

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA-CCT

REITOR

Prof. Lynaldo Cavalcanti de Albuquerque

DIRETOR DO CCT DA UFPb

Prof. Sebastião Guimarães Vieira

CHEFE DO DEC DO CCT

Prof. Heber Carlos Ferreira



C369m Catunda, Paula Frassinetti C.
 Modelo estatístico para avaliação dos processos de
 clarificação / Paula Frassinetti C. Catunda. - Campina
 Grande, 1976.
 129 f.

 Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal da
 Paraíba, Centro de Ciências.

 1. Água - Processo de Clarificação 2. Clarificação de
 Água I. Haandel, Adrianus C. V., Dr. (orientador) II.
 Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB) III.
 Título

CDU 628.168(043)


UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA-CCT

MODELO ESTATÍSTICO PARA AVALIAÇÃO
DOS PROCESSOS DE CLARIFICAÇÃO

Engenheira Civil: PAULA FRASSINETTI C. CATUNDA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc)

Aprovado Por:



Prof. ADRIANUS C. v. HAANDEL
Orientador.



Prof. JOSEMIR VASCONCELOS DE CASTRO



Prof. JOSÉ FARIAS NÓBREGA

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAIBA - BRASIL
DEZEMBRO-1976

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

Colaboraram na confecção do presente trabalho:

- o Prof. ADRIANUS C.v.HAANDEL, pela idéia inicial, orientação e revisão do texto;

- a Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba - CAGEPA, na pessoa do Dr. JOSEMIR VASCONCELOS DE CASTRO, pela presteza com que colocou a nossa disposição a Estação de Tratamento de Água de Gravatã e do Alto Branco, para trabalhos de pesquisa;

- aos Profs. Martin Wiseman e Maria Izabel Feitosa Cavalcanti pela assistência prestada na parte de computação;

- ao C.N.Pq. (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Engenharia Clínica, pelo apoio financeiro.

A TODOS AS MINHAS SINCERAS MANIFESTAÇÕES DE PENHOR E AGRADECIMENTO.

S U M A R I O

Neste trabalho propõe-se um método racional de avaliação da eficiência dos processos de clarificação de águas por análise de experiências em Jar-Tester. Um modelo matemático é desenvolvido permitindo a determinação da concentração e tipo de coagulante e materiais auxiliares à coagulação para uma eficiência máxima. A variação da turbidez é tomada como parâmetro de avaliação. O método é particularmente útil para comparar a atividade de diversos tipos de polieletrólitos.

A B S T R A C T

A rational method is proposed for the evaluation of the efficiency of water clarification processes by the analysis of Jar-Test experiments. With the developed mathematical model the concentration and type of coagulant and auxiliary materials for maximum clarification efficiency can be determined. The variation of the turbidity is taken as the evaluation parameter. The method is particularly suitable for the comparison of the activities of different types of poly electrolytes.

I N D I C E

CAPITULO	I - INTRODUÇÃO.....	001
CAPITULO	II - INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	004
	I - <u>Coagulação</u>	004
	I.1 - Impurezas Coloidais.....	004
	I.2 - Desestabilização das Partículas Co- loidais.....	006
	I.3 - Coagulação e Floculação.....	007
	I.4 - Coagulação com Sulfato de Alumínio..	008
	I.5 - Polieletrólitos.....	011
	II - <u>Sedimentação</u>	015
	II.1 - Sedimentação Discreta.....	015
	II.2 - Tanque Ideal de Sedimentação.....	018
	II.3 - Distribuição da Velocidade de Sedi- mentação.....	020
	II.4 - Turbidez "versus" Distribuição Acu- mulativa da Velocidade de Sedimenta- ção.....	022
	II.5 - Interpretação Estatística.....	027
CAPITULO	III - MÉTODOS E MATERIAIS.....	041
	I - <u>Jar-Tester</u>	041
	II - <u>Ensaio Padronizado no Jar-Tester</u>	042
	II.1 - Preliminares.....	043
	II.2 - Procedimento.....	045
	III - <u>Medidor de Turbidez</u>	046
	IV - <u>Substâncias Químicas</u>	047
	IV.1 - Sulfato de Alumínio.....	047
	IV.2 - Separam AP 273 Premium.....	049
	IV.3 - Drewfloc 21.....	051
	IV.4 - Drewfloc 307.....	052
	V - <u>Exemplificação de um Ensaio</u>	053

CAPITULO	IV - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	060
	IV.1 - Tabelas IV.1 a IV.12.....	061
	IV.2 - Figuras IV.1 a IV.12.....	061
	IV.3 - Tabelas IV.11 a IV.15.....	063
	IV.4 - Apendice II.....	065
CAPITULO	V - DISCUSSÃO	
	V.1 - Considerações.....	105
	V.2 - Remoção de Turbidez em Tanques de Sedimentação.....	107
	V.3 - Remoção de Turbidez em Jar-Tester..	109
CAPITULO	VI - CONCLUSÕES.....	115
CAPITULO	VII - SUGESTÕES.....	118
APÊNDICE 1	- VALORES DE $\int_{-\infty}^x f(x) dx$	
APÊNDICE 2	- Programa Elaborado para a execução do <u>Mode</u> <u>lo Matemático</u>	121
BIBLIOGRAFIA	127.

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

A utilização de Modelos Reduzidos, simuladores dos processos de coagulação, floculação e sedimentação, possibilita a obtenção de informações práticas e eficientes. Critérios de análise muitas vezes imprecisos, contudo, orientam a interpretação das informações obtidas. Na pesquisa de polímeros sintéticos, como auxiliares de íons metálicos coagulantes e/ou como coagulantes primários, a determinação da influência destes polímeros limita-se aos processos de coagulação, floculação e sedimentação. Exige-se desses processos uma máxima remoção de partículas em suspensão, pretendendo-se, assim, diminuir a perda de carga nos filtros, devido à obstrução de seus poros por partículas neles sedimentadas, e, conseqüentemente, aumentar o período útil de filtração. O Jar-Tester é o aparelho básico para ensaios de clarifi

cação pelos processos de coagulação, floculação e sedimentação.

Método comumente aplicado para a avaliação da eficiência dos processos de clarificação, é a análise da variação da turbidez durante a execução de um ensaio no Jar-Tester. Desenvolve-se no presente trabalho um modelo matemático que relaciona a variação de turbidez com a distribuição da velocidade de sedimentação. O modelo desenvolvido foi testado para resultados obtidos em Jar-Tester, utilizando-se a água bruta que chega a Estação de Tratamento de Água do Alto Branco, nesta cidade de Campina Grande, variando-se a concentração do coagulante (Sulfato de Alumínio) e tipo e concentração de polieletrólitos ("Drewfloc 21", "Drewfloc 307" e "Separam AP 273 Premium"). Os resultados de todas as experiências foram consistentes com o modelo matemático desenvolvido. O modelo, possibilita a determinação, de forma clara e concisa, do tipo de polieletrólito mais efetivo e a concentração ótima de Sulfato de Alumínio e do polieletrólito, para uma eficiência máxima dos processos de clarificação. O trabalho ora descrito, desenrola-se da seguinte forma:

Capítulo II - Mostra o desenvolvimento do modelo matemático, tendo como base o estudo das partículas coloidais, sua desestabilização, floculação e sedimentação discreta, quando usado o Sulfato de Alumínio como coagulante e polímeros sintéticos como auxiliares à coagulação.

Capítulo III - Relaciona-se com os métodos de ensaio e com a aparelhagem utilizada.

Capítulo IV - Apresenta a eficiência na remoção de turbidez dos ensaios realizados, para diferentes taxas de escoamento superficial, concentrações diferentes de Sulfato de Alumínio, "Drewfloc 21", "Drewfloc 307" e "Separam AP 273 Premium".

Capítulo V - Trata da discussão de remoção de turbidez quando analisadas a velocidade média de sedimentação, a taxa de escoamento superficial e a fração não removível de turbidez.

Capítulo VI - Apresenta as conclusões obtidas em ensaios no Jar-Tester, quando se aplica o modelo matemático desenvolvido como método de interpretação destes ensaios.

Capítulo VII - Indica sugestões para pesquisas futuras de processos de clarificação, visando a otimização dos processos convencionais de clarificação de águas para abastecimento.

Apêndice I - Traz os valores da integral $\int_{-\alpha}^x F(x) dx$ para valores de x tal que $-2,9 \leq x \leq 2,9$

Apêndice II - Apresenta um programa de computação, escrito com a finalidade de executar o modelo matemático desenvolvido e mostra os resultados obtidos para um determinado exemplo.

CAPITULO II

INTRODUÇÃO TEORICA

I - COAGULAÇÃO

As impurezas encontradas em águas superficiais, passíveis de remoção pelos processos convencionais de tratamento d'água, podem ser de dois tipos: impurezas em suspensão ou impurezas coloidais. Aquelas sedimentam naturalmente pela ação da gravidade, enquanto estas somente serão removidas após processos de coagulação e floculação. Limitamo-nos ao estudo das impurezas coloidais.

I. 1 - IMPUREZAS COLOIDAIS

Partículas finamente divididas

em um meio contínuo formam uma dispersão coloidal. As partículas constituem a fase dispersa, e o meio é o dispersante. Devido ao seu tamanho, as partículas coloidais não são apreciavelmente afetadas pela ação da gravidade. Não sedimentam em água o bastante para que a sua remoção seja assim alcançada. É obvio que havendo aglomeração de partículas coloidais, formando partículas maiores, a sedimentação se processa de forma bem mais rápida. Como as partículas coloidais são eletricamente carregadas (a maioria das partículas coloidais encontradas em águas naturais são carregadas negativamente), as forças de atração de Van der Waals não são suficientemente grandes para vencer a força de repulsão entre as partículas. A presença de partículas coloidais na água provoca a sua turbidez, efeito esteticamente indesejável (conhecido por "efeito Tyndall"), relacionado com a dispersão de raios de luz visível (2). Existem duas teorias básicas para explicar a desestabilização de partículas coloidais: a primeira - **teoria química** - dá ênfase a interações puramente químicas; a segunda - **teoria física** - valoriza interações especificamente físicas (3). A teoria física baseia-se na redução da carga efetiva da partícula e requer o conhecimento da dupla camada de uma partícula coloidal. Quando duas fases - colóide e água - de constituições quimicamente diferentes, entram em contato, estabelece-se entre elas uma diferença de potencial elétrico. Essa diferença de potencial é acompanhada por uma separação de cargas, ficando um lado da interface carregado negativamente e o outro positivamente (1). Ions contrários são atraídos para a interface, proporcionalmente à magnitude

da carga. A Figura II.1 mostra o modelo da dupla camada de uma partícula coloidal. A camada localizada a uma distância " δ " da superfície sólida denomina-se "camada de Stern". A camada onde ocorre uma distribuição difusa de íons de carga contrária, é conhecida com a denominação de "camada de Gouy-Chapman". O potencial na linha divisória (plano de cisalhamento) da parte aderida e difusa, vem a ser o potencial zeta (potencial ξ). Uma parte da dupla camada é ligeiramente ligada à superfície sólida, podendo mover-se na solução quando se aplica uma diferença de potencial. Admite-se que a camada difusa da dupla camada seja móvel (1). A medida da carga de uma partícula coloidal é determinada pelo potencial zeta, ou seja, pelo potencial da parte móvel da dupla camada (3). Potencial zeta é o valor do potencial de Nernst na posição $x=\delta$ (4). Quanto maior o valor do potencial zeta, mais estável é a partícula. Como a quantidade de material adsorvido em uma superfície coloidal depende da concentração do eletrólito, um aumento da concentração de íons positivos faz com que o potencial diminua com a introdução de mais íons de carga oposta às da partícula na camada de Stern.

I.2 - DESESTABILIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS COLOIDAIIS

As partículas coloidais levam uma carga elétrica igual à soma da carga da partícula mais a carga dos íons opostos, ligados a ela (3). A estabilidade de uma partícula coloidal deve-se ao fato de que a partícula possui

carga elétrica. Como as partículas têm carga de mesmo sinal, elas se repelem e, assim, tendem a permanecer em suspensão (5). A carga das partículas coloidais pode ser neutralizada pela adição de um eletrólito à solução coloidal. Os íons de cargas opostas às da partícula, são por esta atraídos. Os íons, ao se aproximarem, reduzem a carga diminuindo o potencial zeta e, portanto, a repulsão entre as partículas. Um coloide negativo pode ser desestabilizado por íons positivos, como K^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} . Os íons de carga elevada são mais efetivos na coagulação de coloides, do que os de carga mais baixa. As concentrações mínimas a uma coagulação rápida obedecem a razão 1:30:900 para íons de carga tripla, dupla e simples, respectivamente (regra de Schulze-Hardy).

I.3 - COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

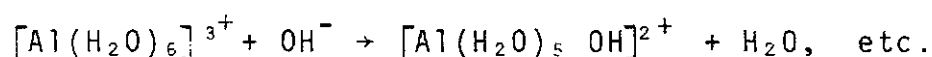
A distinção dos termos coagulação e floculação é de grande importância para o entendimento do mecanismo básico de desestabilização de partículas coloidais. Na prática, o processo de coagulação consiste na adição de um coagulante à água, geralmente sais metálicos de Fe^{3+} e Al^{3+} . A coagulação processa-se instantaneamente. Uma mistura rápida e violenta é fornecida ao sistema para completa homogeneização da massa líquida e do coagulante. A coagulação representa em princípio, uma redução do potencial repulsivo da dupla camada de uma partícula coloidal (6). O coagulante desestabili-

za as partículas coloidais, reduzindo o potencial zeta a tal ponto que as forças de Van der Waals (forças de atração) possam interagir sobre as partículas, provocando a sua aglomeração. Ao processo de coagulação segue-se o de floculação. As partículas coloidais, já desestabilizadas, podem se aproximar e se aglutinar em núcleos hidrolizados de hidróxidos metálicos de sais de alumínio ou de ferro, quando presentes na solução. A floculação pode ocorrer do choque de partículas, por força do movimento natural provocado pela agitação das partículas (movimento Browniano) e pela atuação da força gravitacional (14). Neste caso, tem-se a floculação pericinéctica. Quando o choque das partículas coloidais, já desestabilizadas, ocorre pela introdução de energia externa ao meio, a floculação é chamada de ortocinéctica. Tanto a floculação pericinéctica quanto a ortocinéctica acontecem simultaneamente nas câmaras de floculação das Estações de Tratamento, com predominância da floculação ortocinéctica.

