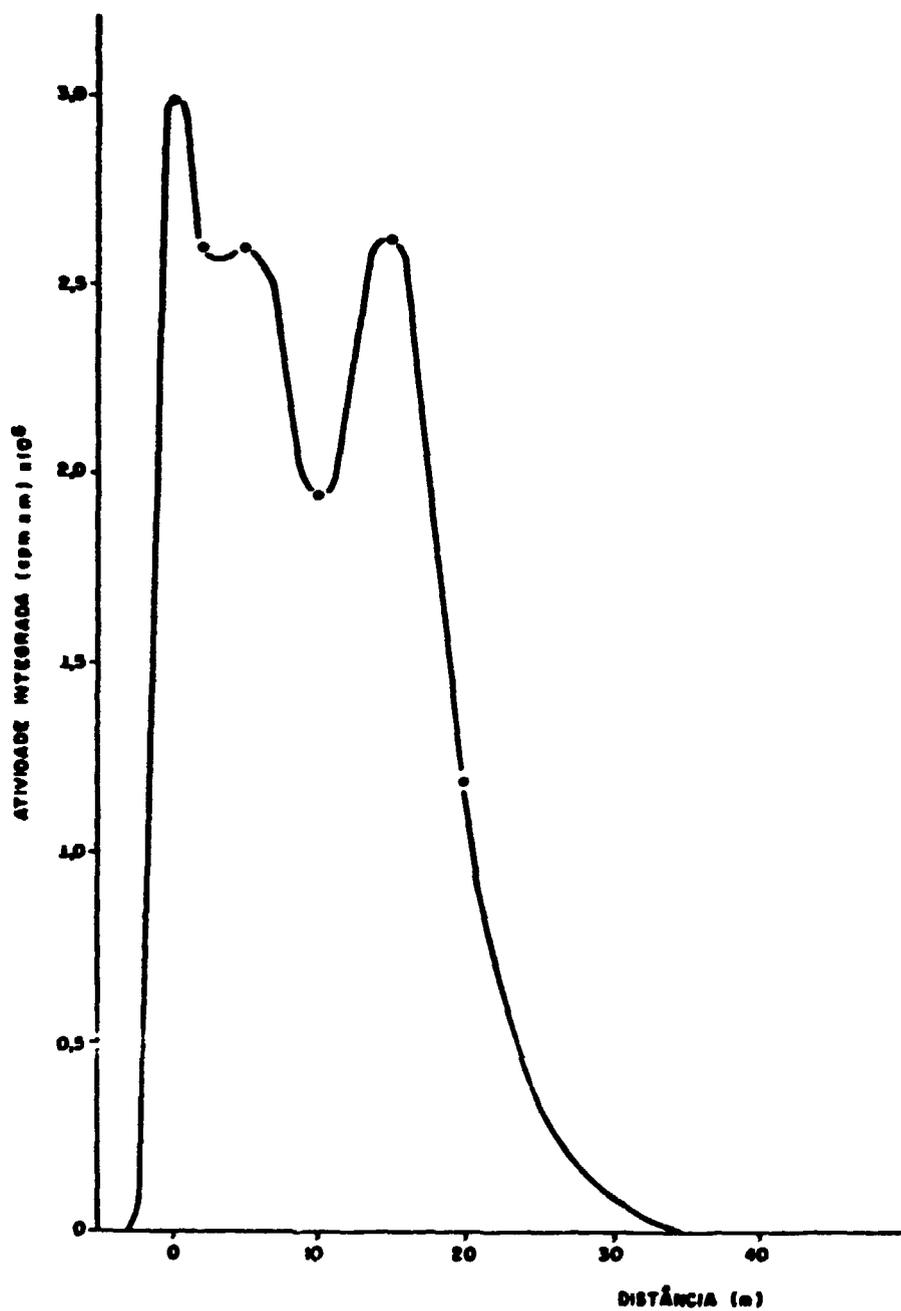


FIGURA 4.36 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 15.09.78
CANAL ESQUERDO - MD

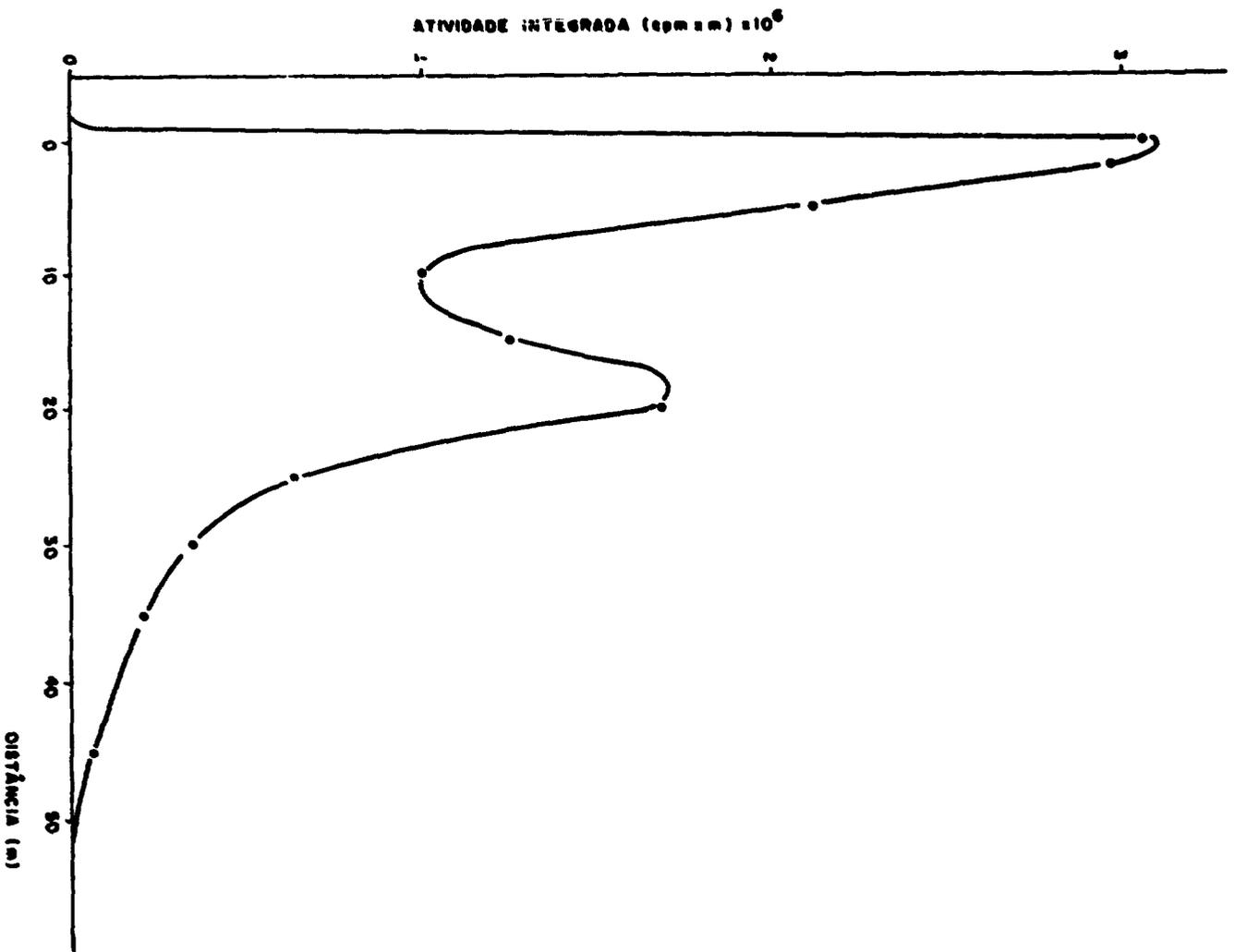


FIGURA 4.37 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 17.09.78
CANAL ESQUERDO - MD

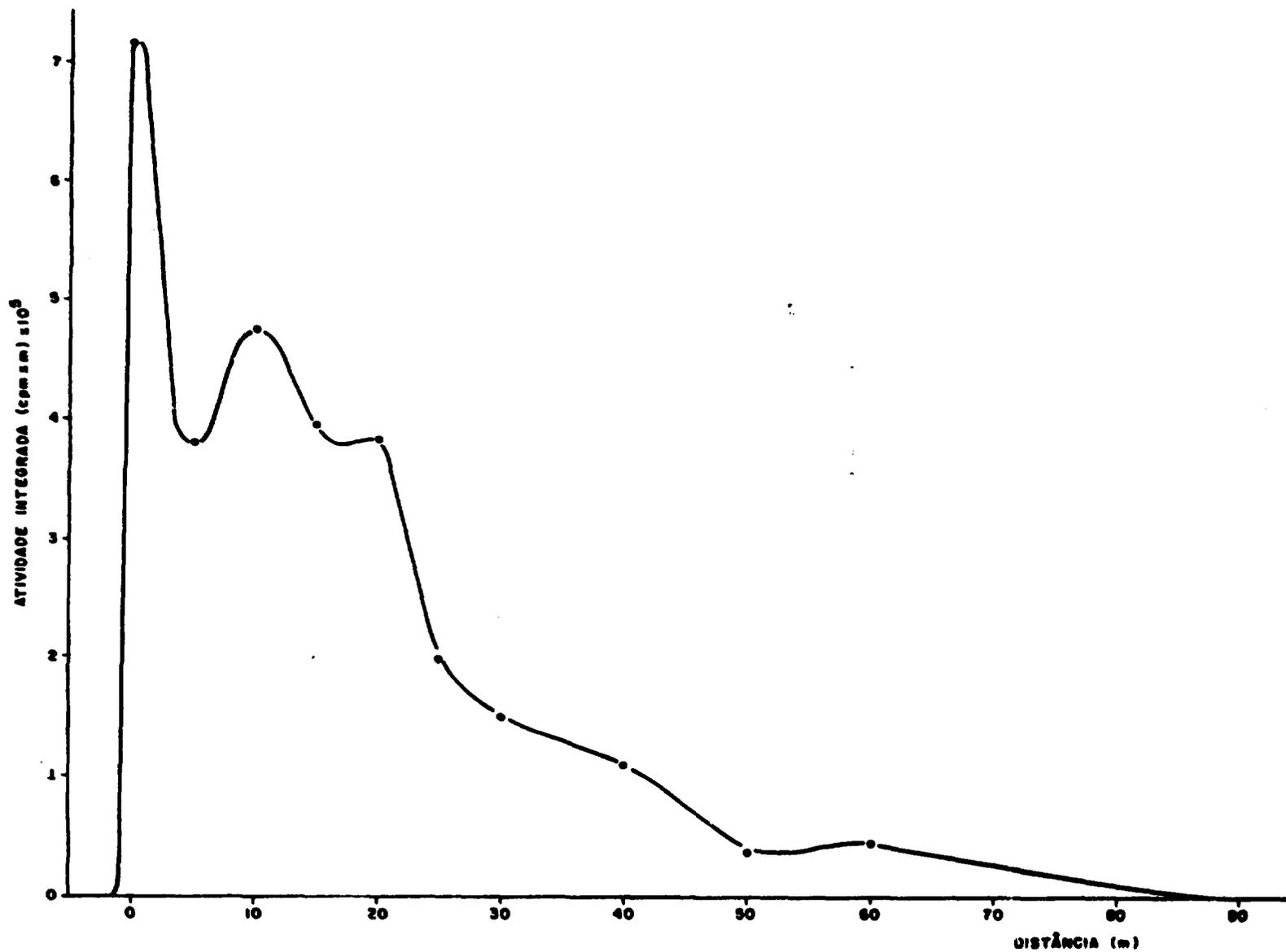


FIGURA 4.38 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 21.09.78
CANAL ESQUERDO - MD

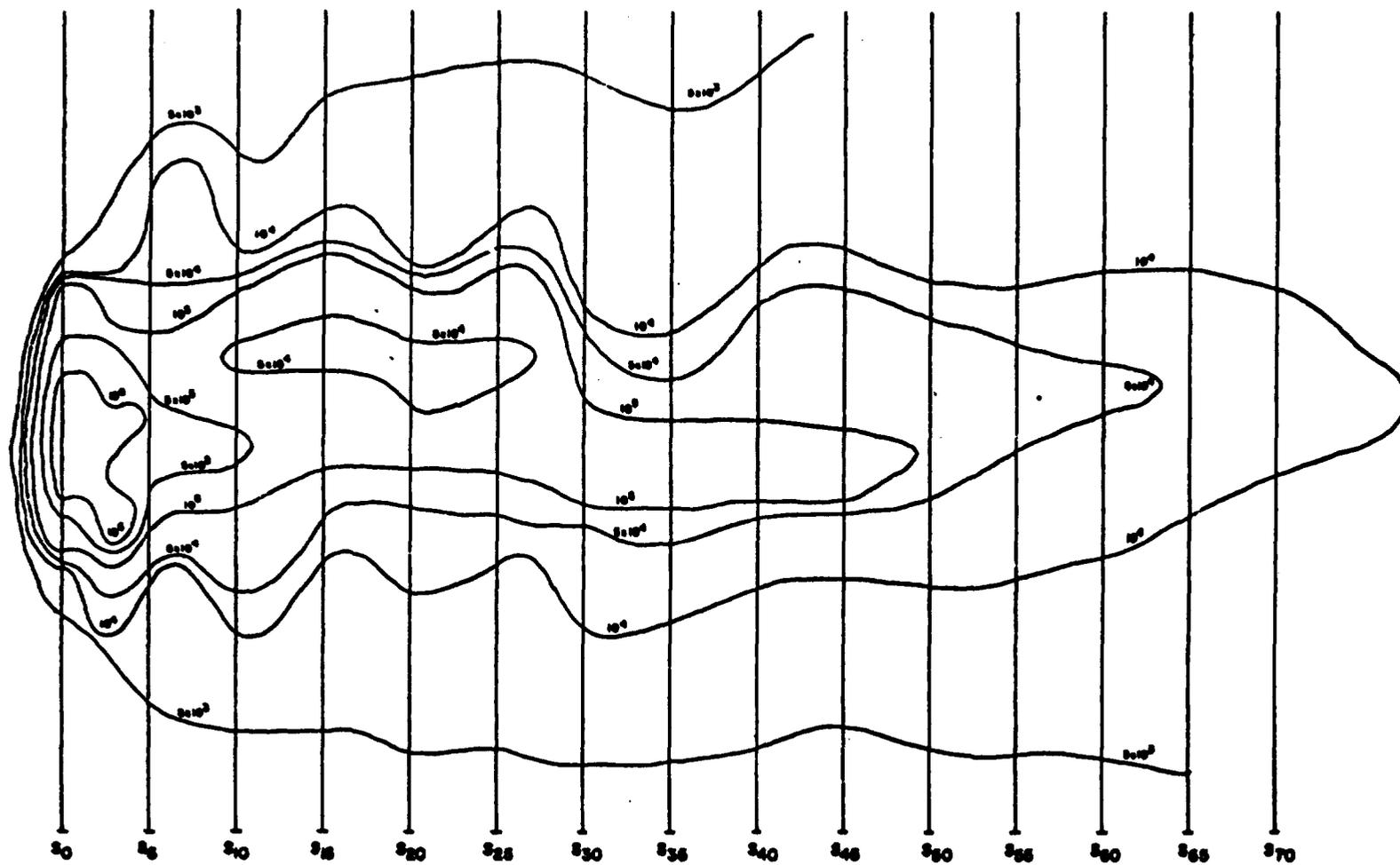


FIGURA 4.39 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 15.09.78
CANAL ESQUERDO - MD

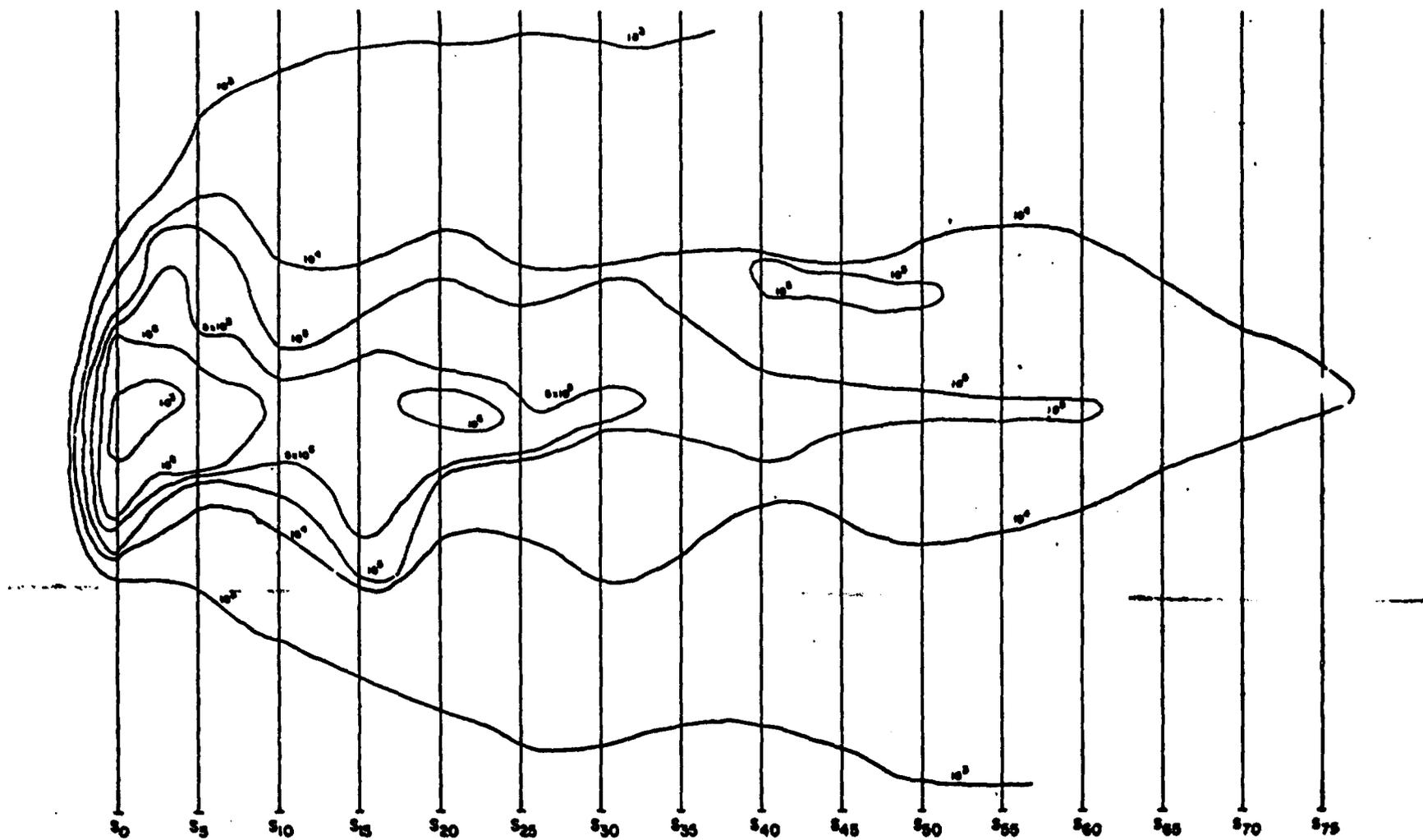


FIGURA 4.40 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 17.09.78
CANAL ESQUERDO - MD

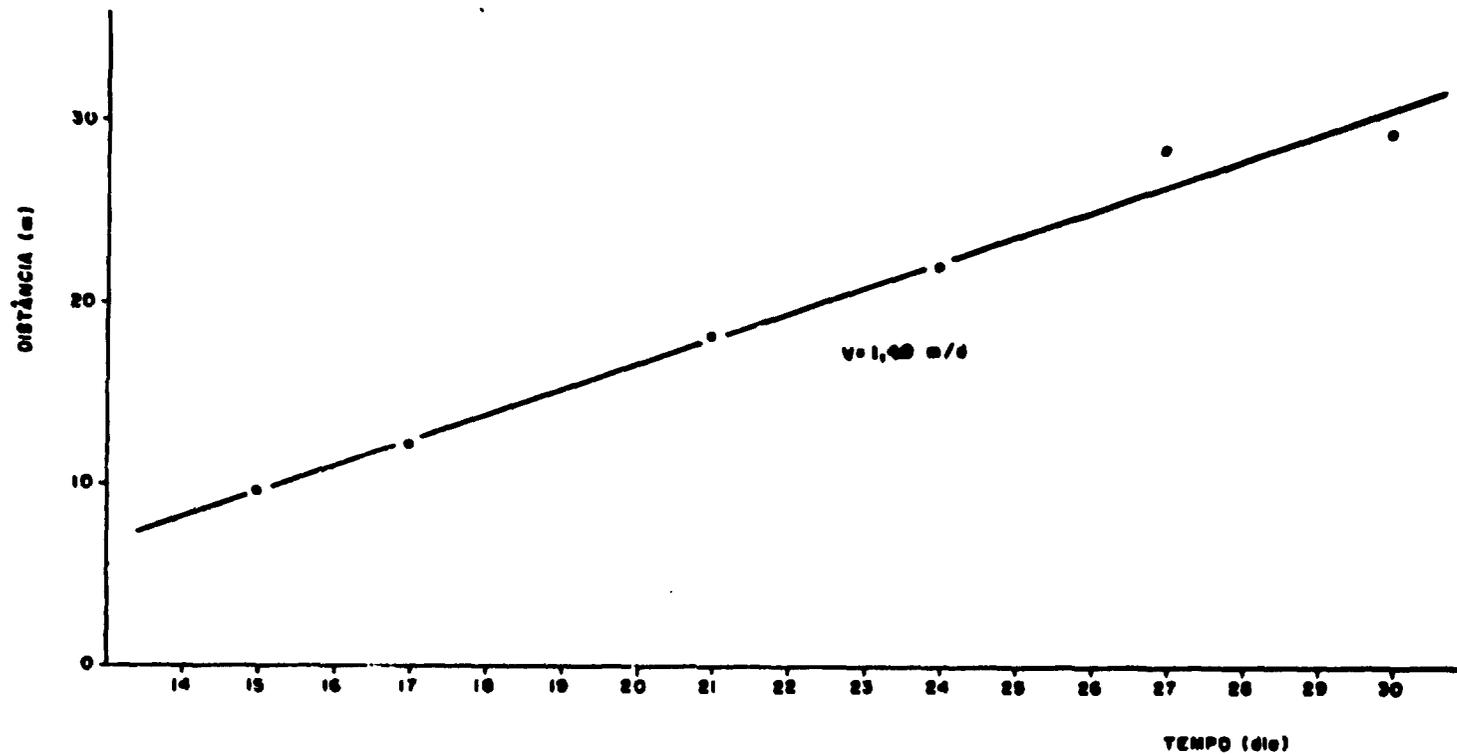


FIGURA 4.41 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 13.09.78 a 04.10.78
CANAL ESQUERDO - MD

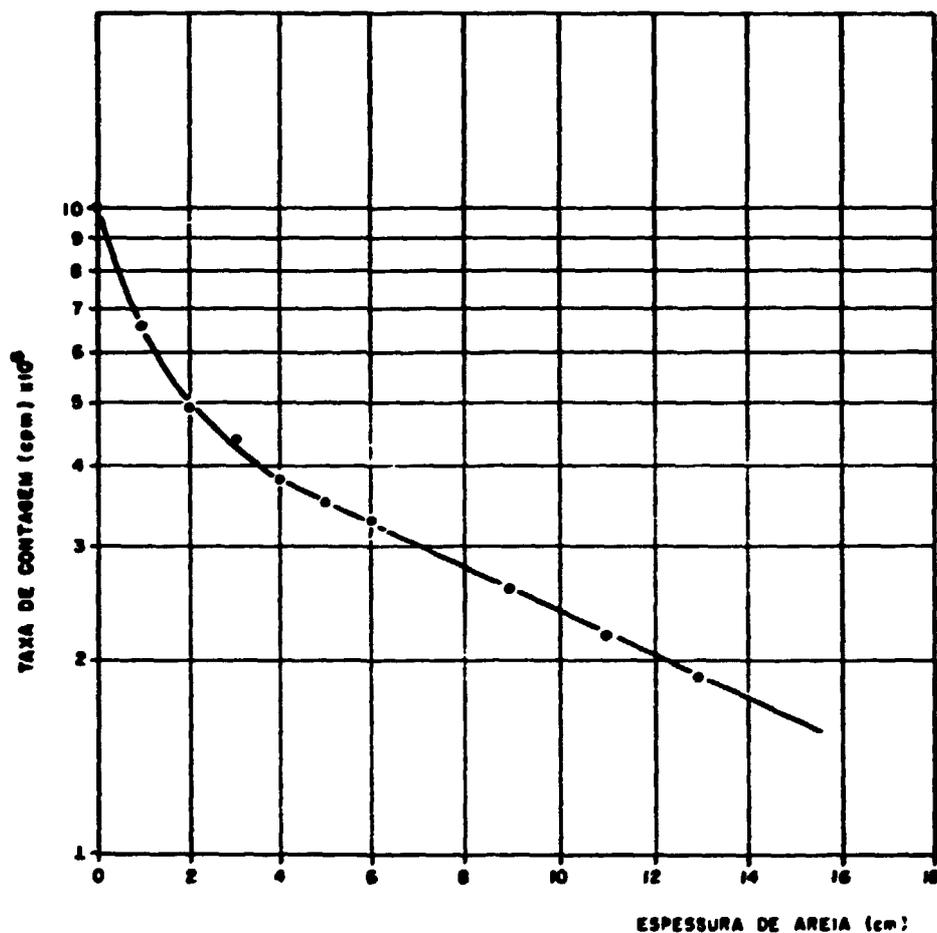


FIGURA 4.42 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA MÓVEL - 13.09.78 a
04.10.78 - CANAL ESQUERDO - MD

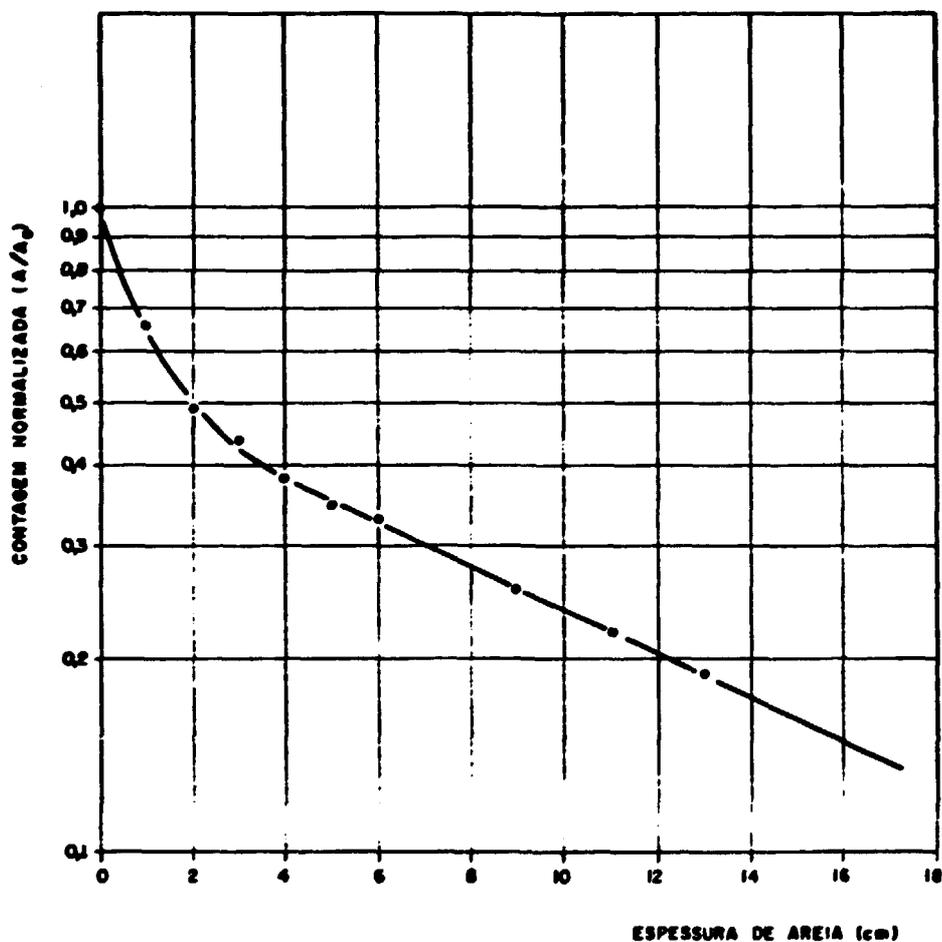


FIGURA 4.43 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA DO DETECTOR EM FUNÇÃO DA CAMADA MÓVEL - 13.09.78 a 04.10.78 - CANAL ESQUERDO - MD

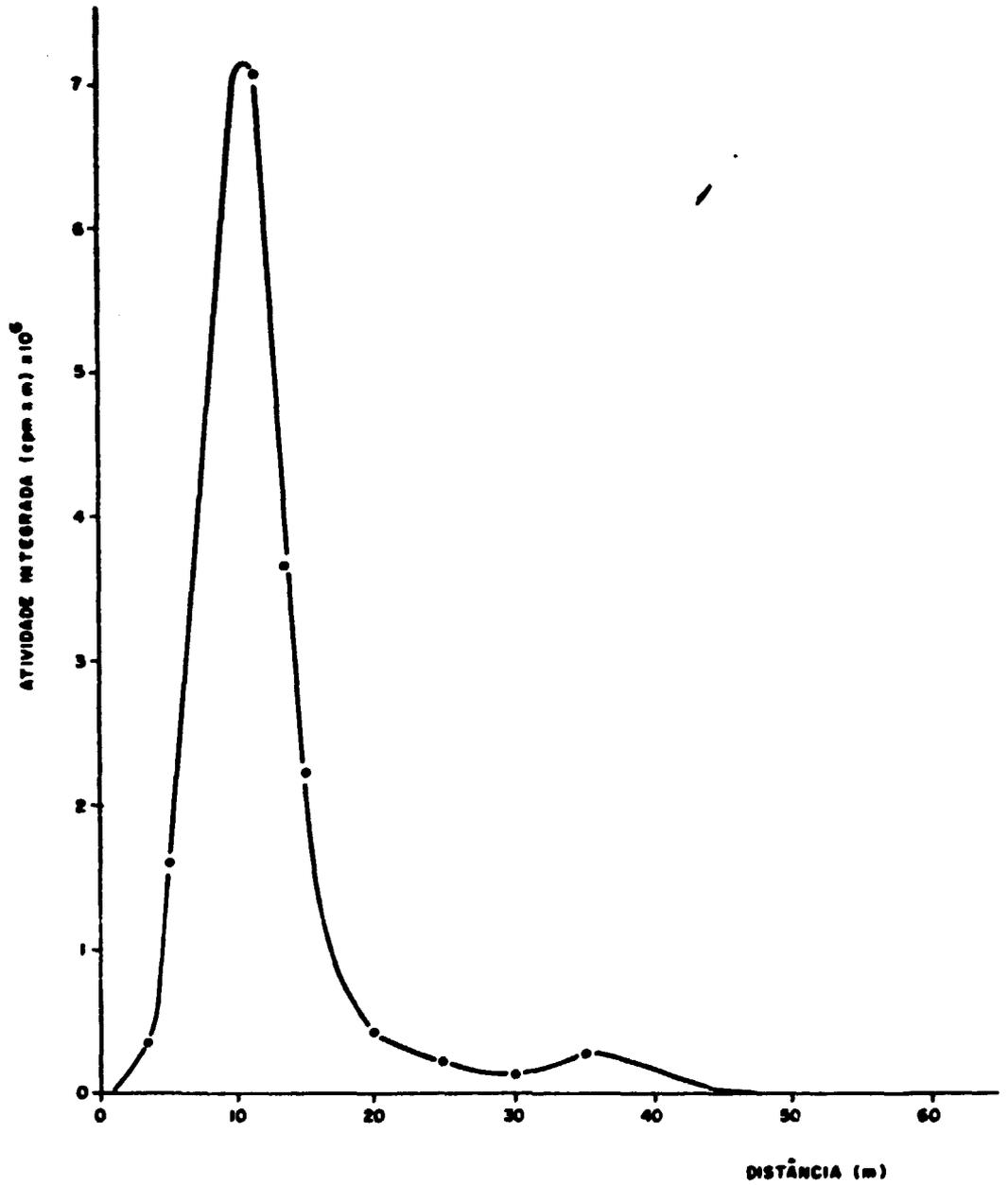


FIGURA 4.44 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 15.09.78
CANAL ESQUERDO - ME

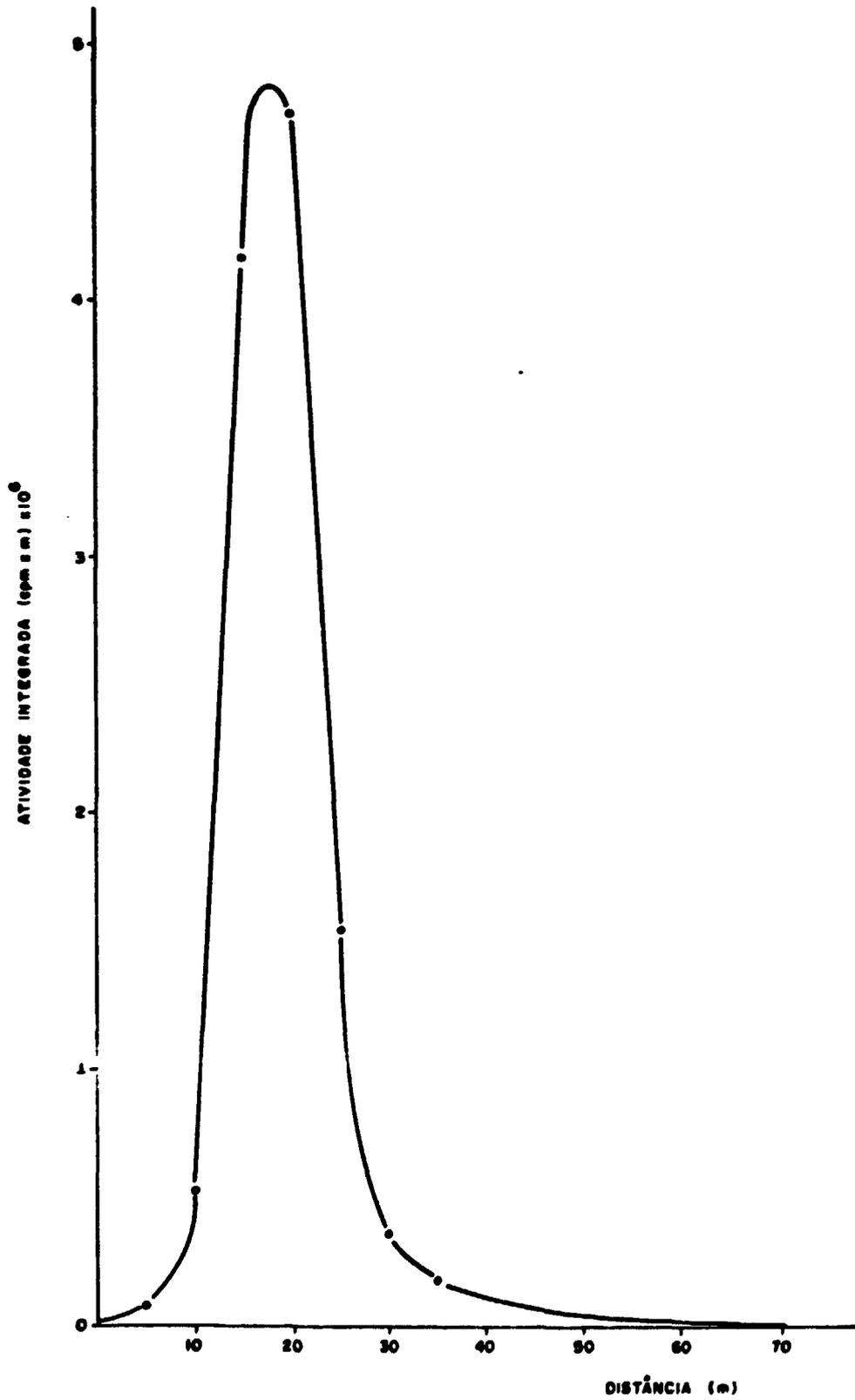


FIGURA 4.45 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 20.09.78
CANAL ESQUERDO - ME

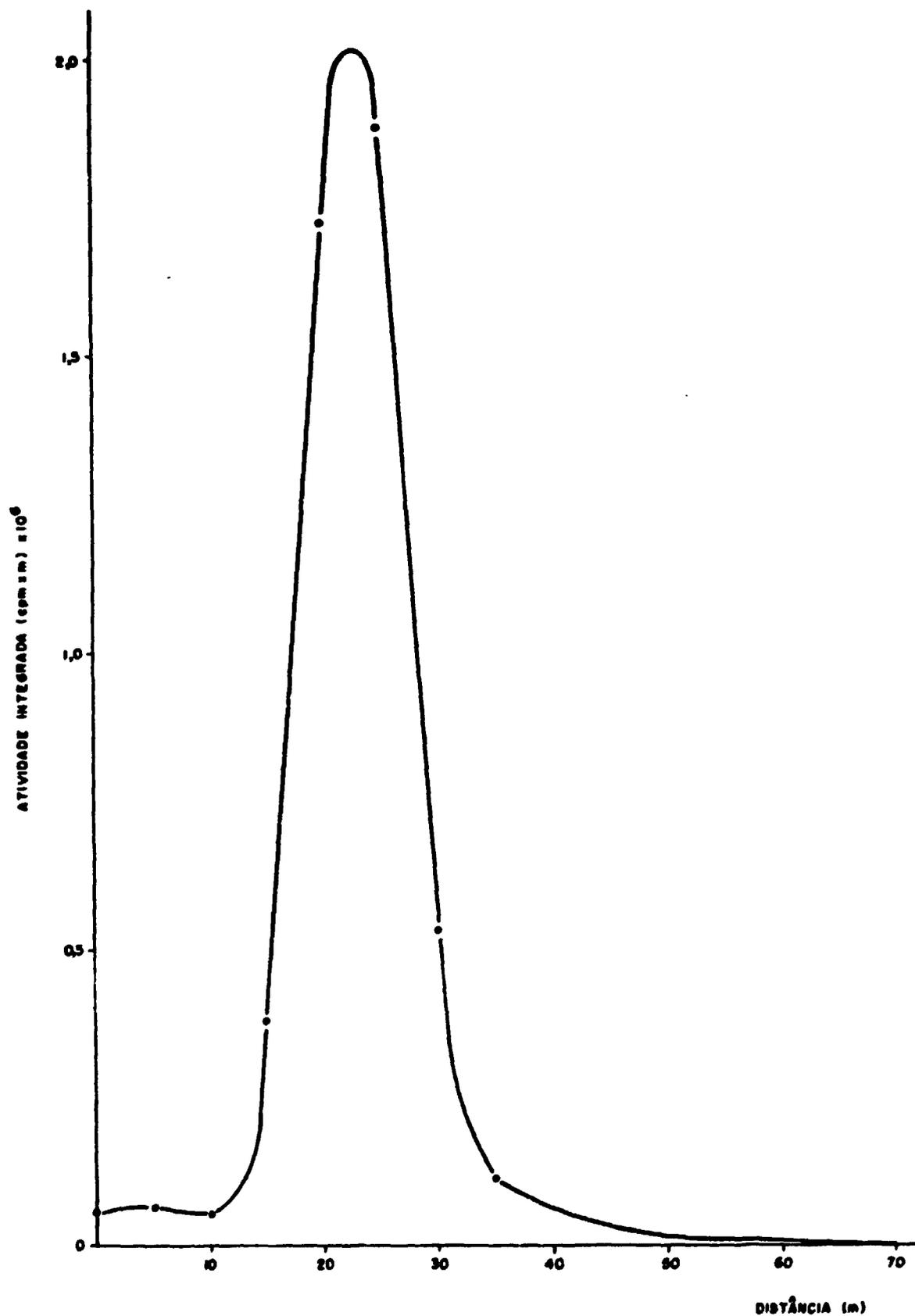


FIGURA 4.46 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 24.09.78
CANAL ESQUERDO - ME

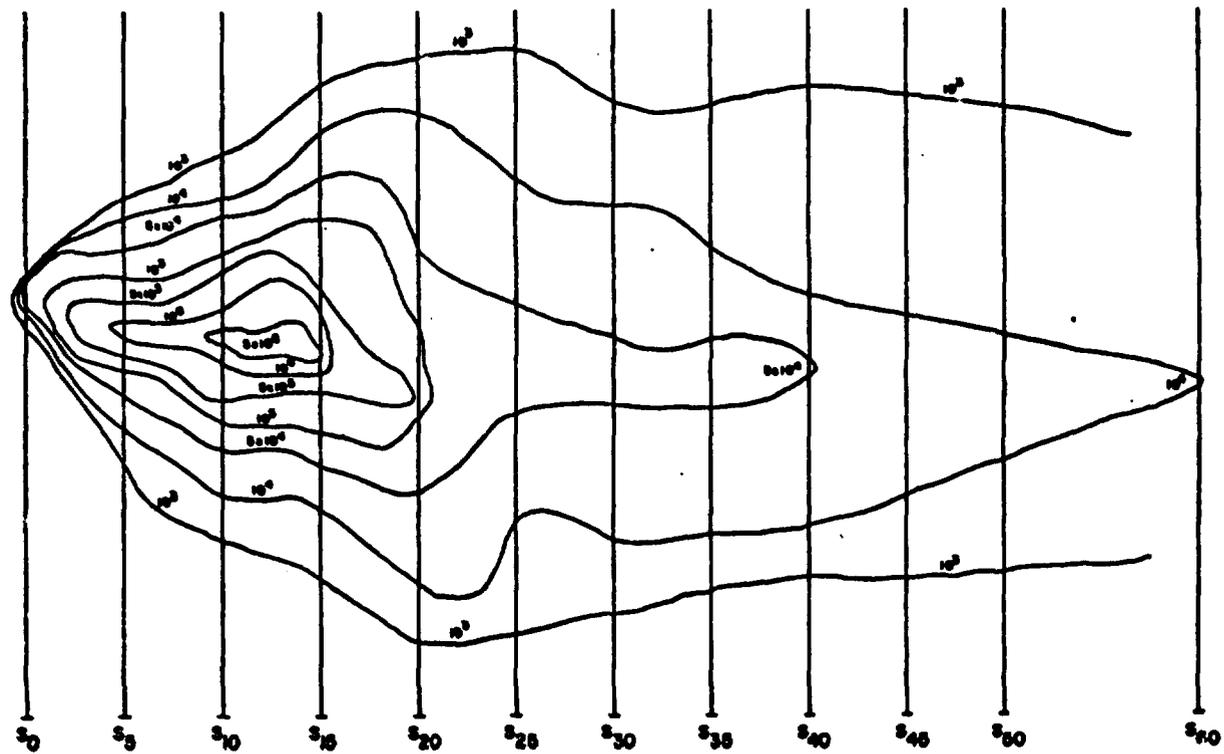


FIGURA 4.47 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 15.09.78
CANAL ESQUERDO - ME

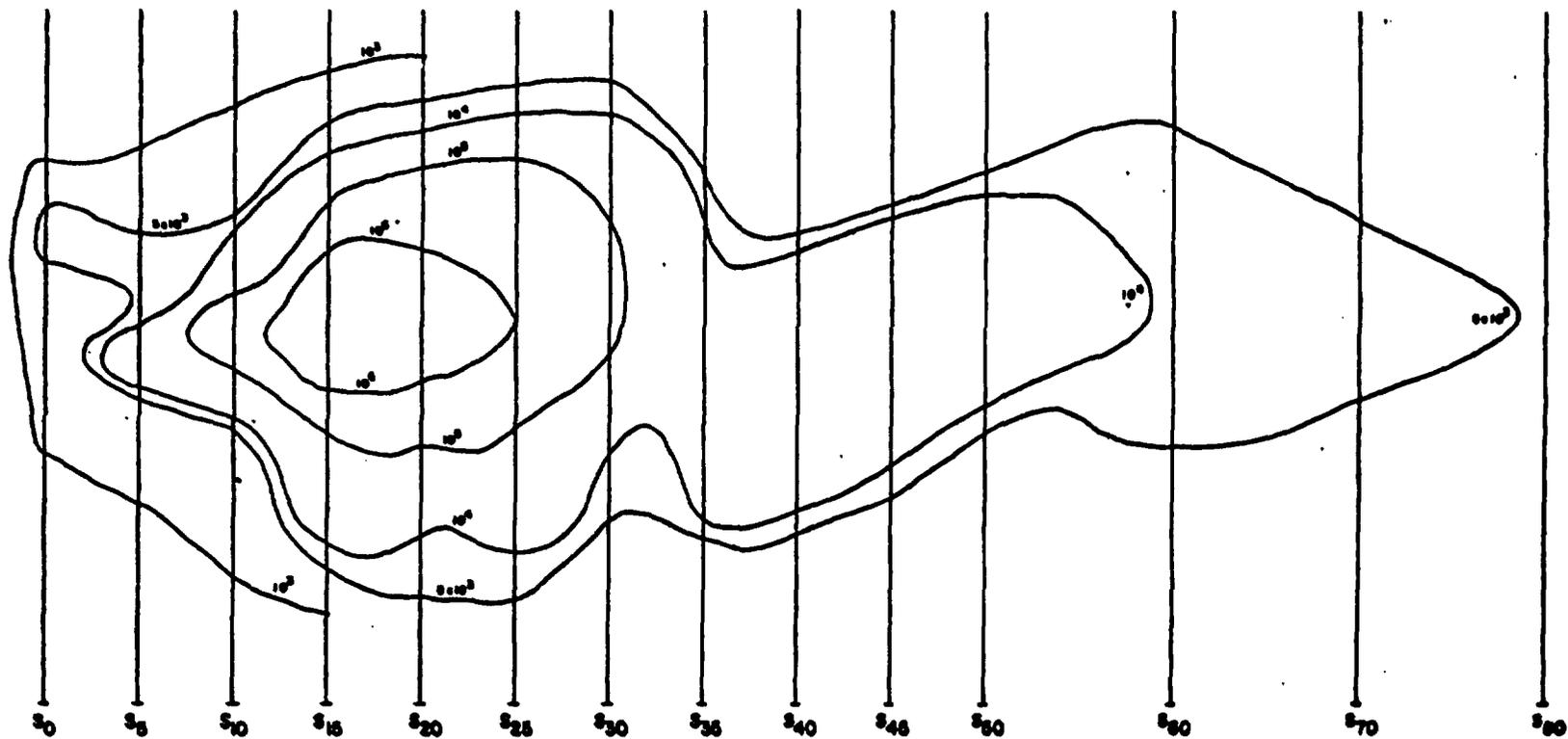


FIGURA 4.48 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 29.09.78
CANAL ESQUERDO - ME

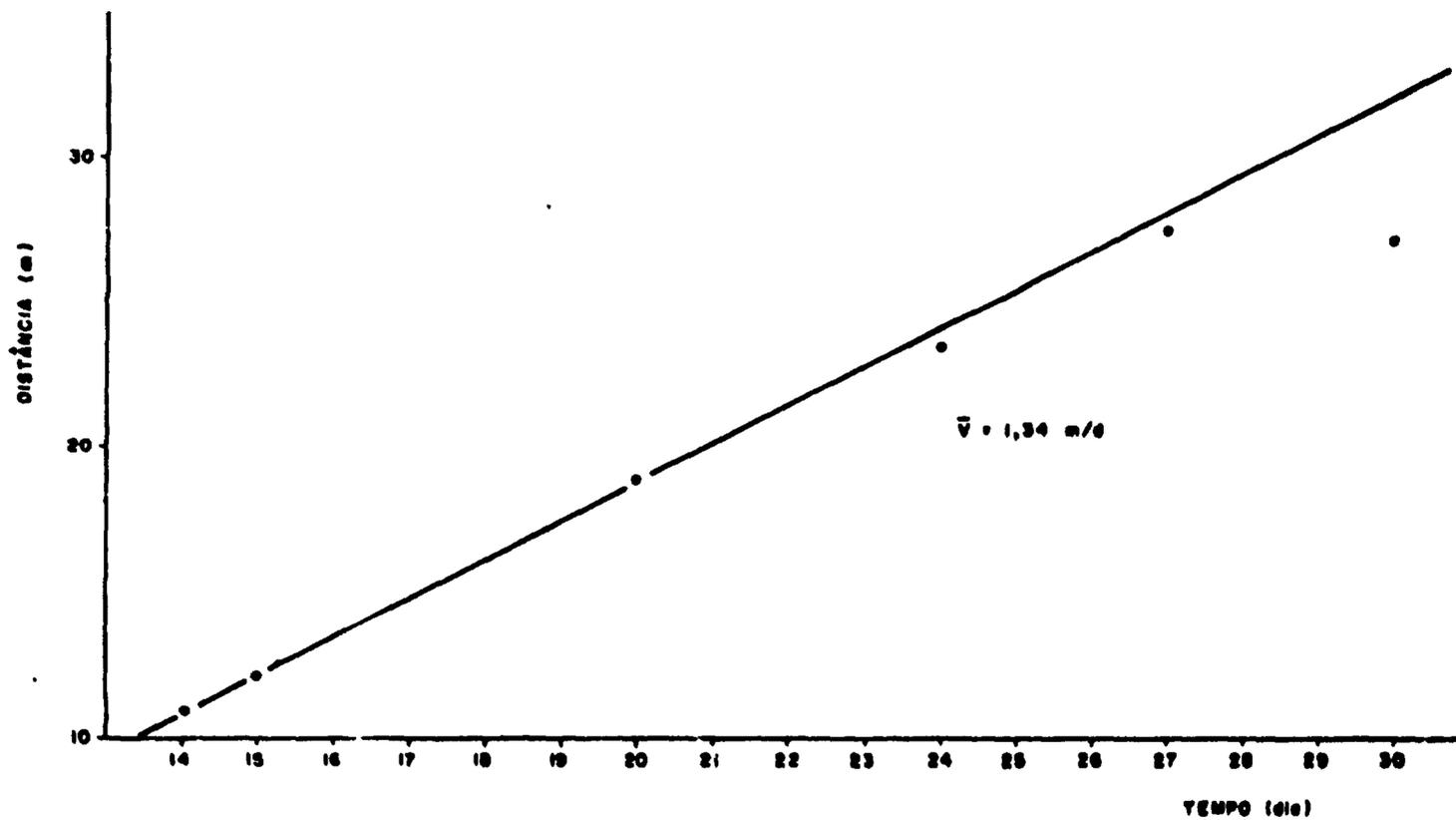


FIGURA 4.49 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 13.09.78 a 04.10.78
CANAL ESQUERDO - ME

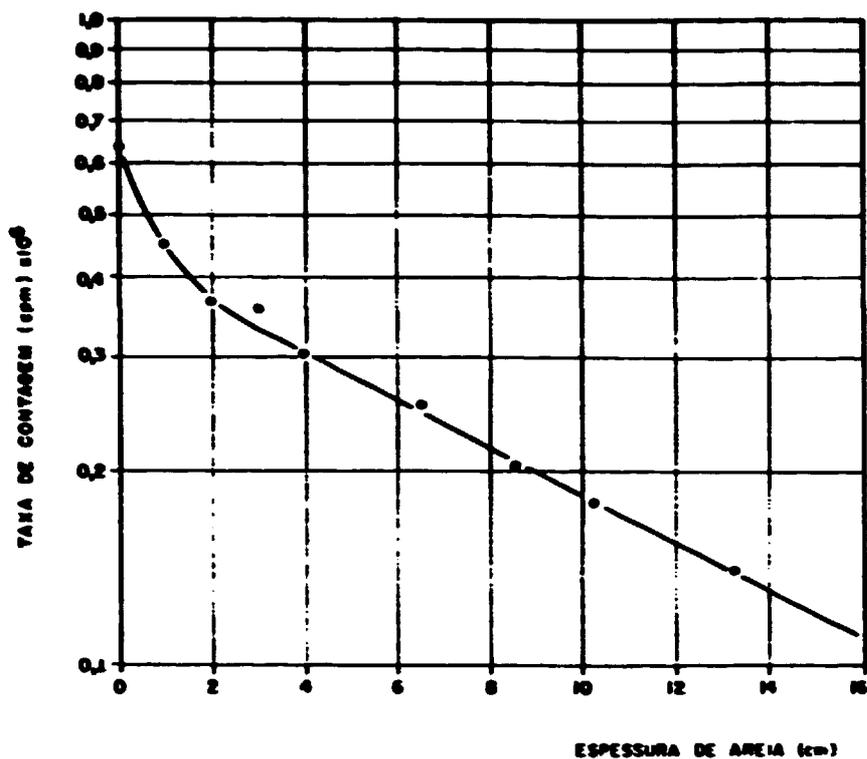


FIGURA 4.50 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR
13.09.78 a 04.10.78 - CANAL ESQUERDO - ME

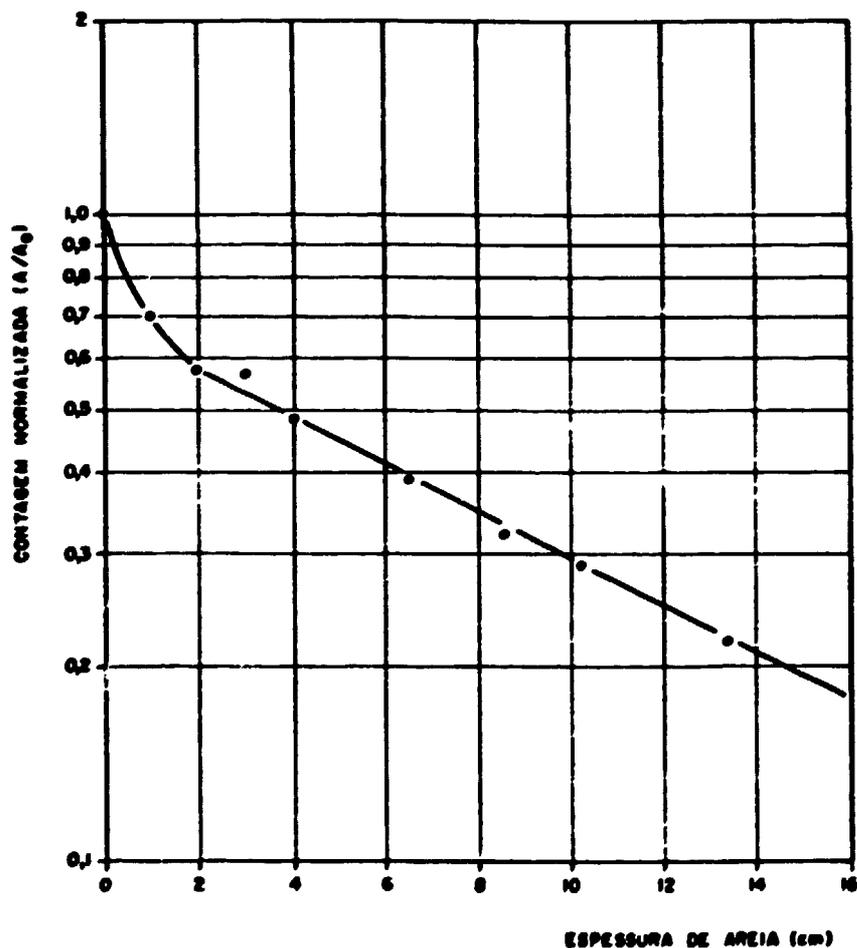


FIGURA 4.51 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA
DO DETECTOR - 13.09.78 a 04.10.78 CANAL ESQUERDO - ME

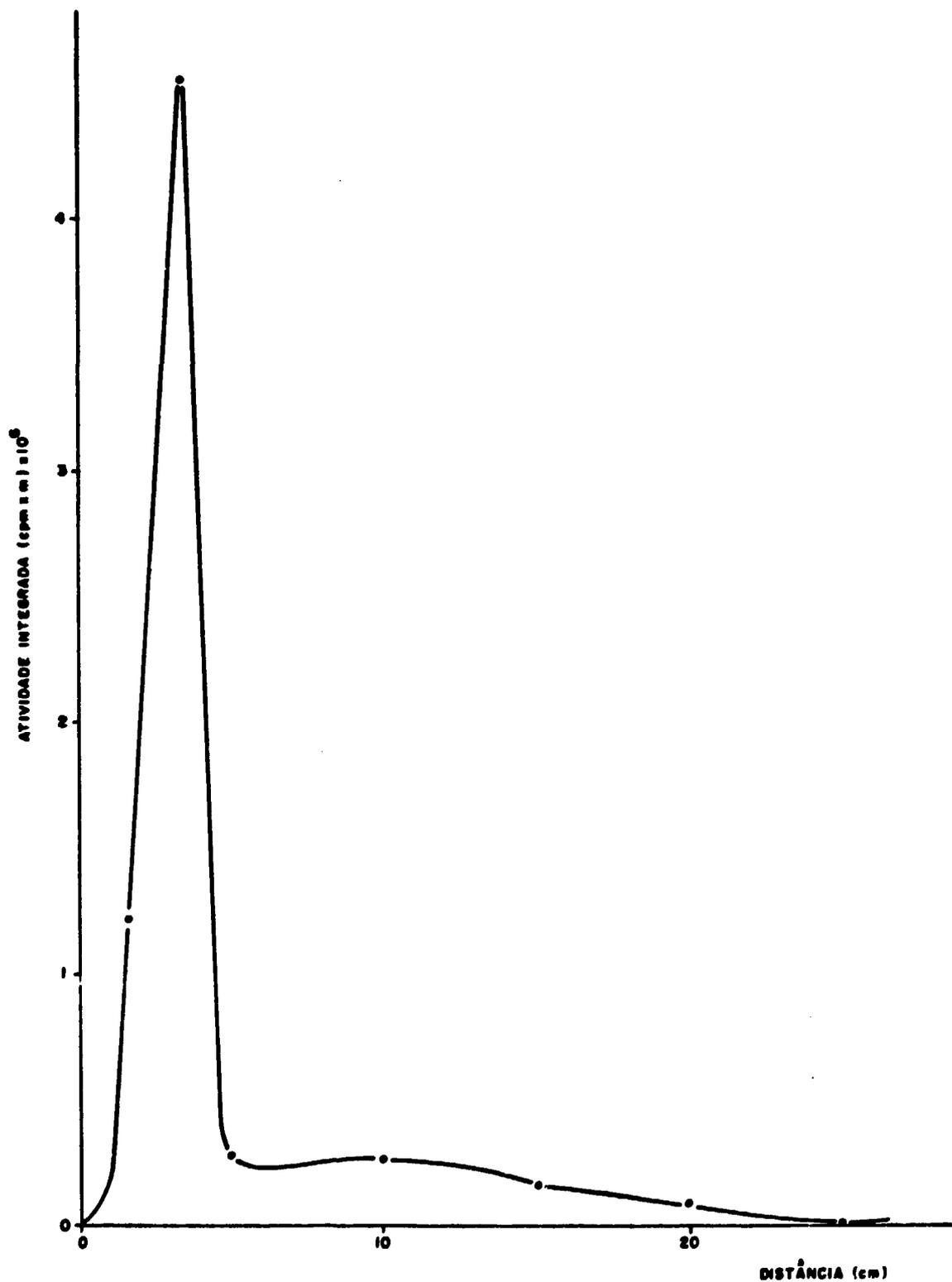


FIGURA 4.52 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 20.11.78
CANAL ESQUERDO - MD

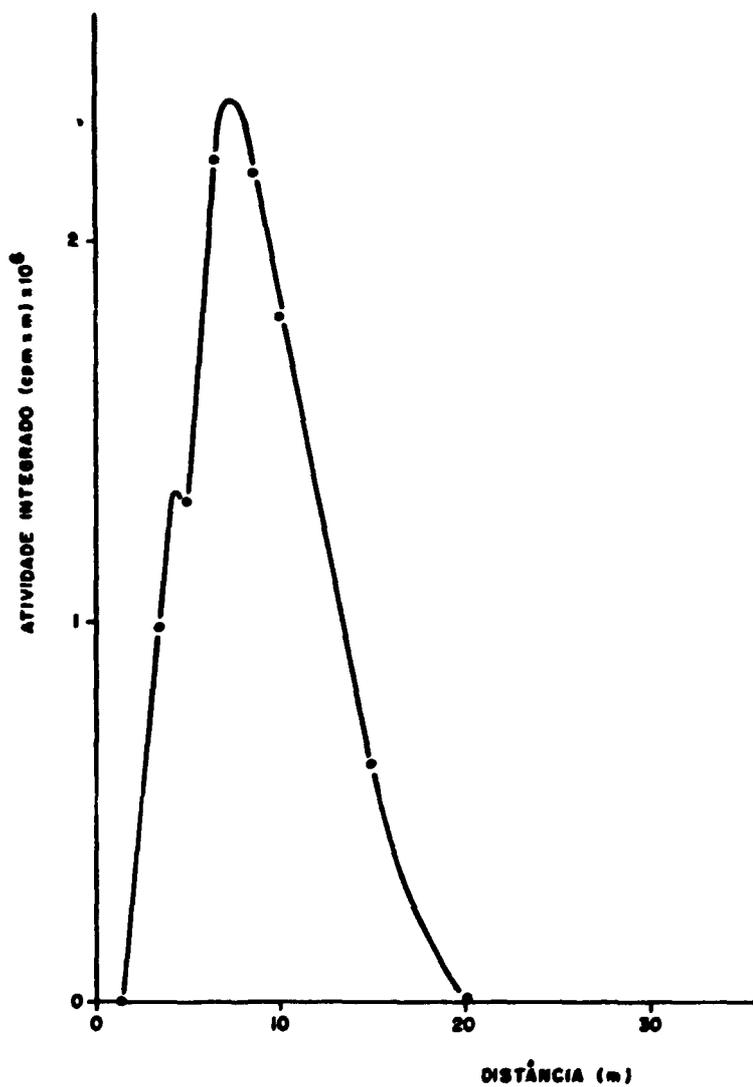


FIGURA 4.53 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 24.11.78
CANAL ESQUERDO - MD

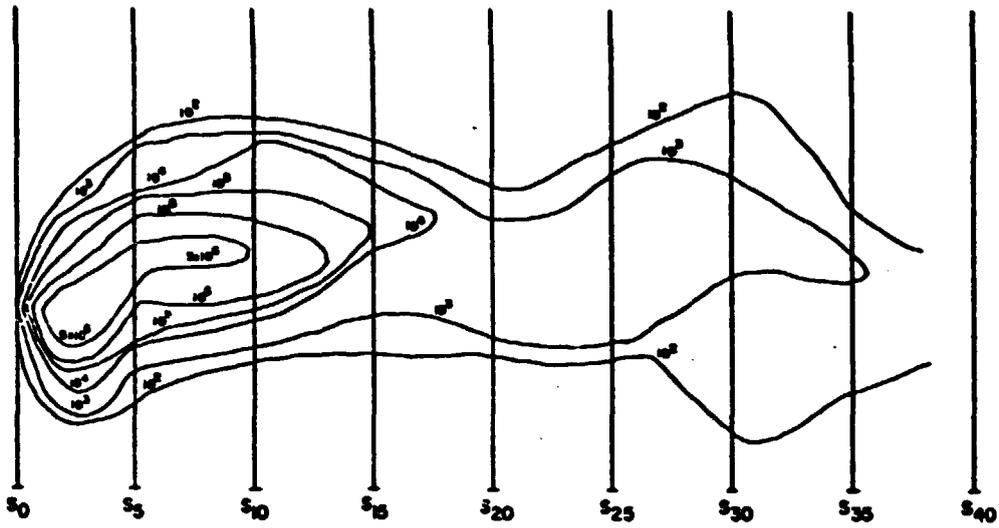


FIGURA 4.54 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 22.11.78
CANAL ESQUERDO - ME

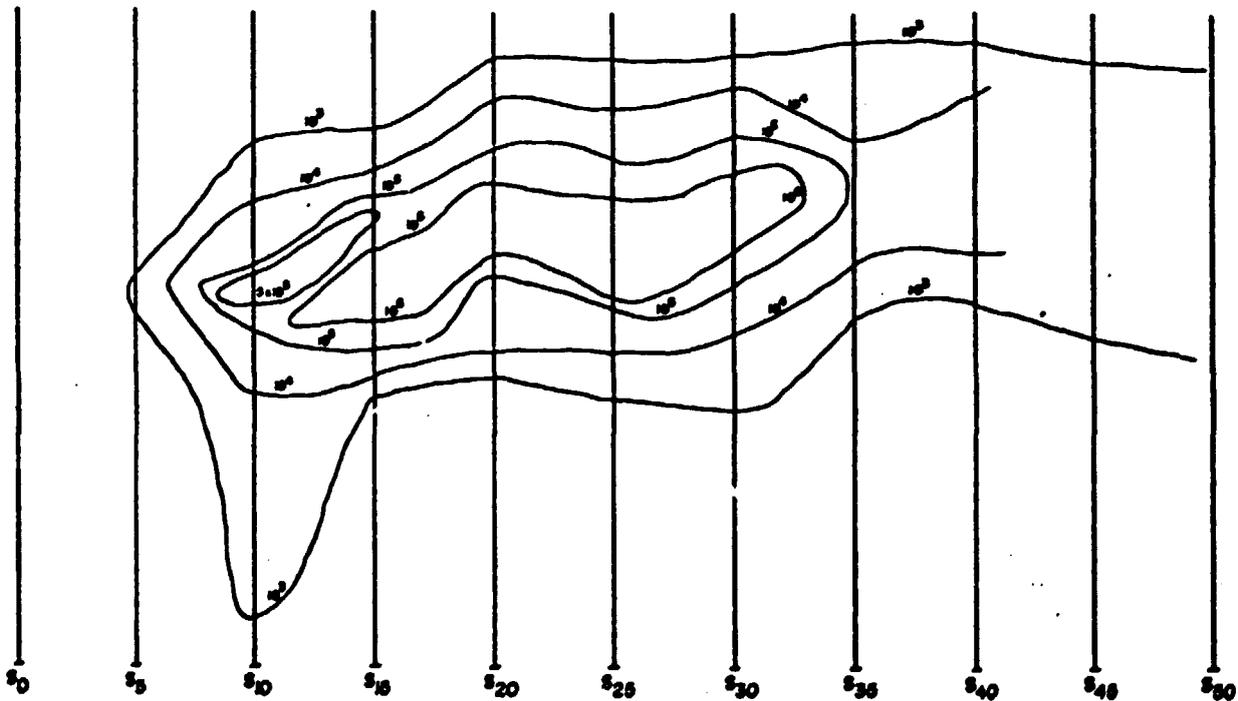


FIGURA 4.55 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 30.11.78
CANAL ESQUERDO - ME

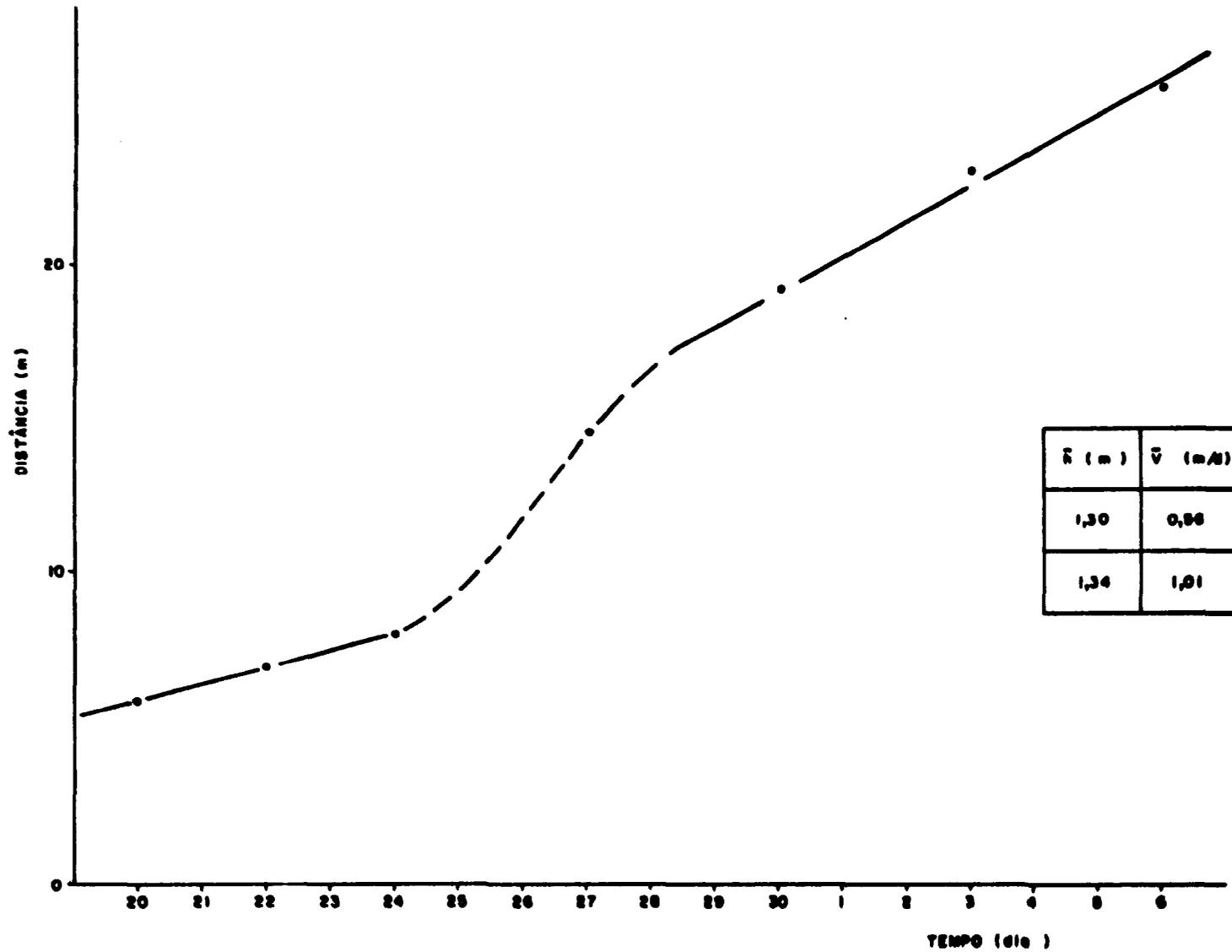


FIGURA 4.56 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 10.11.78 a 09.12.78
CANAL ESQUERDO - MD

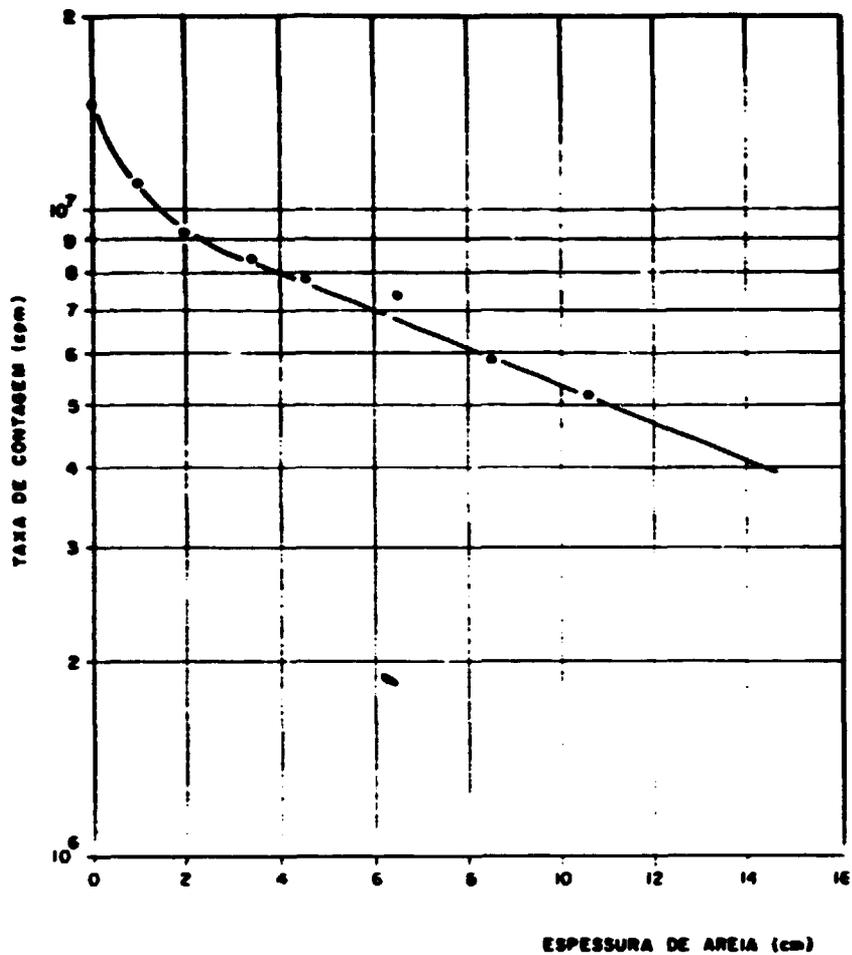


FIGURA 4.57 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR- 10.11 a 09.12 - MD