I.4 - COAGULAÇÃO COM SULFATO DE ALUMÍNIO

Quando, a uma suspensão coloidal de sílica ou argila, adiciona-se Sulfato de Alumínio, dá-se instantaneamente a hidrólise deste sal e a desestabilização das partículas coloidais. A opinião que atualmente prevalece (6) é a que interpreta os íons de Al^{3+} como um redutor do potencial de Nernst (potencial Ψ), repulsivo da partícula. A adição de

soda produz flocos de $Al(OH)_3$, os quais aglutinam as partículas provocando a sua remoção. Brønsted-Volqvarts (5) sugerem que o íon Al^{3+} não existe puro, e sim hidratado, presumivelmente com seis íons hidroxilas na estrutura. Com a adição de álcalis, protons são removidos, havendo introdução de íons hidroxilas na estrutura e, decréscimo da carga da mesma, até um pH de valor aproximadamente igual a 8,0 onde se obtém $Al(H_2O)_3(OH)_3$.



Dependendo do pH e da alcalinidade, os íons de alumínio reagem com a alcalinidade da água e com os íons de H_3O^+ . Portanto, em águas alcalinas, não se observa um abaixamento brusco do pH. Nesta situação, a alcalinidade pode manter o pH dentro do limite de formação e precipitação do hidróxido de alumínio. Quando a alcalinidade é insuficiente para reagir com os íons metálicos de alumínio, estes reagirão com os íons de hidrogênio, e o pH sofrerá um abaixamento brusco. A Figura II.2 mostra as reações do íon metálico de alumínio hidrolizado, com a alcalinidade e com a água. A solubilidade do alumínio é função do pH da solução. A Figura II.3 evidencia que, à medida que a concentração do íon de hidrogênio decresce, o íon hidratado $Al(H_2O)_6^{3+}$ vai formando compostos polimerizados de alumínio, até a formação do composto insolúvel de hidróxido de alumínio (8). Para qualquer valor do pH, os compostos e íons produzidos têm sempre um caráter ácido. Assim é que para um pH maior que 8,0, o hidróxido de alumínio comporta-se como um ácido, cedendo pro

tons e formando um composto solúvel de aluminato (9), (Chave E da Figura II.3).

A determinação da quantidade ótima de Sulfato de Alumínio e do pH ótimo de coagulação, é muito importante para a prática da coagulação. O diâmetro e a concentração das partículas coloidais não representam uma constante em uma mesma água. Também acontece essa variação com o pH e com a alcalinidade. Não é boa prática estabelecer uma dosagem ótima de Sulfato de Alumínio para uma dada turbidez. Uma análise mais acurada para a determinação da quantidade necessária deste coagulante para uma remoção ótima de turbidez, certamente conduzirá a uma melhor operação do sistema. O Jar-Tester torna esta determinação possível e simples. A aplicação conveniente de outros parâmetros, tão importante quanto a dosagem ótima de Sulfato de Alumínio para o bom funcionamento de uma Estação de Tratamento d'Água, pode ser obtida através de ensaios com o Jar-Tester. Citam-se como exemplos: o gradiente na mistura rápida e lenta, a eficiência do emprego de substâncias auxiliares à clarificação de águas, e o valor do pH ótimo para a coagulação. Uma água muito turva não significa necessariamente dosagem elevada de Sulfato de Alumínio. Em ensaios preliminares no Jar-Tester com Sulfato de Alumínio, para águas de média a alta turbidez (turbidez maior que 100 u.j.), as dosagens podem variar de 5 a 10 ppm. O gráfico da turbidez remanescente, em função das dosagens de coagulante, diz se a quantidade ótima de coagulante está dentro da faixa de dosagens aplicadas. Quando, no estudo com o Jar-Tester, a dosagem

ótima de coagulante encontra-se dentro da faixa aplicada de dosagens, obtêm-se uma curva do tipo "a" da Figura II.4. A curva "b" da Figura II.4 mostra que as dosagens aplicadas foram insuficientes para atingir a dosagem ótima de coagulante, pois a remoção ótima de turbidez não foi alcançada.

I.5 - POLIELETRÓLITOS

A utilização de polieletrólitos nas Estações de Tratamento d'Água, tem se mostrado de grande interesse devido à eficiência observada quanto à remoção de partículas em suspensão. Investigações realizadas com polieletrólitos, no Centro de Engenharia Sanitária de Cincinnati, Estados Unidos, forneceram, entre outras, as observações seguintes (10):

1 - Os polieletrólitos usados como auxiliares a coagulantes metálicos produzem flocos que sedimentam rapidamente;

2 - Em certas águas, dosagens pequenas de polieletrólitos reduzem o gasto com coagulante;

3 - Algas são rapidamente coaguladas com polieletrólitos catiônicos;

4 - Os polieletrólitos podem atuar, não somente como auxiliares à coagulação, mas também como coagulantes;

5 - Todos os polieletrólitos não são igualmente efetivos a todos os tipos de águas;

6 - Doses excessivas de polieletrólitos produzem dispersão, em lugar de ajudar a floculação;

7 - Os polieletrólitos devem ser utilizados em forma de solução diluída para assegurar uma completa mistura.

Polieletrólitos referem-se aos polímeros que contêm grupos ionizados ao longo de seus encadeamentos. Polímeros são compostos formados de um encadeamento de sub-unidades ou monômeros, reagidos de maneira a formar uma grande molécula (3). O número total de monômeros, bem como os tipos de monômeros são variados. Aqueles polímeros que contêm no seu encadeamento um só tipo de monômero, são conhecidos como homopolímeros. Outros que contêm no seu encadeamento vários tipos de monômeros são chamados de co-polímeros (3). Quando um polímero, após ser ionizado, retém cargas positivas, no seu encadeamento, é referido como polieletrólito catiônico. Quando retém cargas negativas, diz-se polieletrólito aniônico. O polímero que não sofre ionização, ou seja, não possui cargas elétricas, é classificado como polímero não iônico. A Figura II.5 representa algumas estruturas poliméricas. Desconhece-se a fórmula estrutural exata de alguns polímeros. Sabe-se, no entanto, que muitos deles contêm o monômero básico acrilamina (10). É desconhecido o mecanismo exato pelo qual os polímeros aglomeram sólidos em suspensão. Supõe-se que polímeros de grande cadeia linear são adsorvidos pelos sólidos em suspensão, estabelecendo um

forte entrelaçamento entre polímeros e sólidos. O modelo eletrostático de desestabilização dos coloides não explica como um colóide negativo é desestabilizado por um polieletrólito aniônico. Imagina-se uma teoria geral (bridging theory) de desestabilização de partículas coloidais, combinando a teoria física (modelo eletrostático) e a teoria química, em um modelo de qualidade aceitável, para explicar a habilidade de polímeros de alto peso molecular em desestabilizar uma dispersão coloidal (12). A desestabilização de coloides dá-se pela adsorção do polieletrólito na superfície da partícula coloidal, acompanhada quer de uma redução de carga, quer de uma ligação entre coloides e polieletrólitos entre si. Estes dois mecanismos de agregação não são bem diferenciados. Certamente estão envolvidos fatores químicos e físicos. A efetividade na desestabilização de partículas está relacionada com o número de grupos químicos. Supõe-se que estes grupos envolvam as partículas coloidais, provocando a desestabilização da suspensão. Assim, polímeros que contêm muitos grupos químicos são mais efetivos na desestabilização de coloides. A representação esquemática de uma molécula de um polímero é a de um cordão com muitas ramificações ou braços. Quando ocorre a adsorção de um polímero por uma partícula coloidal, alguns desses grupos envolvem a superfície da partícula coloidal, ficando o restante dos grupos livres na solução, dando por conseguinte uma partícula desestabilizada (Figura II.6-a). Se duas dessas partículas se encontram ocorre forte entrelaçamento entre elas, dando origem a uma partícula floculenta (Figura II.6-b). Quando isto não o-

corre, os grupos livres que ficam na partícula, resultam na reestabilização do coloide (Figura II.6-c). Quando a concentração de polieletrólitos é grande, a adsorção destes na superfície coloidal resulta numa partícula estável (Figura II.6-d),(3). As partículas floculentas, resultantes da adsorção de polímeros por coloides, não são resistentes aos esforços cortantes altos. Assim é que, ao se submeter um floco a uma intensa e prolongada agitação, ocorrerá uma fragmentação do floco, prejudicando, sobremaneira o processo de remoção dessa partícula (12). Alguns polieletrólitos, geralmente aqueles que possuem alta viscosidade, são também bastante suscetíveis ao cisalhamento (6). O residual de turbidez depende do tipo e da dosagem do polímero aplicado. A Figura II.7 baseia-se em trabalho experimental de Black, Berkner e Morgan. Descreve a agregação de coloides negativos de uma dispersão de Kaolinita como polieletrólito aniônico (poliacrilamina, 30% hidrolizada), (2). Comparando a Figura II.7-a com a Figura II.7-b, nota-se que o polieletrólito aniônico induz a coagulação com uma concentração inferior à do Al^{3+} , e que a reestabilização ocorre quando esta concentração aumenta. Esta diferença, notadamente observada na Figura II.7, confirma a teoria de que a neutralização de cargas não é um fator preponderante na desestabilização de coloides por polieletrólitos. Quando os polímeros são usados como substitutos, em parte, do íon metálico coagulante, estes atuam como verdadeiras pontes, ligando os microflocos, que já estavam na solução devido a outros processos, mas que não tinham peso suficiente para sedimentarem ou serem removidos na filtração.

II - SEDIMENTAÇÃO

Conforme a concentração e as características das partículas em suspensão, sedimentam-se essas partículas por:

1 - **Sedimentação Discreta**, ou seja, sedimentação de partículas que não flocculam ou que flocculam fracamente durante o processo de sedimentação;

2 - **Sedimentação Floculenta**, ou melhor, sedimentação de partículas que flocculam durante o processo de sedimentação.

II.1 - SEDIMENTAÇÃO DISCRETA

Durante o processo de sedimentação, se as partículas conservarem sua identidade, ocorre a sedimentação de partículas discretas, ou simplesmente sedimentação discreta. A teoria da sedimentação basicamente refere-se ao efeito da gravidade em partículas suspensas em um líquido de menor densidade. Sob a influência da gravidade, qualquer partícula, possuindo uma densidade maior que a da água, sedimentar-se-á com velocidade acelerada, até que a resistência do líquido seja igual ao peso efetivo da partícula. A velocidade de sedimentação será constante e dependerá do tamanho, forma e densidade da partícula e da viscosidade e densidade do líquido.

do. A forma das partículas tem-se como esférica para a maioria das considerações teóricas e práticas sobre as velocidades de sedimentação. As velocidades de sedimentação das partículas não esféricas, podem ser analisadas tomando-se como relação as partículas esféricas. Para uma partícula esférica de diâmetro "d" e densidade " ρ_s ", em um líquido de densidade " ρ ", a força de aceleração "F" é igual ao peso da partícula, menos a sua força ascensional. Obtém-se uma velocidade constante de sedimentação quando a força de resistência "R" é igual à força de aceleração, o que é expresso pelo seguinte:

$$R = F = \pi d^3/6 \cdot g(\rho_s - \rho) \quad (\text{II.1})$$

A resistência oferecida por um líquido à passagem de uma partícula esférica é função de quatro variáveis independentes: viscosidade " μ " e densidade " ρ " do líquido, diâmetro "d" e velocidade "v" da partícula. Tem-se:

$$R = f(\mu, \rho, d, v) \quad (\text{II.2})$$

Um estudo da Equação II.2, através da análise dimensional, resulta:

$$R = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2/2 \quad (\text{II.3})$$

ou ainda:

$$(\pi d^3/6) \cdot g(\rho_s - \rho) = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2/2 \quad (\text{II.4})$$

onde "A" é a área da partícula da seção em ângulo reto com a direção da sedimentação, $A = \pi d^2/4$ e C_D é o coeficiente de fricção de Newton que, por sua vez, é função do Número de Reynolds (R), (13,15,16). Desenvolvendo a Equação II.4, em função da velocidade, obtêm-se a equação geral da velocidade de sedimentação para partículas esféricas, comumente chamada de "Lei de Newton":

$$v = [(4/3) \cdot (d/C_D) \cdot g(\rho_s - \rho)/\rho]^{1/2}$$

ou:

$$v = [(4/3) \cdot (d/C_D) \cdot g(S_s - 1)]^{1/2} \quad (\text{II.5})$$

onde S_s é o peso específico da partícula dado por $S_s = \rho_s/\rho$. O valor de C_D não é constante: varia com o Número de Reynolds. Para partículas esféricas, este coeficiente é calculado pela equação seguinte (13):

$$C_D = (24/R) + (3/R)^{1/2} + 0.34 \quad (\text{II.6})$$

A Figura II.8 mostra o Coeficiente de Newton ou coeficiente de fricção em função do Número de Reynolds. Na região de turbulência, para um número de Reynolds elevado ($R = 10^2$ até 10^4), C_D assume, mais ou menos, um valor de 0,4, e a velocidade de sedimentação é aproximadamente:

$$v_s \cong [3,3 \cdot g \cdot (S_s - 1)d]^{1/2} \quad (\text{II.7})$$

Para uma resistência viscosa (fluxo laminar), com um Número de Reynolds baixo ($R < 0,5$), e o coeficiente de fricção $C_D = 24/R$, a velocidade de sedimentação será:

$$v_s = g \cdot (1/18) \cdot [(\rho_s - \rho)\mu]d^2;$$

ou

$$v_s = (1/18) \cdot g(S_s - 1)d^2 \quad (\text{II.8})$$

As Equações II.7 e II.8 são conhecidas, respectivamente, como "Lei de Newton" e "Lei de Stokes" (13,16).

II.2 - TANQUE IDEAL DE SEDIMENTAÇÃO

Alguns critérios adotados para projetos de tanque ideal de sedimentação resultam da análise de um tanque ideal, concebido por diversos autores, entre os quais Hazen(18), Camp (14,21,22), Fair e Geyer (13), embora seja admitida como imperfeita essa análise, deixando muito a desejar quando da aplicação da teoria à prática. Hazen (18) introduziu o conceito de um tanque ideal de sedimentação, hipotético, no qual a sedimentação se realiza exatamente da mesma maneira que em um recipiente de igual profundidade, contendo um líquido em repouso. O tanque de Hazen apoia-se em três princípios básicos:

1 - A direção do fluxo é horizontal e a velocidade de fluxo é a mesma em todos os pontos da zona de sedimentação;

2 - As concentrações das partí-
culas de mesmo tamanho são idênticas em todos os pontos da seção
vertical, no início da zona de entrada;

3 - Uma partícula é removida quan-
do atinge a zona de lodo.