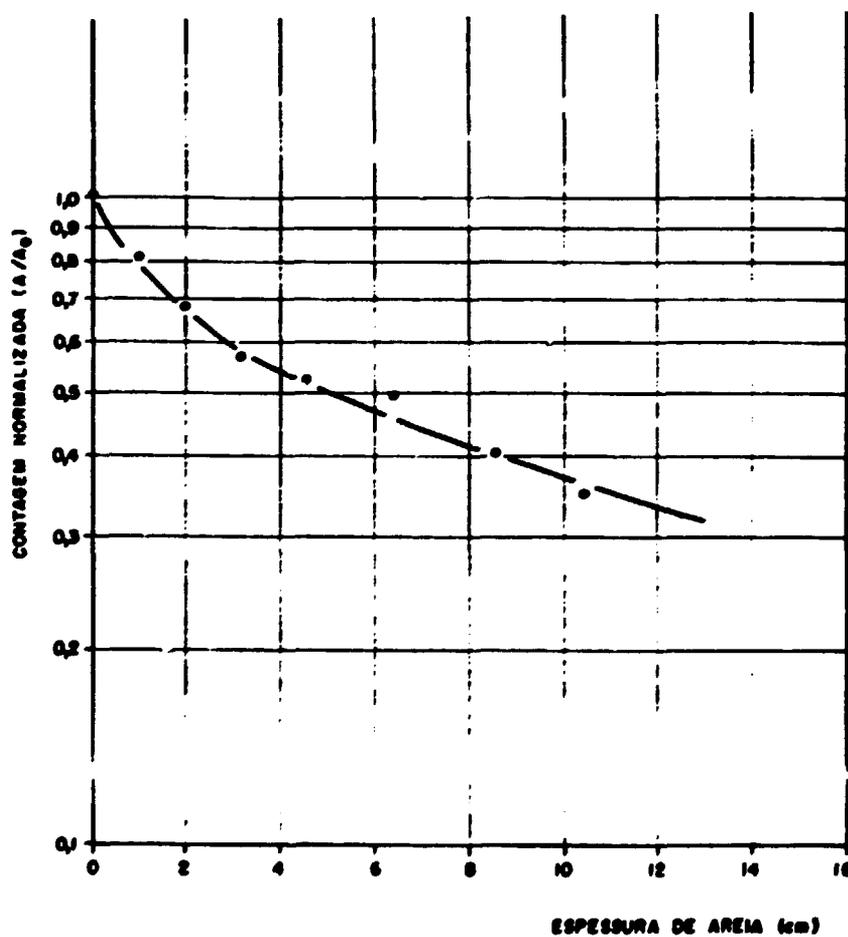


FIGURA 4.58 - CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA - 10.11 a 09.12 - MD

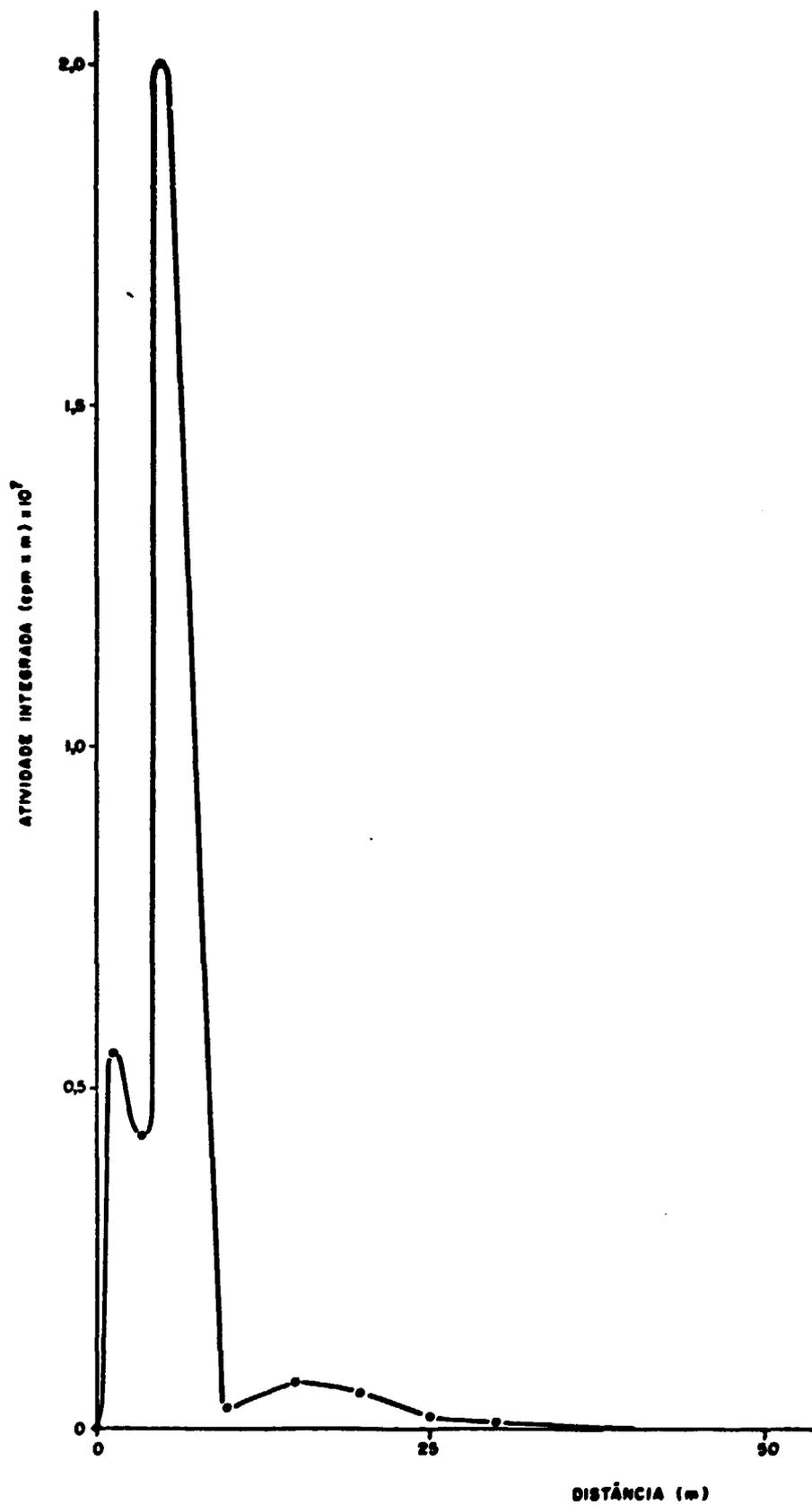


FIGURA 4.59 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 20.11.78
CANAL ESQUERDO - MD

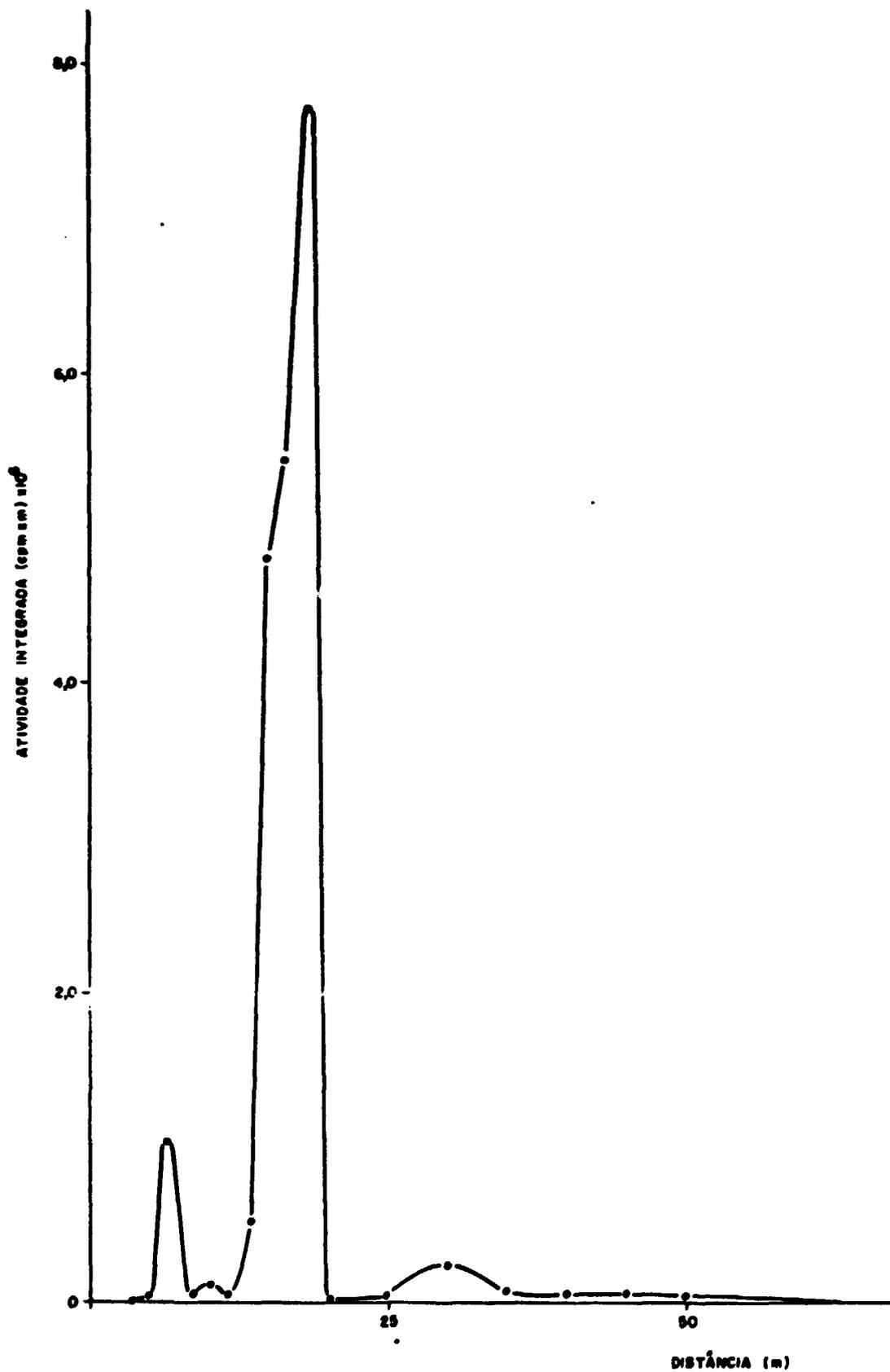


FIGURA 4.60 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 29.11.78
CANAL ESQUERDO - ME

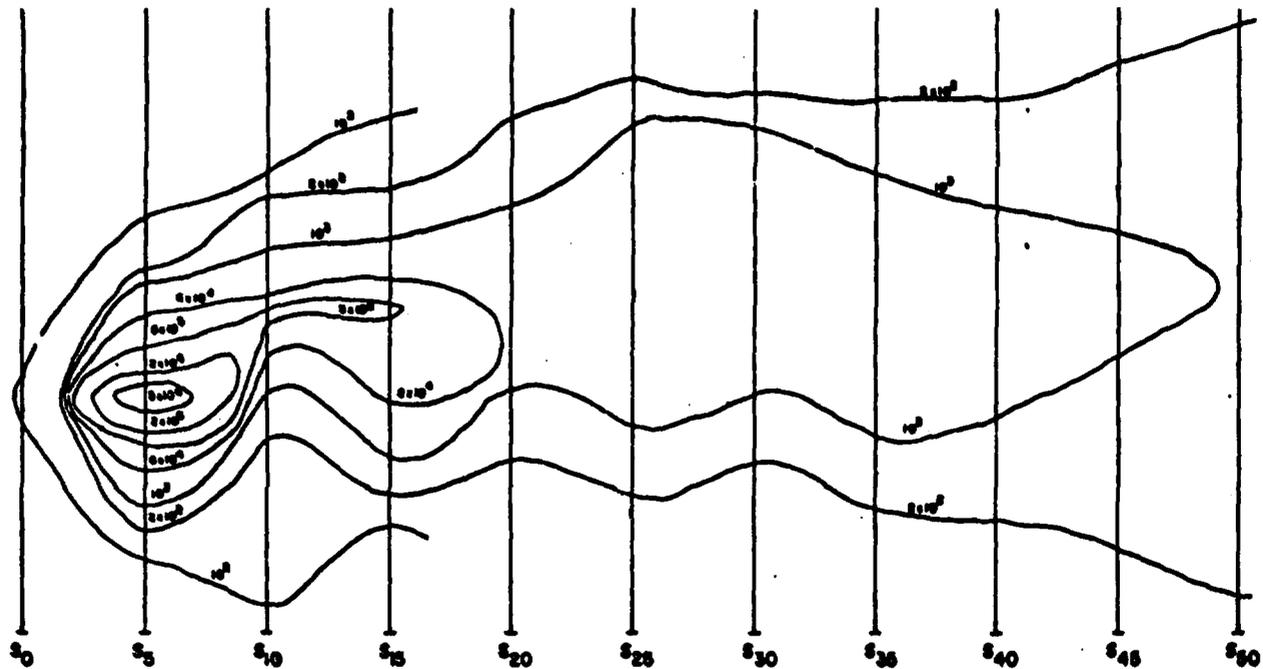


FIGURA 4.61 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 21.11.78 - ME

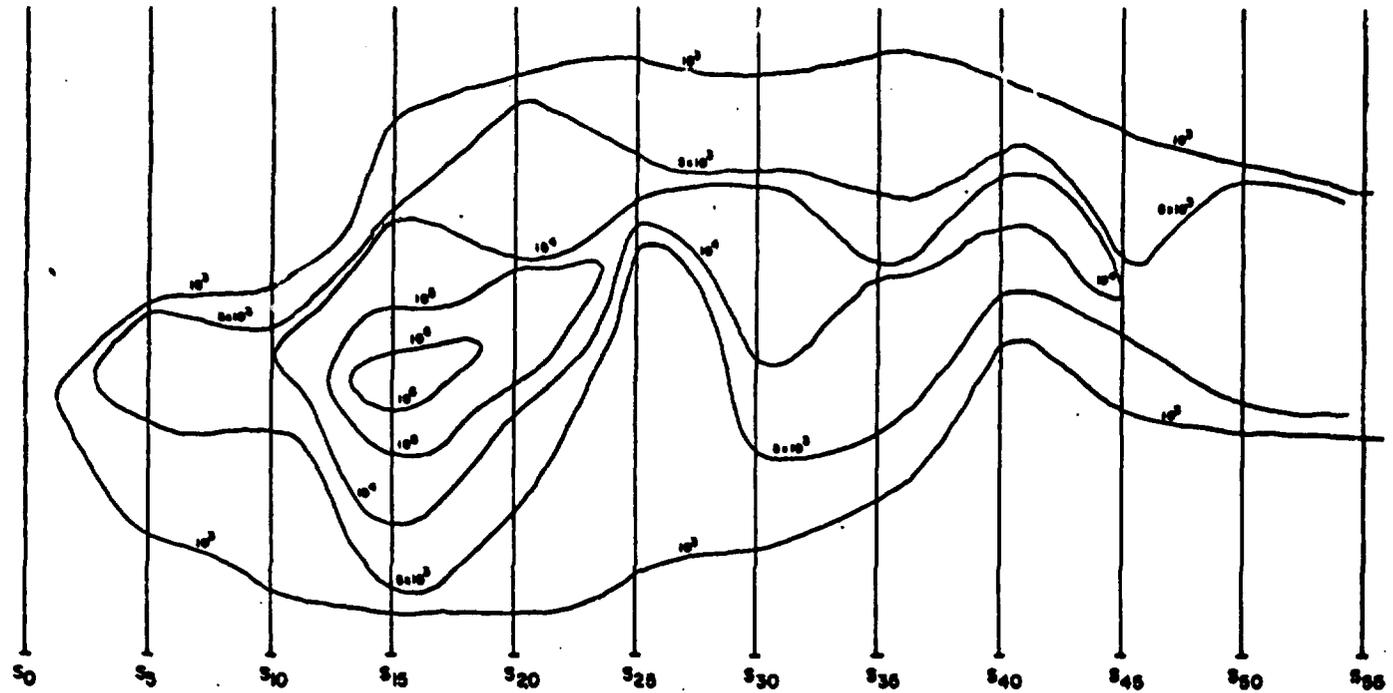


FIGURA 4.62 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 29.11.78 - ME

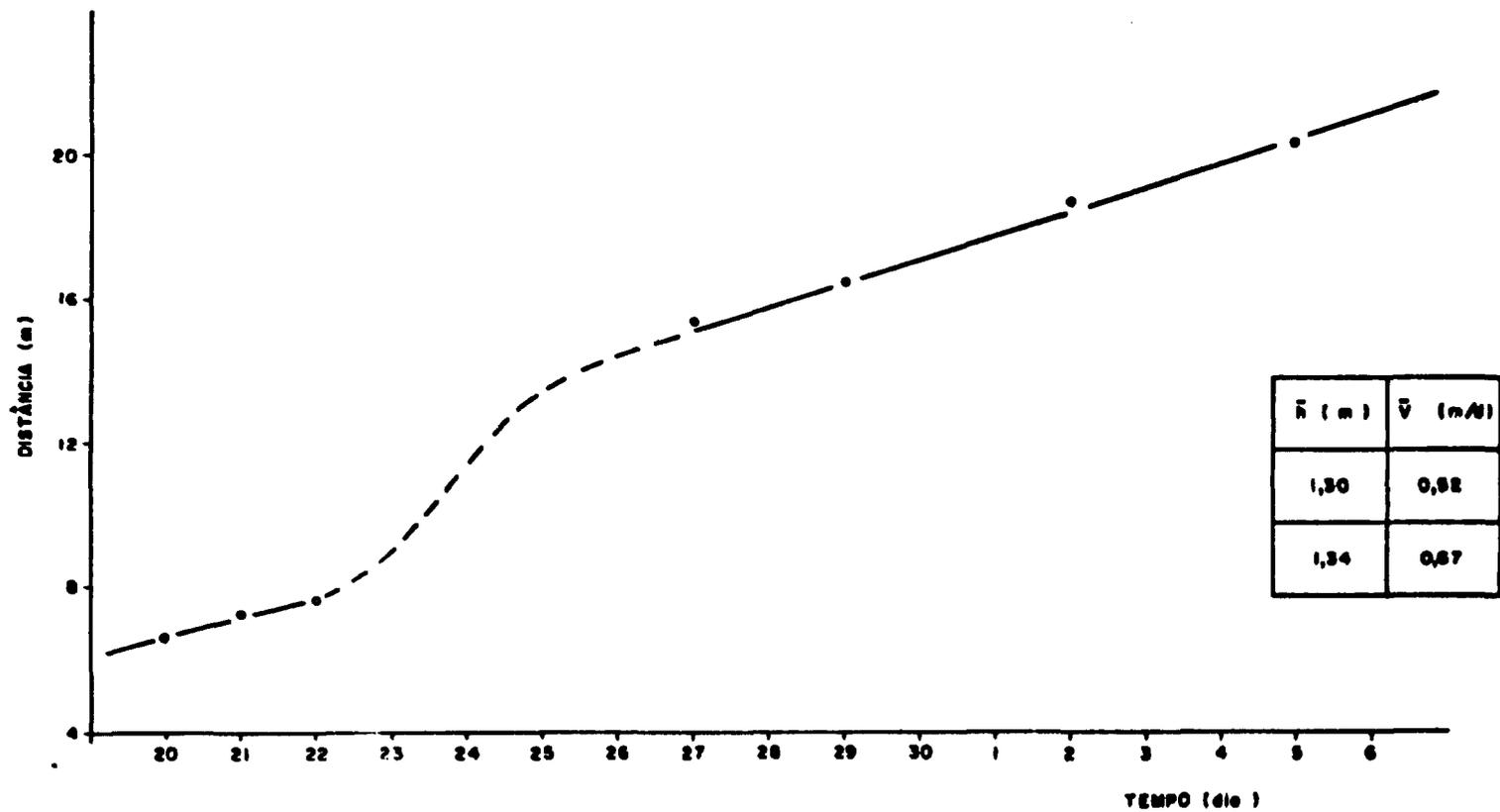


FIGURA 4.63 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO
CAMPANHA DE 10.11.78 a 09.12.78 - CANAL ESQUERDO - ME

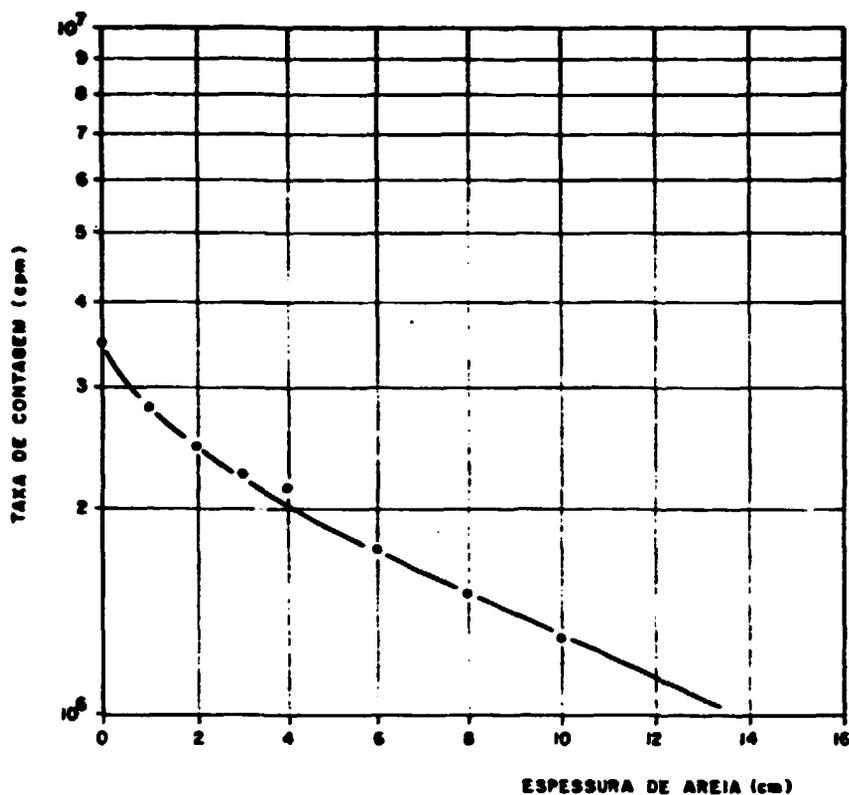


FIGURA 4.64 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR 10.11 a 09.12 - ME

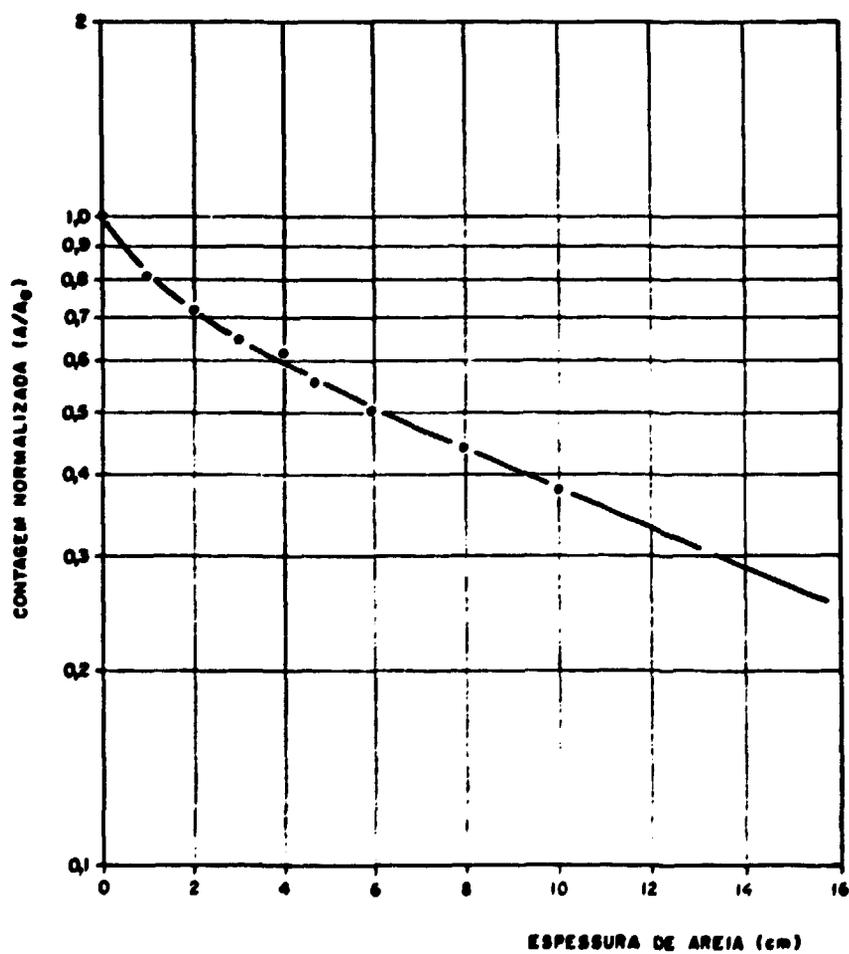


FIGURA 4.65 - CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA - 10.11 a 09.12 - ME

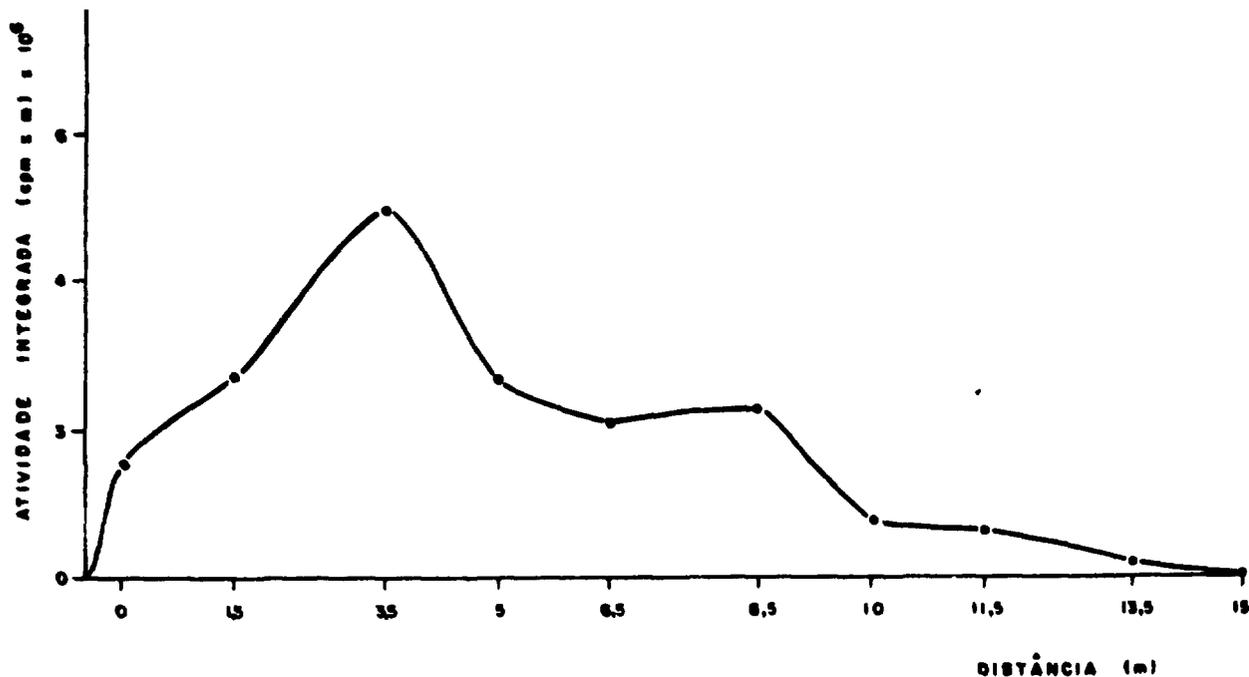


FIGURA 4.66 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 07.01.79 - MD

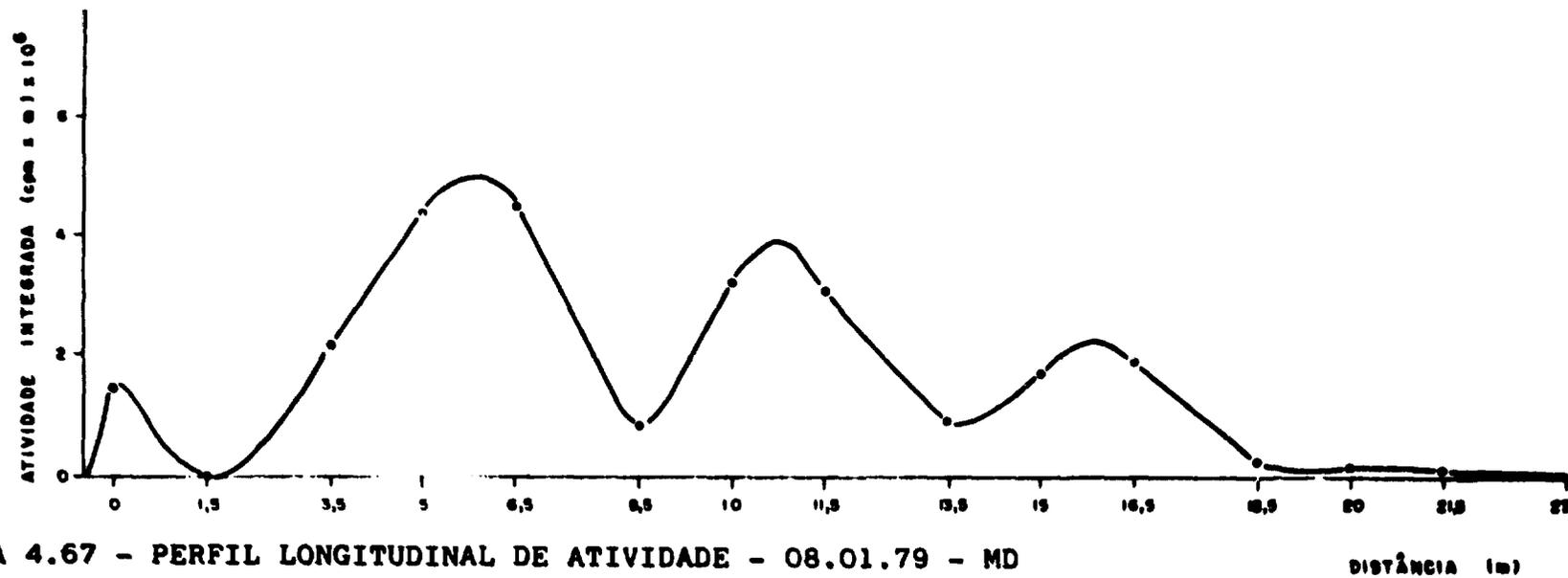


FIGURA 4.67 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 08.01.79 - MD

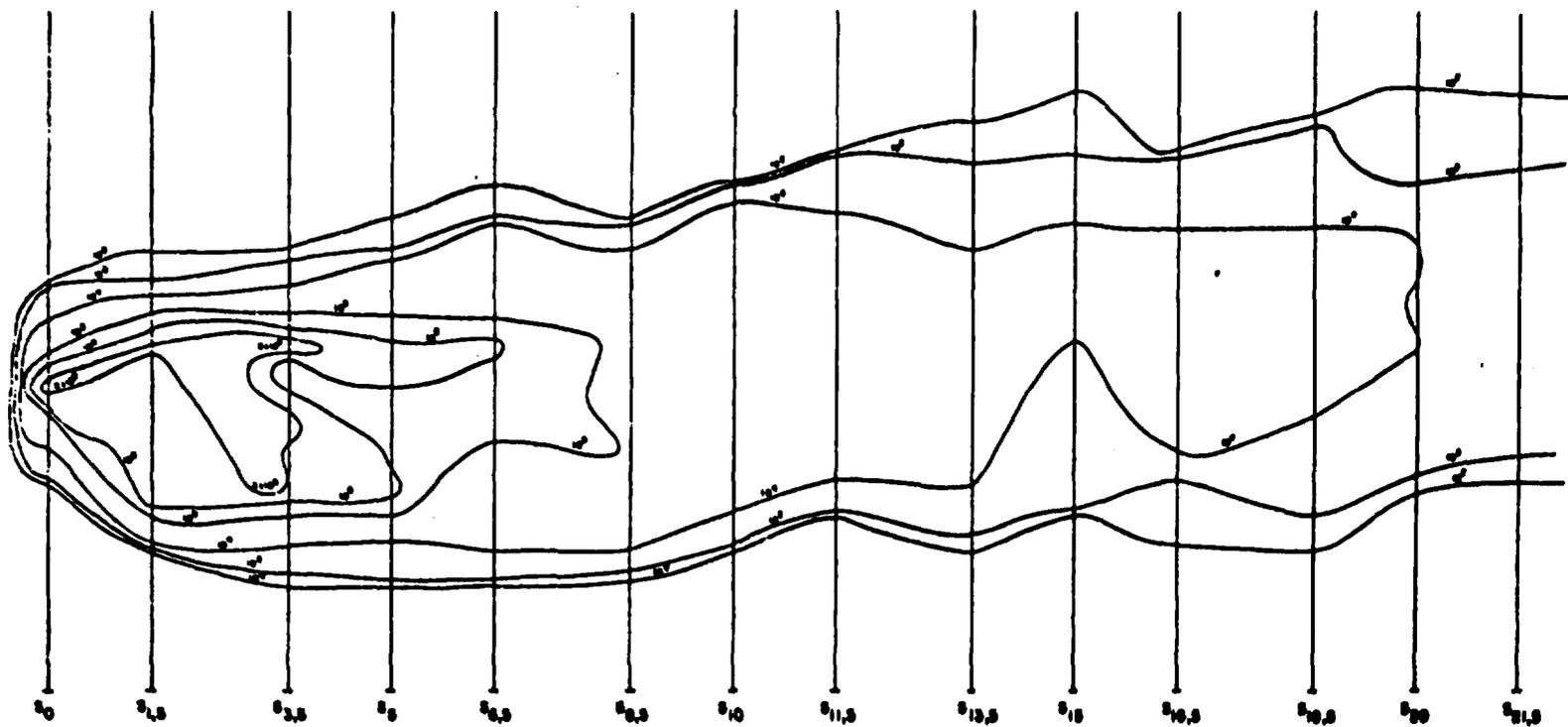


FIGURA 4.68 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 07.01.79 - MD

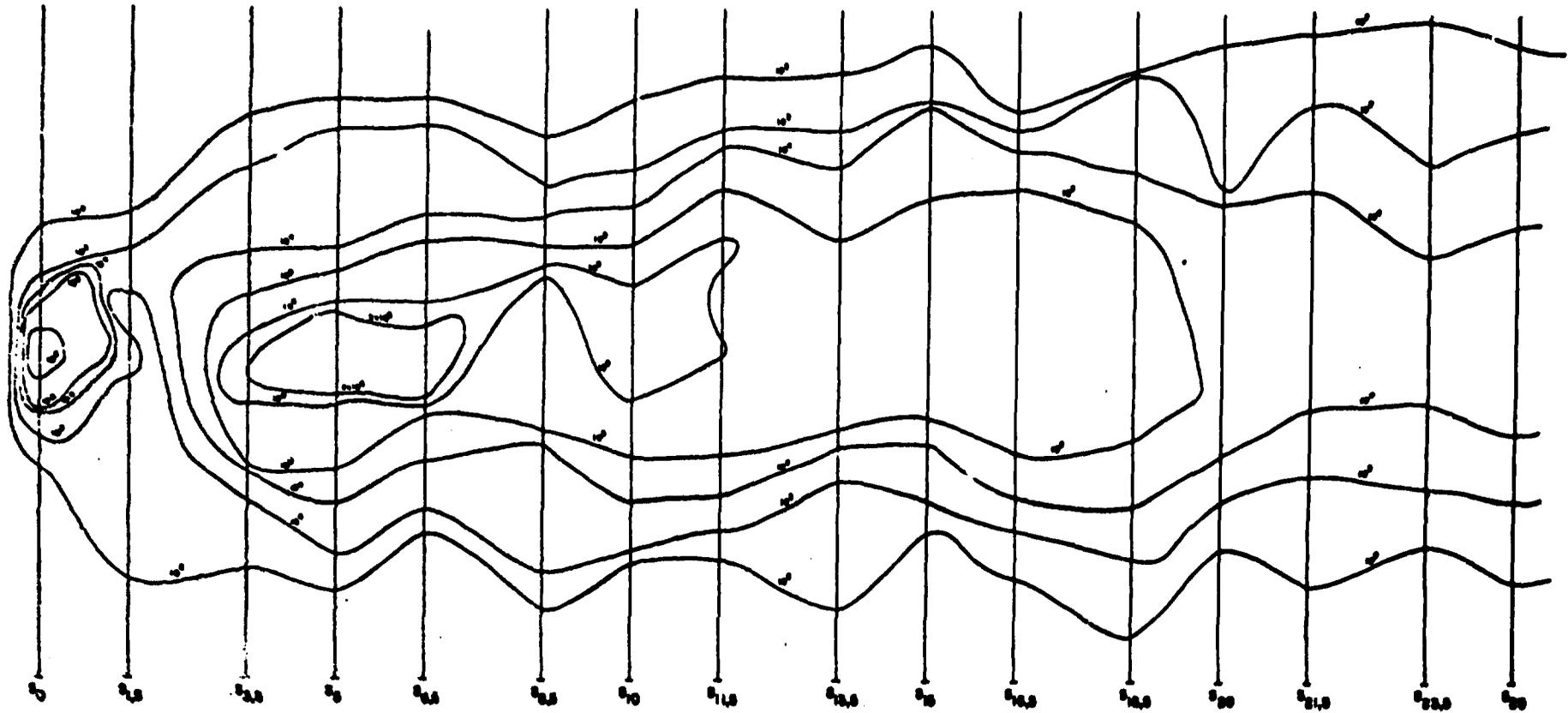


FIGURA 4.69 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 08.01.79 - MD

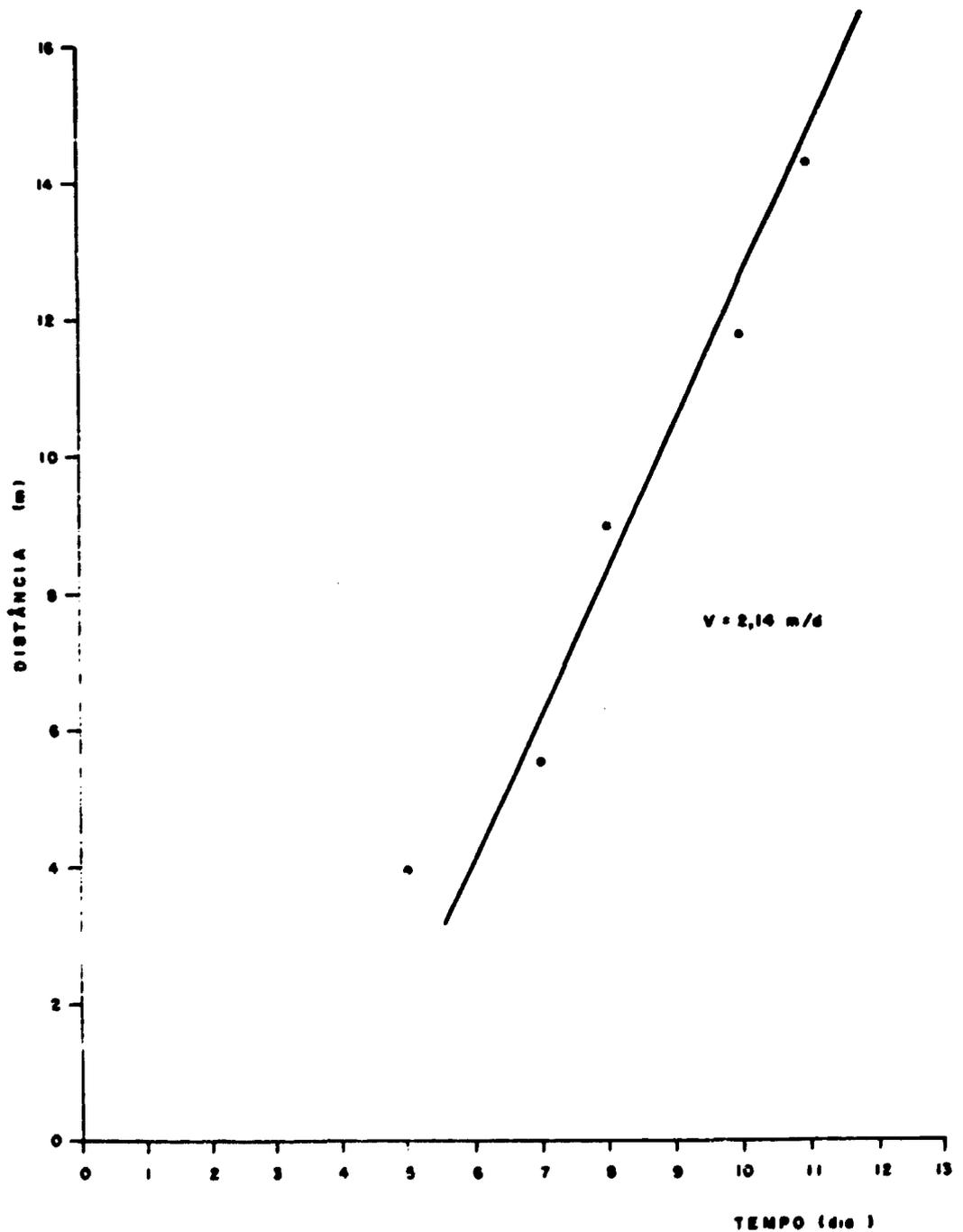


FIGURA 4.70 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 26.12.78 a 26.01.79 CANAL ESQUERDO - MD

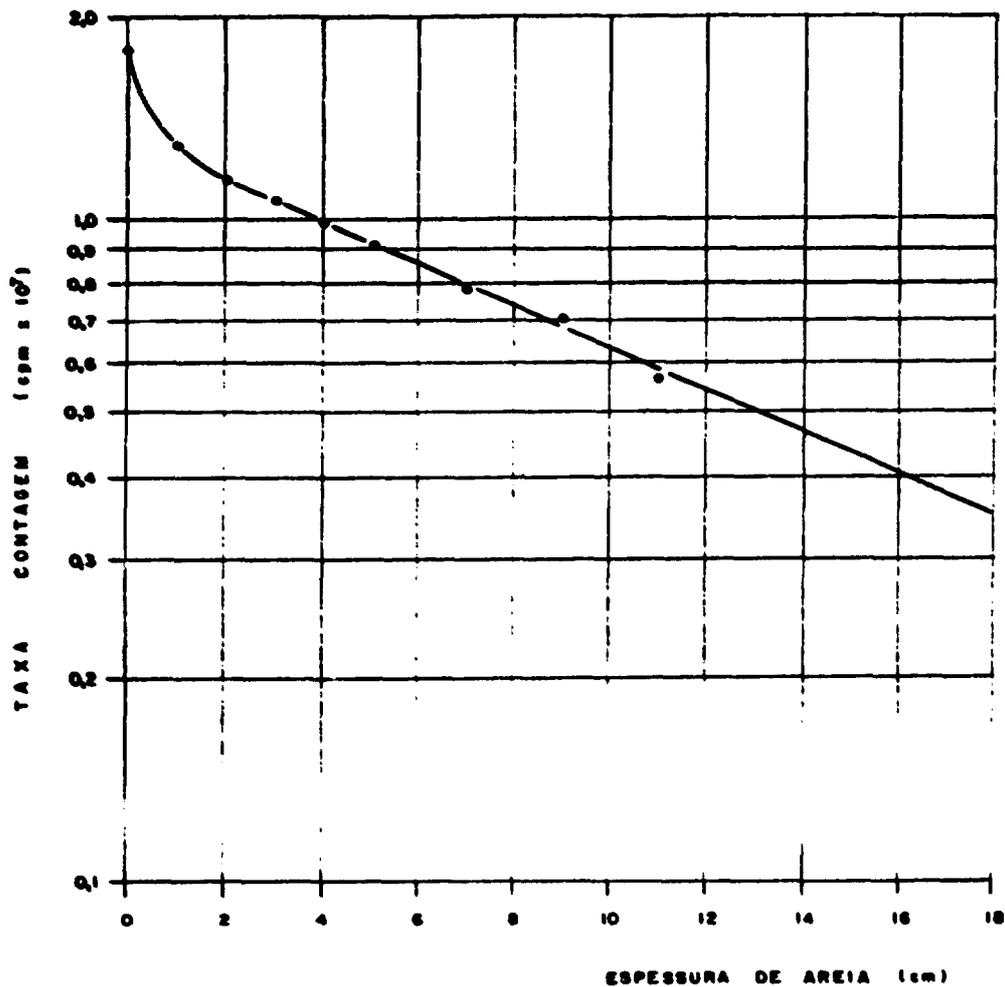


FIGURA 4.71 - CURVA DE CALIBRAÇÃO DO DETECTOR
26.12.78 a 26.01.79 - MD

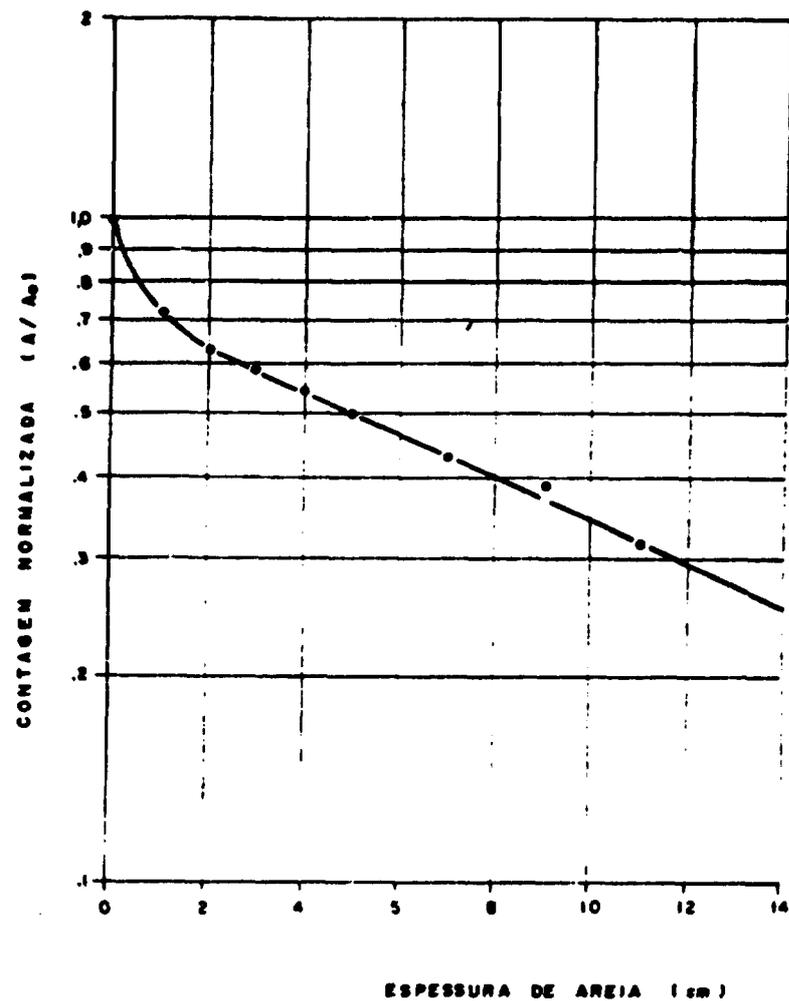


FIGURA 4.72 - CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA
26.12.78 a 26.01.79 - MD

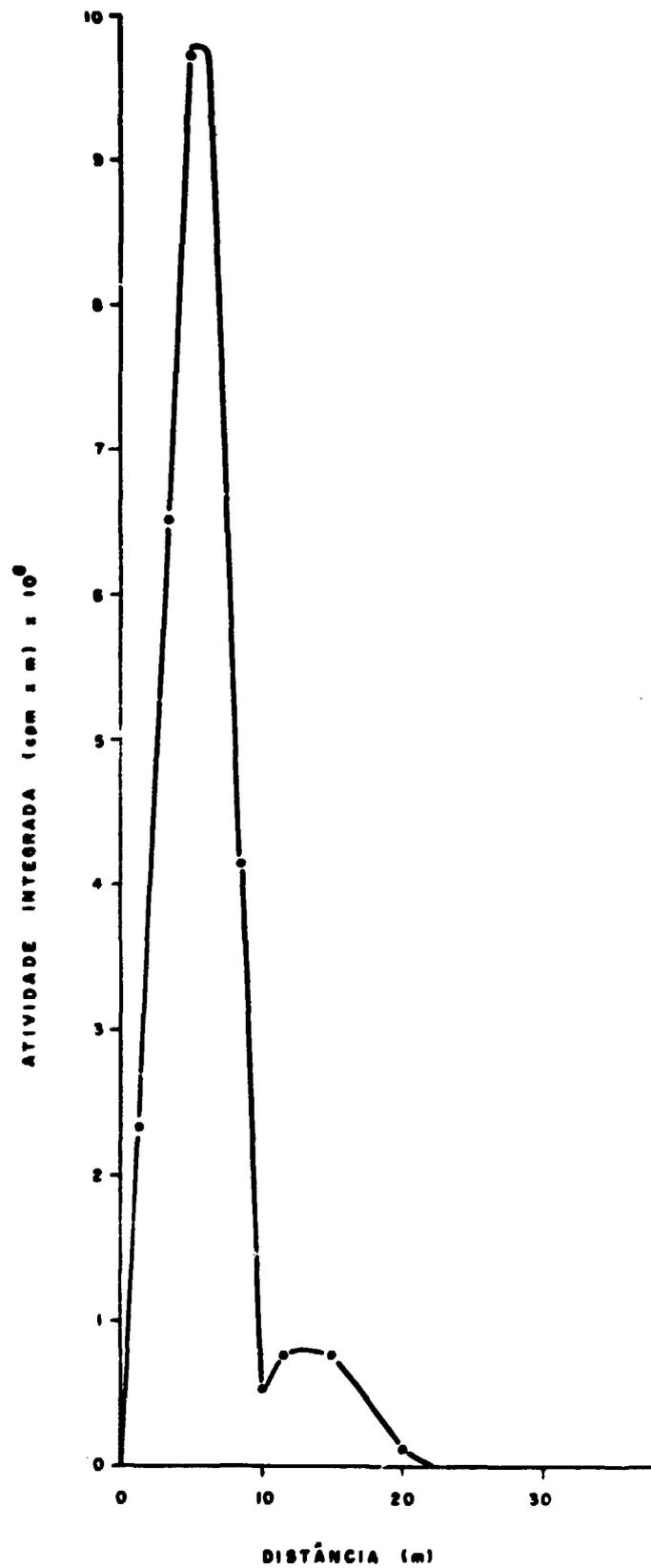


FIGURA 4.73 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 05.01.79
CANAL ESQUERDO - ME

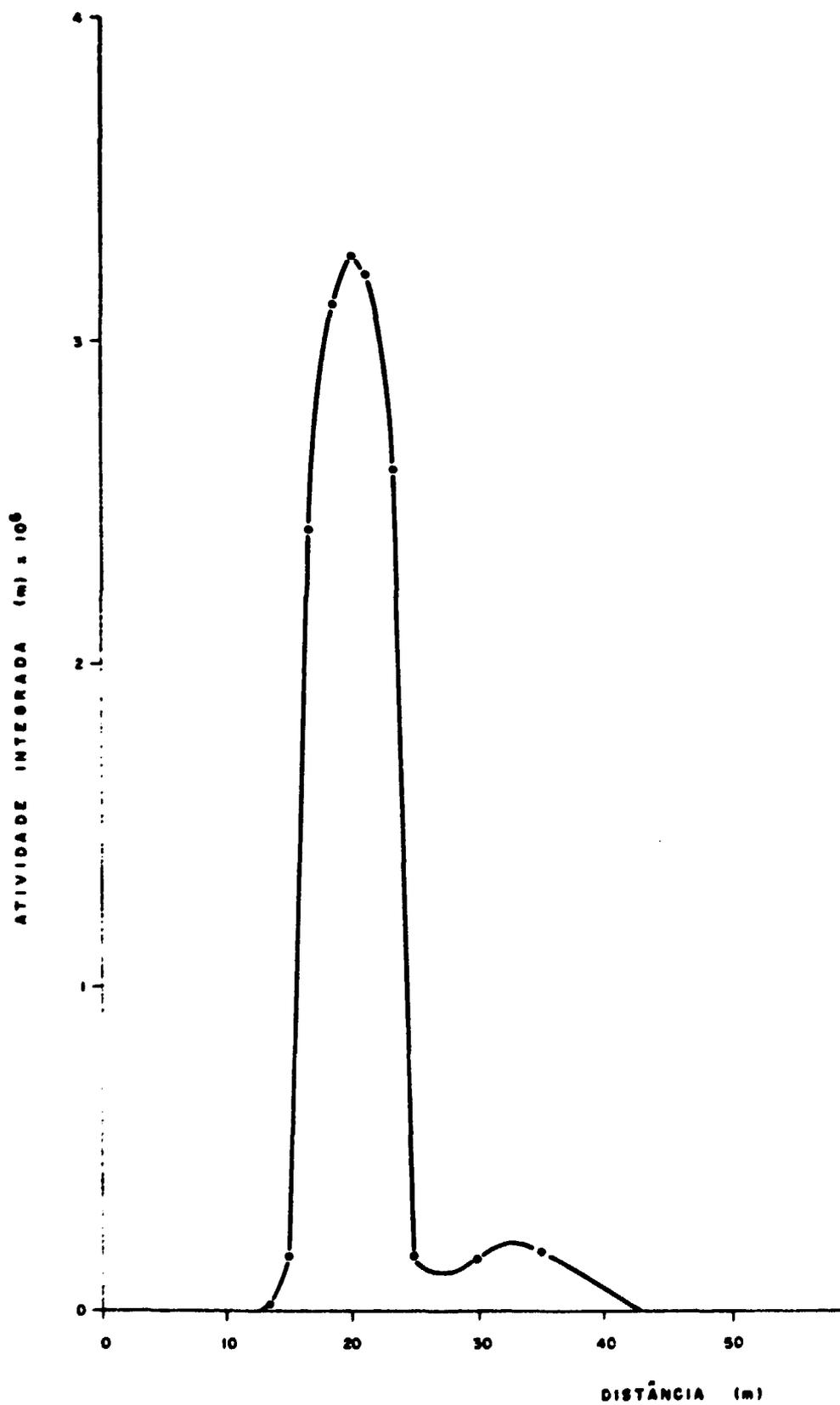


FIGURA 4.74 - PERFIL LONGITUDINAL DE ATIVIDADE - 10.01.79
CANAL ESQUERDO - ME

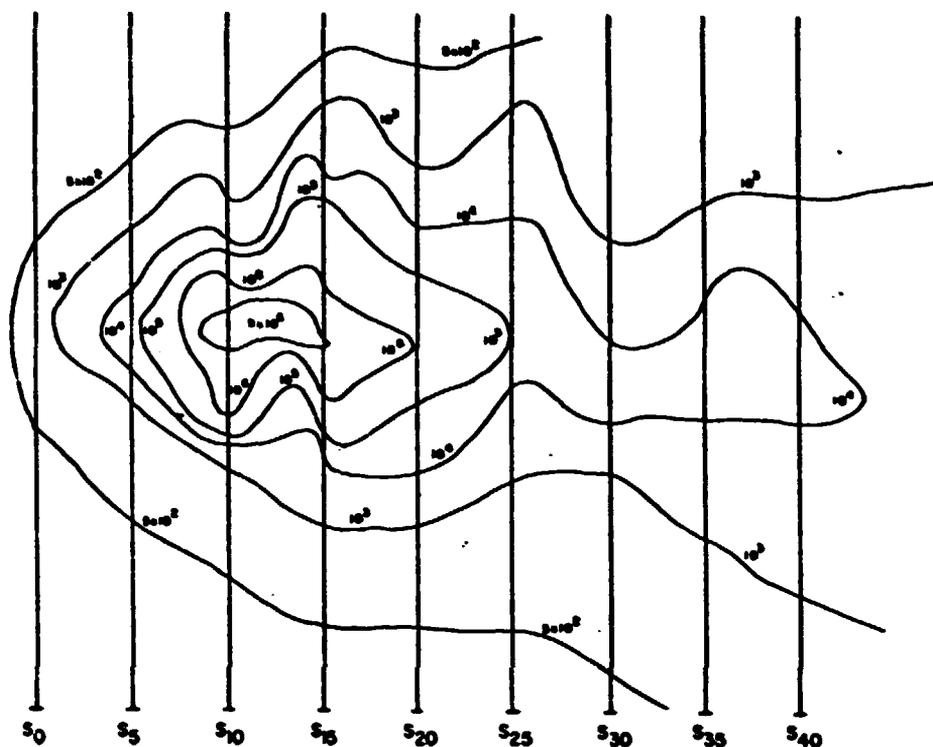


FIGURA 4.75 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 07.01.79
CANAL ESQUERDO - ME

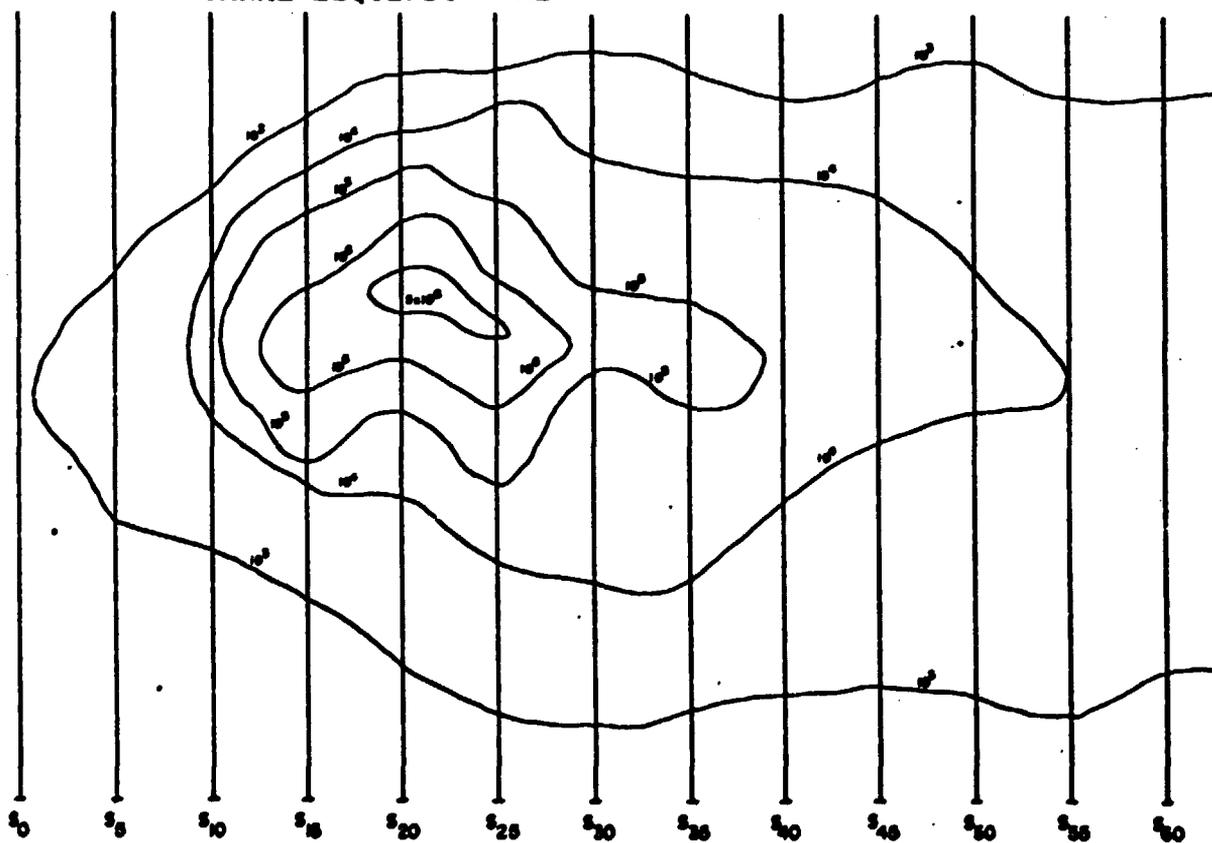


FIGURA 4.76 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE ISOATIVIDADE - 11.01.79
Canal Esquerdo - ME

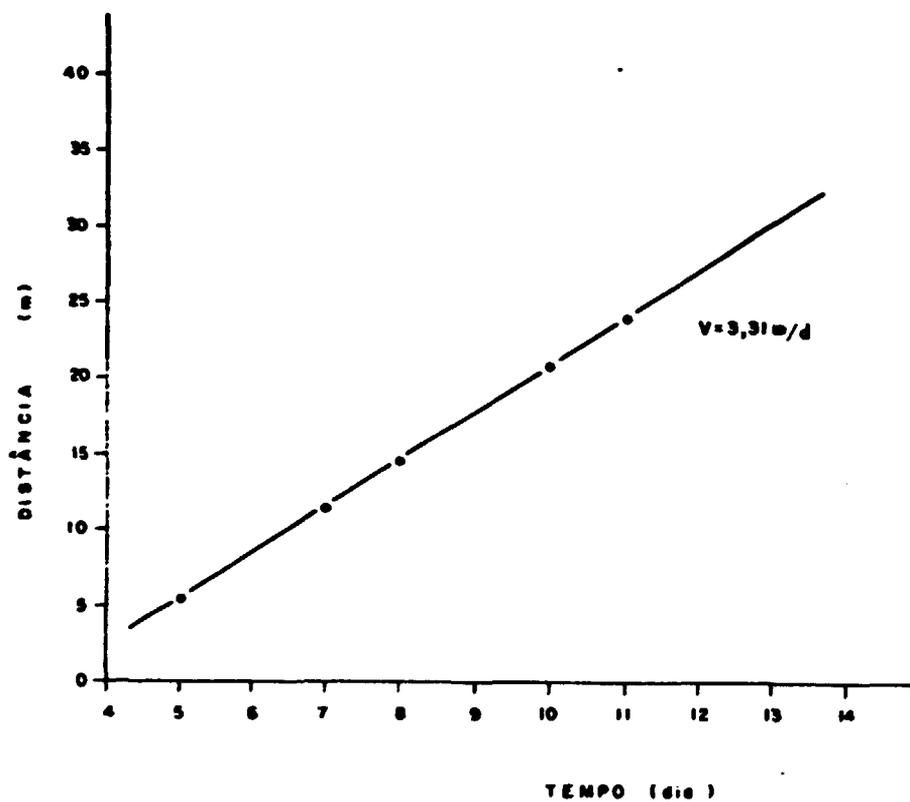
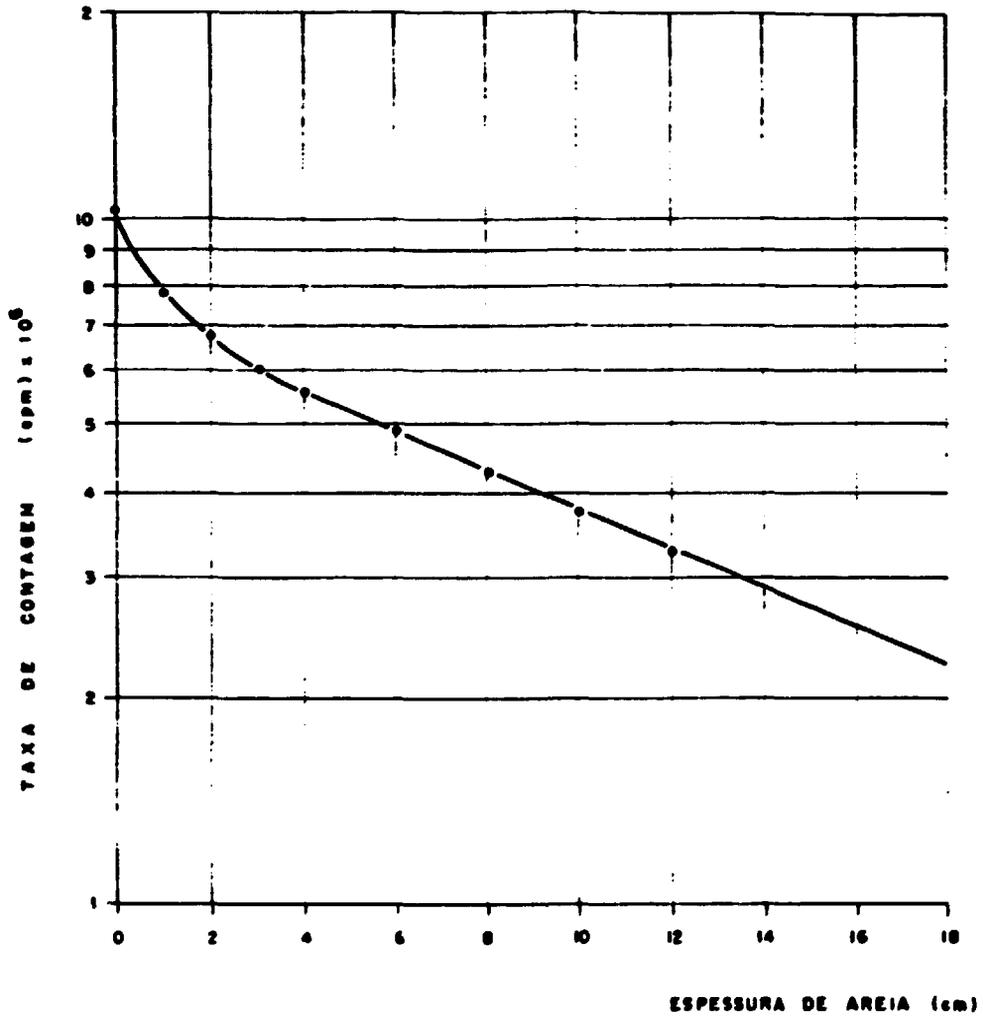
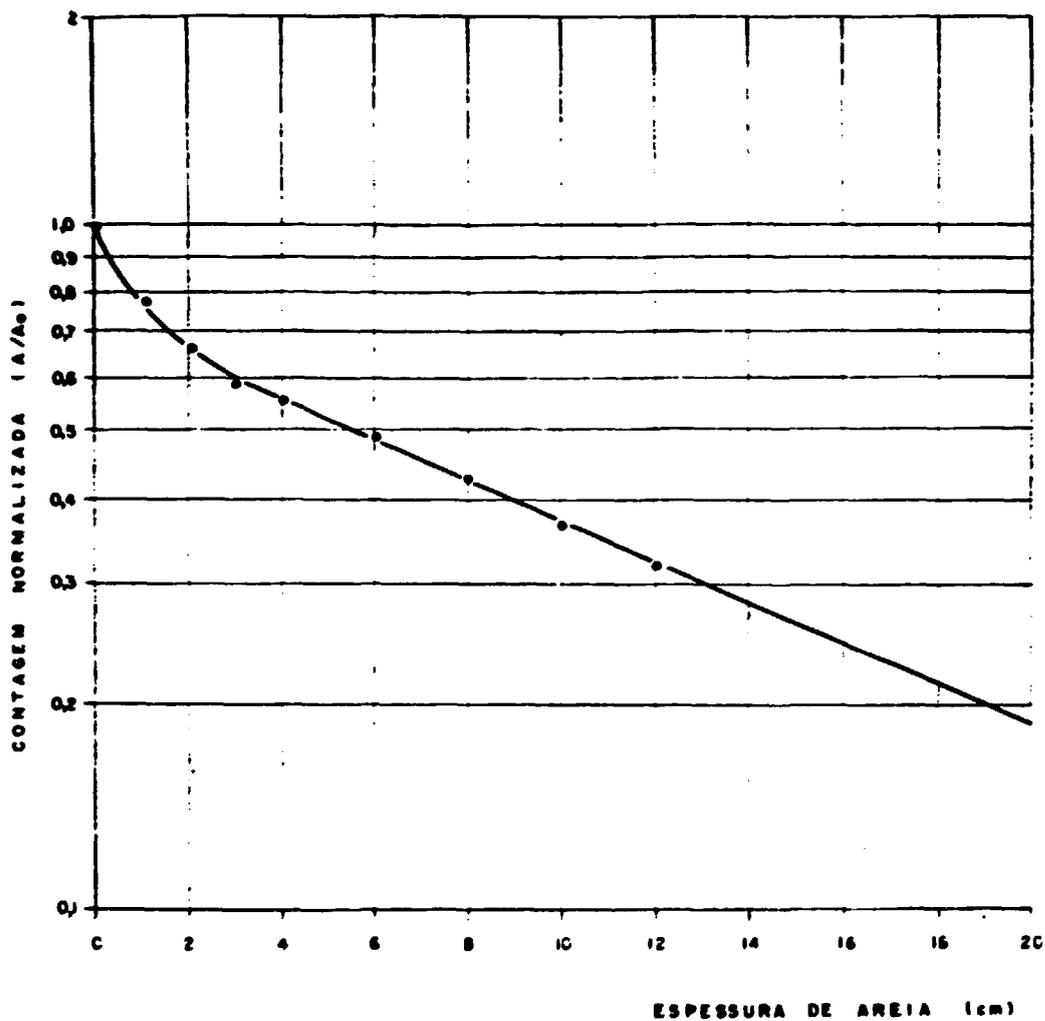


FIGURA 4.77 - REPRESENTAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ARRASTE DE FUNDO - CAMPANHA DE 26.12.78 a 26.01.79 - ME



**FIGURA 4.78 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO
DETECTOR - CAMPANHA DE 26.12.78 a 26.01.79
CANAL ESQUERDO - ME**



**FIGURA 4.79 - REPRESENTAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO NORMALIZADA DO DETECTOR - CAMPANHA DE 26.12.78 a 26.01.79
CANAL ESQUERDO - ME**