A Figura II.9 ilustra os percor-
sos de partículas discretas em um tanque de sedimentação ideal.
Os percursos são determinados a partir da soma vetorial da ve
locidade de sedimentação " S_s " e da velocidade de deslocamento
" S_d " da partícula. Partículas com velocidade de sedimentação
" S_s " maior ou igual a " S_0 ", são removidas em um tempo em que
 $t_0 = S_0 \cdot h_0$. Desta forma, $S_0 = h_0/t_0$; $t_0 = C/Q$ e $A = C/h_0$; on-
de Q é a taxa de escoamento (m^3/s), C é a capacidade volumê-
trica da zona de sedimentação (m^3) e A é a área superficial (m^2).
Assim:

$$S_0 = (C/A)/(C/Q)$$

ou:

$$S_0 = Q/A \quad (II.9)$$

ou seja, S_0 é a taxa de escoamento superficial ($m^3/s/m^2$) e re
presenta a velocidade crítica de sedimentação. Partículas com
 $S_s < S_0$ somente serão removidas em um tanque de sedimentação de

fluxo horizontal se estiverem a uma distância h' da zona de lodo, de forma que $h' = S_s \cdot t_0$. A proporção removida de partículas com $S_s < S_0$ é dada por:

$$h'/h_0 = S_s/S_0 = S_s/(Q/A) \quad (\text{II.10})$$

Em um tanque de largura "B", $dh'/dL = (S_s \cdot dt)/(S_d \cdot dL)$ é constante porque S_s e S_d são constantes.

Assim:

$$\begin{aligned} h' &= S_s/S_d \text{ e } h'/h_0 = (S_s/S_d) \cdot (L/h_0) = (S_s \cdot L \cdot B)/(S_d \cdot h_0 \cdot B) = \\ &= S_s \cdot A/Q \end{aligned}$$

A razão $S_s/Q/A$ é chamada de "Número de Hazen".

II.3 - DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

Quando se considera a sedimentação de partículas em um meio tranquilo, a eficiência de remoção de partículas é função da taxa de escoamento superficial e da velocidade de sedimentação das partículas,

$$r = f(S_0, S_s) \quad (\text{II.11})$$

Uma vez que as partículas sedimentam com velocidades diferentes,

específicas a cada partícula devido ao seu tamanho e peso, geralmente não se considera a velocidade de sedimentação pertinente a cada partícula, e sim a frequência da distribuição da velocidade de sedimentação (13). A distribuição da velocidade de sedimentação é tomada em função da concentração das partículas encontradas em amostras retiradas de um recipiente, antes e no decorrer do processo de sedimentação. Se " S_0 " é a velocidade crítica de sedimentação das partículas que sedimentam " h_0 " em um tempo " t_0 ", onde " h_0 " é a distância da superfície ao ponto de amostragem, partículas com velocidades de sedimentação $S_s > S_0$ serão removidas totalmente no tempo " t_0 ". Partículas com $S_s \leq S_0$ só serão removidas se estiverem a uma distância h' do ponto de amostragem, tal que $h' < S_s \cdot t_0$. A fração removida das partículas com $S_s \leq S_0$, é dada por:

$$S_s/S_0 = h'/h_0 \quad (\text{II.12})$$

A Figura II.10 mostra a distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação. No eixo das abcissas, observa-se a velocidade de sedimentação " S_s " e, no eixo das ordenadas, a concentração relativa " p " das partículas com velocidade de sedimentação menor que " S_s ". Observa-se ainda que uma fração das partículas igual a $(1-p_0)$, tem uma velocidade de sedimentação superior a velocidade crítica de sedimentação " S_0 ". A fração das partículas com uma velocidade de sedimentação " S_s " é dp (Figura II.10). Através da Equação II.12 determina-se a parte removida das partículas com velocidade de sedimentação " S_s ", que é igual a:

$$S_s/S_0 \cdot dp \quad (II.13)$$

A parte removida de todas as partículas com $S_s \leq S_0$ é então dada por:

$$\int_0^{p_0} S_s/S_0 dp \quad (II.14)$$

e a remoção total em todo o processo de sedimentação é:

$$r = (1-p_0) + \int_0^{p_0} (S_s/S_0) dp$$

ou

$$r = (1-p_0) + 1/S_0 \int_0^{p_0} S_s dp \quad (II.15)$$

A integral $\int_0^{p_0} S_s dp$, representa a área hachurada da Figura II.10-a, sendo que a remoção está representada na Figura II.10-b, onde:

$$a = 1/S_0 \int_0^{p_0} S_s dp.$$

II.4 - TURBIDEZ "VERSUS" DISTRIBUIÇÃO ACUMULATIVA DA VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

A concentração dos flocos formados da coagulação com sais de ferro e alumínio ou outros coagulantes, pode ser medida em termos das propriedades críticas

da suspensão, ou seja; cor, turbidez, volume e peso dos flocos ou em termos do conteúdo de ferro e alumínio (13). As medidas de turbidez representam um procedimento experimental bastante conveniente para a determinação das partículas coloidais. A turbidez pode ser determinada por fotômetros de luz. Lê-se a intensidade de dispersão de luz em unidades de turbidez. A coagulação e floculação de partículas coloidais resultam geralmente na sedimentação parcial dessas partículas, e a suspensão sobrenadante apresenta um residual de turbidez mais baixo. Existe uma relação bem definida entre a turbidez remanescente e a concentração das partículas ainda não removidas (24). Quando da retirada das amostras, a grande turbulência no tubo de amostragem faz com que os flocos macroscópicos se fragmentem e voltem ao estado coloidal. Assim, a turbidez pode ser considerada como a medida da concentração das partículas na amostra. O parâmetro "p" pode agora ser definido como:

$$p = T/T_0 \quad (II.16)$$

onde T é a turbidez de uma amostra retirada no tempo "t" de sedimentação e "T₀" é a turbidez no início do processo de sedimentação. A turbidez "T" é composta exclusivamente de partículas com velocidade de sedimentação $S_s \leq h/t$. Para um tempo "t₀" de sedimentação, a turbidez é composta de partículas com velocidade de sedimentação $S_s \leq S_0 = h/t_0$. A Equação II.15 resulta:

$$r = 1 - (T/T_0) - (1/S_0) \cdot \int_0^{T/T_0} S_s d(T/T_0) \quad (II.17)$$

A Figura II.11, representa um diagrama típico da turbidez relativa T/T_0 em função da velocidade de sedimentação " S_s ". Observa-se que a turbidez é essencialmente composta de duas partes: a fração T_∞/T_0 , não removível de turbidez por sedimentação devido aos flocos com velocidade de sedimentação $S_s = 0$; e a fração $T - T_\infty/T_0$ em princípio removível por sedimentação, referindo-se a partículas com velocidades de sedimentação $S_s > 0$. Analisando a Figura II.11, vê-se que:

$$(1/S_0) \cdot \int_{T_\infty/T_0}^{T/T_0} S_s d(T/T_0) = T/T_0 - (1/S_0 T_0) \cdot \int_0^{S_0} T dS_s,$$

a remoção será então dada por:

$$r = 1 - (T/T_0) + (T/T_0) - (1/S_0 T_0) \cdot \int_0^{S_0} T dS_s$$

ou

$$r = 1 - (1/S_0 T_0) \cdot \int_0^{S_0} T dS_s \quad (II.18)$$

O presente trabalho propõe um método de cálculo para a determinação da remoção de partículas em suspensão, tendo como parâmetro de avaliação a turbidez. O método baseia-se na análise da distribuição da velocidade de sedimentação. Se uma amostra tem uma turbidez inicial " T ", então a fração não removida de flocos é igual a:

$$p' = (T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty) \quad (II.19)$$

A parte " $T_0 - T_\infty$ " da turbidez inicial " T_0 " é devida a flocos que possuem velocidades de sedimentação $S_s > 0$. Experiências mostram que a distribuição da velocidade de sedimentação de flocos sedimentáveis, pode ser aproximada à Distribuição Gaussiana. Os valores de p' , obtidos de amostras retiradas após tempos de sedimentação diferentes, são colocados em função da velocidade de sedimentação " S_s " em diagrama probabilístico. Observa-se que, para todas as experiências, a relação entre p' e " S_s ", neste diagrama pode ser bem aproximada a uma reta significando que $p' = F(S_s)$ onde, $F(S_s)$ é a Distribuição Acumulativa Normal. Matematicamente, a relação entre p' e " S_s ", pode ser dada por:

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = p' = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{S_0} \exp. [-(S_s - \bar{S})^2 / 2\sigma^2] dS_s \quad (\text{II.20})$$

onde " \bar{S} " é a velocidade média de sedimentação, σ^2 é a variância, e σ é o desvio padrão. Na Equação II.20 o intervalo de integração é de $-\infty$ até S_0 , embora não existam velocidades de sedimentação negativas. Entretanto, experimentalmente ficou determinado que a razão entre " \bar{S} " e " σ " é sempre maior que 2,0 o que faz com que o valor da integral $\int_{-\infty}^0 \exp. [(S_s - \bar{S}) / 2\sigma^2] . dS_s$, seja muito pequeno. A expressão II.20 pode ser escrita em sua forma unitária:

$$(T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty) = F(x) \quad (\text{II.21})$$

onde:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-x^2/2} dx \quad (\text{II.22})$$

e,

$$x = (S_s - \bar{S})/\sigma \quad (\text{II.23})$$

A substituição da Equação II.21 na Equação II.18 resulta:

$$r = 1 - (1/S_0 T_0) \cdot \int_0^{S_0} [(T_0 - T_\infty) F(x) + T_\infty] dS_s$$

ou

$$r = 1 - (1/S_0 T_0) \cdot (T_0 - T_\infty) \cdot \int_0^{S_0} F(x) dS_s + (1/S_0 T_0) \cdot \int_0^{S_0} T_\infty dS_s$$

e,

$$r = 1 - (1/S_0) \cdot (T_0 - T_\infty)/T_0 \cdot \sigma \cdot \int_0^{(S_0 - \bar{S})/\sigma} F(x) d(S_s - \bar{S})/\sigma + (1/S_0 T_0) T_\infty S_0$$

$$r = 1 - (T_\infty/T_0) - (T_0 - T_\infty/T_0) \cdot (\sigma/S_0) \cdot \int_{-\infty}^x F(x) dx \quad (\text{II.24})$$

Fisicamente, esta expressão significa que a remoção da turbidez, "r", depende de dois fatores:

1 - A razão T_∞/T_0 representando a fração de turbidez relativa a partículas não sedimentáveis;

2 - $(T_0 - T_\infty/T_0) \cdot \sigma/S_0 \int_{-\infty}^x F(x) dx$ representando a fração de turbidez relativa a partículas sedimentáveis. No apêndice I encontra-se a Tabela I que mostra os valores da integral $\int_{-\infty}^x F(x) dx$ em função de x.

II.5 - INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA

O modelo desenvolvido, no presente trabalho, dá uma interpretação estatística da distribuição da velocidade de sedimentação, relacionando a variação da turbidez com a velocidade de sedimentação das partículas sedimentáveis.

A Função da Distribuição Acumulativa Normal Unitária é definida pela equação:

$$F(z) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \int_{-\infty}^z e^{-y/2} dy \quad (\text{II.25})$$

com

$$y = \frac{z - \bar{z}}{\sigma}$$

onde, "z" é uma variável randomica, " \bar{z} " é a média e " σ " é o desvio padrão. O diagrama probabilístico relaciona "F(z)" com "z". A escala da ordenada, no diagrama probabilístico, é adaptada de forma que a relação de "F(z)" com "z" é uma reta. Sabe-se que a uma distância " σ " da média, o valor de "F(z)" é:

$$F(z) = 0,16 \quad \text{ou}$$

$$F(z) = 0,84$$

Os valores de " \bar{z} " e " σ " podem ser encontrados facilmente no diagrama probabilístico:

$$\text{Para } F(z) = 0,50 \quad z = \bar{z}$$

$$\text{Para } F(z) = 0,84 \quad z = z_i \quad \text{com } \sigma = z_i - \bar{z}$$

"F(z)" e "y" encontram-se tabelados em livros de Estatística (20, 25, 26). A função da Distribuição Acumulativa da Velocidade de Sedimentação, Figura II.11, quando colocada em papel probabilístico, comporta-se como "F(z)". Resta-nos concluir que a Função da Distribuição Acumulativa da Velocidade de Sedimentação pode ser tomada como uma Distribuição Acumulativa Normal, onde, a velocidade de sedimentação das partículas " S_s " é a variável independente e (p') é a probabilidade de ocorrência de " S_s ", ou seja, (p') é a fração de partículas com velocidade de sedimentação menor ou igual a " S_s ".

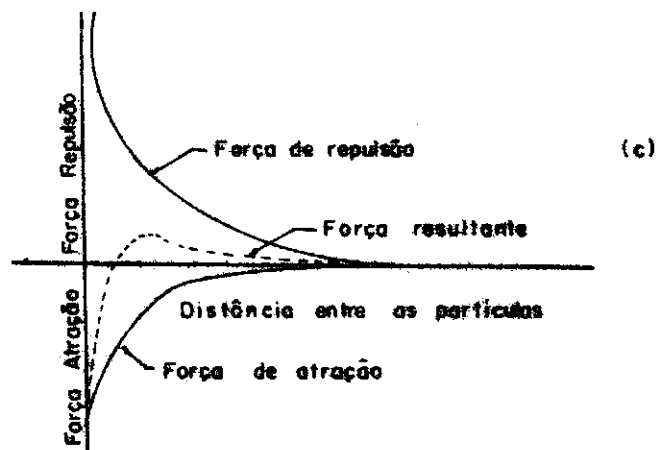
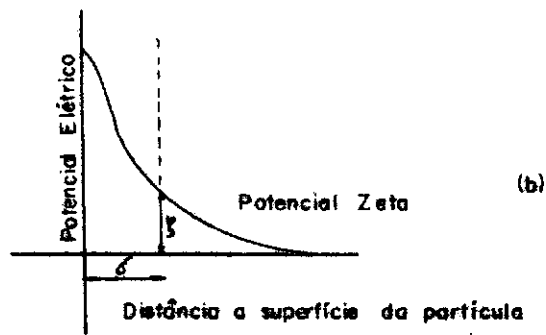
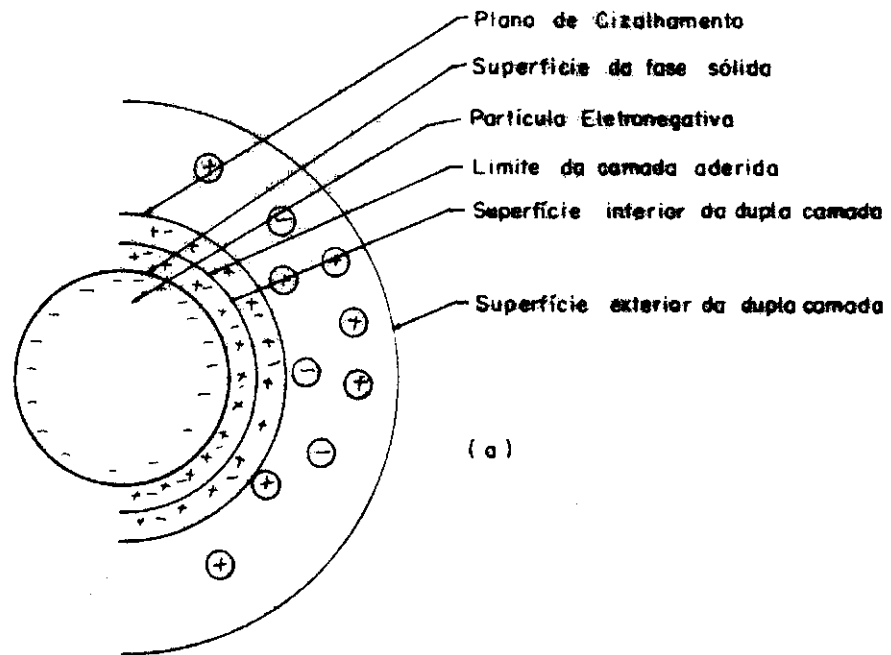