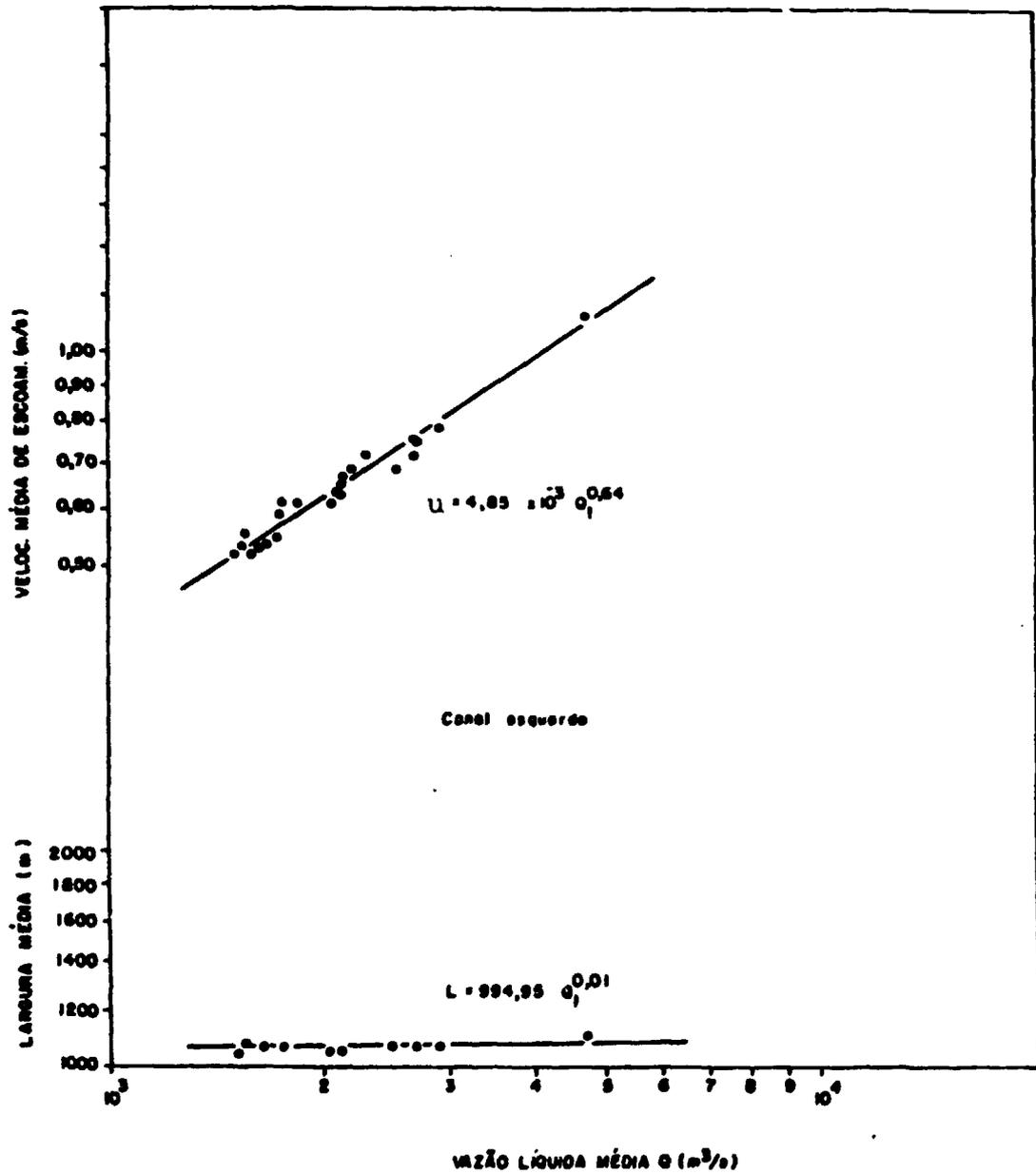


FIGURA 4.80 - CORRELAÇÕES OBTIDAS COM OS DADOS RELATIVOS AO PERÍODO DE 1977/1979

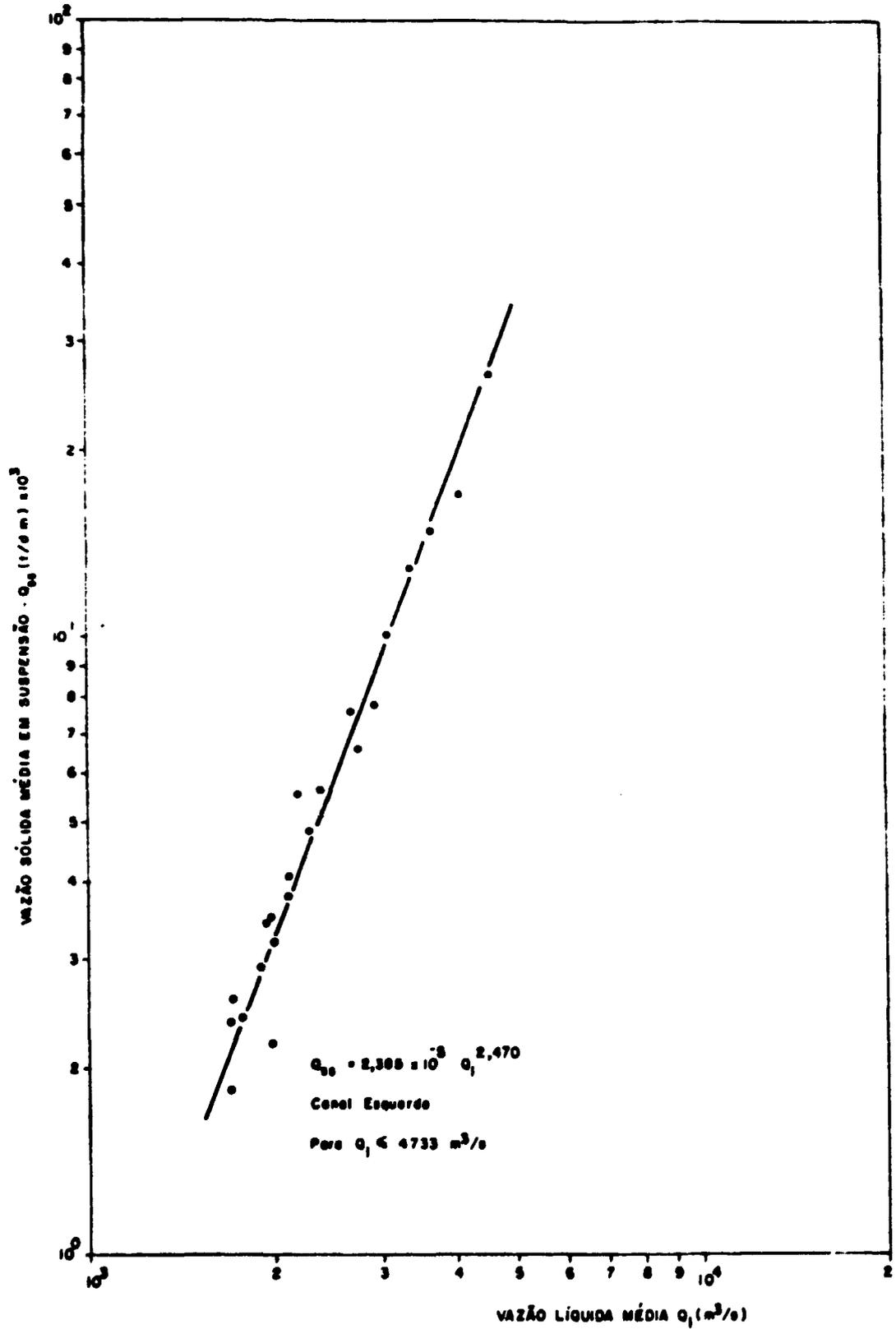


FIGURA 4.81 - CORRELAÇÃO ENTRE A VAZÃO SÓLIDA EM SUSPENSÃO E VAZÃO LÍQUIDA

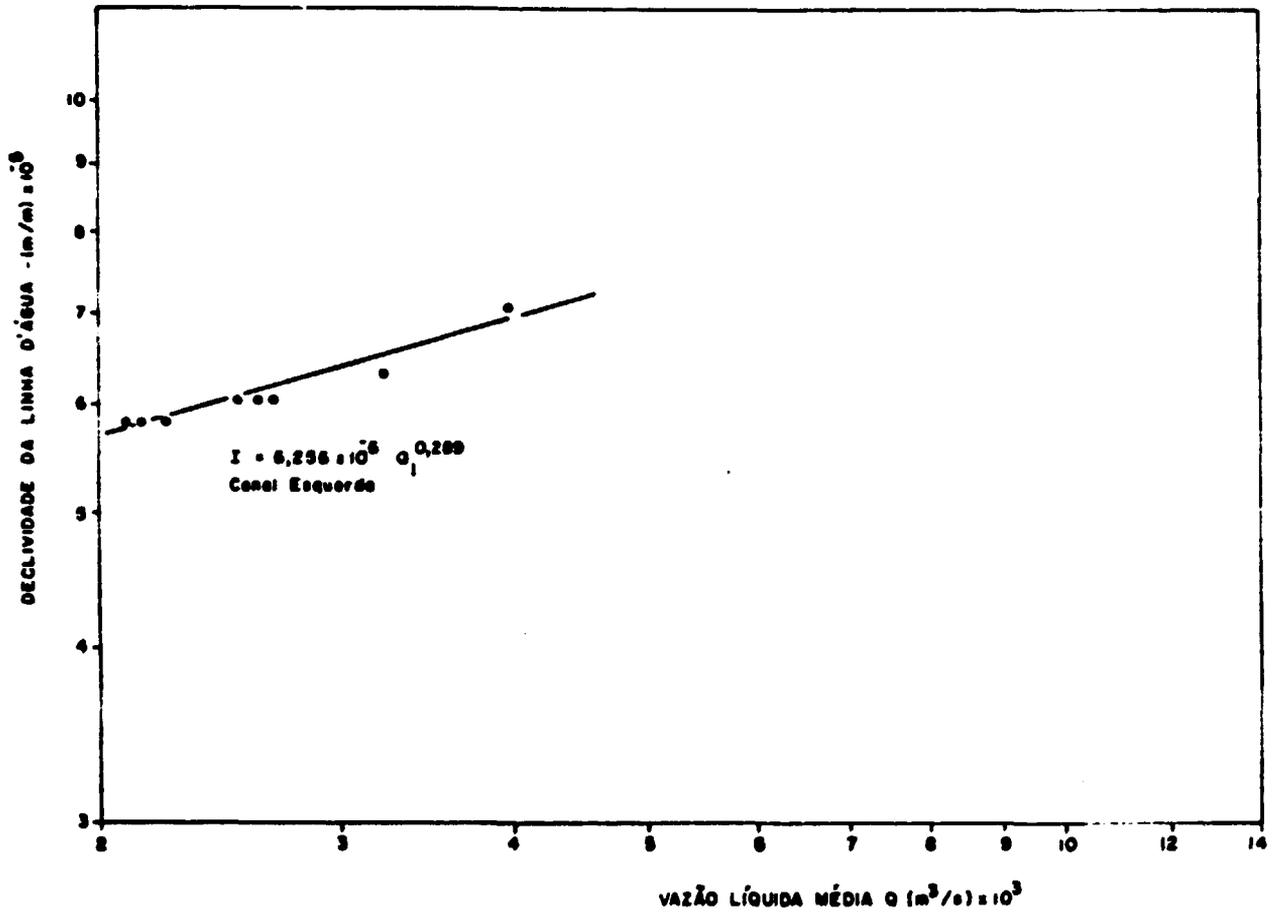


FIGURA 4.82 - REPRESENTAÇÃO DA DECLIVIDADE DA LINHA D'ÁGUA EM FUNÇÃO DA VAZÃO LÍQUIDA MÉDIA

C A P Í T U L O 5

CÁLCULO DO TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO UTILIZANDO AS FÓRMULAS TEÓRICAS

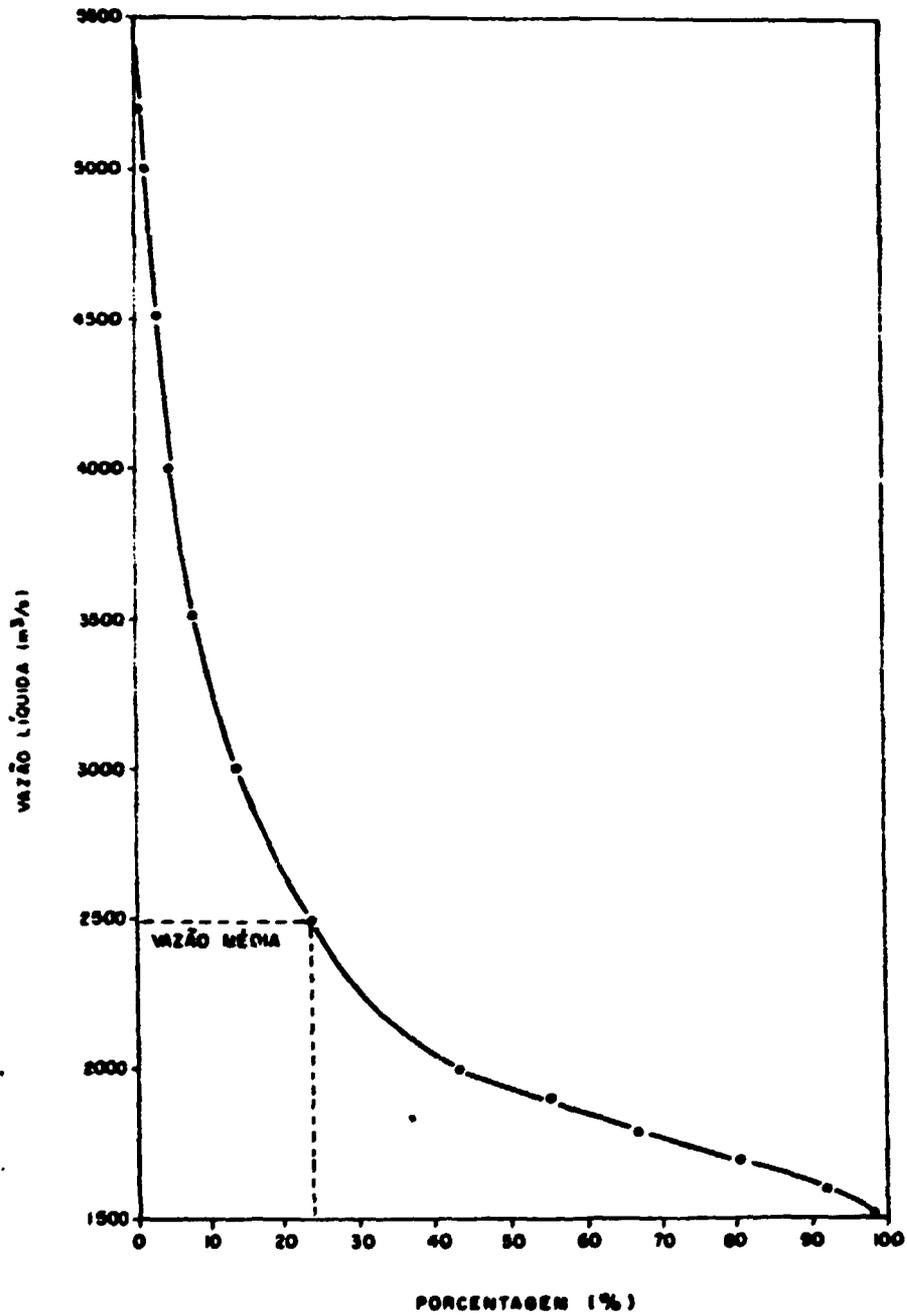


FIGURA 4.83 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CURVA
DURAÇÃO-FREQUÊNCIA -CANAL ESQUER
D0-Dez/77 a Jan/79

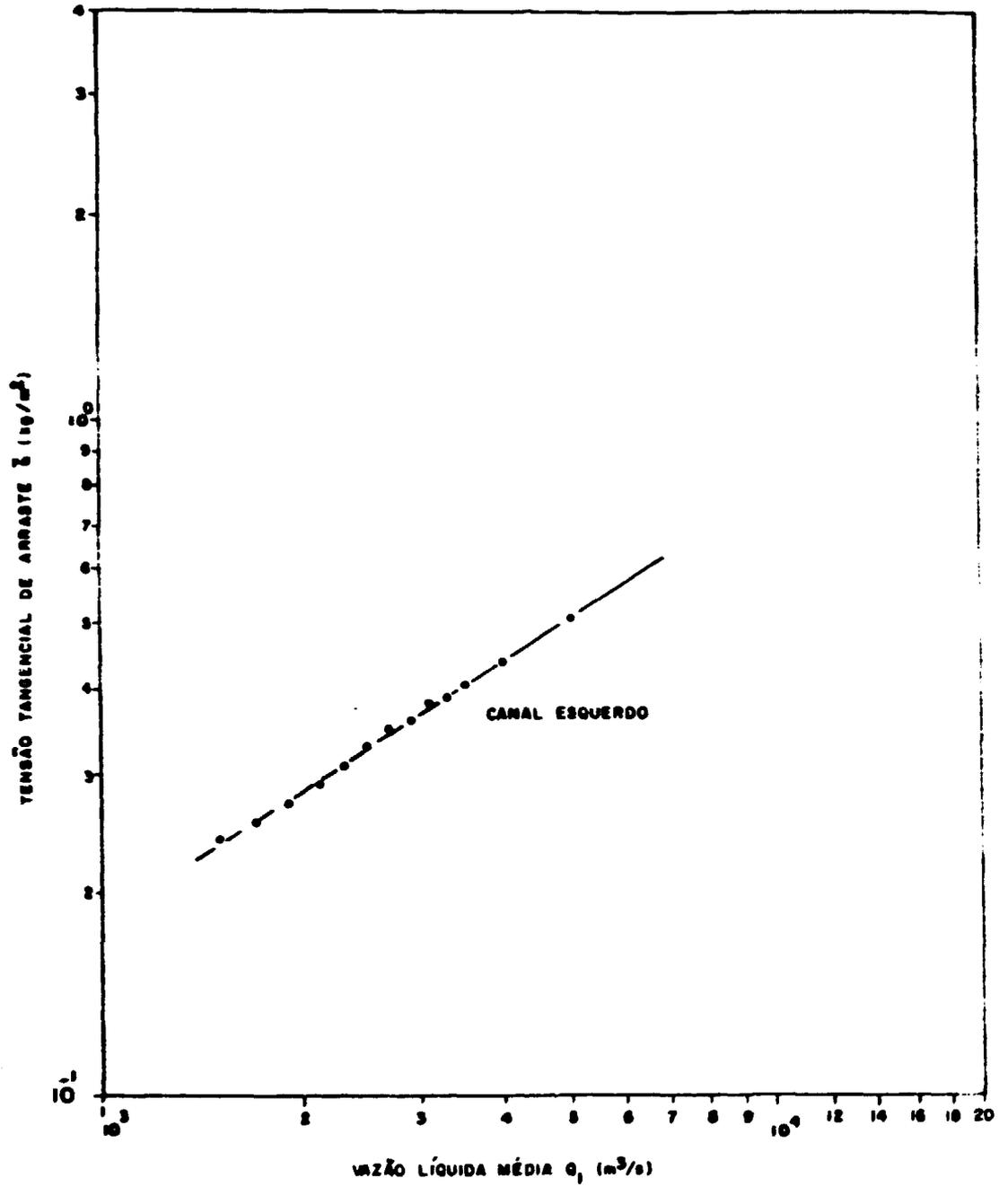


FIGURA 4.84 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA TENSÃO TANGENCIAL DE ARRASTE EM FUNÇÃO DA VAZÃO LÍQUIDA MÉDIA

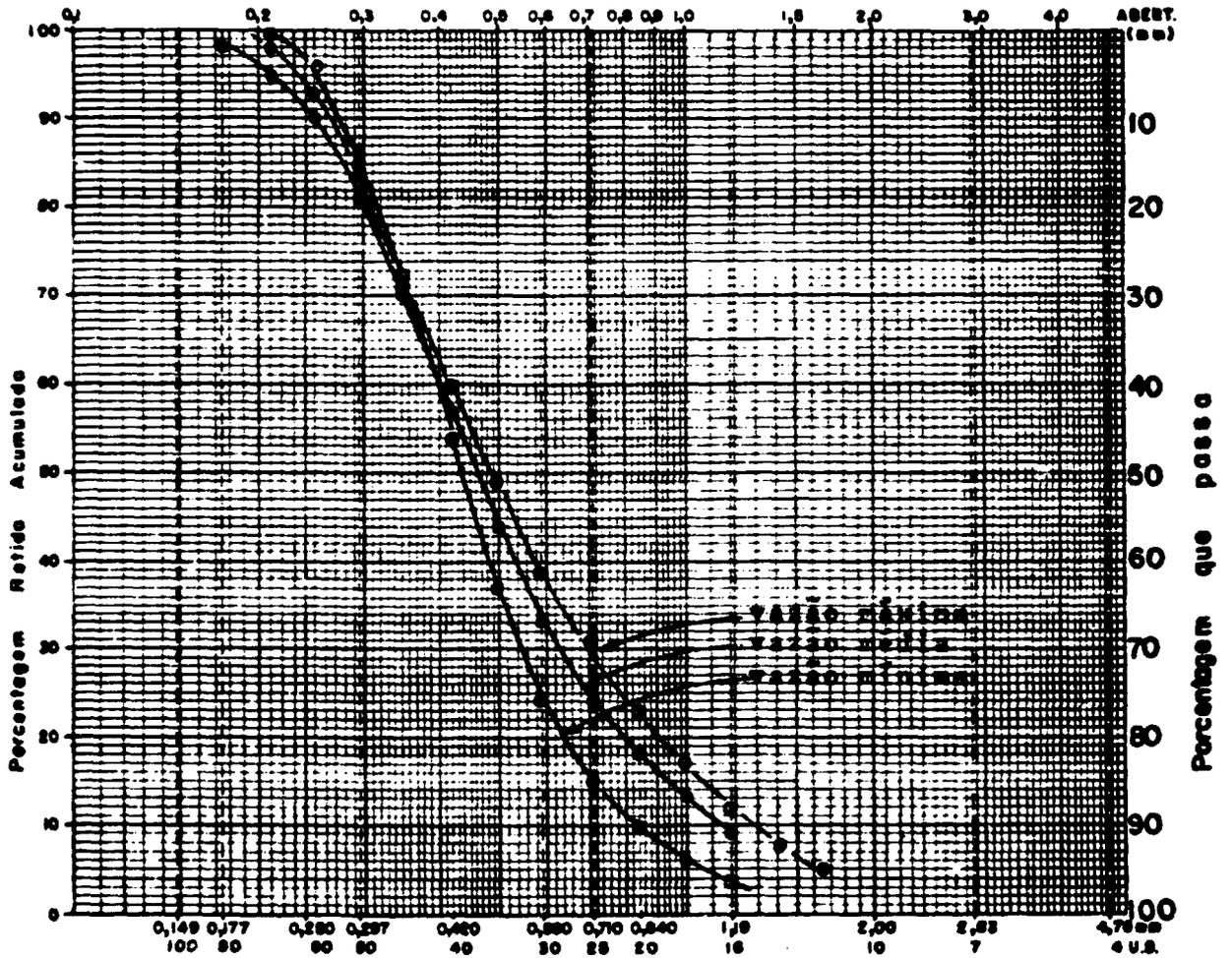


FIGURA 4.85 - CURVA GRANULOMÉTRICA - RIO PARANÁ
CANAL ESQUERDO

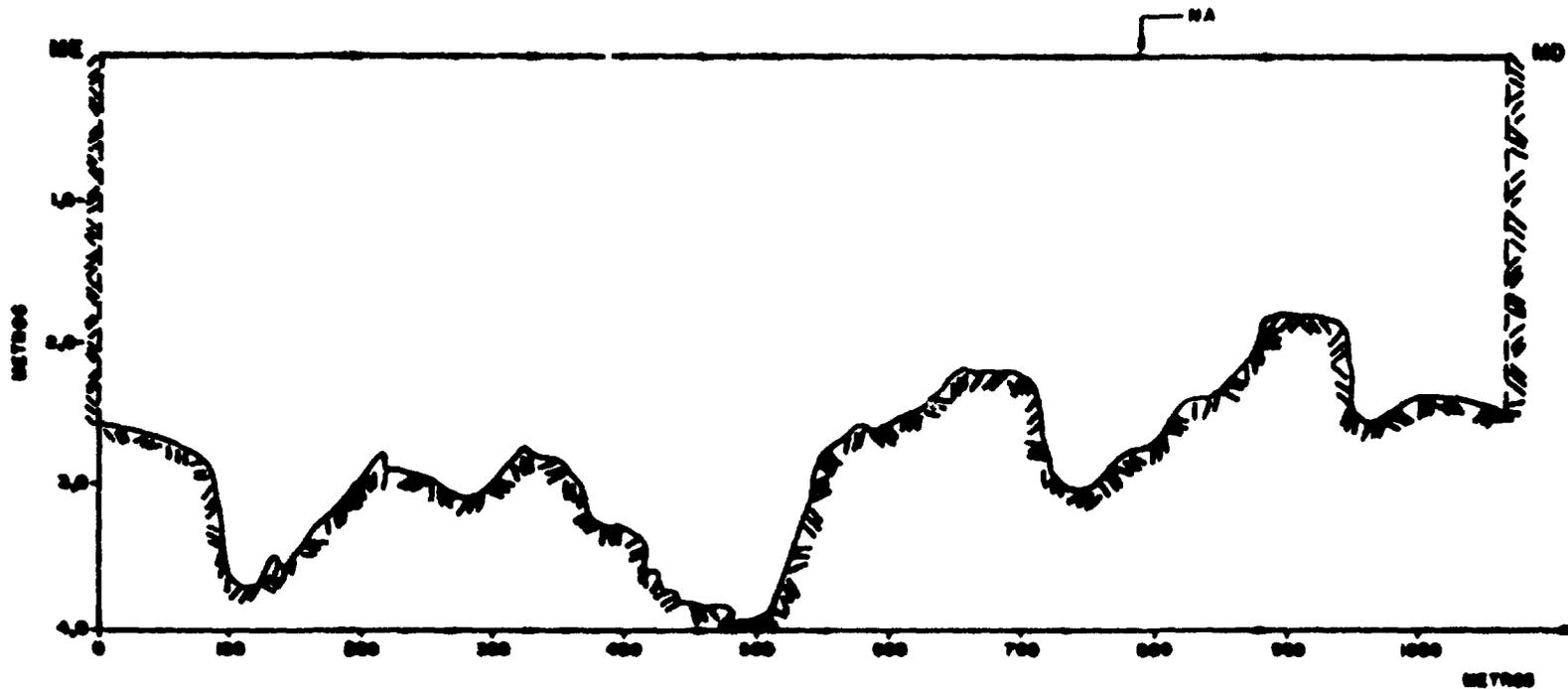


FIGURA 4.86 - SEÇÃO TRANSVERSAL DO CANAL ESQUERDO

5. CÁLCULO DO TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO UTILIZANDO AS FÓRMULAS TEÓRICAS

5.1. Fórmula de Meyer-Peter e Müller (1948)

$$\frac{\gamma \cdot R_h \cdot (k/k')^{3/2} \cdot S}{d} - 0,047 (\gamma_s - \gamma) = 0,25 \sqrt{\frac{\gamma}{g}} \cdot \frac{(g'_s)^{2/3}}{d} \quad (5.1.1)$$

onde:

$$g'_s = g_s \cdot \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s} \quad (5.1.2)$$

g'_s = vazão sólida por unidade de largura em peso submerso (Kgf/m.s.);

d = diâmetro médio do sedimento (m);

S = declividade da linha de energia da seção (m/m);

S' = perda de carga unitária devido a rugosidade de grão (m/m);

k = coeficiente de rugosidade devido a S ;

$$k = \frac{u}{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}} \quad (5.1.3)$$

k' = coeficiente de rugosidade devido a S' ;

$$K' = \frac{26}{d_s^{1/6}} \quad (5.1.4)$$

u = velocidade média da água na seção (m/s);

γ = peso específico da água (kgf/m³);

γ_s = peso específico de sedimento (kgf/m³);

g_s = vazão sólida por unidade de segmento (kgf/s.m.);

D = profundidade média (m).

TABELA 5.1.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Fórmula de Meyer-Peter e Müller (1948)

	Q_t (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	u (m/s)	R_h (m)	d_{50} (m)	k
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-3}$	1,09	4,00	$1,30 \times 10^{-3}$	50,91
Vazão Média	2492	3,20	$6,00 \times 10^{-3}$	0,72	3,20	$1,10 \times 10^{-3}$	42,80
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-3}$	0,52	2,67	$0,80 \times 10^{-3}$	37,58

k'	k/k'	d_{50} (m) $\times 10^{-3}$	g'_s (kgf/s.m)	g_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} ton/d
78,70	0,65	0,50	$2,94 \times 10^{-2}$	$4,68 \times 10^{-2}$	4,04	1083	4.375
80,92	0,53	0,47	$5,53 \times 10^{-3}$	$8,79 \times 10^{-3}$	0,76	1076	817
85,33	0,44	0,44	$2,91 \times 10^{-3}$	$4,63 \times 10^{-3}$	4×10^{-2}	1070	42,8

5.2. Fórmula de Schoklitsch (1935)

$$g_s = \frac{7000}{d^{1/2}} S^{3/2} (q - q_{cr}) \quad (5.2.1)$$

onde:

g_s = vazão sólida por unidade de largura (kgf/s.m);

q = vazão líquida por unidade de largura (m³/s.m);

q_{cr} = vazão líquida por unidade de largura, na qual os se
dimentos começam a se mover (m³/s.m);

$$q_{cr} = \frac{1.944 \times 10^{-5} \times d}{S^{2/3}} \quad (5.2.2)$$

TABELA 5.2.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Schoklitsch (1935)

	Q_L (m ³ /s)	S (m/m)	d (m) 10 ⁻³	q (m ³ /s.m)	q_{cr} (m ³ /s.m)	g_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
Vazão Máxima	4733	7,22x10 ⁻³	0,50	4,37	0,0032	0,038	3,24	1083	3.509
Vazão Média	2492	6,00x10 ⁻³	0,47	2,32	0,0039	0,016	1,38	1076	1.490
Vazão Mínima	1491	5,17x10 ⁻³	0,44	1,39	0,0045	0,008	0,71	1070	757

5.3. Equação de Kalinske (1947)

$$\frac{q_s}{u_* \cdot d} = fct_K \left[\frac{(\tau_*)_{cr}}{\tau_*} \right] \quad (5.3.1)$$

onde:

q_s = vazão sólida em $m^3/s.m$;

u_* = velocidade de atrito (m/s);

$(\tau_*)_{cr}$ = tensão crítica de cisalhamento (kg/m^2);

τ_* = tensão de cisalhamento (kg/m^2);

K = constante.

$$u_* = \sqrt{g \cdot D \cdot s} \quad (5.3.2)$$

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d}{\nu} \quad (5.3.3)$$

obs:

- $(\tau_*)_{cr}$ calculado a partir do gráfico da figura 5.3.1;
- q_s calculado a partir do gráfico de Kalinske, figura 5.3.2.

TABELA 5.3.1 - CÁLCULO DA VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Kalinske (1947)

	Q_s (m^3/s)	D (m)	S (m/m)	u_* (m/s)	Re_*	d (m) $\times 10^{-3}$	τ_* (kg/m^2)
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-5}$	0,053	33,2	0,50	0,29
Vazão Média	2492	3,20	$6,00 \times 10^{-5}$	0,043	25,5	0,47	0,19
Vazão Mínima	1941	2,67	$5,17 \times 10^{-5}$	0,037	20,2	0,44	0,14

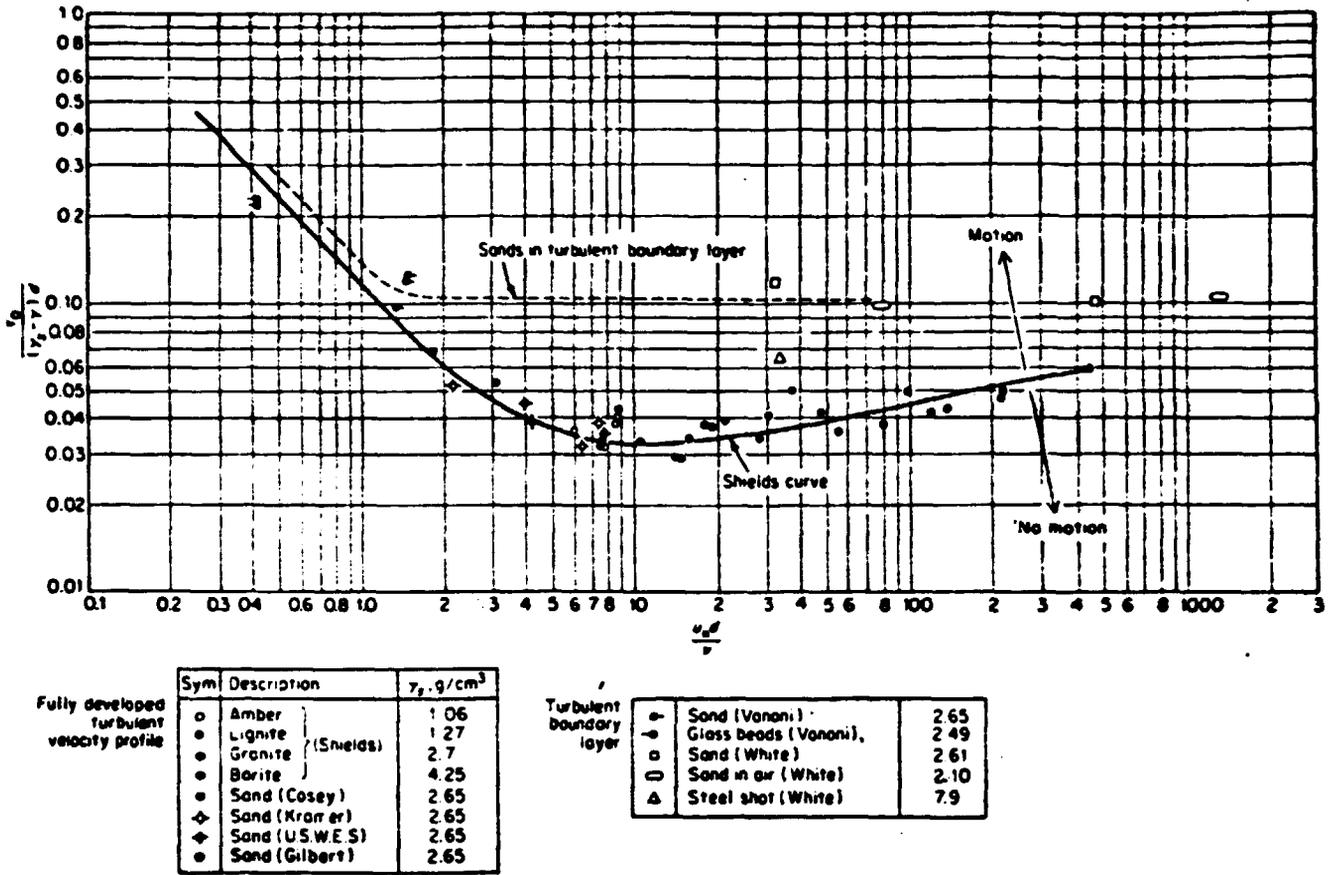


FIGURA 5.3.1 - DIAGRAMA DE SHIELDS

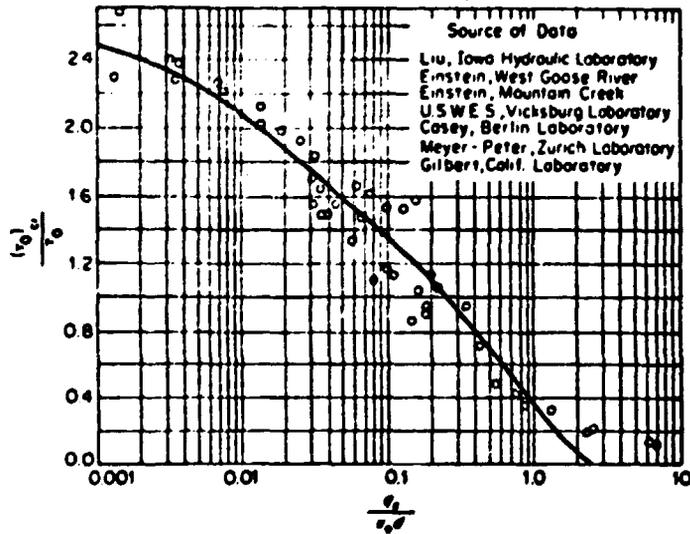


FIGURA 5.3.2 - EQUAÇÃO DE KALINSKE (1947)

Tabela 5.3.1 - Continuação

$(\tau_0)_{cr}$ (kg/m ²)	$\frac{(\tau_0)_{cr}}{\tau_0}$	q_s (m ³ /s.m)	g_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
0,031	0,11	$3,9 \times 10^{-5}$	0,066	5,66	1083	6.137
0,028	0,15	$2,8 \times 10^{-5}$	0,046	3,99	1076	4.295
0,025	0,18	$2,1 \times 10^{-5}$	0,035	3,01	1070	3.228

5.4. Fórmula de Duboys (1879)

$$q_s = x \cdot \tau_0 \cdot \left[\tau_0 - (\tau_0)_{cr} \right] \quad (5.4.1)$$

onde:

q_s = descarga sólida de fundo (m³/s.m);

x = coeficiente característico do sedimento;

$$x = 0,54 \frac{1}{\tau_s - \gamma} \quad (\text{para granulometria uniforme}) \quad (5.4.2)$$

TABELA 5.4.1 - CÁLCULO DA VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Duboys (1879)

	Q_L (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	d (m)	τ_0 (kg/m ²)	$(\tau_0)_{cr}$ (kg/m ²)
Vazão máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-5}$	$0,50 \times 10^{-3}$	0,29	0,031
Vazão Média	2472	3,20	$6,00 \times 10^{-5}$	$0,47 \times 10^{-3}$	0,19	0,028
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-5}$	$0,44 \times 10^{-3}$	0,14	0,025

Tabela 5.4.1 - Continuação

q_s (m ³ /s.m)	g_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
$2,39 \times 10^{-5}$	0,041	3,51	1083	3.801
$9,77 \times 10^{-6}$	0,017	1,43	1076	1.544
$5,11 \times 10^{-6}$	0,009	0,75	1070	803

5.5. Equação de Shields (1936)

$$\frac{g_s}{\gamma \cdot q} \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{S \cdot \gamma} = 10 \frac{\tau_* - (\tau_*)_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)^d} \quad (5.5.1)$$

$$g_s = 3,46 S \cdot q \cdot \frac{\tau_* - (\tau_*)_{cr}}{d} \quad (5.5.2)$$

TABELA 5.5.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Shields (1936)

	Q_s (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	Re_*	$(\tau_*)_{cr}$ (kg/m ²)	τ_* (kg/m ²)
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-5}$	33,2	0,031	0,29
Vazão Média	2492	3,20	$6,00 \times 10^{-5}$	25,5	0,028	0,19
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-5}$	20,2	0,025	0,14

Tabela 5.5.1 - Continuação

q (m ³ /s.m)	d (m)	g _s (kgf/s.m)	Q _{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q _{sf} (ton/d)
4,37	0,50x10 ⁻³	0,57	48,9	1083	52.913
2,32	0,47x10 ⁻³	0,17	14,3	1076	15.433
1,39	0,44x10 ⁻³	0,07	5,6	1070	6.007

5.6. Fórmula de Einstein - Relação Empírica (1942)

$$\phi = \frac{g_s}{\gamma_s} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \sqrt{\frac{1}{g \cdot d^3}} \quad (5.6.1)$$

onde:

$$\phi = f(\psi) \quad (5.6.2)$$

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{SR'_h} \quad (5.6.3)$$

R'_h = raio hidráulico da seção considerando apenas a rugosidade dos grãos.

obs:

- adotado $R'_h = R_h$;

- determinado $\phi = f(\psi)$ a partir do gráfico da figura 5.6.1.