Fig. II. - a) Representação de uma partícula coloidal
 b) Esquemática do potencial zeta
 c) Esquemática da força de repulsão e atração

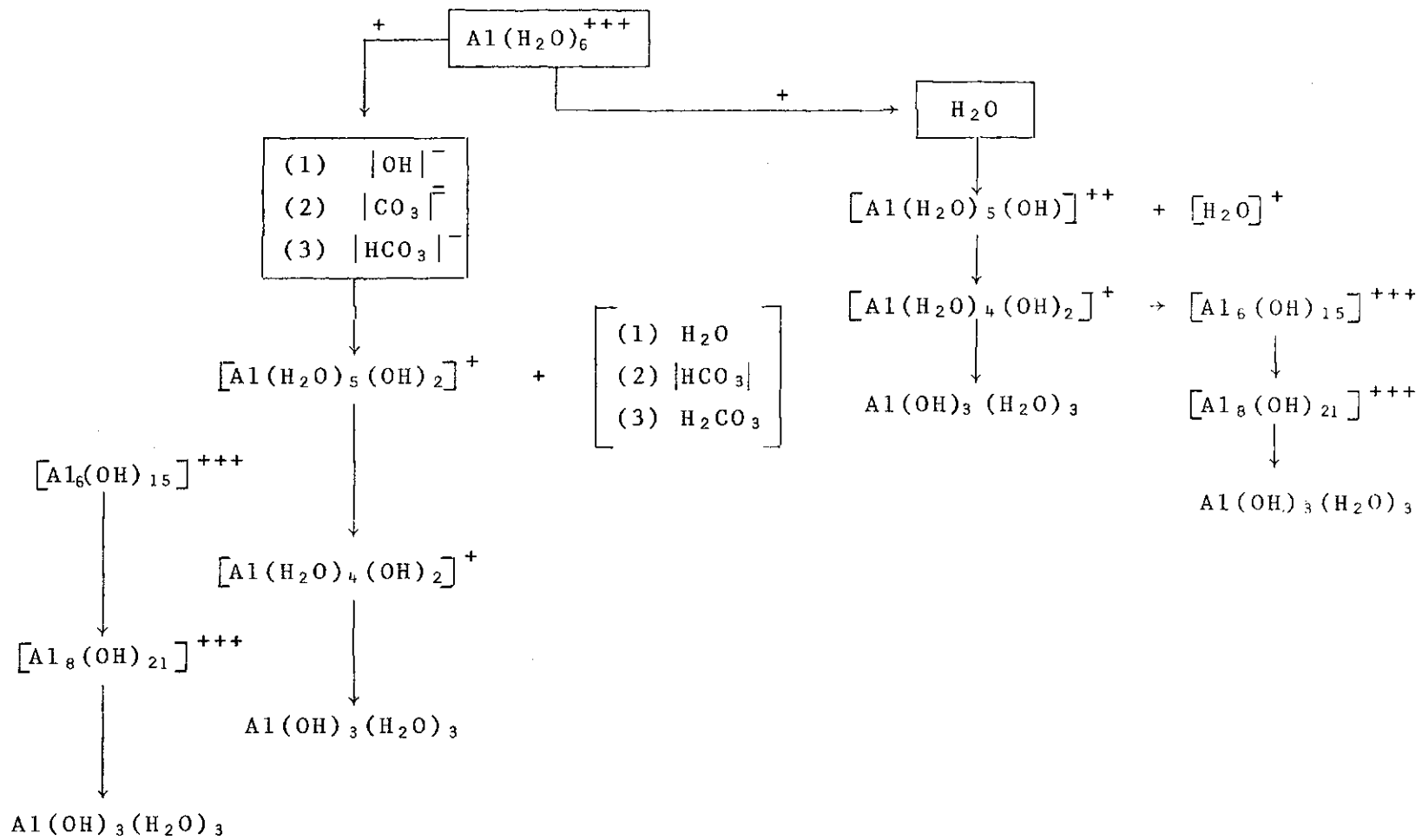


FIGURA II.2 - Produtos da reação do ion alumínio hidrolizado com a água e com a alcalinidade.

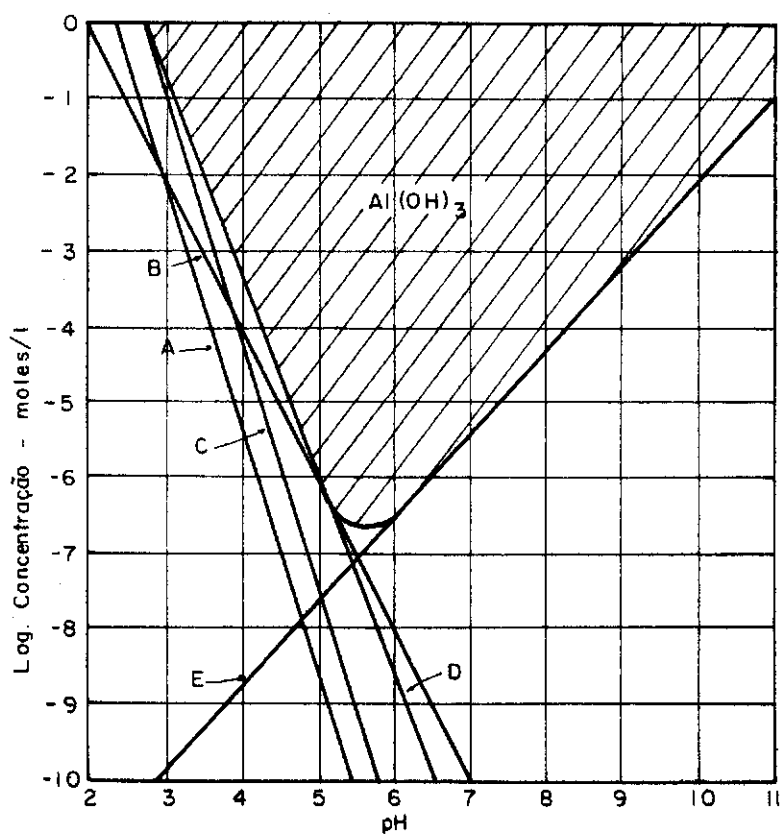


Fig. II-3 - Curva de solubilidade do Hidróxido de Alumínio

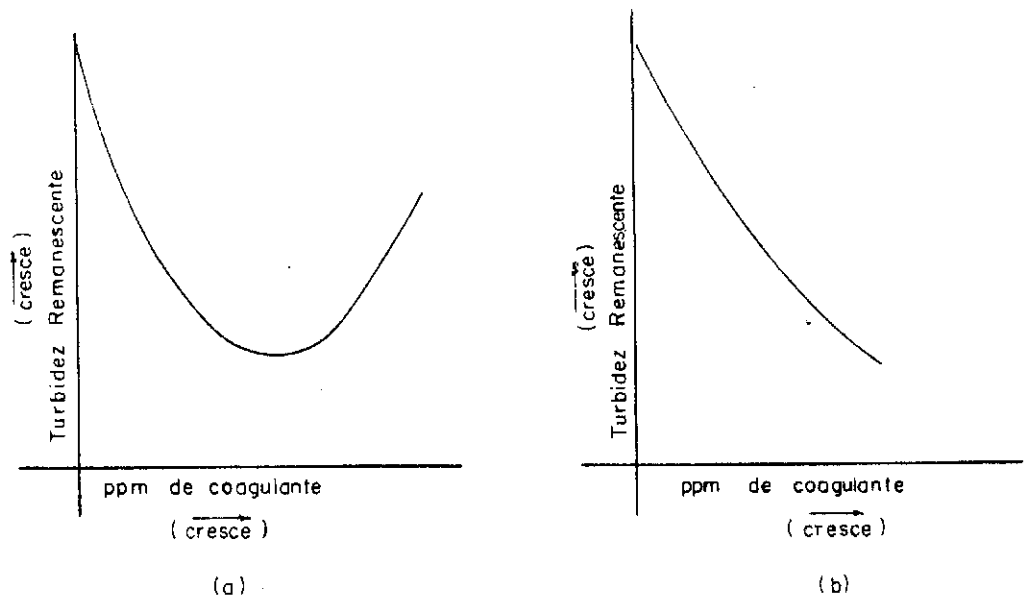
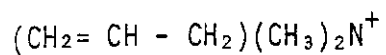


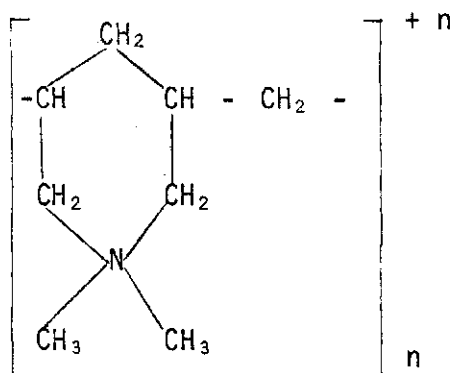
Fig.II 4 - Turbidez remanescente versus dosagens de coagulante

MONÔMEROPOLÍMEROCATIÔNICO

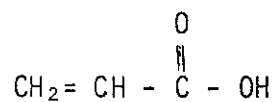
Ion dialidimetil amonia



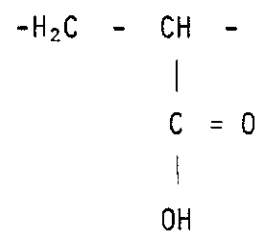
Ion Polidialidimetil Am.

NÃO IÔNICO

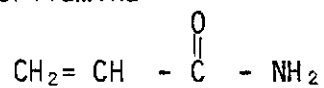
Ácido Acrílico



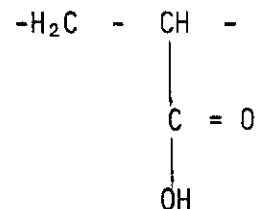
Ácido Poliacrílico



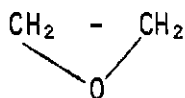
Acrilamina



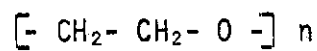
Poliacrilamina



Óxido Etileno



Óxido Polietileno



ANIÔNICO

Poliacrilamina parcialmente hidrolizada

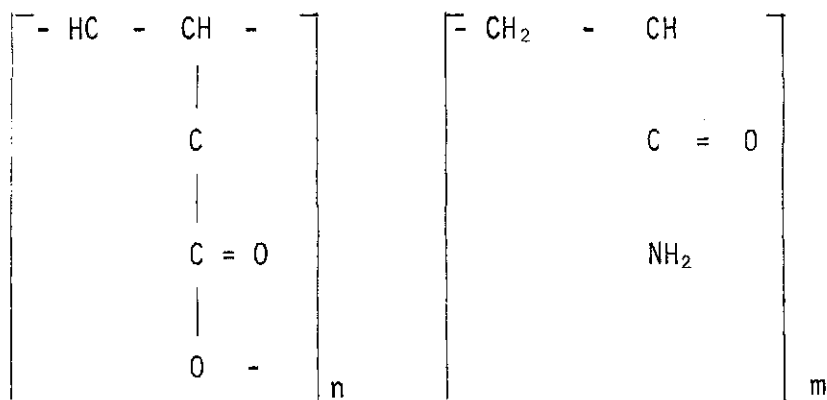


FIGURA II.5 - Algumas Estruturas Poliméricas utilizadas na Coagulação.

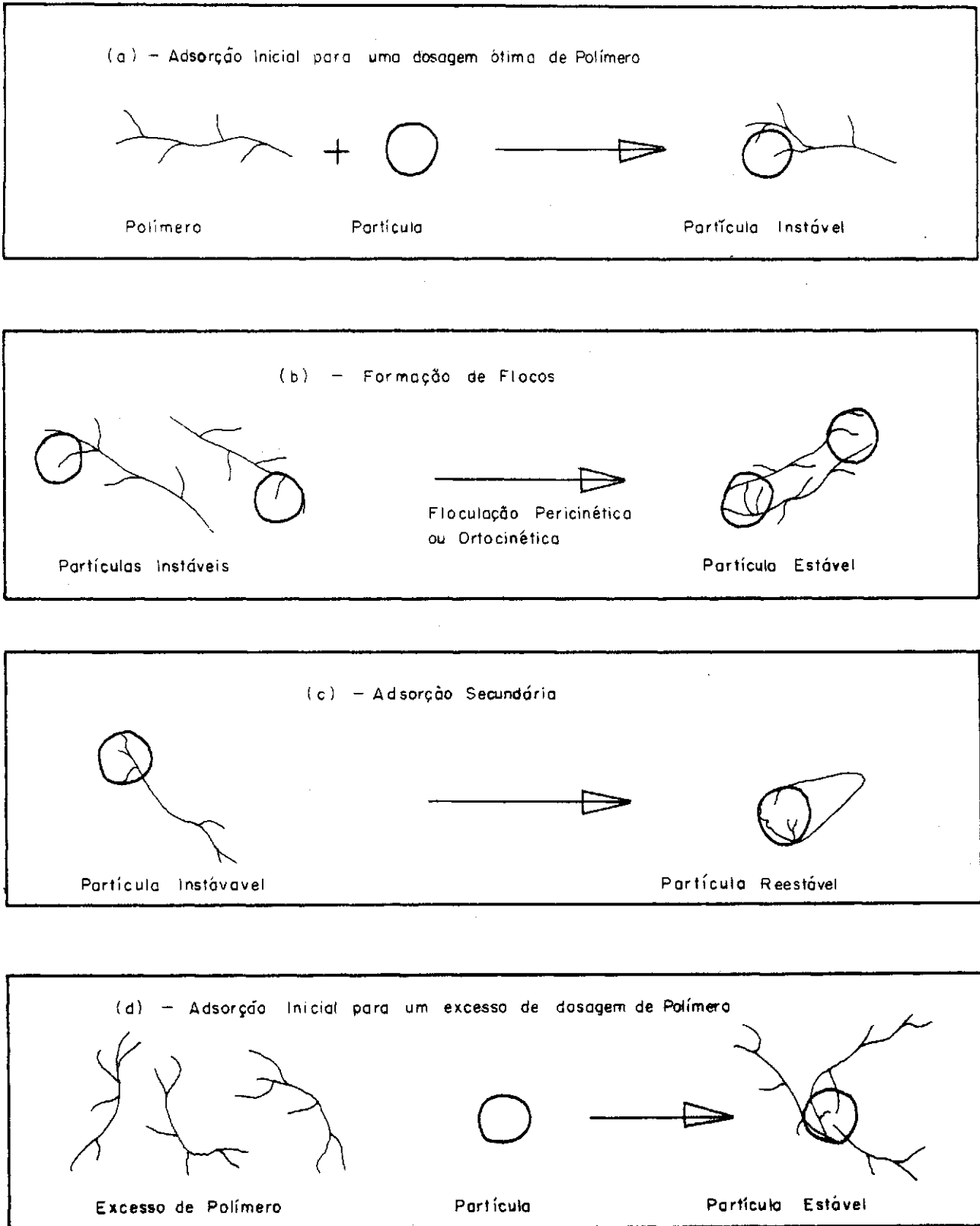
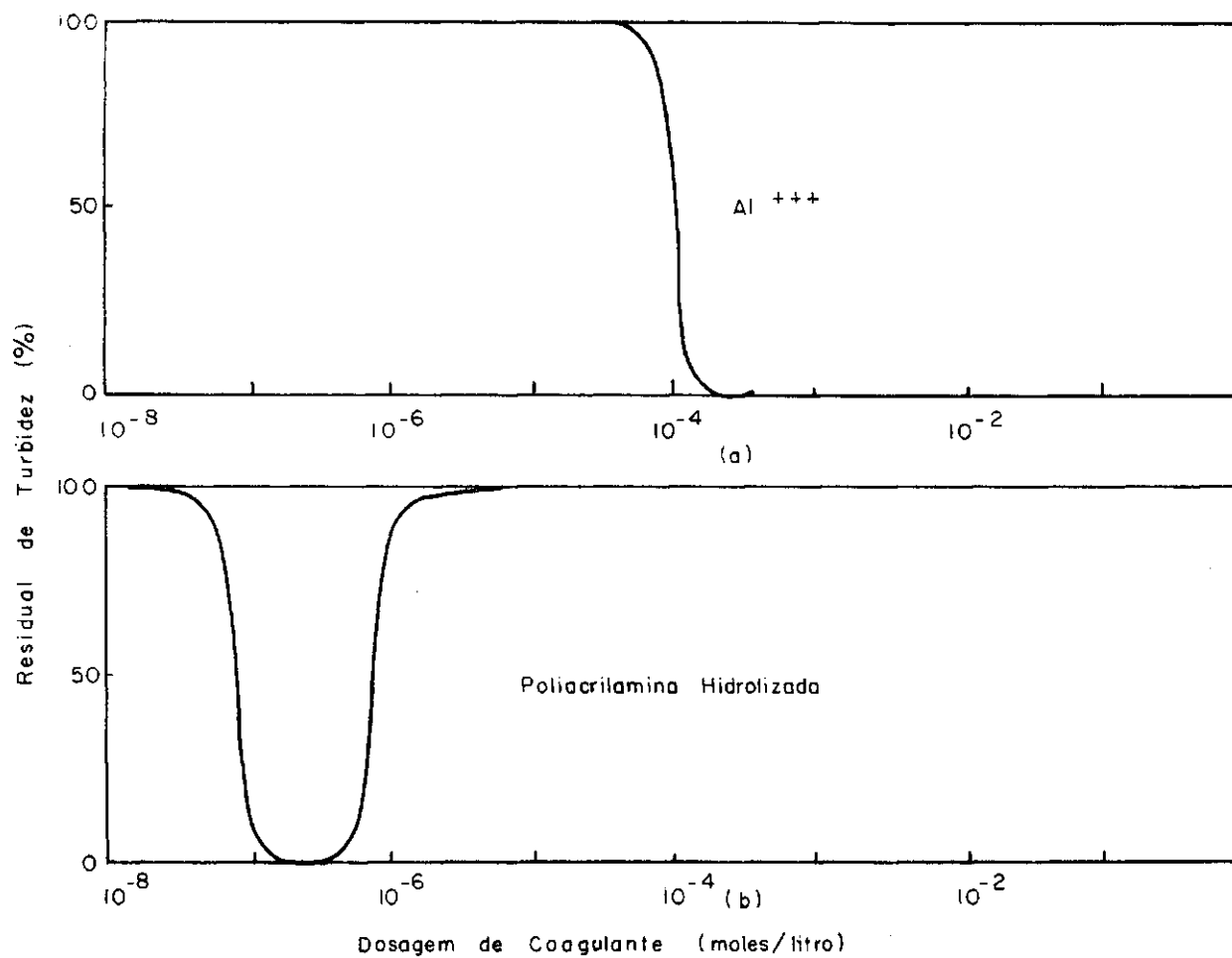


Fig. 6 - Representação esquemática do comportamento Polímeros e Coloides numa Solução.



FigII7 - Comparação das Curvas de Coagulação para diferentes dosagens de diferentes coagulantes.

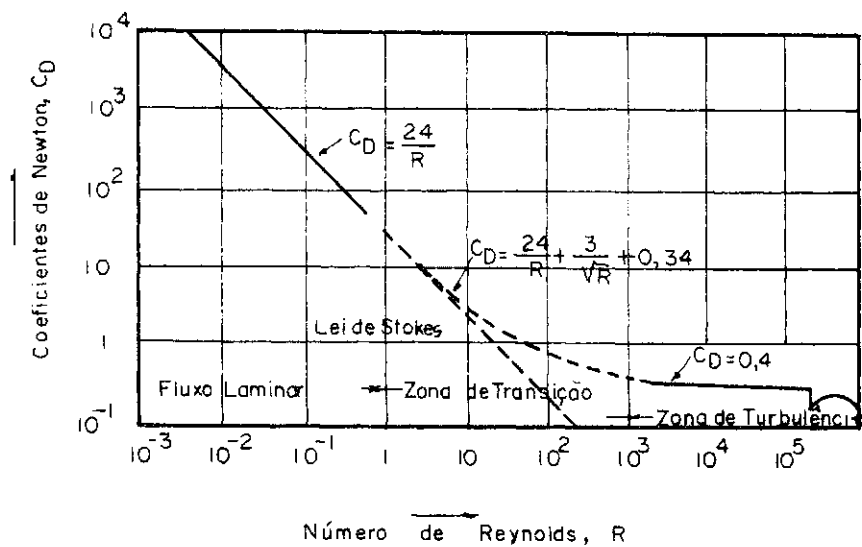


Fig.IIB - Coeficiente de Newton C_D para vários valores do número de Reynolds.

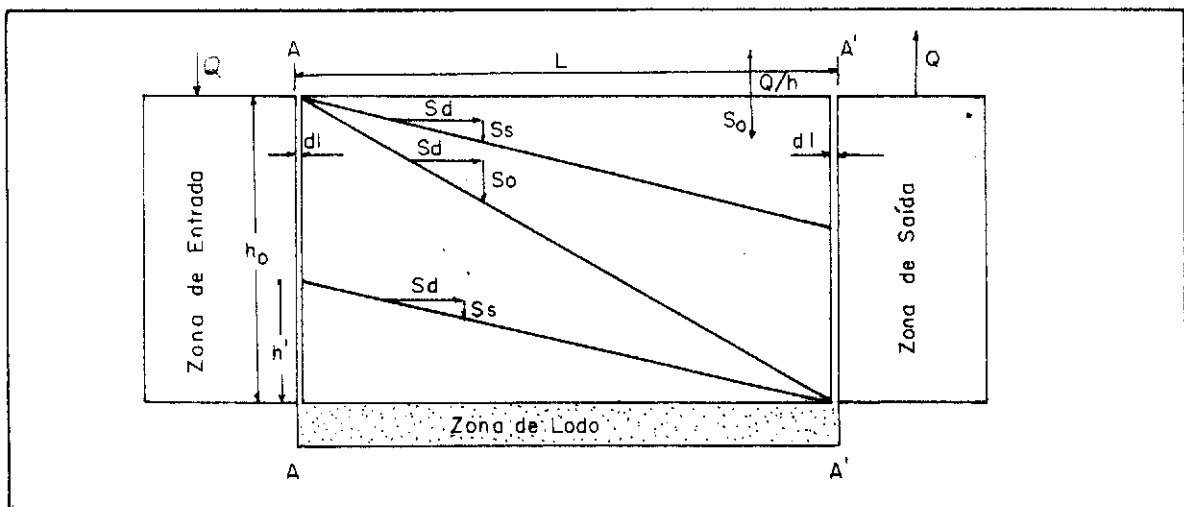


Fig. II 9 - Seção Vertical de um tanque retangular ideal de sedimentação

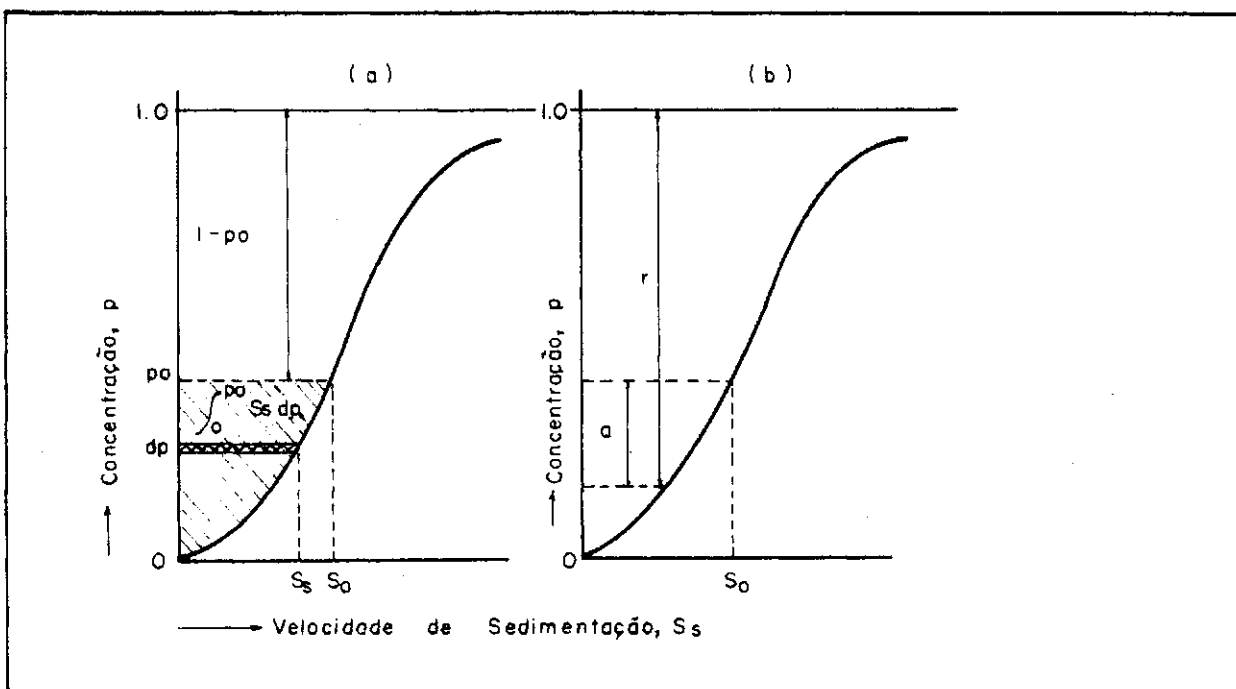


Fig. II 10 - Frequência da distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação de partículas discretas.

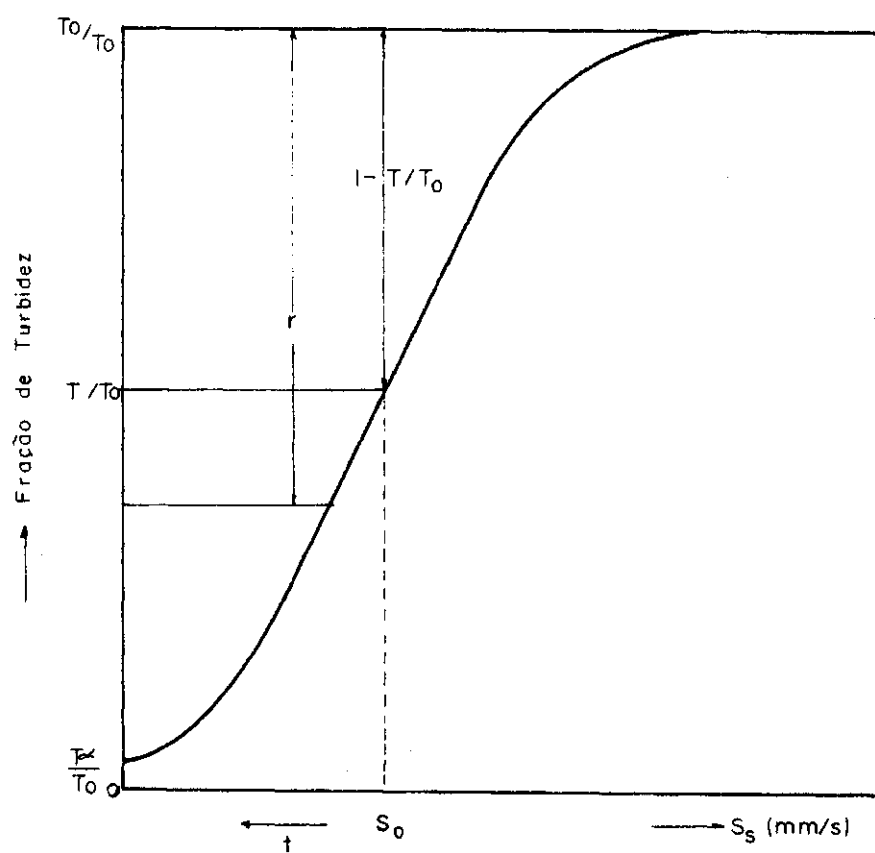


Fig. II. II - Distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação.