TABELA 5.6.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Fórmula Empírica de Einstein (1942)

	Q_b (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	R'_h (m)	d (m)	ψ	ϕ	g_s (kgf/s.m)
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-3}$	4,00	$0,50 \times 10^{-3}$	2,86	0,70	0,08
Vazão Média	2472	3,20	$6,00 \times 10^{-3}$	3,20	$0,47 \times 10^{-3}$	4,04	0,45	0,05
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-3}$	2,67	$0,44 \times 10^{-3}$	5,26	0,30	0,03

Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
7,21	1083	7.803
4,22	1076	4.542
2,54	1070	2.727

5.7. Equação de Einstein - Relação Analítica (1950)

$$\psi_* = \frac{i_s}{i_b} \cdot \frac{g_s}{\gamma_s} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\rho_s - \rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g \cdot d^3}} \quad (5.7.1)$$

$$\psi_* = f(\psi_*) \quad (5.7.2)$$

$$\psi_* = \xi \cdot Y \cdot (\beta^2 / \beta_x^2) \cdot \psi \quad (5.7.3)$$

onde:

ξ = fator de correção do encobrimento do grão;

Y = fator de correção de pressão, que leva em conta o coeficiente de sustentação para diferentes rugosidades;

$$\beta = \log 10,6$$

$$\beta_x = \log \left(10,6 \frac{x}{\Delta} \right)$$

$$\delta = 11,5 \frac{v}{u_*}$$

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cdot \frac{d}{SR'_h}$$

obs:

- o fator ξ é determinado por intermédio do gráfico da figura 5.7.3;
- o fator Y é determinado por intermédio do gráfico da figura 5.7.4;
- a função ψ_* é determinada por intermédio do gráfico da figura 5.7.2.
- considerou-se $\frac{i_s}{i_b} = 1$
- o fator x é determinado através do gráfico da figura 5.7.1.

TABELA 5.7.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Relação Analítica - Einstein (1950)

	Q_s (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	R'_h (m)	$d_{s,s}$ (m)	$d_{s,e}$ (m)
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-5}$	4,00	$0,39 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$
Vazão Média	2472	3,20	$6,00 \times 10^{-5}$	3,20	$0,38 \times 10^{-3}$	$0,47 \times 10^{-3}$
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-5}$	2,67	$0,37 \times 10^{-3}$	$0,44 \times 10^{-3}$

$d_{e,s}$ (m)	ψ	u_*	δ (m)	$\frac{k_s}{\delta}$	Y	x	$\Delta = \frac{k_s}{x}$
$0,64 \times 10^{-3}$	2,30	0,053	$1,74 \times 10^{-5}$	3,69	0,52	1,15	$5,57 \times 10^{-5}$
$0,58 \times 10^{-3}$	3,36	0,043	$2,14 \times 10^{-5}$	2,71	0,55	1,30	$4,46 \times 10^{-5}$
$0,52 \times 10^{-3}$	4,56	0,037	$2,49 \times 10^{-5}$	2,01	0,60	1,40	$3,71 \times 10^{-5}$

$\frac{\Delta}{\delta}$	X	$\frac{d}{X}$	ζ	β	β_x	β^2/β_x^2	ψ_*	ϕ_*
3,20	$4,29 \times 10^{-5}$	0,91	1,2	1,03	0,91	1,28	1,36	3,6
2,08	$3,43 \times 10^{-5}$	1,11	1,1	1,03	0,91	1,28	2,60	2,3
1,49	$3,46 \times 10^{-5}$	1,07	1,1	1,03	0,99	1,08	3,25	1,5

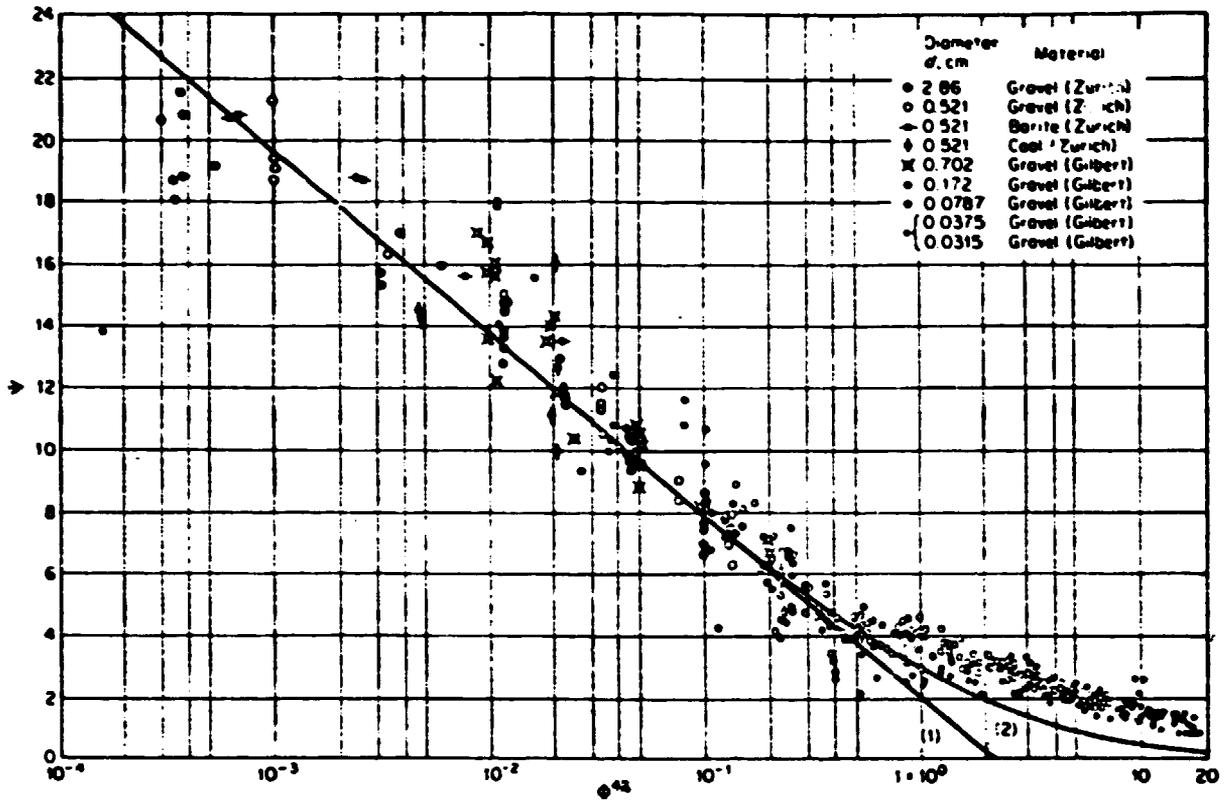


FIGURA 5.6.1 - EQUAÇÃO DE EINSTEIN (1942)

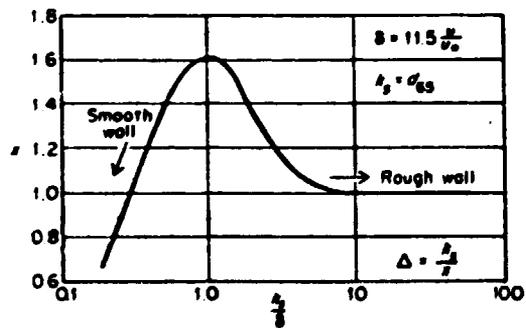


FIGURA 5.7.1 - FATOR DE CORREÇÃO x

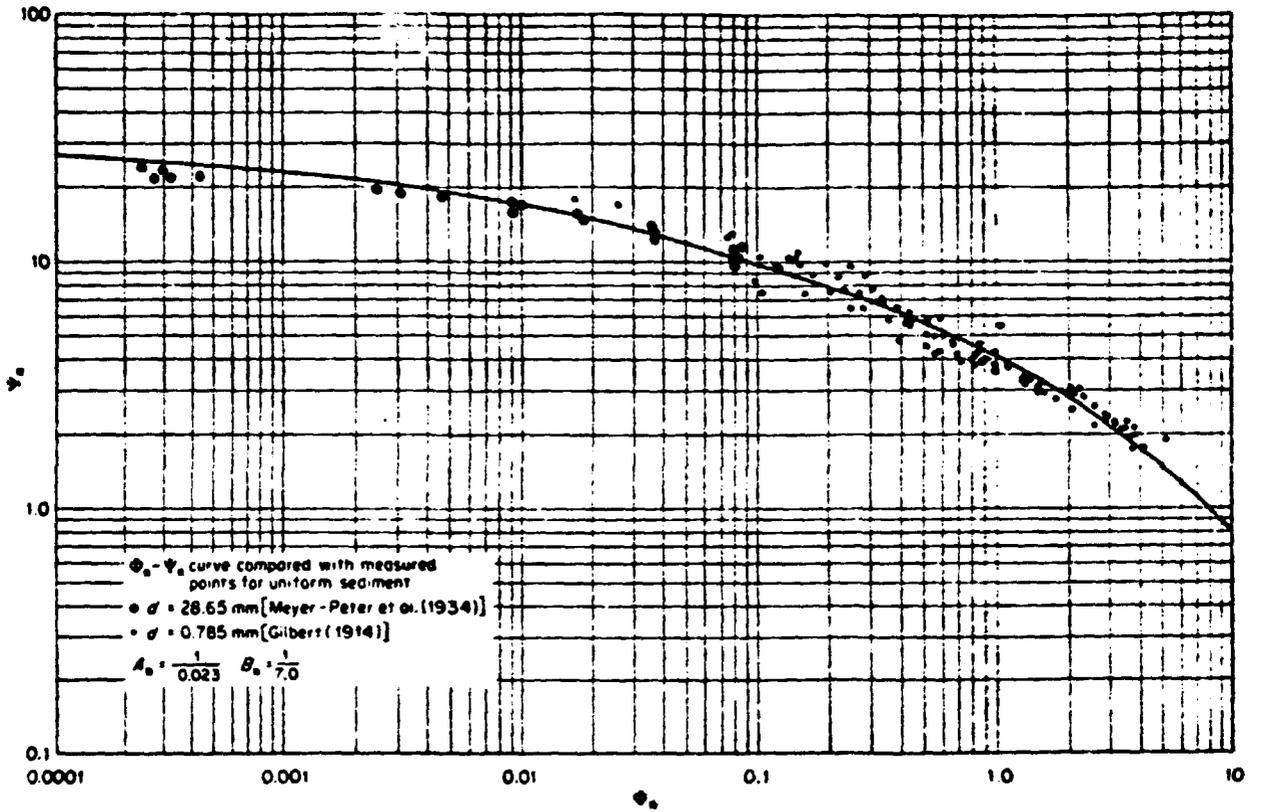


FIGURA 5.7.2 - CORRELAÇÃO ENTRE ϕ_s e ψ_s (1950)

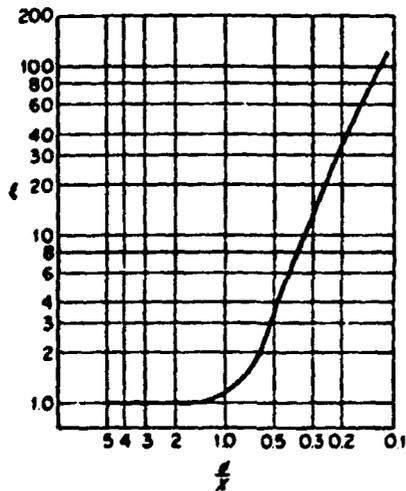


FIGURA 5.7.3 - FATOR ζ

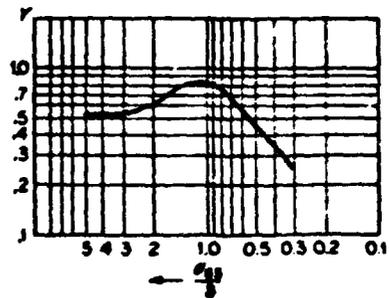


FIGURA 5.7.4 - FATOR γ

Tabela 5.7.1 - Continuação

g_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (tcn/d)
0,31	26,4	1083	28.590
0,19	16,4	1076	17.600
0,12	10,4	1070	11.100

5.8. Fórmula de Chang, Simons e Richardson (1967)

$$g_s = K_t \cdot u \cdot [\tau_o - (\tau_o)_{cr}] \quad (5.8.1)$$

onde:

K_t = constante determinada experimentalmente (figura 5.8.1)

$$K_t = f \left[\frac{u}{u_s} \cdot \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d} \cdot S \right]$$

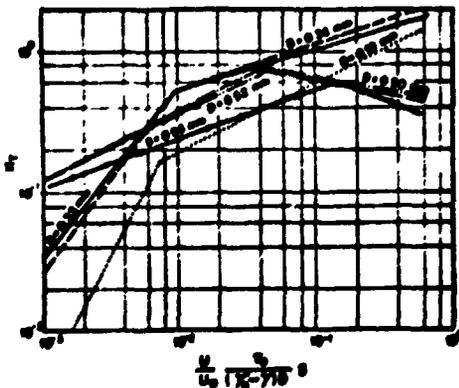


FIGURA 5.8.1 - COEFICIENTE DE ARRASTE DE FUNDO

TABELA 5.8.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Chang et alli (1967)

	Q_b (m^3/s)	S (m/m)	u (m/s)	u_* (m/s)	τ_0 (kg/m^2)	$(\tau_0)_{cr}$ (kg/m^2)
Vazão Máxima	4733	$7,22 \times 10^{-3}$	1,09	0,053	0,29	0,031
Vazão Média	2492	$6,00 \times 10^{-3}$	0,72	0,043	0,19	0,028
Vazão Mínima	1491	$5,17 \times 10^{-3}$	0,52	0,037	0,14	0,025

d (m)	K_t	g_s ($kgf/s.m$)	Q_{sfm} ($ton/d.m$)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
$0,50 \times 10^{-3}$	0,08	0,023	1,95	1083	2.113
$0,47 \times 10^{-3}$	0,06	0,007	0,60	1076	650
$0,44 \times 10^{-3}$	0,04	0,002	0,21	1070	221

5.9. Fórmula de Frijling - (1952)

$$q_s = 5d \sqrt{\mu \cdot g \cdot D \cdot S} \cdot e^{-\frac{0,27 \gamma' d}{\mu \cdot D \cdot S}} \quad (5.9.1)$$

onde:

μ = fator de rugosidade

$$\mu = \left[\frac{C}{18 \log 12 \cdot \frac{D}{d_{90}}} \right]^{3/2}$$

C = coeficiente de Chezy

$$C = \frac{u}{\sqrt{DS}}$$

TABELA 5.9.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Frijling (1952)

	Q_t (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	u (m/s)	d (m)	d_{90} (m)	C
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-5}$	1,09	$0,5 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	64,1
Vazão Média	2492	3,20	$6,00 \times 10^{-5}$	0,72	$0,47 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	51,9
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-5}$	0,52	$0,44 \times 10^{-3}$	$0,8 \times 10^{-3}$	44,2

μ	q_s (m ³ /s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
0,69	$3,6 \times 10^{-5}$	5,31	1083	5.750
0,51	$8,6 \times 10^{-6}$	1,26	1076	1.300
0,39	$1,3 \times 10^{-6}$	0,19	1070	208

5.10. Fórmula de Yalin (1963)

$$\frac{g'_s}{\gamma'_s \cdot d \cdot u_*} = 0,635 \cdot r \cdot \left[1 - \frac{2,3 \log(1+ar)}{ar} \right] \quad (5.10.1)$$

onde:

$$r = \frac{\tau_o - (\tau_o)_{cr}}{\tau_o}$$

$$a = 2,45 \left(\frac{\gamma}{\gamma_s} \right)^{0,14} \cdot \sqrt{\frac{(\tau_o)_{cr}}{\gamma'_s \cdot d}}$$

$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma$$

$$g'_s = g'_s \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right)$$

TABELA 5.10.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Yalin (1963)

	Q_t (m ³ /s)	D (m)	S (m/m)	u (m/s)	u_* (m/s)	τ_o (kg/m ²)	$(\tau_o)_{cr}$ (kg/m ²)
Vazão Máxima	4733	4,00	$7,22 \times 10^{-3}$	1,09	0,053	0,29	0,031
Vazão Média	2472	3,20	$6,00 \times 10^{-3}$	0,72	0,043	0,19	0,028
Vazão Mínima	1491	2,67	$5,17 \times 10^{-3}$	0,52	0,037	0,14	0,025

d (m)	r	a	g'_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
$0,50 \times 10^{-3}$	0,89	0,32	0,005	0,432	1083	467
$0,47 \times 10^{-3}$	0,85	0,31	0,003	0,283	1076	304
$0,44 \times 10^{-3}$	0,82	0,30	0,002	0,208	1070	220

5.11. Fórmula de Bagnold (1966)

$$g'_s = \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right) \cdot \tau_o \cdot u \cdot \left(\frac{e_b}{t_{ga}} \right) \quad (5.11.1)$$

onde:

e_b = eficiência de transporte por arraste de fundo (figura 5.11.1);

t_{ga} = é determinado através do gráfico da figura 5.11.2.

$$t_{ga} = f \left[\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)d} \right] \quad (5.11.2)$$

TABELA 5.11.1 - CÁLCULO DE VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Bagnold (1966)

	Q_t (m ³ /s)	u (m/s)	u (ft/s)	e_b	τ_o (kg/m ²)	d (m)	t_{ga}
Vazão Máxima	4733	1,09	3,58	0,13	0,29	$0,50 \times 10^{-3}$	0,72
Vazão Média	2492	0,72	2,36	0,12	0,19	$0,47 \times 10^{-3}$	0,74
Vazão Mínima	1491	0,52	1,71	0,12	0,14	$0,44 \times 10^{-3}$	0,76

g'_s (kgf/s.m)	g_s (kgf/s.m)	Q_{sfm} (ton/d.m)	L (m)	Q_{sf} (ton/d)
0,035	0,056	4,83	1083	5.239
0,013	0,021	1,79	1076	1.930
0,007	0,011	0,96	1070	1.030

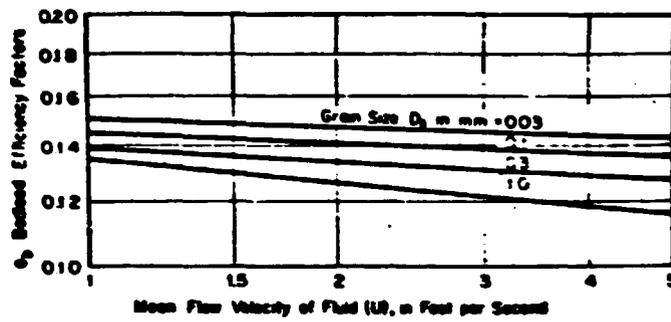


FIGURA 5.11.1 - FATOR DE EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO

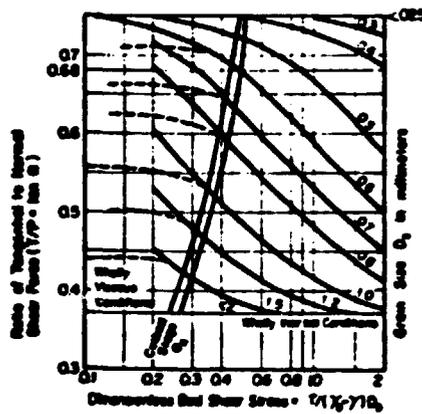


FIGURA 5.11.2 - RELAÇÃO ENTRE A FORÇA TANGENCIAL E A FORÇA NORMAL

5.12. Descarga Sólida pelo Método de Colby-Hembre (1955)

O método de Colby⁽³⁴⁾, calcula a descarga sólida não medida, correspondendo à soma da descarga em suspensão não amostrada com a de arraste. Essa descarga em suspensão não amostrada é devido ao fato de que o amostrador não coleta material até o leito, ficando o bico de coleta cerca de 10cm acima para que não apanhe o material de arraste.

A descarga sólida total será a soma da descarga sólida medida, Q_{sm} , com a descarga sólida não medida, Q_{nm} .

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (5.12.1)$$

O cálculo de Q_{nm} é feito por ábacos a partir do conhecimento da velocidade média em m/s, da profundidade média em m, da concentração em ppm e da largura da seção em m.

Os ábacos estabelecidos por Colby foram obtidos a partir de um desenvolvimento semi-empírico baseado em experiências sobre diversos métodos de cálculos de descarga sólida e principalmente no processo modificado de Einstein.

Baseado em dados de campo o ábaco I, determinado empiricamente, relaciona a descarga sólida não medida e aproximada com a velocidade média. O ajustamento para o verdadeiro valor é feito a partir dos outros ábacos que dependem da profundidade e da disponibilidades de areias. O ábaco II relaciona a concentração de areias em suspensão com a profundidade e a velocidade média. O ábaco III representa a correlação do fator de correção da descarga sólida não medida com a razão de eficiência C'_g/C_r .

TABELA 5.12.1 - CÁLCULO DO TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO
Método de Colby-Hembre (1955)

	PARÂMETROS PARA VAZÃO LÍQUIDA MÍNIMA	PARÂMETROS PARA VAZÃO LÍQUIDA MÉDIA	PARÂMETROS PARA VAZÃO LÍQUIDA MÁXIMA
Vazão Líquida (m ³ /s)	1491	2492	4733
Velocidade Média (m/s)	0,52	0,72	1,09
Profund. Média (m)	2,67	3,20	4,0
Largura Seção (m)	1070	1076	1083
Conc. Média (C' _s) (mg/l)	12,53	26,13	66,70
Descarga Sólida em Suspensão (ton/d)	1,759x10 ⁶	6,291x10 ⁶	30,88x10 ⁶
(Ábaco I) g' _{nm} (ton/dia/m)	4,0	14,0	50,0
(Ábaco II) C _r	120,0	230,0	440,0
C' _s /C _r	0,104	0,114	0,152
(Ábaco III) K	0,40	0,42	0,46
Q _{sf} = Q _{nm} (ton/dia)	1.712	6.326	24.909

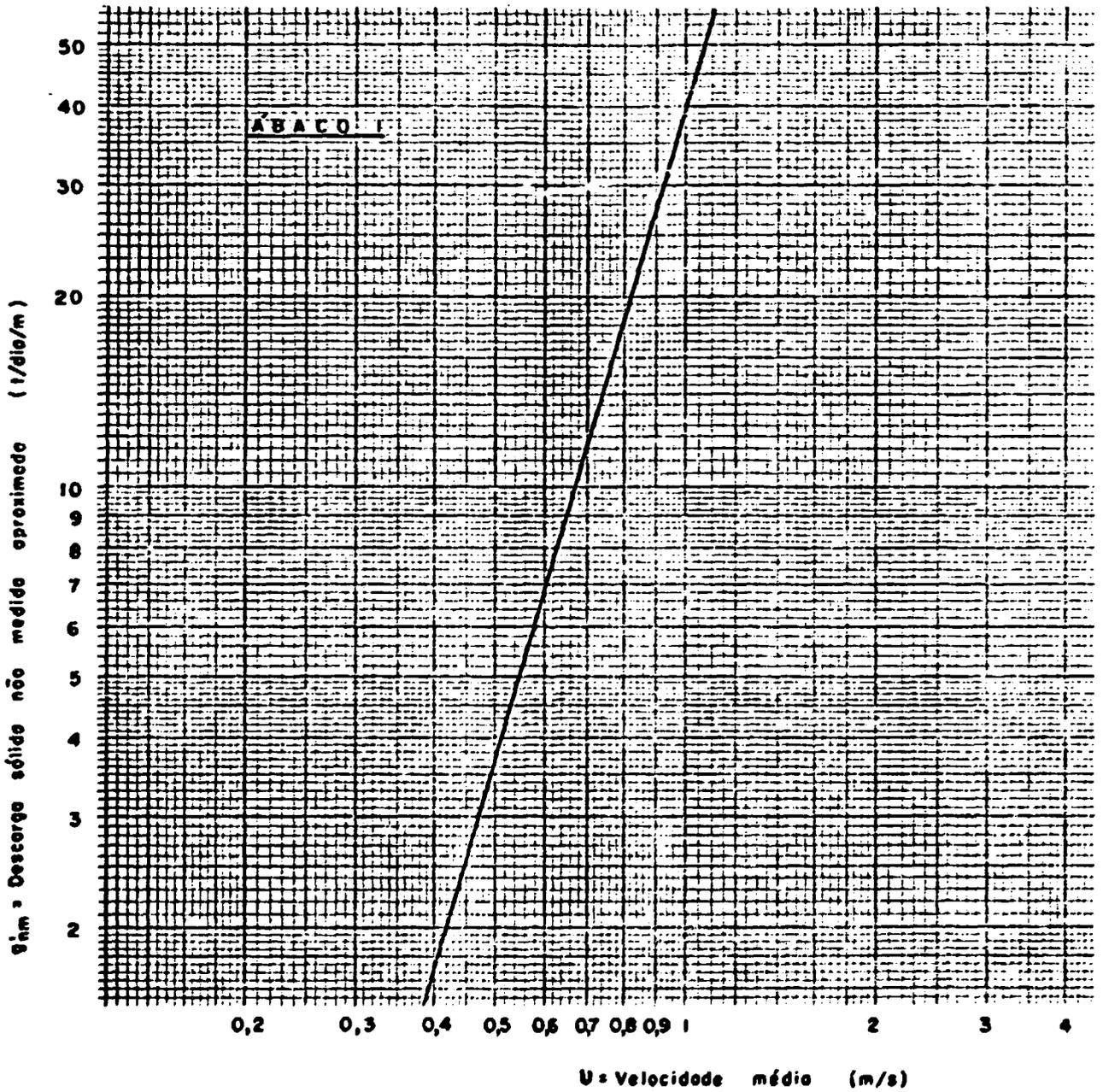


FIGURA 5.12.1 - OBTENÇÃO DE g'_{nm} A PARTIR DE u

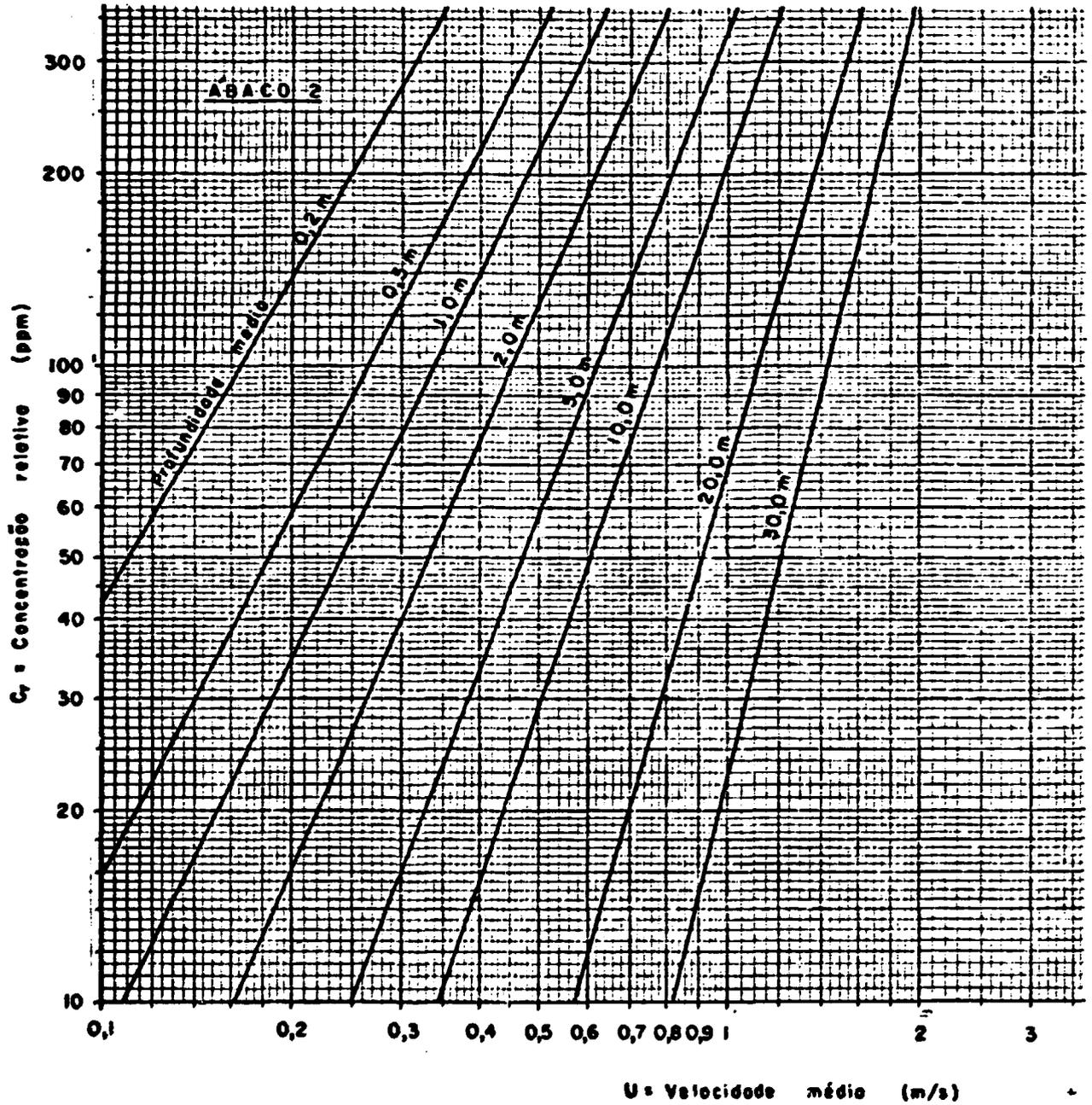


FIGURA 5.12.2 - OBTENÇÃO DE C_p A PARTIR DE U e de D

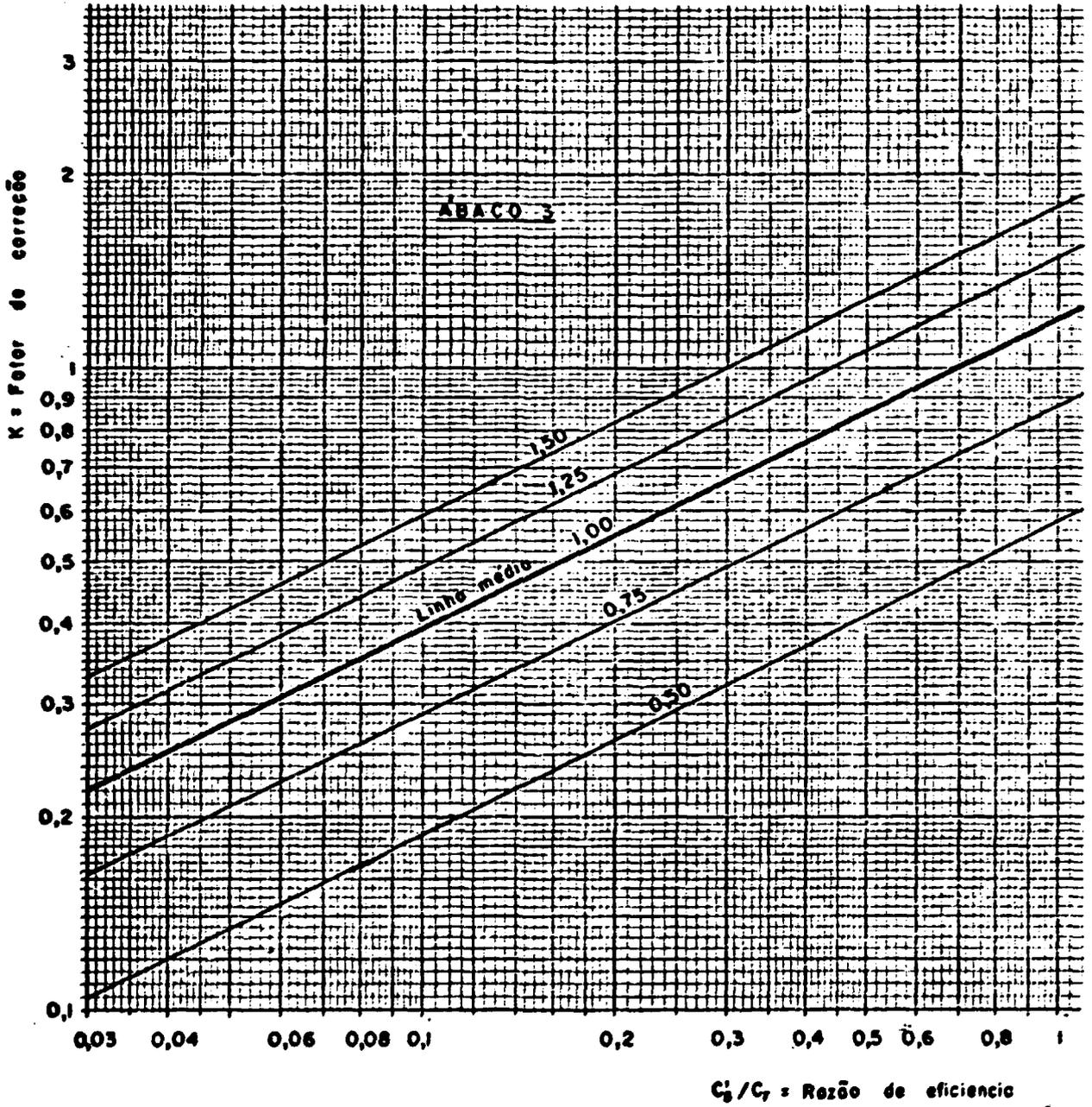


FIGURA 5.12.3 - OBTENÇÃO DE K A PARTIR DE C_g/C_r

5.13. Comparação dos Resultados Obtidos com a Aplicação de fórmulas Teóricas com os Valores Experimentais

Os resultados obtidos com a aplicação de fórmulas teóricas são apresentados na tabela 5.13.1, e os resultados experimentais na tabela 5.13.2.