CAPITULO III

MÉTODOS E MATERIAS**I - JAR-TESTER**

O **Jar-Tester** é um aparelho de utilização constante no contróle dos processos de coagulação e floculação das Estações de Tratamento de Água. Este aparelho, sem a ajuda de qualquer outro instrumento, fornece a soma dos processos de coagulação, floculação e sedimentação. Nele se developpe uma sedimentação em que a tendência à floculação pode ser considerada insignificante. Conservando a partícula a sua individualidade durante o assentamento, e considerando que não ocorrem perturbações através do processo de sedimentação, pode ser considerada tranqüila e discreta a sedimentação no Jar Tester. De grande importância para uma boa operação do sistema é a utilização do Jar-Tester para contróle das dosagens quã

micas e do gradiente de mistura rápida (coagulação) e lenta (floculação), aplicados em uma Estação de Tratamento de Água Convencional. Contudo, a versatilidade do aparelho poderá ser melhor aproveitada em estudos de otimização de uma Estação de Tratamento de Água. Vale o exemplo da utilização de polímeros sintéticos como auxiliares dos íons metálicos de alumínio e ferro III, quando o Jar-Tester possibilita investigar a eficiência de remoção de partículas em suspensão, se usadas tais substâncias poliméricas. A Figura III.1 mostra as adaptações feitas em um Jar-Tester. Tais adaptações têm por objetivo a coleta de amostras a partir do início da sedimentação em tempos de sedimentação diferentes. O modelo da Figura III.1 - Magne-Drive-Model 73-Coffman Industries, Inc-Kansas City-Kans-, consta de seis jarras com capacidade máxima de 2 (dois) litros cada, dispostos em um recipiente único de vidro, que possibilita a circulação de água, de modo que a temperatura nas jarras se mantenha constante. Este modelo permite que as dosagens de coagulante e/ou de polímeros sintéticos, sejam feitas simultaneamente. A intensidade de mistura rápida e lenta pode ser controlada para que se obtenha o gradiente de velocidade desejado. A coleta de amostra é feita com um vacuômetro, que provoca um vácuo parcial nos tubos de coleta, permitindo assim a obtenção de amostras em pequenos intervalos de tempo, sem perturbação do processo de sedimentação.

II - ENSAIO PADRONIZADO NO JAR-TESTER

Os resultados obtidos através de ensaios no Jar-Tester não são comparáveis, em termos absolutos, aos obtidos em um tanque de sedimentação de uma Estação de Tratamento de Água. Se após uma série de investigações, tais observações permitem concluir que o ensaio "A" foi mais eficiente do que o ensaio "B", "C", etc., em termos por exemplo, de remoção de impurezas, é obvio que a conclusão relativa entre os ensaios, prevalecerá também na prática. Os resultados de ensaios no Jar-Tester só serão válidos se for mantida entre os mesmos, uma relação constante conseguida com uma padronização dos ensaios. O modelo padronizado propõe-se a determinar a eficiência de remoção de partículas, quando se utilizam polímeros como auxiliares de íons metálicos coagulantes. Observa-se que não se trata de um modelo generalizado para todas as determinações referidas a um Jar-Tester.

II.1 - PRELIMINARES

pH: A determinação do pH da água bruta, como medida indicadora de alcalinidade, deve ser feita invariavelmente antes do ensaio no Jar-Tester. Este parâmetro é de grande importância, haja vista a sua relação com a alcalinidade da água e com a hidrólise dos sais coagulantes. O pH da água, antes da coagulação, deve ser o mesmo em todos os ensaios, e corresponder, se não ao pH natural da água, pelo menos ao pH ótimo de coagulação.

Alcalinidade: Pode-se determinar uma única vez, desde que o pH da água natural se mantenha constante. A determinação da alcalinidade deve ser feita para conhecimento do equilíbrio do gás carbônico e seus íons derivados, carbonato e bicarbonato na água, dando, assim, o poder de tamponação desta ao se adicionar o coagulante.

Temperatura: A temperatura deve ser verificada e mantida em todos os ensaios constante, e igual à temperatura da água no local de coleta.

Coagulante: Impõe-se determinar a dosagem ótima de coagulante, ou seja, a dosagem que corresponde à maior remoção de turbidez. As dosagens de coagulante são constantes em cada ensaio e tomadas, a partir da dosagem ótima, até dosagens inferiores à ótima.

Turbidez: A turbidez natural da água, ou melhor, a turbidez da água bruta, deve ser determinada em cada ensaio. Determinação muito importante, a ser feita criteriosamente.

Polímeros: Uma pesquisa preliminar com polímeros do tipo catiônico, não iônico e aniônico, de terminando a melhor afinidade da água com qualquer um desses tipos, facilitará bastante as investigações posteriores.

Local de Coleta: A água a ser analisada deve ser coletada na Estação de Tratamento, antes do ponto de aplicação do coagulante e após a aeração se for o caso, para que as características físico-químicas sejam mantidas.

II.2 - PROCEDIMENTO

1 - Preparar todas as jarras com 1,5 litros de água a ser analisada, colocá-las no Jar-Tester e adaptar todos os dispositivos deste aparelho.

2 - Agitar a água das jarras, por alguns instantes, a 100 rotações por minuto. Durante a agitação, inverter, simultaneamente, as dosagens do coagulante metálico e cronometrar a partir do primeiro instante da adição do coagulante.

3 - Decorridos 25 segundos da adição do coagulante, adicionar as dosagens diferentes do polímero em estudo, deixando uma jarra como prova em branco.

4 - Aos 30 segundos de mistura do coagulante a 100 rpm (rotações por minuto), diminuir a velocidade para 30 rpm durante 30 minutos.

5 - Ao fim dos 30 minutos de mistura a 30 rpm (floculação), desligar o aparelho e coletar si-

multaneamente, em todas as jarras, amostras relativas ao tempo de sedimentação " t_0 " (início do processo de sedimentação), a uma distância fixa da superfície líquida. As amostras coletadas devem ter volumes iguais, correspondentes ao volume mínimo necessário para a determinação da turbidez.

6 - Continuar a coleta de amostras durante 30 minutos, em tempos diferentes de sedimentação. Deve-se coletar um mínimo de oito amostras em tempos de sedimentação assim distribuídos: 0, 2, 4, 7, 10, 15, 20 e 30 minutos.

7 - Após um tempo de sedimentação "ad infinitum" onde a velocidade das partículas é considerada nula, retirar simultaneamente amostras de todas as jarras.

8 - Determinar o mais breve possível a turbidez remanescente de todas as amostras, agitando-as fortemente antes de cada determinação.

III - MEDIDOR DE TURBIDEZ

A Figura III.2 ilustra o turbidímetro Hach - Model 2100A Hach Chemical Company-PQ80x907 - Ames, Iowa 30010 U.S.A. - utilizado para a determinação de turbidez. Mede-se, neste aparelho, a dispersão da luz visível provocada

por partículas coloidais, por uma célula fotoelétrica em unidades nephelométricas de turbidez (UNT) correspondentes as unidades Jackson de turbidez (u.J.). O modelo Hach 2100 A, possibilita uma medida rápida e eficiente da turbidez e exclui erros de leitura comuns a outros tipos de medidores, como o Jackson e o Hellige, os quais dependem dos critérios de observações dos operadores. A capacidade de medida do aparelho é ampla, podendo alcançar leituras de turbidez de 0,0 UNT a 1000 UNT.

IV - SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS

IV.1 - SULFATO DE ALUMÍNIO

O Sulfato de Alumínio é substância coagulante utilizada em todos os ensaios. A razão dessa escolha prende-se ao fato de que este sal tem larga aplicação nas Estações de Tratamento de Água de todo o Brasil. Particularmente na Paraíba, o seu emprêgo é generalizado.

Propriedades: O Sulfato de Alumínio empregado (fórmula molecular $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$), apresenta-se em forma de cristais brancos, quase puro (99% de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) e estável ao ar. A 20°C, 100 gramas de água dissolvem 107,4 gramas do sal hidratado. Dosagens convenientes de Sulfa-

to de Alumínio desestabilizam as partículas coloidais formando por meio de uma reação alcalina, um precipitado floculento de hidróxido de alumínio hidratado, removendo, em parte, a turbidez por aglutinação das partículas coloidais.

Solução Matriz: Dada a solubilidade do Sulfato de Alumínio em água, não oferece dificuldades a preparação da Solução Matriz deste coagulante. A sua concentração deve ser de tal ordem, que o volume necessário para a obtenção de uma determinada dosagem venha a ser desprezível em relação ao volume da água a ser dosada. A idade da Solução Matriz deve ser sempre uma constante em todos os ensaios, e o tempo decorrido, desde o preparo até a sua utilização, não deve exceder a 1 (um) dia.

Dosagens: As dosagens de Sulfato de Alumínio variam segundo as necessidades que se faz sentir e devem ser tomadas a partir da dosagem ótima de coagulante. A dosagem ótima de coagulante é obtida da análise dos efeitos produzidos quanto à remoção e qualidade dos flocos formados, quando se varia as dosagens do coagulante. O estudo de polieletrólitos, como auxiliares a coagulação com Sulfato de Alumínio em cada ensaio, é feito variando-se as dosagens daqueles e mantendo-se constante a dosagem deste. Desta forma, os ensaios são realizados partindo-se da dosagem ótima do coagulante metálico à dosagem mínima requerida para a coagulação com o Sulfato de Alumínio. As dosagens do coagulante devem ser feitas simultaneamente com uma mistura intensiva (100 rotações por mi

nuto), durante 30 segundos, de forma que estas sejam perfeitamente dispersadas na massa líquida.

IV.2 - SEPARAM AP 273 PREMIUM

Os polímeros "Separam AP 273 Premium", fabricados pela "The DOW Chemical Company", com representação em Recife-Pe., têm aprovação da "Division of Water Hygiene, Environmental Protection Agency", dos Estados Unidos, no seu emprego em águas para abastecimento.

Propriedades: Trata-se - o "Separam AP 273 Premium" - de um polímero aniônico, bastante higroscópico, com peso molecular muito alto. É solúvel em água e tem como estrutura básica a poliacrilamina, como se vê na Figura III.3. É desconhecido o mecanismo exato, por meio do qual os polímeros "Separam" aglomeram os sólidos inorgânicos em suspensão, formando forte entrelaçamento entre polímeros e sólidos. Não se observa variação do pH da água após a coagulação, tendo como agente auxiliar o polímero "Separam AP 273 Premium". Os polímeros "Separam" possuem muito boa estabilidade térmica. O alto peso molecular do polímero é causa do incremento bem significativo na viscosidade da água. Altos esforços cortantes encontrados em operações de mistura e bombeamento violento, podem degradar o polímero. Em condições normais de uso, não se observa irritações na pele quando acidentalmente entra-se em

contato direto com a solução. Entretanto, exposição contínua e excessiva deve ser evitada, segundo recomendações do fabricante.

Solução Matriz: Devido à sua alta viscosidade, na prática não se deve usar soluções com concentrações superiores a 1%. Em ensaios de laboratório, recomendam-se soluções de concentrações iguais a 0,01%. A dificuldade no preparo da solução matriz de "Separam AP 273 Premium" deve-se à sua característica higroscópica. Exige-se todo cuidado na pesagem e no preparo da solução. A umidade do ar pode agregar as partículas deste polímero diminuindo consideravelmente a sua solubilidade em água. Com a finalidade de evitar esta agregação, o polímero deve ser pulverizado na água. Para se manter as características pseudoplásticas do polímero, a solução matriz deve ser obtida de uma mistura lenta, onde a velocidade de mistura não exceda a 10 rotações por minuto. Na utilização da solução matriz em ensaios em modelos reduzidos, o tempo de preparo da solução deve ser sempre o mesmo, como deve ser o mesmo o tempo decorrido desde o seu preparo até à sua utilização. Não devem ser utilizadas soluções de mais de 1 (um) dia de preparadas.

Dosagens: As dosagens aplicadas não devem exceder a 1 (um) ppm (parte por milhão). Em ensaios no Jar-Tester com o polímero "Separam AP 273 Premium", recomendam-se dosagens de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 ppm. Dado o efeito cortante originado de um alto gradiente de velocidade de

UPPB/BIBLIOTECA/PRAI

mistura, a adição das dosagens de "Separam AP 273 Premium" deve ser feita simultaneamente a uma velocidade de mistura de 100 rotações por minuto, durante 5 segundos.

IV.3 - DREWFLOC 21

A "DREW Produtos Químicos" possui uma linha de polímeros aplicáveis, onde há necessidade de separação do sistema sólido - líquido, como na clarificação de águas para abastecimento, tratamento de esgotos e águas para fins diversos. O Drewfloc 21" tem uso aprovado em águas para abastecimento da "Technical Advisory Committee for Coagulant Aids da U.S. Public Health Service".

Propriedades: O "Drewfloc 21" é um polímero catiônico, complexo, e não possui características higroscópicas consideráveis. É solúvel em água. As soluções de "Drewfloc 21" não apresentam incremento de viscosidade perceptível. Podem sofrer altas velocidades de rotação, quando por ocasião do preparo da solução sem rompimento da cadeia do polímero, por 30 minutos, o que demonstra a sua resistência ao cisalhamento. Não foi observado, durante o uso desse polímero, nenhum efeito tóxico.

Solução Matriz: O tempo de contato água-polímero é de grande importância para a completa dissolução do "Drewfloc 21". Para uma concentração máxima de

0,015%, com 30 minutos de agitação a alta rotação, observam-se ainda partículas não dissolvidas do polímero assim como, após 5 horas de contato água-polímero, o "Drewfloc 21" encontra-se completamente dissolvido. Desta forma, a solução matriz deve ser preparada com, no mínimo, 6 (seis) horas de antecedência da sua utilização, a fim de assegurar a sua completa homogeneização. O tempo decorrido do preparo da solução matriz, até a sua utilização nos ensaios, deve ser sempre o mesmo e nunca superior a 1 (um) dia.

Dosagens: A dosagem recomendada de "Drewfloc 21" é de 0,25 a 5,0 ppm, dependendo das condições da operação. Em ensaios de laboratório, dosagens de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 ppm deram resultados consideravelmente bons. A Técnica utilizada na aplicação das dosagens consiste em se adicionar o polímero, 25 segundos após a adição do coagulante metálico, a uma velocidade de mistura de 100 rpm, assim permanecendo 5 segundos, em seguida passar a uma velocidade 30 rpm, durante 30 minutos.

IV.4 - DREWFLOC 307

Propriedades: Trata-se de um polímero de alto peso molecular, usado nas mais diversas áreas. Apresenta-se como pó seco, podendo ser estocado por longos períodos de tempo. Seu mecanismo de ação explica-se pela adsor-

ção dos microflocos ao longo do polímero, produzindo flocos pesados de rápida sedimentação. Quanto à aprovação de seu uso em tratamento de água para abastecimento, nenhuma informação foi obtida.

Solução Matriz: Recomendam-se soluções a 1%. As soluções devem ser preparadas com água fria. Para completa dissolução do polímero deve-se agitar a mistura por 30 minutos a alta rotação, e esperar de 4 a 5 horas para a completa dissolução. Como o "Drewfloc 21", a solução de Drewfloc 307" deve ser preparada com, no mínimo 6 (seis) horas de antecedência da sua utilização. O tempo decorrido do preparo da solução matriz até a sua utilização, deve ser sempre o mesmo e nunca superior a 1 (um) dia.

Dosagens: "Drewfloc 307" é recomendado na faixa de dosagem de 0.1 a 1.0 ppm, dependendo das condições de operação. Em estudos em modelo reduzido as dosagens recomendadas são de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 ppm. As dosagens da solução matriz são feitas a uma velocidade de mistura de 100 rotações por minuto, durante 5 (cinco) segundos.

V - EXEMPLIFICAÇÃO DE UM ENSAIO

Este parágrafo pretende descrever um ensaio realizado no Jar-Tester, "Modelo 73 da Coffman Industries". Para este ensaio, como para todos os outros, uti

liza-se a água bruta de Vaca Brava, colhida na Estação de Tratamento de Água do Alto Branco, subsidiária, nesta cidade de Campina Grande, da Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba-CA GEPA. O ensaio tem como objetivo o estudo da eficiência, na remoção de partículas em suspensão, quando se usa como coagulante o Sulfato de Alumínio, em dosagens iguais e como auxiliar à coagulação, o polieletrólito "Drewfloc 21", em dosagens diferentes, obedecendo-se à sequência seguinte:

a - APARELHAGEM

a.1 - Jar-Tester: Magne-Drive -
Modelo 73, fabricado pela Coffman Industries;

a.2 - Turbidímetro Hach - Mode-
lo 2100A, fabricado pela Hach Chemical Company;

a.3 - Cinquenta e quatro erlen-
meyer de 250 mililitros;

a.4 - Seis erlenmeyer de 1000
ml (mililitros);

b - SOLUÇÕES:

b.1 - Solução de Sulfato de Alu
mínio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, de concentração igual a 15 gramas por litro de solução;

b.2 - Solução de "Drewfloc 21",
de concentração igual a 0,15 gramas por litro de solução.

c - CARACTERÍSTICAS DA AGUA BRUTA

c.1 - Alcalinidade igual a 40 ppm de CaCO_3 ;

c.2 - pH igual a 6,7;

c.3 - Turbidez Natural igual a 118 unidades Jackson;

c.4 - Temperatura da água no local de coleta igual a 24,6°C;

c.5 - Temperatura da água no ensaio igual a 24,6°C;

d - PROCESSO

d.1 - De início, agita-se a água coletada e adiciona-se 1,5 litros desta às seis jarras do aparelho Jar-Tester;

d.2 - Prepara-se o aparelho, colocando-se as jarras e adaptando-se os dispositivos necessários ao ensaio;

d.3 - Liga-se o aparelho, e, simultaneamente a 100 rpm, invertem-se 4 ml da solução de Sulfato de Alumínio (60 mg do sal) as seis jarras. O primeiro instante da adição é cronometrado;

d.4 - Aos 25 segundos de mistura dos 4 ml da solução de Sulfato de Alumínio com a água a ser ensaiada a 100 rpm, a cada uma das cinco jarras, adiciona-se 3, 6, 9, 12 e 15 ml da solução de Drewfloc 307, deixando uma jarra como "prova em branco". Prosseguir na mistura por mais 5 minutos, a 100 rpm;

d.5 - Cronometrados 30 segundos a partir da adição do coagulante metálico, passa-se para uma velocidade de mistura de 30 rpm, durante 30 minutos (floculação);

d.6 - Ao fim dos 30 minutos de floculação, desliga-se o aparelho e inicia-se a cronometragem do processo de sedimentação. Simultaneamente em todas as jarras, coletam-se amostras de 25 ml cada, relativas ao tempo de sedimentação "t" igual a zero;

d.7 - Seguem-se as coletas de amostras, de 25 ml cada, com 2, 4, 7, 10, 15, 20 e 30 minutos de sedimentação;

d.8 - Após as coletas das amostras de 25 ml, relacionadas nos itens d.6 e d.7, retiram-se 700 ml, da água em análise, de cada jarra, seguindo-se com as coletas de amostras de 25 ml de cada jarra;

d.9 - Lê-se a turbidez remanescente das 54 amostras de 25 ml cada, tendo o cuidado de agitar vigorosamente cada amostra antes de cada leitura de turbidez;

d.10 - Anota-se as leituras, relativas a cada amostra, alinhando-se conforme Tabela IV.1.



FIGURA III.1 - Adaptações feitas em um Jar-Tester-Magne-Drive-Model 73-Coffman Industries, Inc-Kansas City - Kans.

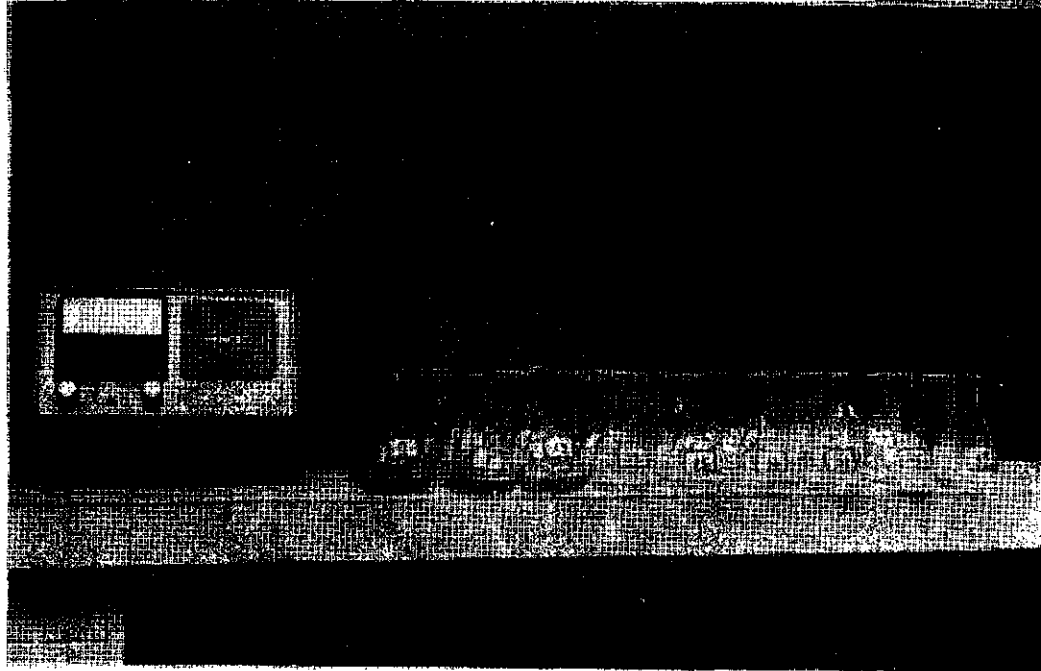


FIGURA III.2 - Turbidímetro Hach - Model 2100A
Hach Chemical Company - POB0x907
Ames, Iowa 300 10 U.S.A.

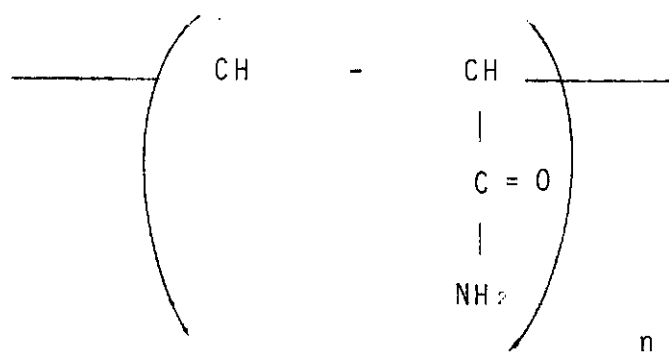


FIGURA III.3 - Estrutura básica da Poliacrilamina

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Objetivando o estudo da influência de polímeros sintéticos, como auxiliares ao Sulfato de Alumínio no processo de clarificação de águas para abastecimento, foram realizadas 12 (doze) ensaios, pela forma descrita no Capítulo III. Três polímeros foram pesquisados: "Separam AP 273 Premium", "Drewfloc 21" e "Drewfloc 307", tendo a turbidez como parâmetro avaliador quanto à eficiência destes na clarificação. Analisou-se a clarificação da água bruta tomando-se para cada concentração de Sulfato de Alumínio (40, 45, 55 e 70 ppm), concentrações de 0,0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 ppm de cada um dos polieletrólitos pesquisados, com um total de 72 análises.

IV.1 - TABELAS IV.1 a IV.12

As Tabelas IV.1 a IV.12, apresentam os resultados dos ensaios realizados no Jar-Tester. Constatam-se, nelas, a variação de turbidez em cada ensaio, relativas às amostras retiradas. As amostras foram coletadas a uma profundidade "h", após intervalos de tempo de sedimentação "t". Cada Tabela fornece os valores da turbidez para seis diferentes concentrações de um dos polímeros em estudo, e para uma determinada concentração de Sulfato de Alumínio. A primeira coluna de turbidez nas Tabelas IV.1 a IV.12, refere-se à turbidez remanescente no início do processo de sedimentação " T_0 ", e a última coluna relaciona-se com a turbidez remanescente mínima, que pode ser obtida através do processo de clarificação " T_∞ ". As Tabelas IV.1 a IV.12, apresentadas, permitem o cálculo da porcentagem de turbidez não removida, mas referida a partículas sedimentáveis (p') para todos os tempos de coleta de amostras. O cálculo de (p') é dado, conforme Equação II.19, por:

$$p' = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty}$$

IV.2 - FIGURAS IV.1 A IV.12

As Figuras IV.1 a IV.12, apresentam graficamente a relação entre (p') e " S_s " onde " S_s " é

calculado por:

$$S_s = \frac{h}{t}$$

Os valores de (p') estão nas Figuras IV.1 a IV.12 em escala probabilística, e os de " S_s " em escala linear. Observa-se nestas figuras que a relação entre (p') e " S_s " pode ser bem aproximada a uma reta, significando que a distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação se comporta como a distribuição acumulativa normal, ou seja:

$$p' = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{(S_s - \bar{S})/\sigma} \exp \left[-\frac{(S_s - \bar{S})^2}{2\sigma^2} \right] d\left(\frac{S_s - \bar{S}}{\sigma}\right)$$

Na realidade, inexistem velocidades de sedimentação negativas (não se observa formação de espuma nos ensaios realizados), de modo que, a rigor, o intervalo de integração deveria partir de zero. Entretanto, a razão entre " \bar{S} " e " σ ", é sempre da ordem de 2 a 2,5 o que faz com que o valor da integral, no intervalo de " $-\infty$ até 0", seja muito pequeno, podendo ser considerado desprezível. Os valores da velocidade média de sedimentação " \bar{S} " e do desvio padrão " σ ", estão nos Diagramas IV.1 a IV.12. " \bar{S} " é o valor de " S_s " para (p') igual a 0,50, e " σ " é a diferença entre os valores de " S_s " para (p') igual a 0,84 e para (p') igual a 0,50.

Nas Figuras IV.1 e IV.12, são incluídos apenas os valores de (p') , compreendidos na faixa " $0,025 \leq p \leq 0,875$ ". Pela própria natureza da escala probabilística, pequenos erros da determinação de (p') fora desta faixa, influem bastante sobre a posição e direção da linha reta, e por esta razão são excluídos.

IV.3 - TABELAS IV.13 a IV.15

As Tabelas IV.13 a IV.15, apresentam os valores de " \bar{S} ", " σ " e " T_{∞}/T_0 ", determinados a partir das Tabelas IV.1 a IV.12, e das Figuras IV.1 a IV.12. A velocidade média de sedimentação " \bar{S} ", o desvio padrão " σ ", e a fração de turbidez não removível " T_{∞}/T_0 ", caracterizam completamente o processo de sedimentação. Estes três parâmetros, possibilitam o cálculo, pela Equação II.24 com utilização da Tabela 1, Apêndice I, da remoção de turbidez de um tanque ideal de sedimentação, em função da taxa de escoamento superficial. Como exemplo de cálculo, cita-se o ensaio com 0,2 ppm de "Drewfloc 21" e com 55 ppm de Sulfato de Alumínio. As características de sedimentação neste ensaio são:

$$\bar{S} = 0,26 \text{ mm/s} \quad (\text{Tabela IV.13})$$

$$\sigma = 0,12 \text{ mm/s} \quad (\text{Tabela IV.14})$$

$$T_{\infty}/T_0 = 0,02 \quad (\text{Tabela IV.15})$$

No Quadro IV.1 abaixo, a eficiência de remoção de turbidez é calculada para alguns valores da taxa de escoamento superficial " S_0 ".

S_0	$x = (S_0 - \bar{S})/\sigma$	$\int_{-\infty}^x F(x)dx$	r %
0	-	-	87
0,14	-1	0,084	81
0,26	0	0,403	71
0,38	1	1,084	56
0,50	2	2,008	44
0,62	3	3,000	36
0,74	4	4,000	30
0,86	5	5,000	25
0,98	6	6,000	22

Quadro IV.1 - Eficiência de remoção "r", em porcentagem, em função da taxa de escoamento superficial S_0 , para 0,2 ppm de "Drewfloc 21" e 55 ppm de Sulfato de Alumínio.

De modo semelhante, para todos os ensaios, a eficiência de remoção de turbidez, apresenta-se nas Figuras IV.13 a IV.24, para valores de " S_0 " compreendidos de 0,0 a 1,0 mm/s.

IV.4 - APÊNDICE II

O Apêndice II mostra um programa escrito em linguagem FORTRAN para um Sistema de Computação /360 ou /370, que possibilita o cálculo da eficiência de remoção de turbidez, em função da taxa de escoamento superficial para um dado tipo de polieletrólito, com uma determinada concentração de Sulfato de Alumínio e uma dada concentração de polieletrólito. Este programa tem como dados de entrada: tempo, distância do ponto de amostragem à superfície líquida, e turbidez de cada amostra; e como dados de saída: (p') , "r" , " \bar{S} ". " σ " e " T_{∞}/T_0 ".