TABELA 5.13.1 - VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
Fórmulas Teóricas

Q_{sf} (ton/d)	MEYER-PETER e MULLER (1948)	SCHOKLITSCH (1935)	KALINSKE (1947)	DUBOYS (1879)	SHIELDS (1936)
Vazão Máxima	4.370	2.200	7.490	3.801	52.900
Vazão Média	810	780	5.470	1.544	15.400
Vazão Mínima	40	290	4.260	803	6.000

EINSTEIN (1942)	EINSTEIN (1950)	CHANG et alli (1967)	FRIJLING (1952)	YALIN (1963)	BAGNOLD (1966)	COLBY- HEMBRE (1955)
7.800	28.500	2.113	5.750	467	5.239	24.900
4.540	17.600	650	1.300	304	1.930	6.320
2.720	11.100	221	208	220	1.030	1.710

TABELA 5.13.2 - VAZÃO SÓLIDA POR ARRASTE DE FUNDO
DADOS INFERIDOS COM BASE NOS RE
SULTADOS DE CAMPO

	Q_b (m ³ /s)	Q_{sf} (ton/d)
Vazão Máxima	4733	14.500
Vazão Média	2492	360
Vazão Mínima	1491	18

$$Q_{sf} = 8,528 \times 10^{-11} \cdot Q_b^{1,1111}$$

5.14. Análise dos Resultados Obtidos com a Aplicação das Fórmulas de Transporte Sólido

A fórmula de Meyer-Peter e Müller (1948) foi elaborada para as condições seguintes:

- S - variando de 4×10^{-6} a 2×10^{-2} m/m;
- d_{50} - 0,4 mm a 30 mm;
- γ_s - 1.250 a 4.220 kgf/m³;
- D - 0,01 a 1,20m.

Para a formulação admitiu-se também que o movimento é permanente (médio) e as vazões de transporte de sedimentos por arrastamento são pequenas.

Na seção estudada do Rio Paraná as características hidráulico sedimentológicas não são as ideais para a aplicação da fórmula de Meyer-Peter e Müller, onde a declividade \underline{S} é da ordem de 10^{-3} m/m, $d_{50} = 0,50$ mm, $\gamma_s = 2.700$ kgf/m³ e a profundidade \underline{D} variando de 2,6 a 4,0 m. Portanto, a fórmula de Meyer-Peter e Müller não é bem adequada para as condições do Rio Paraná em Guaira, uma vez que esta equação foi concebida para rios de declividade relativa

mente alta (rios de montanhas), para baixas profundidades médias e granulometria relativamente alta.

No caso do Rio Paraná, que é um rio de planalto onde a declividade é relativamente baixa e a profundidade média varia de 2 a 4m, a equação de Meyer-Peter e Müller dá resultados satisfatórios para D próxima da faixa de validade da equação, como podemos observar, para vazão líquida mínima, a vazão sólida calculada se aproxima da experimental. Para vazões líquidas abaixo da descarga média, os resultados calculados de vazão sólida por arrastamento são maiores que os obtidos experimentalmente, estes valores podem ser atribuídos ao fato de as alturas da lâmina de água estarem acima da faixa de utilização da fórmula, e também pelo fato de que a capacidade de transporte da corrente não ser utilizada integralmente. Para vazões líquidas em torno da máxima os resultados experimentais são maiores que as calculadas, este fato pode ser atribuído à formação de forças inerciais importantes sobre os sedimentos, portanto, não mais satisfazendo a condição de movimento permanente médio admitido na elaboração da fórmula.

H. Einstein elaborou duas fórmulas para o cálculo do transporte sólido por arraste de fundo, a semi-empírica em 1942 e a analítica em 1950. As equações de Einstein são recomendadas para sedimentos com granulometria variada e eventuais deformações no leito, onde para granulometria razoavelmente uniforme pode-se adotar como o diâmetro representativo o $d = d_{50}$. Para a elaboração destas fórmulas, Einstein admitiu que cada partícula se movimenta quando a força de sustentação sobre a partícula exceder o peso próprio da mesma submersa. Ele admitiu também que a distância média percorrida por cada partícula, movendo-se entre dois pontos consecutivos de depósito é constante e este valor é independente das condições de escoamento, do fluxo de transporte e das condições do leito. Tanto para a equação de Meyer-Peter e Müller como a de Einstein, não foram eficazmente testadas para transportes sólidos elevados, onde os valores de ϕ são próximos ou superiores a 10.

Nos estudos apresentados por V.A. Vanoni, M.H. Brooks e J.F. Kennedy em 1961, onde foram aplicadas várias fórmulas de transporte sólido por arraste de fundo, nos rios Colorado, Niobrara, West Goose Creek e Mountain Creek, mostram as grandes discrepâncias observadas entre os resultados calculados e experimentais. As fórmulas de Meyer-Peter e Müller e de Einstein, que são as mais conceituadas, apresentaram diferenças com os valores obtidos experimentalmente da ordem de 50 a 100%, o que evidencia a grande dificuldade em se adotar uma equação para o cálculo do transporte sólido por arraste de fundo, num determinado tipo de rio.

As equações de Schoklitsch, Kalinske, Du Boys, Shields, Chang, Bagnold, Frijlink e Yalin; foram geralmente elaboradas para condições específicas onde a aplicação mais generalizada torna-se inviável. Conforme podemos observar, estas equações possuem algumas características restritivas de aplicação, enumeradas abaixo:

Fórmula de Schoklitsch: Granulometria uniforme, sem deformação no leito, $2.530 \text{ kgf/m}^3 < \gamma_s < 2.690 \text{ kgf/m}^3$ e $0,305\text{mm} < d < 7,20\text{mm}$;

Fórmula de Kalinske: Granulometria uniforme, grãos esféricos e leitos planos;

Fórmula de Du Boys: Granulometria uniforme, leitos planos e deslocamentos em camadas;

Fórmula de Shields: Granulometria uniforme, leito planos, $1.060 \text{ kgf/m}^3 < \gamma_s < 4.250 \text{ kgf/m}^3$ e $1,56\text{mm} < d < 2,47\text{mm}$;

Fórmula de Chang, Simons e Richardson: Granulometria variada e eventuais deformações no leito;

Fórmula de Bagnold: Alta taxa de transporte, relaciona a energia dispendida de uma corrente e a quantidade de sedimentos transportados pelo escoamento, não explicita a influência das deformações do leito;

Fórmula de Frijling: Para pequenas vazões sólidas, materiais finos, e se leva em conta as deformações do leito;

Fórmula de Yalin: Granulometria uniforme, leito plano e $\frac{d}{D}$ desprezível.

Conforme podemos observar na tabela 5.13.1, as vazões sólidas por arraste de fundo obtidas a partir de fórmulas teóricas não apresentaram valores semelhantes. Comparando os resultados calculados com os valores obtidos experimentalmente, podemos observar que estes variam de -97% a +119% para correspondente vazão líquida máxima, -15% a +4000% para vazão líquida média e 120% a +6000% para vazão líquida mínima. No caso específico do Rio Paraná, no Canal Esquerdo, e na Seção Guaira, podemos concluir que nenhuma das equações usadas fornece resultados satisfatórios para todo intervalo de vazões líquidas. Entretanto, subdividindo-se as vazões líquidas em intervalos menores podemos observar que a fórmula de Meyer-Peter e Müller se ajusta razoavelmente na faixa entre vazão líquida mínima e média, e as fórmulas de Einstein (1942 e 1950) e de Colby-Hembre (1955) para vazões líquidas entre a média e a máxima.

De um modo geral, as fórmulas teóricas são válidas para condições restritas, como visto acima, a variação de alguns parâmetros hidráulicos num mesmo canal implica na utilização de uma outra equação. Cada equação foi desenvolvida para condições especiais, portanto, o emprego de diferentes equações para um determinado rio, fatalmente apresentará resultados que diferirão em várias ordens de grandeza.

A maioria das equações de transporte sólido por arraste de fundo foram elaboradas com dados obtidos em modelos laboratoriais e não foram suficientemente aferidas em canais naturais, de um lado por problemas de custo e de outro por dificuldades operacionais de medição. Com o advento do uso de traçadores radioativos para a medição do transporte sólido por arraste de fundo, com o custo relativamente competitivo e com uma boa confiabilidade nos resul

tados, estas fórmulas teóricas poderão ser aprimoradas, principalmente em rios do porte do Rio Paraná.

Em vista do exposto, e do limitado conhecimento sobre o transporte de sedimentos por arraste de fundo em canais naturais de grande porte, o cálculo preciso de vazões sólidas utilizando-se fórmulas empíricas ou racionais constitui-se numa tarefa difícil. A escolha de uma equação que represente o transporte sólido por arraste de fundo, num determinado trecho do rio, deve ser feita com cautela, no sentido de selecionar somente as equações que foram desenvolvidas em condições similares ao do local em estudo.

5.15. Verificação quanto a Configuração do Fundo

A partir de repouso e por ordem sucessiva de ocorrência à medida que a velocidade aumenta, assim que a velocidade do escoamento atinge o valor crítico de início de transporte, as partículas de fundo começam a deslocar-se, mantendo-se o leito plano durante algum tempo. Se aumentarmos a velocidade formam-se as configurações chamadas rugas, que são ondulações relativamente regulares com altura da ordem de centímetros. As dunas são ondulações muito mais irregulares do que as rugas com altura da ordem dos decímetros e comprimento da ordem de dezenas de metros.

Se a velocidade aumentar ainda mais, observa-se que o leito torna-se sensivelmente plano e é chamado de transição, e quando a velocidade do escoamento ultrapassa as condições críticas formam-se as antidunas

5.15.1. Critério de Blasius (1910)

$N_F > 1$: longas dunas

$N_F < 1$: rugas e dunas

a) Vazão mínima: $N_F = \frac{u}{\sqrt{gD}} = \frac{0,52}{\sqrt{9,8 \times 2,67}} = 0,10$

b) Vazão média : $N_F = 0,13$

c) Vazão máxima: $N_F = 0,17$

5.15.2. Critério de Simons et alli (1961)

Baseada em investigações da U.S. Geological Survey no Colorado State University, Simons et alli classificou as deformações em função do número de Reynolds.

$$\frac{u_*}{V_{ss}} = f \left(\frac{d \cdot u_*}{\nu} \right) \quad (\text{figura 5.15.2})$$

	d (m)	D (m)	u_* (m/s)	V_{ss} (m/s)	$\frac{u_*}{V_{ss}}$	Re
Vazão Máxima	$0,50 \times 10^{-3}$	4,00	0,053	0,08	0,6	26,5
Vazão Média	$0,47 \times 10^{-3}$	3,20	0,043	0,08	0,5	20,2
Vazão Mínima	$0,44 \times 10^{-3}$	2,67	0,037	0,08	0,4	16,2

OBS: V_{ss} obtido através do gráfico da figura 5.15.1

Pelo gráfico da figura 5.15.2, temos:

Vazão máxima: dunas

Vazão média : dunas

Vazão mínima: rugas

5.15.3. Critério de Simons et alli (1963)

Correlação entre $\tau_{0,u}$ (lb/ft.s) e d (mm)

	τ_0 (kgf/m)	u (m/s)	d (mm)	$\tau_{0,u}$ (lb/ft.s)
Vazão Máxima	0,29	1,09	0,50	0,21
Vazão Média	0,19	0,72	0,47	0,09
Vazão Mínima	0,14	0,52	0,44	0,05

Pelo gráfico da figura 5.15.3, temos:

Vazão máxima: dunas

Vazão média : rugas/dunas

Vazão mínima: rugas

5.15.4. Critério de Kondrat'ev (1962)

Os estudos de Kondrat'ev utilizaram dados experimentais soviéticos. O primeiro gráfico apresenta uma relação entre o número de Froude e o diâmetro do grão e fornece a indicação para início de movimento do grão (I), deformação no leito (II) e arraste da de formação (III).

	d (mm)	N_F
Vazão Máxima	0,50	0,17
Vazão Média	0,47	0,13
Vazão Mínima	0,44	0,10

Pelo gráfico da figura 5.15.4, temos:

Vazão máxima: início de movimentação dos grãos

Vazão média : início de movimentação dos grãos

Vazão mínima: início de movimentação dos grãos

5.15.5. Critério de Znamenskaya (1969)

Para uma dada condição hidráulica, em função do número de Froude e u/V_{ss} , obtém-se a partir do gráfico de Znamenskaya a forma do leito, a velocidade da deformação C_B e a angulosidade (Steepness) $\Delta H/\lambda$.

	N_F	u/V_{ss}
Vazão Máxima	0,17	13,6
Vazão Média	0,13	9,0
Vazão Mínima	0,10	6,5

Pelo gráfico da figura 5.15.5, temos:

Vazão máxima: rugas

Vazão média : rugas

Vazão mínima: rugas

5.15.6. Critério de Engelund et allí (1966)

As condições de estabilidade foram investigados por Engelund et allí para diferentes combinações de N_F e u/u_* , conforme figura 5.15.6.

	N_F	$\frac{u}{u_*}$
Vazão Máxima	0,17	20,6
Vazão Média	0,13	16,7
Vazão Mínima	0,10	14,0

Pelo gráfico da figura 5.15.6, temos:

Vazão máxima: dunas

Vazão média : dunas

Vazão mínima: dunas

5.15.7. Comentários

Existem inúmeras metodologias para a indicação da configuração de fundo. Muitas delas foram desenvolvidas exclusivamente em canais de laboratório, com seção geométrica regular.

Aplicando estes critérios para a previsão da deformação de fundo no Rio Paraná, em Guaira, a maioria indicou rugas ou dunas.

A observação direta no campo, por meio de levantamento batimétricos periódicos é importante para comprovar os prognósticos.

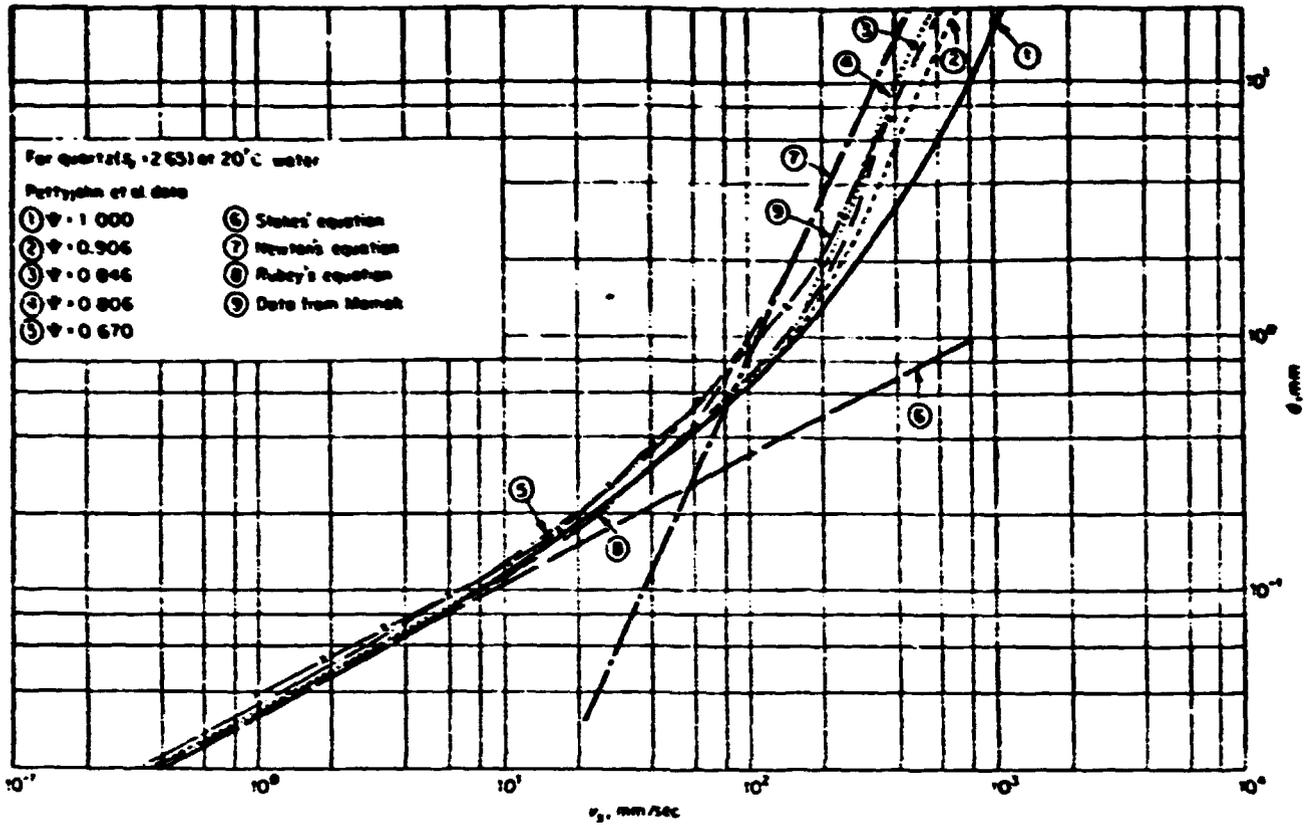


FIGURA 5.15.1 - VELOCIDADE DE QUEDA VERSUS DIÂMETRO DA PARTÍCULA (GRAF - 1966)

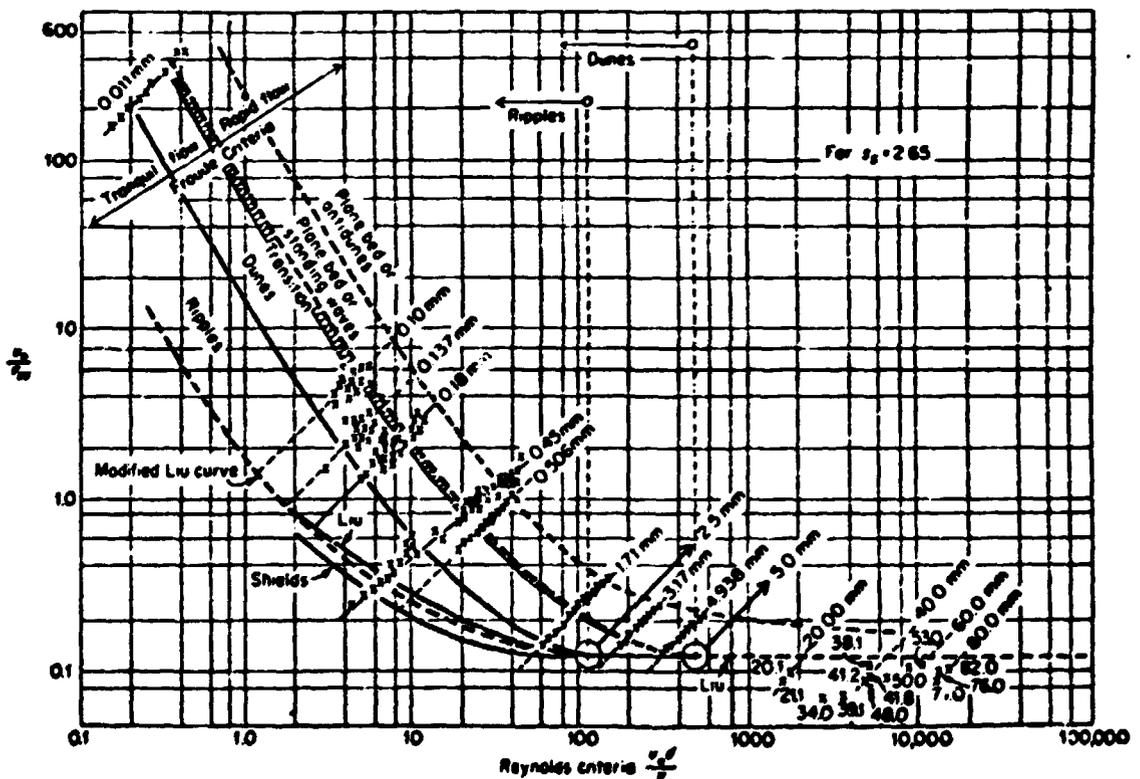


FIGURA 5.15.2 - CRITÉRIO DE SIMONS et alii (1961)

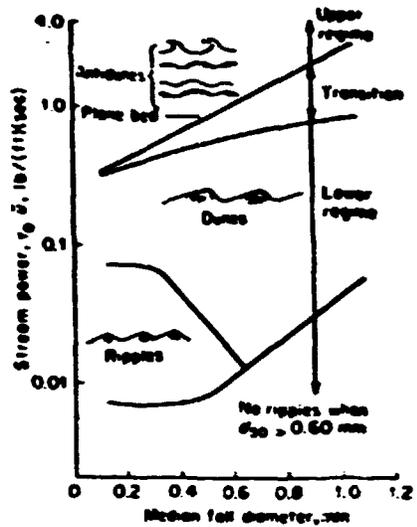


FIGURA 5.15.3 - CRITÉRIO DE SIMONS et alli (1963)

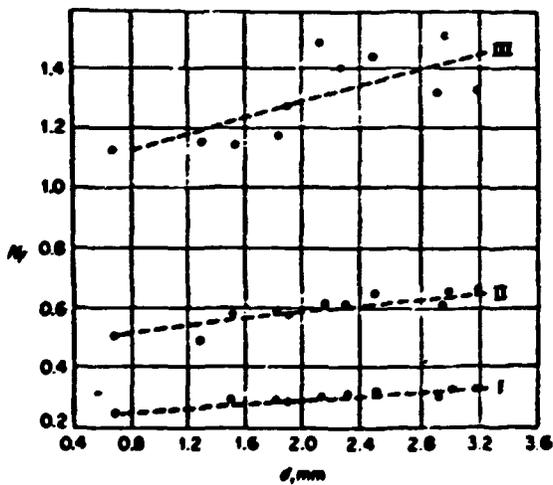


FIGURA 5.15.4 - CRITÉRIO DE KONDRAT'EV (1962)

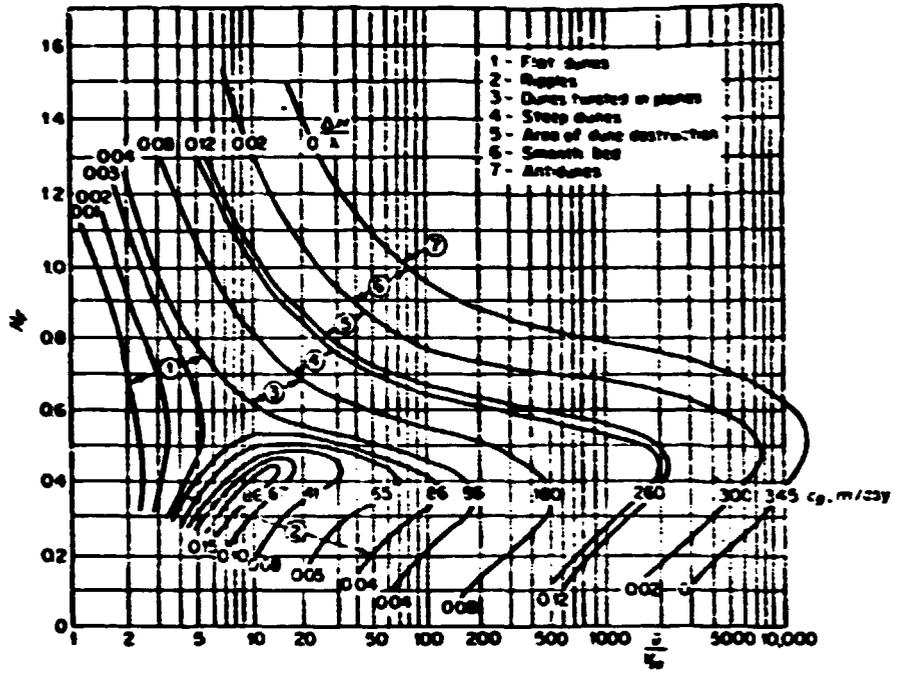


FIGURA 5.15.5 - CRITÉRIO DE ZNAMENSKAYA (1969)

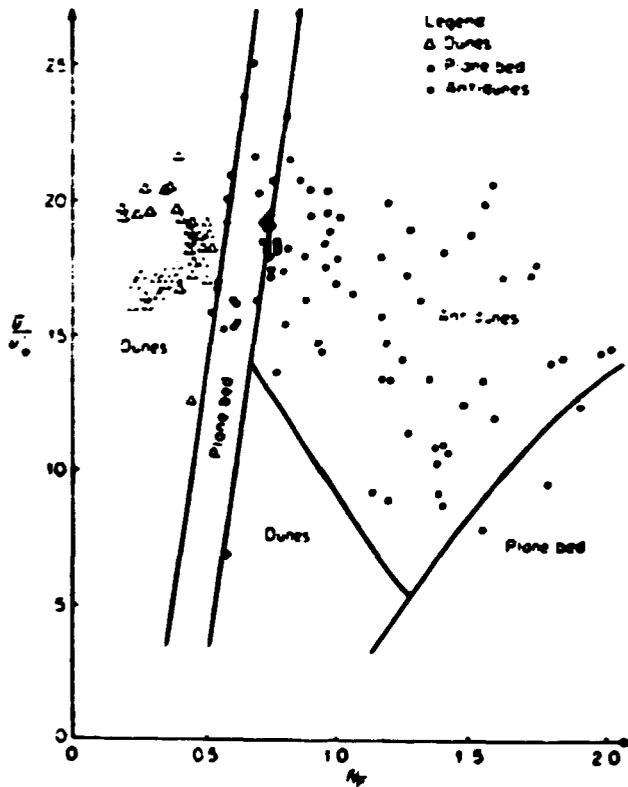


FIGURA 5.15.6 - CRITÉRIO DE ENGELUND (1966)

C A P Í T U L O 6

ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA

6. ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA

6.1. Introdução

A quantificação do transporte sólido por arraste de fundo utilizando técnica de marcação da areia com um isótopo radioativo, tem despertado grande interesse no campo da sedimentologia, uma vez que, em comparação aos métodos tradicionais, consiste em um processo relativamente simples e com uma precisão que atende às necessidades para elaboração da maioria de projetos e estudos.

A técnica utilizada consistiu basicamente nas etapas seguintes:

- 1 - marcação da areia;
- 2 - transporte e imersão dos sedimentos marcados;
- 3 - detecção da "nuvem radioativa";
- 4 - calibração dos equipamentos;
- 5 - processamento dos dados e cálculos da vazão sólida por arraste de fundo.

A areia retirada do local de ensaio foi marcada superficialmente com ^{199}Au , a medição foi realizada ponto a ponto e os cálculos de transporte pelo método de integração espacial, procedimentos estes já descritos nos capítulos 2 e 4.

6.2. Sedimentos Marcados com ^{199}Au

Como já visto anteriormente, os sedimentos podem ser marcados de duas formas: superficialmente e em massa. Foi adotado para a experiência a marcação superficial, utilizando-se como traçador radioativo o ^{199}Au , com meia vida de 2,7 dias e energia gama de 0,41 MeV.

A escolha do ^{198}Au deveu-se ao fato de possuir uma meia vida compatível com a duração da experiência, e a energia dos raios γ emitidos por este radioisótopo atender às condições mínimas para uma boa sensibilidade de detecção.

A marcação superficial dos sedimentos naturais possibilita trabalhar com grandes quantidades de sedimentos ativos e apresenta a grande vantagem da igualdade de comportamento dinâmico da areia marcada com aquela do local de ensaio. Como inconveniente da marcação superficial podemos citar o risco de desprendimento do radioisótopo da superfície dos grãos em virtude dos efeitos abrasão e solubilidade, outro fator desfavorável é a atividade depositada sobre a superfície do grão não ser proporcional à massa do sedimento. No caso da experiência, como temos uma granulometria razoavelmente uniforme, os erros provenientes da marcação superficial são praticamente desprezíveis frente a outras fontes de desvios.

6.3. Transporte e Imersão dos Sedimentos Marcados

Com a utilização do método de marcação superficial com ^{198}Au , não foi necessário o transporte da areia ativa desde o laboratório até o local do ensaio, o que implicaria no uso de pesadas blindagens de chumbo. O ouro radioativo é transportado na forma de uma solução de ácido cloro áurico (H Au Cl_4), acondicionada em um frasco de 25ml e dentro de uma blindagem de chumbo com 5cm de espessura e 50 kg de peso. O veículo utilizado foi o utilitário C-10, devidamente monitorado e sinalizado conforme a norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear. A dose máxima permissível nestes casos é a seguinte:

- a) superfície externa do veículo = 2mSv/h;
- b) 2 metros da superfície externa = 0,1mSv/h;
- c) na posição dos ocupantes do veículo = 0,02mSv/h.

S_v (Sievert) = unidade de dose equivalente

$$1 S_v = 1 \text{ J/kg}$$

A marcação propriamente dita procedeu-se às margens do Canal Es querdo, conforme procedimentos já descritos no item 4.3.

Como podemos observar, se optássemos por outros procedimentos que não aquele da marcação dos sedimentos no local do ensaio, teria mos problemas nos aspectos de segurança radiológica e no trans porte de pesadas blindagens.

A imersão dos sedimentos marcados procedeu-se conforme já descri tos no item 4.4, utilizando para tal o injetor mostrado na figura 4.3. Do ponto de vista do comportamento dinâmico dos sedimentos, uma injeção ideal seria aquela com uma distribuição uniforme dos grãos ativos sobre a superfície do leito, de maneira que estes se jam assimilados pela camada móvel, e submetidas às mesmas condi ções hidráulicas dos sedimentos naturais.

O injetor utilizado libera os sedimentos em forma de montí culo, dificultando assim, a homogeneização inicial. Somente após um pe ríodo variável de tempo, dependendo das condições hidráulicas e sedimentológicas, o deslocamento dos sedimentos será representa tivo. Este problema foi minimizado misturando-se a areia ativa com inativa na proporção de 1 para 4 e fazendo-se, no mínimo, duas injeções na seção inicial com espaçamento de 1 m.

6.4. Detecção dos Sedimentos Marcados

A detecção dos sedimentos marcados foi efetuada pelo método de medida puntual, ou seja: em cada ponto desce-se a sonda de modo que fique a uma certa distância do fundo e faz-se a con tagem por um tempo préfixado (15 a 30s). Para manter a geometria de medição sempre constante utilizou-se o suporte mostrado na figura 4.4.

Na experiência realizada, adotou-se a distância sonda-leito de 5cm, dando um campo de medida da ordem de 25cm de diâmetro (figu

ra 4.6). A distância entre a sonda e o leito deve ser determinada para cada caso, que depende basicamente da energia dos raios gama emitidos pelo radioisótopo.

Comparando o método de medição ponto a ponto com os processos de medida contínua e o de tomada de amostras, podemos salientar as características seguintes:

A medição utilizando a técnica de tomada de amostras, com perfilagem vertical, resultaria na obtenção de dados quantitativos mais precisos, porém, a operação de coleta de amostras é lenta e trabalhosa. Portanto, esta técnica deve ser abandonada quando se trata de estudos em rios de grande porte como é o caso do Rio Paraná. Em experimentos laboratoriais esta técnica é bastante valiosa.

A técnica de medição contínua consiste basicamente em fazer um mapeamento dinâmico, tipo trenó com sonda cintiladora de NaI(Tl). Este método possui uma grande vantagem em virtude da rapidez na execução do mapeamento, e possui uma boa sensibilidade de detecção quando a distribuição dos grãos radioativos por unidade de área é pequena. Entretanto, para sua utilização em rios, principalmente no caso do Rio Paraná onde se verifica a presença de algumas formações rochosas que sobressaem do fundo arenoso, o processo de arraste do trenó acarreta riscos de perda ou quebra de equipamentos.

Como desvantagens deste método ainda podemos citar a necessidade de um equipamento de teleposicionamento de precisão, e em muitos casos a perturbação no leito ocasionado pelo arraste do trenó poderá provocar alterações na movimentação natural dos sedimentos.

A técnica de medição ponto a ponto permite uma melhor precisão na detecção dos sedimentos marcados uma vez que podemos controlar o tempo de contagem, e o posicionamento é relativamente simples com a utilização de dois teodolitos. Como desvantagem pode

mos citar que o tempo gasto para cobrir toda área com presença de grãos radioativos é considerável, como no caso da experiência chega-se a gastar até 8 horas de serviço contínuo para o mapeamento da "mancha" radioativa.

6.5. Calibração do Equipamento de Medição

O levantamento da curva de calibração do equipamento foi realizado conforme já descrito no item 4.7.

Para se obter uma boa reprodutividade a curva de calibração foi determinada com um sedimento possuindo as mesmas características daquelas que se encontra no local do ensaio, para tanto, após terminado o rastreamento, retiraram-se aproximadamente 150 kg de areia a uns 5 metros a montante da seção de injeção.

A homogeneização da areia no tanque de calibração foi realizada manualmente, o que tornou o processo bastante moroso e trabalhoso. Para melhorar a eficiência e o rendimento dos trabalhos de calibração, o processo de mistura deveria ser feito com auxílio de um equipamento mecânico do tipo betoneira.

6.6. Interpretação dos Resultados

Com a aplicação da metodologia descrita no Capítulo 4, foram levantadas curvas de isoatividade e, a partir destas foram determinadas a espessura da camada móvel e a velocidade média de deslocamento. Este método é geralmente denominado de Integração Espacial.

A determinação da massa de sedimentos realmente transportados por unidade de tempo mediante a utilização de traçadores radioativos deve ser feita com cuidados especiais para que sejam levados em consideração alguns aspectos como por exemplo, a atividade dos sedimentos ter que ser proporcional à massa e independente da fração granulométrica considerada.

Com a marcação superficial dos sedimentos a atividade depositada nos grãos é proporcional à sua superfície, portanto na detecção são medidos, preferencialmente, os grãos finos pois estas possuem proporção maior de radioisótopo. Em consequência deste fato, a velocidade de deslocamento obtida é superior à velocidade média representativa da camada móvel. No caso da experiência, temos uma variação do tamanho dos grãos confinados a uma faixa granulométrica relativamente pequena, o que nos permite admitir que os erros provenientes deste fato não sejam relevantes perante outros inerentes ao método aplicado. Por outro lado, deve ser levado em consideração que a marcação superficial se faz com o próprio sedimento retirado do local de ensaio, o que nos garante que o comportamento dinâmico dos grãos seja exatamente o mesmo do sedimento natural, o que não acontece com os materiais artificiais marcados massivamente.

Outro aspecto que devemos considerar na aplicação do método de integração no espaço é o fato que as curvas de isoatividade obtidas não nos fornecem uma exata visão tridimensional da distribuição do traçador. A homogeneização dos sedimentos marcados com os naturais constitui-se em um processo lento, o que acarreta uma certa incerteza nos mapeamentos, sobretudo nos períodos iniciais da experiência. Para que o deslocamento dos sedimentos marcados seja representativo é necessário que haja uma mistura perfeita com a camada em movimento. Na experiência realizada, para minorar estes problemas, injetou-se a areia marcada em dois pontos da seção inicial, sendo que a massa injetada constitui-se de uma mistura de areia ativa e inativa na proporção 1 para 4.

A velocidade média de deslocamento foi calculada pela variação do centro de gravidade da "nuvem" radioativa, onde as curvas integradas na direção do deslocamento da camada móvel mostram uma distribuição assimétrica do traçador apresentado, um decaimento assintótico da curva nas posições a jusante. Na prática, em virtude das dificuldades operacionais, as medições foram realizadas apenas nas seções onde as contagens eram relativamente altas de

tal forma que não houvesse a necessidade de se aumentar o tempo de contagem para diminuir o erro estatístico. Portanto, nas seções onde as contagens se aproximam da contagem de fundo ou seja, onde a concentração do radioisótopo é tão pequena de modo que a intensidade da radiação emitida se aproxima da radiação natural, a curva neste trecho foi extrapolada admitindo-se uma queda exponencial das contagens em relação à distância longitudinal. No caso da metodologia empregada, os erros provenientes desta simplificação na curva de contagem integrada longitudinalmente não teve influência considerável no cálculo da velocidade média de deslocamento, uma vez que mesmo o centro de gravidade da "nuvem" radioativa não seja determinada com precisão, a velocidade média é calculada pela variação da posição do centro de gravidade de uma medição para outra, onde o erro sistemático pode ser considerado constante e sua influência no cálculo da velocidade média pode ser negligenciado. Observou-se que o levantamento do nível de radiação de fundo (background) para estes casos é importante uma vez que a ordem de contagens da "nuvem", nesta região, é bem pequena. Geralmente, a radiação de fundo deve ser medida no mínimo em cinco locais, com o tempo de contagem da ordem de 10 minutos por ponto.

A espessura da camada móvel foi determinada pelo método da contagem total. Neste método correlaciona-se a contagem integrada da curva longitudinal de atividades com a atividade total teórica para espessura zero calculada em função da constante de calibração k . Conhecendo-se o valor da relação entre as atividades integradas e teóricas para espessura zero, e entrando na curva de calibração do equipamento de detecção, obtemos a espessura da camada móvel.

Após um determinado período de homogeneização do sedimento marcado com ^{199}Au , iniciou-se a medição da evolução da "mancha" radioativa pelo método estático de medida, obtendo-se assim a atividade integrada longitudinalmente. Esta atividade deveria ser constante a partir do momento em que a homogeneização atingir o

estado de equilíbrio, entretanto, observou-se que a atividade recuperada diminuía à medida que a "mancha" se deslocava para a jusante. Após um intervalo de tempo de 5 a 6 dias a diminuição da atividade integrada era de 10% aproximadamente, e após 10 a 15 dias aproximadamente, a diminuição era em torno de 5%. Esta variação na atividade recuperada pode ser atribuída principalmente a dois fatores: primeiro o processo não ideal da injeção do sedimento marcado, em segundo a perda de contagem dos grãos finos que possuem uma velocidade de deslocamento maior e agravando-se com o fato de não se realizar medições em todas as seções a jusante por dificuldades operacionais já citados anteriormente.

Na experiência, para o cálculo da espessura da camada móvel, utilizou-se a média das atividades integradas longitudinalmente, obtidas no período de 5 a 15 dias após a imersão da areia marcada, onde a contagem maior verificada no período inicial devido à homogeneização deficiente dos grãos marcados na camada móvel, é compensada pelas perdas de contagem nos períodos posteriores devidas ao efeito de penetração dos grãos e a não medição do "rabo" da curva até atingirmos o zero. A determinação da espessura da camada móvel de transporte constitui-se num dos aspectos que ainda necessita de um estudo detalhado uma vez que se verifica o envolvimento de diversos fatores. Por exemplo, uma pesquisa com traçadores radioativos em um canal experimental, com possibilidade de se retirar amostras verticais cilíndricas e indeformadas, será de grande valia para o estudo da camada móvel de transporte.

6.7. Escolha do Traçador

Na seleção do traçador radioativo para o estudo da movimentação dos sedimentos do leito móvel devem ser considerados o material a ser marcado e o isótopo radioativo. De certa maneira, apesar do material a ser marcado influenciar na seleção do traçador, geralmente é possível eleger um determinado radioisótopo que possui uma meia-vida e energia da radiação adequadas para a finalidade da experiência.

Na escolha do material a ser marcado, temos duas possibilidades: o uso do material natural a ser estudado ou a utilização de material artificial. Quanto à marcação temos três alternativas: marcação em superfície, em volume e por inserção de fontes radioativas.

A inserção de fontes só se aplica para materiais grosseiros como os pedregulhos e seixos, e esta marcação é feita inserindo-se uma fonte radioativa em um furo previamente realizado com uma broca especial e posteriormente fechada com cimento.

A marcação superficial do material natural assegura que o mesmo se comportará identicamente com o material a ser estudado, e tem a possibilidade de marcar grandes quantidades de sedimento. A grande desvantagem do método, especialmente se o material não é uniforme em tamanho e forma, é a atividade depositada ser proporcional à superfície do grão. A areia marcada por este método deve ser ensaiada em laboratório para verificar se a abrasão não remove consideravelmente o traçador radioativo.

A marcação, em volume, de um material artificial como por exemplo o vidro, oferece a grande vantagem na escolha no nuclídeo, uma vez que há grande quantidade de radioisótopos que se prestam para serem incorporados no vidro. Com a utilização do vidro, podem conseguir-se características quase idênticas às do sedimento natural porém, é necessário testar em laboratório se o comportamento do material artificial é igual ao natural. Esta marcação é proporcional a $(\frac{d}{2})^3$ o que é altamente desejável quando temos uma granulometria não uniforme. A perda de atividade por abrasão é desprezível. A grande desvantagem deste método é a limitação quanto à massa de vidro a ser irradiado no reator nuclear; geralmente esta massa varia de 20 a 100g de vidro moído.

A escolha do radioisótopo é normalmente voltado para emissores gama com uma meia-vida da ordem de duração da experiência. Entretanto, utilizando-se do efeito "bremsstrahlung", os emissores

beta também podem ser utilizados para certas aplicações onde é necessária a retirada de amostras.

A tabela 6.7.1 mostra as características de alguns radioisótopos que podem ser utilizados na marcação dos sedimentos.

TABELA 6.7.1 - RADIOISÓTOPOS QUE PODEM SER UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE TRANSPORTE SÓLIDO POR ARRASTE DE FUNDO

ELEMENTO	ISÓTOPO	MEIA-VIDA	RADIAÇÃO	ENERGIA GAMA (MeV)	NÚMERO DE FOTONS POR DECAIMENTO	APLICAÇÃO
Ouro	¹⁹⁸ Au	2,7 d	β, γ	0,41-0,68	1,0	S,H
Bário	¹³⁰ Ba	12,8 d	β, γ	0,16-2,53*	3,4*	S,I
Fósforo	³² P	14,2d	β	-	-	S
Rubídio	⁸⁶ Rb	18,7 d	β, γ	1,08	0,08	H
Cromo	⁵¹ Cr	28,0 d	γ	0,32	0,08	S
Zircônio	⁹⁵ Zr	65,0 d	β, γ	0,24-0,76*	2,0 *	S,H
Cobalto	⁶⁰ Co	71,0 d	β, γ	0,20-0,61	1,3	S,I
Iridio	¹⁹² Ir	74,0 d	β, γ	0,20-0,61	2,5	H,S
Escândio	⁴⁶ Sc	84,0 d	β, γ	0,89-1,12	2,0	S,H
Tântalo	¹⁸² Ta	115,0 d	β, γ	0,10-1,29	2,6	H,I
Estanho	¹¹³ Sn	119,0 d	γ	0,26-0,39	1,1	I
Túlio	¹⁷⁰ Tm	127,0 d	β, γ	0,08	0,1	H
Zinco	⁶⁵ Zn	245,0 d	β, γ	0,51-1,12	0,5	I,H
Prata	¹¹⁰ Ag	253,0 d	β, γ	0,12-1,52	3,2	S
Cobalto	⁶⁰ Co	5,3 a	β, γ	1,17-1,33	2,0	H

* Inclusive radiação do isótopo filho

S = marcação superficial;

H = marcação homogênea

I = marcação por inserção.

Assim como a utilização do ^{198}Au , já descrito em capítulos anteriores, o ^{51}Cr é um isótopo que apresenta boas perspectivas de uso como traçador com marcação superficial.

Este radioisótopo apresenta a grande vantagem na facilidade de marcação, propiciando alta atividade específica. Podemos citar apenas uma desvantagem do uso do ^{51}Cr , que é a baixa porcentagem de fótons gama emitidos por cada decaimento radioativo deste isótopo. Os procedimentos básicos para marcação superficial de grãos silicosos são mostrados na tabela 6.7.2.

Para a marcação superficial podemos ainda ressaltar o uso do ^{45}Sc e do ^{192}Ir . O ^{45}Sc apresenta boa adsorção em grãos de material com alta capacidade de troca iônica. Os procedimentos para a marcação superficial dos sedimentos com ^{192}Ir e ^{45}Sc são mostrados na tabela 6.7.3 e 6.7.4.

Para marcação homogênea, utiliza-se geralmente um vidro que não contenha certas impurezas que após a irradiação com nêutrons possam apresentar espécies radioativas de meia-vida longa. Neste vidro, incorpora-se 0,1% ou mais de um elemento que após a irradiação produza um isótopo de meia-vida compatível com os objetivos da experiência. De uma maneira geral, podemos utilizar praticamente todos elementos indicados com H na tabela 6.7.1.

Para a preparação do vidro, geralmente necessita-se do auxílio de um laboratorista com grande experiência em vidros. O vidro de verá ser preparado com as características necessárias de densidade e composição, e antes da irradiação no reator ele deve ser moído e classificado conforme a granulometria do material de fundo a estudar. Normalmente, pode-se irradiar com nêutrons em um reator atômico, uma quantidade limitada de material que varia de 25 a 100g de vidro moído.

A decisão para a escolha do método de marcação, se superficial ou em massa, depende do tipo de experiência e das características

do sedimento a marcar. Por exemplo, para experiências envolvendo tomada de amostras cilíndricas a marcação superficial torna-se mais econômica, uma vez que há a necessidade da presença de grande número de partículas ativas. Para material de fundo com uma curva granulométrica extensa, isto é, se a distribuição é grande, a marcação superficial vai dar uma proporção maior de atividade para grãos menores, acarretando resultados errôneos. Este fato pode ser minimizado, em alguns casos, com a marcação com uma proporção menor de radioisótopo para frações de sedimentos mais finos.

Para uma boa resolução na detecção dos grãos ativos, é recomendável que a energia da radiação gama seja relativamente baixa. Na prática, a meia-espessura para radiação gama deve ser da ordem de alguns centímetros de água ou do material do leito. Neste caso, o ^{51}Cr e o ^{192}Ir são os que se adaptam razoavelmente. Entretanto, para camada móvel de grande espessura, os radioisótopos com maior energia de radiação gama são os indicados.

A atividade específica deve ser determinada em função do método de detecção, da energia da radiação gama, etc.. Quando da utilização de detetores tipo cintilação e emissores gama de baixa energia como o ^{198}Au , ^{51}Cr ou ^{192}Ir , é desejável ter uma atividade de 0,37 a 3,7 KBq por partícula (assumindo que a partícula tenha 0,2 mm de diâmetro e pesando aproximadamente 10^{-3}g).

A. Caillot⁽²⁹⁾, em 1970, apresentou uma metodologia para a marcação superficial e homogênea de sedimentos. Dentre os vários métodos citados, são mostrados nas tabelas 6.7.2, 6.7.3 e 6.7.4, os procedimentos para marcação superficial com ^{51}Cr , ^{192}Ir e ^{45}Sc . A título de exemplo, são mostrados também algumas composições dos vidros a serem irradiados em um reator nuclear.

TABELA 6.7.2 - PROCEDIMENTO PARA MARCAÇÃO DE SEDIMENTOS COM ^{51}Cr

ETAPA	REAGENTES	CONCENTRAÇÃO	TEMPO	TEMPERATURA	EFEITO OBTIDO OU ESPERADO	OBSERVAÇÕES
2	Fonte de Silício $\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ HCl	21,2g em 300ml de H_2O 10ml em 40ml de H_2O	2h	100°C	Deposição de Si sobre o sedimento	As soluções são adicionadas uma após outra Aquecimento com agitação até secagem completa
Deixar o sedimento no forno a 1050°C, durante 1 hora						
Lavagem do sedimento durante 1 hora, com troca de água a cada 15min.						
3	CrO_3 , Na_2 Acetato de Pb	500mg em 300ml de H_2O 4g em 400ml de H_2O	60min	70°C	Deposição do Cr sobre o sedimento	As soluções são adicionadas uma após outra Aquecimento com agitação até secagem completa
Deixar o sedimento no forno, em atmosfera de N_2 , a 1050°C, durante 1 hora						

Tabela 6.7.3 - PROCEDIMENTO PARA MARCAÇÃO DE SEDIMENTOS COM ^{192}Ir

ETAPA	REAGENTES	CONCENTRAÇÃO	TEMPO	TEMPERATURA	EFEITO OBTIDO OU ESPERADO	OBSERVAÇÕES
2	Fonte de Si $\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ HCl	10,6g em 300ml de H_2O 5ml em 40ml de H_2O	2h	100°C	Deposição do Si sobre o sedimento	As soluções são adicionadas uma após outra Aquecimento com agitação até secagem completa
Deixar o sedimento no forno a 1050°C, durante 1 hora						
Lavagem do sedimento durante 1 hora, com troca de água a cada 15min.						
3	$\text{IrCl}_3 \cdot (\text{NH}_4)_3$ HCO_2Na	500mg em 300ml de H_2O 100mg em 400ml de H_2O	60min	70°C	Deposição do Ir sobre o sedimento	As soluções são adicionadas uma após outra Aquecimento com agitação até secagem completa
Deixar o sedimento no forno, em atmosfera de N_2 , a 1050°C, durante 1 hora						

TABELA 6.7.4 - PROCEDIMENTOS PARA MARCAÇÃO DE SEDIMENTOS COM ^{45}Sc

ETAPA	REAGENTES	CONCENTRAÇÃO	TEMPO	TEMPERATURA	EFEITO OBTIDO OU ESPERADO	OBSERVAÇÕES
3	Cloreto de Sc	26mg em 500ml de H_2O	2h	100°C	Deposição de Sc sobre o sedimento	Aquecimento com agitação até secagem completa
Deixar o sedimento no forno, em atmosfera de N_2 , a 1050°C, por 1 hora						

ETAPAS: 1 - Pré-tratamento; 2 - Tratamento; 3 - Marcação.

- Obs: - Para as marcações superficiais com ^{51}Cr , ^{192}Ir e ^{46}Sc , o pré-tratamento é o mesmo do ^{198}Au , já descrito no item 4.3.
- No caso do ^{46}Sc , não há nenhum tratamento a realizar.
 - As concentrações ou quantidades são dadas para a marcação de 1 kg de sedimento.

Para marcação homogênea, A. Caillot sugeriu a seguinte composição dos vidros ativáveis:

A) Vidro com ^{192}Ir

SiO_2	.....	48%	
Al_2O_3	.....	19%	
CaO}	.....	17%	
TiO_2	.....	5%	
K_2O}	.....	5%	
Ir}	.....	0,25 a 0,30%	densidade - 2,668

B) Vidro com ^{198}Au

SiO_2	.....	50,5%	
Al_2O_3	.....	20%	
CaO}	.....	18%	
MgO}	.....	6,25%	
TiO_2	.....	5,25%	
Au}	.....	0,04 a 0,5%	densidade = 2,7

C) Vidro com ^{51}Cr

SiO_2	.....	48%
Al_2O_3	.....	22%
TiO_2	.....	5%
CaO}	.....	14%
MgO}	.....	6%
BaO}	.....	5%
Cr}	.....	3%

D) Vidro com ^{102}Ta

SiO_2	.....	40%
Al_2O_3	.....	12%
CaO}	.....	13%
MgO}	.....	5,5%
BaO}	.....	6,5%
TiO_2	.....	3%
K_2O}	.....	5%
Ta_2O_5	.....	15%

C A P Í T U L O 7

COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES

7. COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES

Para a determinação do transporte sólido por arraste de fundo na seção Guaira, Canal Esquerdo do Rio Paraná utilizou-se como traçador o ^{198}Au , com marcação superficial. O ^{198}Au com meia-vida 2,7 dias, com energia da radiação gama de 0,41 MeV, correspondeu satisfatoriamente aos propósitos da experiência. Entretanto, o emprego do ^{198}Au acarreta alguns inconvenientes tanto na preparação como na aplicação no campo.

Uma das dificuldades está na fase de processamento do ^{198}Au para obtenção da solução de ácido cloroáurico (H Au Cl_4), onde o ouro metálico ativo deve ser dissolvido em água régia, aquecido para a evaporação do ácido sulfúrico, e o resíduo em forma de sal é dissolvido com água destilada, formando-se o H Au Cl_4 . Esta operação é bastante trabalhosa e deve ser feita em um laboratório radioquímico que tenha uma capela especial de proteção com paredes de chumbo. Outro inconveniente que podemos mencionar, está relacionado com a sua aplicação no campo. No caso do Rio Paraná, principalmente para vazões líquidas baixas, onde a taxa de transporte dos sedimentos é relativamente baixa, há a necessidade de se medir a evolução da "nuvem" radioativa por um período longo de tempo. Como o ^{198}Au tem uma meia-vida relativamente curta ($T_{1/2}=2,7$ dias), o levantamento fica prejudicado em virtude do decaimento do radioisótopo. Por outro lado, se injetarmos uma quantidade maior de traçador teremos o problema de saturação do sistema de detecção nas campanhas iniciais de medição, e também o processamento de grandes quantidades de ouro não é recomendável.

Para evitar estes inconvenientes é favorável o uso de um traçador de uma meia-vida maior, como por exemplo o ^{51}Cr . Este apresenta uma desvantagem em relação ao ^{198}Au , no aspecto de transporte a grandes distâncias, pois necessita de pesadas blindagens uma vez que a marcação do sedimento deve ser feita no laboratório.

A metodologia utilizada para injeção do traçador apresentou algumas falhas que podem ser corrigidas em campanhas futuras. Dentre as falhas podemos citar a forma da deposição dos sedimentos marcados no leito, onde a areia ativa é colocada em forma de pequeno montículo, dificultando-se assim a homogeneização com o leito móvel. Para evitar este inconveniente é necessário projetar um novo injetor que permita uma melhor distribuição superficial dos grãos ativos, podendo-se pensar até em um equipamento com tele comando que distribua a areia ativa de forma homogênea ao longo de uma pequena faixa da seção inicial, transversalmente ao fluxo de água. Este equipamento poderá ser ainda dotado de um sistema em que a areia ativa se misture com os sedimentos inativos da camada móvel.

Na utilização do injetor mostrado na figura 4.3, deve-se tomar cuidado para que o volume vazio que sobra após o carregamento do material a injetar seja preenchida com água antes de submergí-lo em direção ao leito. Nas experiências realizadas previamente para testar o equipamento, notou-se que a bolsa de ar que se formava no interior do injetor, impedia que todo o material saísse do saco de polietileno, e com o preenchimento do volume vazio com água notou-se que a deposição do sedimento no leito além de ser suave evitava a formação de borbulhas que provocavam turbulências sobre o leito móvel. Um outro aspecto que deve ser aperfeiçoado é o fator segurança, a dose de radiação recebida pelo operador, no instante da injeção, corresponde aproximadamente $\frac{1}{3}$ da dose total (desde o processamento do material radioativo até o final dos trabalhos de campo). Esta taxa de dose pode ser minimizada com a utilização de um injetor com paredes de espessura maior ou, se o problema for o peso, deve-se utilizar nestes casos recipientes blindagem de urânio exaurido.

As medições foram realizadas em duas seções, uma a 200m da margem esquerda e outra a 150m da margem direita. Para se obter um resultado representativo da seção total é recomendável a realização de uma medição na parte central da seção transversal do rio, ou

seja a uns 400m das margens. Este ensaio poderia ser realizado a cada duas campanhas de medição do transporte sólido por arraste de fundo.

O sistema de detecção da evolução da "nuvem" radioativa, consistiu em um detector de cintilação com cristal de NaI(Tl) de 1"x1", acoplado a um escalímetro BASC. Para uma melhor eficiência na detecção e redução da atividade injetada é recomendável o uso de uma sonda com cristal de NaI(Tl) de 2"x2" e um escalímetro do tipo BASC III. O BASC III possui 999 posições de memória onde os resultados poderão ser armazenados, onde os dados são posteriormente recuperados manualmente ou diretamente alimentando a impressora ou mesmo um microcomputador.

O suporte para a fixação da sonda e manutenção da geometria de medição mostrado na figura 4.4, deve ser adaptado para utilização do detector com cristal de 2"x2". Durante os ensaios verificou-se a necessidade de lastros de chumbo para estabilização do conjunto sonda e suporte. Estes lastros devem ser intercambiáveis, conforme as condições do escoamento.

O posicionamento dos pontos de medição foram obtidos por meio de dois teodolitos, sendo que um deles dava o alinhamento e o outro o ângulo. Conforme já descrito anteriormente este procedimento é bastante moroso apesar da boa precisão. Para que as medições tenham um rendimento maior, é recomendável o uso de um equipamento eletrônico de teleposicionamento tipo Motorola. Este equipamento é essencial quando se utiliza a detecção dinâmica.

A medição da evolução dos sedimentos marcados é feita nas seções transversais que cortam a "nuvem" radioativa. Em cada levantamento são medidas de 10 a 15 seções transversais, e o tempo gasto para se medir estas seções é de aproximadamente 8 horas. Em virtude do processo de medição ser relativamente moroso e em vista do deslocamento contínuo dos sedimentos, temos um certo desvio na

curva de atividades integrada longitudinalmente, uma vez que ca da levantamento deveria corresponder a uma situação instantânea.

Para que haja uma boa racionalização nos trabalhos de rastreamento da evolução dos sedimentos marcados, recomenda-se o uso de uma sonda cintiladora com cristal de NaI(Tl) de 2" x 2" que possui maior eficiência de detecção e conseqüentemente necessitando de menor tempo de contagem, o uso de um equipamento de teleposicionamento e melhoria no sistema de movimentação da balsa. O sistema de movimentação da balsa era constituído de duas cordas, fixas em duas poitas de ferro com peso aproximado de 150kg cada. À medida que havia necessidade de se deslocar a balsa para a jusante soltava-se a corda manualmente, onde o processo de posicionamento tornava-se trabalhoso, principalmente quando a balsa passava da linha de alinhamento, e nestes casos só com auxílio de um barco a motor para empurrá-lo a montante. Para eliminar esta dificuldade de posicionamento sugere-se a instalação de dois guinchos, colocados um em cada extremidade da balsa.

Durante as campanhas de medição é necessário a verificação da configuração do leito, principalmente quando temos vazões líquidas altas, onde temos a maior probabilidade de formação de dunas. Este levantamento deve ser feito toda vez que há uma variação considerável no nível de água lido na régua limnimétrica da seção. Este levantamento deve ser feito na seção longitudinal do local da experiência, utilizando-se um ecobatímetro de boa precisão.

Outro dado importante que deve ser observado durante as campanhas de medição é a variação da declividade da linha d'água em função da vazão líquida. O levantamento da declividade S é importante para a aplicação das fórmulas teóricas para o cálculo do transporte sólido por arraste de fundo.

A coleta de amostras de areia tanto para a marcação, ensaio granulométrico e calibração do equipamento de medição deve ser feita, na medida do possível, nas condições hidráulicas semelhantes

às da experiência. A coleta de areia para a calibração deve ser feita no final da campanha de medição da evolução dos sedimentos marcados para se evitar a perturbação no leito móvel. Para esta operação deve-se usar uma draga tipo Peterson que colete apenas a areia da camada móvel, e sempre variando o ponto de coleta na seção transversal para se evitar a escavação do leito.

No processo de calibração do equipamento de medição é aconselhável utilizar-se um tanque circular com o diâmetro correspondente ao ângulo sólido de detecção da sonda cintiladora, assim como o suporte da sonda deve ter a base circular. A área sensível do detector é determinada experimentalmente, conforme já mostrada no gráfico da figura 4.6. Conforme já descrito anteriormente, a homogeneização da areia ativa com a inativa deve ser feita com auxílio de um misturador tipo betoneira.

A precisão na pesagem da alíquota da areia marcada (padrão) é muito importante, para tanto é necessário o uso de uma balança de precisão tipo analítica.

A metodologia de cálculo do transporte sólido obedeceu o roteiro já descrito no capítulo 4, onde tanto as integrais das atividades transversais e longitudinais foram calculadas pelo método de planimetragem das áreas. Este processo, apesar de fornecer resultados precisos é bastante laborioso. Para racionalizar o processamento recomenda-se o uso de um microcomputador para o cálculo das integrais. Podemos também prever, no programa, as correções das atividades medidas no campo quanto à radiação de fundo (background) e decaimento radioativo do radioisótopo, cálculo da velocidade média de transporte e o da vazão sólida por arraste de fundo.

Nas futuras medições de transporte sólido por arraste de fundo, devem ser previstas algumas campanhas para a determinação da perfilagem da concentração de sedimentos ao longo da vertical y do escoamento líquido. A determinação da curva de concentração pode

rá ser feita pelo método clássico de coleta de amostras ou através de um turbidímetro nuclear. Pelo método tradicional, a coleta de amostra é feita com auxílio de uma turbidisonda e a concentração determinada em laboratório. O turbidímetro nuclear, atualmente em fase de experiências em diversos países, usa o princípio da atenuação da radiação gama, uma vez devidamente calibrado, para as condições locais, fornece uma perfilagem imediata e contínua ao longo da vertical.

Extrapolando-se a curva de concentração para $y \approx 0,05D$, teremos a concentração C_a no topo da camada móvel. A determinação da concentração nas proximidades da superfície da camada móvel é de grande valia para o entendimento e análise dos mecanismos que regem o transporte, que por sinal é extremamente complexo na região de transição entre a movimentação de sedimentos por arraste de fundo e por suspensão.

De acordo com a equação de ROUSE (7.1), da variação da concentração em função da profundidade y , a concentração torna-se infinita para $y = 0$. Portanto, esta equação não representa a realidade quando $y = 0$. Além deste fato, junto ao leito, o conceito de suspensão, ou seja, partículas sólidas envoltas continuamente por partículas de água, não se aplica plenamente e o comprimento de mistura l tende a zero.

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D-y}{y} \cdot \frac{a}{D-a} \right)^2 \quad (7.1)$$

Einstein (1950), designou de camada móvel, a espessura no topo do leito, na qual a suspensão não se verifica. A espessura desta camada foi admitida como sendo $a' = 2d$, onde d é o tamanho representativo do grão. O material dentro desta camada torna-se a fonte do carreamento em suspensão, e pode ser obtida então a concentração de referência C_a no limite inferior da vertical.

Pela teoria do transporte sólido de fundo, a taxa de carreamento é dado por $g_s i_s$. Se a velocidade na qual a camada se movimenta é u_B , então o peso das partículas que se movimentam por unidade de área é dado por $g_s i_s / u_B$. A concentração média é dada por:

$$C_a = A_s \frac{i_s \cdot g_s}{a' \cdot u_B} \quad 7.2$$

Onde A_s é uma constante de correção devida a não uniformidade da concentração da camada móvel. Einstein (1950), admitiu a proporcionalidade $u_B \propto u_*'$ e baseando-se em resultados experimentais estabeleceu que $A_s = 1/11,6$, portanto a equação 7.2 fica:

$$C_a = \frac{1}{11.6} \frac{i_s \cdot g_s}{u_*' a'} \quad 7.3$$

onde:

$$u_*' = \sqrt{g R_h' S}$$

Da equação 7.3, temos:

$$i_s g_s = 11.6 C_a u_*' a' \quad 7.4$$

Portanto, conhecendo-se o valor da concentração de referência C_a , podemos estimar o transporte sólido por arraste de fundo através da equação 7.4, resultando assim, em mais um meio para confrontar os resultados obtidos experimentalmente através do emprego de traçadores radioativos. Um outro aspecto de vantagem do levantamento da concentração de sedimentos em suspensão consiste na utilização do método expedito para estimar o transporte sólido por arraste de fundo elaborado por COLBY-HEMBRE (1955), conforme já descrito no item 5.12, onde por meio de ábacos a vazão sólida é determinada em função da concentração de sólidos em suspensão, da velocidade e da profundidade.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES

8. CONCLUSÕES

Atualmente, os traçadores radioativos são utilizados com frequência no estudo do movimento e transporte sólido de sedimentos nos rios e ao longo das costas. Assim, como em outras aplicações, os traçadores radioativos competem com várias outras substâncias usadas para estes fins. No caso específico do estudo do transporte sólido por arraste de fundo, devem ser considerados os traçadores fluorescentes, materiais magnéticos, areias coloridas etc.

Os radioisótopos possuem algumas vantagens se comparados com outros tipos de traçadores. Eles são relativamente baratos; os equipamentos de medição são disponíveis comercialmente; podem-se identificar grupos granulométricos utilizando-se isótopos com a emissão de radiação γ de diferentes energias; possibilitam a obtenção de medidas contínuas; não há necessidade de amostragem ou quando é imprescindível a tomada de amostras, a localização dos pontos de coleta torna-se mais fácil. O uso de radioisótopos com meia-vida adequada (relativamente curta) proporciona a vantagem de podermos realizar novas experiências no mesmo local, uma vez que o decaimento da atividade remanescente é rápida. Como desvantagens podemos citar os cuidados necessários quanto à proteção radiológica, a necessidade de credenciamento junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear para trabalhar com materiais radioativos e a necessidade de pessoal especializado na utilização destes materiais.

Podemos concluir que em rios com as características hidráulicas e sedimentológicas do Canal Esquerdo, do Rio Paraná em Guaíra, pode-se empregar a marcação superficial dos grãos com o ouro radioativo, para os estudos de transporte sólido por arraste de fundo. A escolha do ^{199}Au como traçador em rios do porte do Rio Paraná é perfeitamente viável técnica e operacionalmente, uma vez que a velocidade de deslocamento da "nuvem" radioativa é relativamente alta, o que resulta numa campanha de medição com duração mais curta. Cada campanha de medição dura em média de 15

a 20 dias, o que corresponde a aproximadamente 7 meias-vidas portanto a marcação superficial com ^{198}Au é tecnicamente satisfatória uma vez que este método permite a marcação de grandes quantidades de areia e com atividade específica relativamente alta.

A marcação superficial dos grãos com ^{198}Au , no caso do Rio Paraná, não acarreta erros significativos uma vez que a variação granulométrica dos sedimentos de fundo está confinada a uma faixa de tamanho relativamente pequena.

A utilização da técnica de traçadores radioativos para o estudo do transporte sólido por arraste de fundo, tem demonstrado ser uma ferramenta de grande potencial, principalmente em rios do porte do Rio Paraná onde os métodos convencionais de medição, tais como: fosso transversal; aparelhos de caixa ou cesto, de tabuleiro, de pressão diferencial; traçadores coloridos, fluorescente, etc.; não apresentam condições técnicas e operacionais de utilização.

Em épocas de estiagem onde as vazões líquidas são inferiores à média e o transporte sólido por arraste de fundo também é pequeno, em consequência o período de medição deve ser maior. Nestes casos, podemos utilizar a marcação com isótopo de meia-vida mais longa como por exemplo o ^{51}Cr , que possui o período de 27,8 dias e energia gama de 0,33 MeV.

A utilização de traçadores radioativos, apesar de algumas dificuldades na sua aplicação, principalmente em termos de levantamentos quantitativos, ainda é o método que comparado a outros é o que inspira maior confiança. Devido à complexidade que envolve o mecanismo do transporte sólido por arrastamento de fundo, os estudos realizados até agora deixam muito a desejar, constituindo-se assim, num vasto campo para pesquisas, onde sem dúvida o auxílio dos traçadores radioativos será de grande valia tanto para os estudos laboratoriais como para os de campo.

As fórmulas para quantificação da vazão sólida por arraste de fundo, aplicadas no Rio Paraná, não apresentaram resultados satisfatórios. A aplicação destas fórmulas consiste numa tarefa que exige cuidados especiais, uma vez que as mesmas foram em geral elaboradas para condições específicas, e tendo em vista que os fenômenos que regem este transporte são de natureza extremamente complexa, é de se esperar que haja discrepâncias consideráveis nos resultados. Fazendo-se uma avaliação em primeira aproximação dos resultados obtidos com a aplicação das fórmulas, pode-se concluir que aquelas que merecem um certo grau de confiança são as de Meyer-Peter e Müller e de Einstein. A fórmula de Meyer-Peter e Müller se ajusta melhor para descargas sólidas correspondente às vazões líquidas entre a mínima e a média, e as de Einstein (1940 e 1950) e de Colby-Hembre (1955) para vazões acima da média.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - PUTMAN, J.L., SMITH, D.B. et alli. Thames Siltation Investigation. Preliminary Experiments of the use of Radioactive Tracers for Indicating Mud Movement. AERE/I/R 1516, Harwell, England, dic. 1954.
- 2 - HOURS, R. et alli. Méthode d'étude de l'évolution des plages par traceurs radioactifs. I Quai Branly, Paris, 1, núm. 11, Nov. 1955.
- 3 - COURTOIS, G. & SAUZAY, G. Sur les masses de sédiments a injecter dans une experience de traceurs radioactifs en Sedimentologie dynamique. Isotope Hydrology, Proc. of a Symposium, IAEA, 9-13 marc. 1970.
- 4 - LANE, E.W. Progress Report on Studies on Design of Stable Channels by the Bureau of Reclamacion, Proc. ASCE, Separate nº 280, 1953.
- 5 - SHIELDS, A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteil. Preuss. Versuchsanst. Wasser, Erd, Berlin, 1936.
- 6 - WHITE, C.M. Equilibrium of Grains on Bed of a Stream, Proc. Royal Soc. of London, 1940.
- 7 - MEYER-PETER, E. & MÜLLER, R. Formulas for Bed-Load Transport, Intern. Assoc. Hydr. Res. 2d Meeting, Stockholm, 1948.
- 8 - RAMETTE, M. & HEUZEL, M. Étude de l'entraînement des galets à l'aide de traceur radioactifs, La Houille Blanche (Spécial A), Mai-Juin., 1962.

- 9 - EGIJAROFF, I. L'équation générale du Transport des Alluvions non cohesives par un courant fluide. Proc. 7th Conf. IAHR, Lisboa, 1957.
- 10 - BONNEFILLE, R. Essais de synthèse des lois de début d'en-
trainement des sédiments sous l'action d'un courant en
regime continu, Bulletin du C.R.E., Chatou (5), Oct. 1963.
- 11 - CHABERT, J. & CHAUVIN, J.L. Formations de et de rides dans
les modeles fluviaux, Bulletin du C.R.E., Chatou (4), Juin.
1963.
- 12 - LIU, H.K. Mechanics of Sediment Ripple Formation, Proc.
ASCE, New York, 83 (HYZ), April, 1957.
- 13 - ALBERTSON, M.L.; SIMONS, O.B. & RICHARDSON, E.V. Discussdo
de Liu, H.K., Proc. ASCE, New York, 84 (HY1), Fev. 1958.
- 14 - CHABERT, J. & CHAUVIN, J.L. Formations de dunes et de rides
dans les modeles fluviaux, Bulletin du C.R.E., Chatou (4),
Juin, 1963.
- 15 - BONNEFILLE, R. Étude d'un critère de début d'apparition des
rides et des dunes fluviales, Bulletin du C.R.E., Chatou
(11), Avr., 1965.
- 16 - GARDE, R.J. & ALBERTSON, M.L. Characteristics of Bed Forms
and Regimes of Flow in Alluvial Channels, Civil Engineering
Dep., Colorado State University, Fort Collins, Colorado,
1959.
- 17 - GARDE, R.J. & RAJU, K.G. Regime Criteria for Alluvial
Streams, Proc. ASCE, New York, 89 (HY4), Jul. 1963.

- 18 - DU BOYS, M.P. Étude du Regime du Rhone et de l'action exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers indefiniment affouillable, Annales des Pontes et Chaussées, Serie 5, Vol. 18, 1879.
- 19 - SCHOKLITSCH, A. Handbuch des wasserbaues, Springer Vienna (2nd ed., 1950), English Translation by S. Shulitz, 1930.
- 20 - MEYER-PETER, E. FAVRE, H. & EINSTEIN, A., Neure Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb, Schweiz Bauzeitung, Vol. 103, n° 13, 1934.
- 21 - CHIEN, N. The Present Status of Research on Sediment Transport, Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Vol. 80, 1954.
- 22 - EINSTEIN, H.A. The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows, U.S. Dept. Agric., Soil Conserv. Serv., T.B. no. 1026, 1950.
- 23 - PETERSEN, B.R. Some Radioactive Surface Labelling Methods, Danish Isotope Centre, Copenhagen, Ingeniøren 499/102, 1960.
- 24 - CAMPBELL, B.L. An Improved Technique for Labelling Sand with Au 198, Int. J. Appl. Radiat. Isotopes (G.B.) 14/5, 1963.
- 25 - BEDMAR, A.P. Isotopos en Hidrologia, Editorial Alhambra, Madrid, 1972.
- 26 - COURTOIS, G. & SAUZAY, G. L'Application des Radioéléments en Sédimentologie, Houille Blanche, numéro spécial, 7/1970 1ère partie, 629.

- 27 - CAILLOT, A. Bedload Transport, Guide Book on Nuclear Techniques in Hydrology, I.A.E.A., Technical Reports Series no. 91, Vienna, 1983.
- 28 - HUBBEL, D.W. & SAYRE, W.W. Sand Transport Studies with Radioactive Tracers, Proc. ASCE, New York, 90 (HY3), May 1964.
- 29 - CAILLOT, A. Les Méthodes de Marquage des sédiments par des Indicateurs radioactifs, Houille Blanche, numéro spécial, 7/1970 - 1ère partie, 661.
- 30 - GRAF, H.W. Hydraulics of Sediments Transport, McGraw - Hill Book Company, N.Y., 2d Ed., 1984.
- 31 - BOGÁRDI, J., Sediment Transport in Alluvial Streams, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1978.
- 32 - SIMONS, D.B. & SENTÜRK, F. Sediment Transport Technology, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1977.
- 33 - YALIN, M.S. Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press, N.Y., 2d Ed., 1977.
- 34 - COLBY, B.R. & HEMBRE, C.H. Computations of Total Sediment Discharge, Niobrara River near Cody, Nebraska, U.S. Geol. Survey, Water Supply Paper 1357, 1955.