TABELA IV.1

h (mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t (min)	0	1	2	4	6	10	15	30	30
s (mm/s)		1,33	0,65	0,32	0,21	0,12	0,08	0,04	0,00
0.0	118	118	118	118	114	85	61	51	45
0.2	118	118	118	75	53	41	38	36	34
0.4	118	118	102	53	40	34	33	31	29
0.6	118	118	74	42	37	34	33	32	30
0.8	118	110	69	49	47	44	44	43	42
1.0	118	105	76	70	68	68	68	67	67

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 40 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 307

TABELA IV.2

h(mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t(min)	0	1	2	4	6	10	15	30	30
s(mm/s)		1,33	0,65	0,32	0,21	0,12	0,08	0,04	0,00
0,0	118	118	118	115	88	55	46	35	29
0,2	118	118	118	76	46	30	26	24	20
0,4	118	118	100	41	27	21	19	18	15
0,6	118	118	53	23	19	16	16	15	15
0,8	118	102	40	21	17	16	15	15	14
1,0	118	97	35	19	16	15	15	15	14

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 45 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 307

TABELA IV.3

h(mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t(min)	0	1	2	4	6	10	15	30	30
s(mm/s)		1,33	0,65	0,32	0,21	0,12	0,08	0,04	0,00
0,0	118	118	118	104	63	28	19	11	3
0,2	118	118	118	54	26	1,4	8,0	6,0	2,5
0,4	118	118	102	28	12	5,3	3,8	3,8	1,5
0,6	118	118	45	9,7	4,7	3,2	2,6	2,0	1,4
0,8	118	99	29	7,6	4,8	3,8	3,2	3,2	1,8
1,0	118	81	22	8,9	6,9	4,9	4,9	4,9	2,9

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 55 p.p.m

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 307

TABELA IV.4

h(mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t(min)	0	1	2	4	6	10	15	30	30
S(mm/s)		1,33	0,65	0,32	0,21	0,12	0,08	0,04	0,00
0,0	118	118	118	109	72	28	18	10	3,5
0,2	118	118	118	77	39	16	10	5,6	1,9
0,4	118	118	118	51	22	9	5,4	3,6	1,9
0,6	118	118	63	12	6	3,6	2,9	1,9	1,9
0,8	118	95	19	13	5	2	2,4	1,9	1,9
1,0	118	91	19	6,2	4,6	3,5	3,4	3,4	2,9

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 70 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 307.

TABELA IV.5

h(mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t(min)	0	2	4	7	10	15	20	30	30
S(mm/s)		0,67	0,32	0,18	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00
0,0	110	110	110	110	60	48	45	42	34
0,2	110	110	107	67	44	35	33	30	27
0,4	110	110	97	55	34	31	30	26	21
0,6	110	110	74	37	26	23	20	18	16
0,8	110	110	62	30	21	18	15	13	10
1,0	110	110	59	27	18	16	13	12	87

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h)

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 40 p.p.m

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21.

TABELA IV.6

h (mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t (min)	0	2	4	7	10	15	20	30	30
s (mm/s)		0,67	0,32	0,18	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00
0,0	110	110	110	72	46	33	30	28	25
0,2	110	110	83	40	26	21	19	17	14
0,4	110	110	73	32	21	17	15	14	12
0,6	110	110	62	26	17	13	11	10	8,3
0,8	110	110	48	20	13	11	10	9,4	8,4
1,0	110	102	37	15	10	8,3	7,7	7,1	6,2

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 45 p.p.m

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21.

TABELA IV.7

h (mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t (min)	0	1	2	4	6	10	15	30	30
s (mm/s)		1,33	0,65	0,32	0,21	0,12	0,08	0,04	0,00
0,0	110	110	110	99	62	26	15	8,5	2,0
0,2	110	110	110	58	32	15	11	6,3	2,0
0,4	110	110	104	40	18	6,9	4,7	3,7	1,5
0,6	110	110	98	27	11	5,7	4,6	3,7	2,5
0,8	110	110	83	17	6,3	4,7	3,6	3,1	2,0
1,0	110	110	81	20	7,9	4,1	3,5	3,1	2,5

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e

da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m

Concentração de Sulfato de Alumínio: 55 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21

TABELA IV.8

h (mm)	82	70	78	76	74	72	70	68	12
t (min)	0	2	4	7	10	15	20	30	30
S (mm/s)		0,67	0,32	0,18	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00
0,0	110	110	110	56	14	5,8	4,8	4,4	3,7
0,2	110	110	78	28	14	7,3	5,2	3,5	0,8
0,4	110	110	65	22	11	6,9	4,7	3,6	0,3
0,6	110	110	37	9,1	3,6	1,9	1,4	0,8	0,3
0,8	110	96	24	10	7,9	4,1	3,6	3,0	2,5
1,0	110	110	40	7,8	4,5	3,5	3,0	2,7	2,4

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 70

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21

TABELA IV.9

h (mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t (min)	0	2	4	7	10	15	20	30	30
S (mm/s)		0,67	0,32	0,18	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00
0,0	130	130	130	97	75	62	59	55	48
0,2	130	130	127	95	83	79	77	76	72
0,4	130	130	113	82	73	68	67	67	64
0,6	130	130	98	74	64	63	63	62	60
0,8	130	130	91	75	72	70	70	70	70
1,0	130	130	94	82	78	78	77	76	75

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m

Concentração de Sulfato de Alumínio: 40 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Separam AP 273 Premium

TABELA IV.10

h (mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t (min)	0	2	4	7	10	15	20	30	30
S (mm/s)		0,67	0,32	0,18	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00
0,0	130	130	130	83	61	50	46	43	32
0,2	130	130	101	54	41	35	33	31	29
0,4	130	130	95	50	38	34	33	32	30
0,6	130	130	84	41	34	29	28	28	27
0,8	130	122	56	38	34	33	32	32	32
1,0	130	130	70	44	40	39	38	38	37

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h) em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 45 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Separam AP 273 Premium

TABELA IV.11

h(mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t(min)	0	1	2	4	6	10	15	30	30
S(mm/s)		1,33	0,65	0,32	0,21	0,12	0,08	0,04	0,00
0,0	130	130	130	113	55	30	12	11	5,0
0,2	130	130	87	31	16	9,7	7,2	5,9	3,4
0,4	130	123	45	19	10	7,7	7,0	6,3	3,4
0,6	130	130	46	14	8,2	5,0	4,4	3,8	2,5
0,8	130	107	27	11	8,2	6,9	6,2	6,0	5,5
1,0	130	100	25	13	10	9,0	8,3	8,0	7,8

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 55 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Separam AP 273 Premium

TABELA IV.12

h(mm)	82	80	78	76	74	72	70	68	12
t(min)	0	2	4	7	10	15	20	30	30
S(mm/s)		0,67	0,32	0,18	0,12	0,08	0,06	0,04	0,00
0,0	130	130	122	68	37	21	16	14	6,5
0,2	130	130	111	47	23	17	13	10	2,7
0,4	130	130	86	33	17	12	9,2	7,3	3,5
0,6	130	130	66	25	19	16	11	6,7	2,0
0,8	130	126	50	19	12	7,2	6,6	5,9	3,4
1,0	130	122	41	17	12	9,0	8,4	7,8	3,9

Turbidez em função do tempo de sedimentação (t) e da profundidade de amostragem (h), em u.j.

Concentração de polieletrólito de 0,0 - 1,0 p.p.m.

Concentração de Sulfato de Alumínio: 70 p.p.m.

Tipo de polieletrólito: Separam AP 273 Premium.

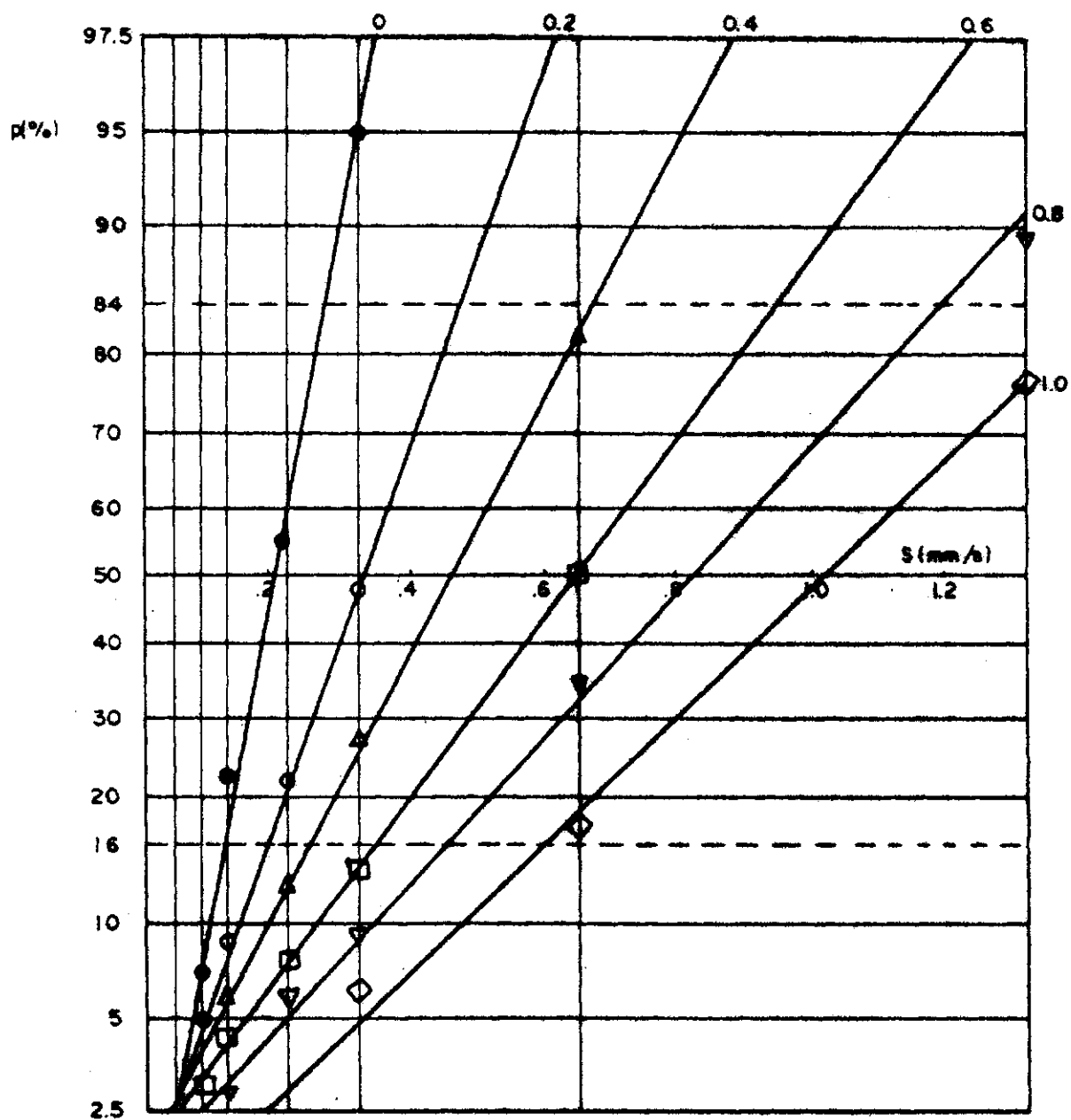


Fig.: IV. 1

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 40 ppm

Tipo de polieletrólito: Dredfloc 307

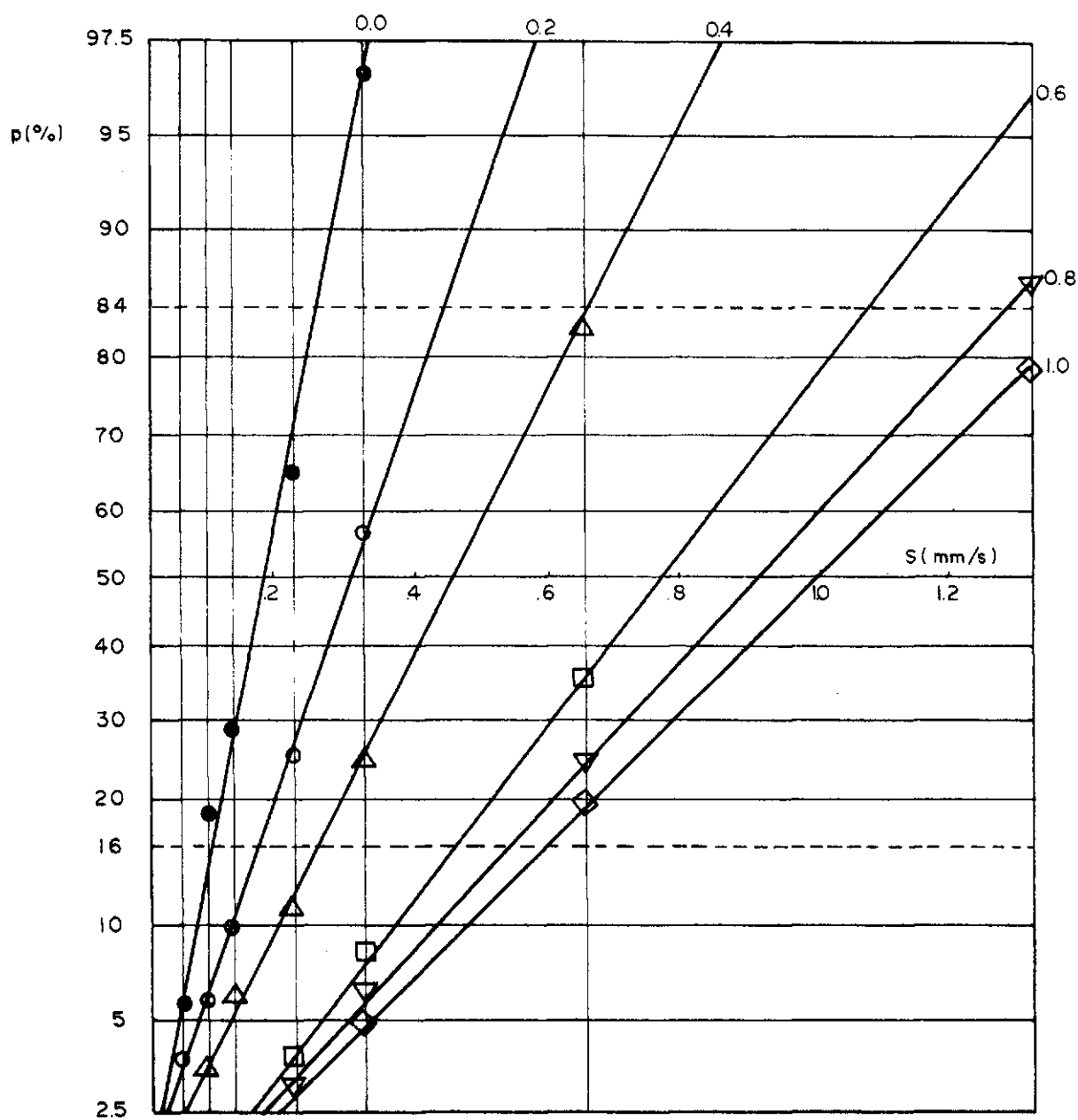


Fig. IV. 2

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 45 ppm

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 307

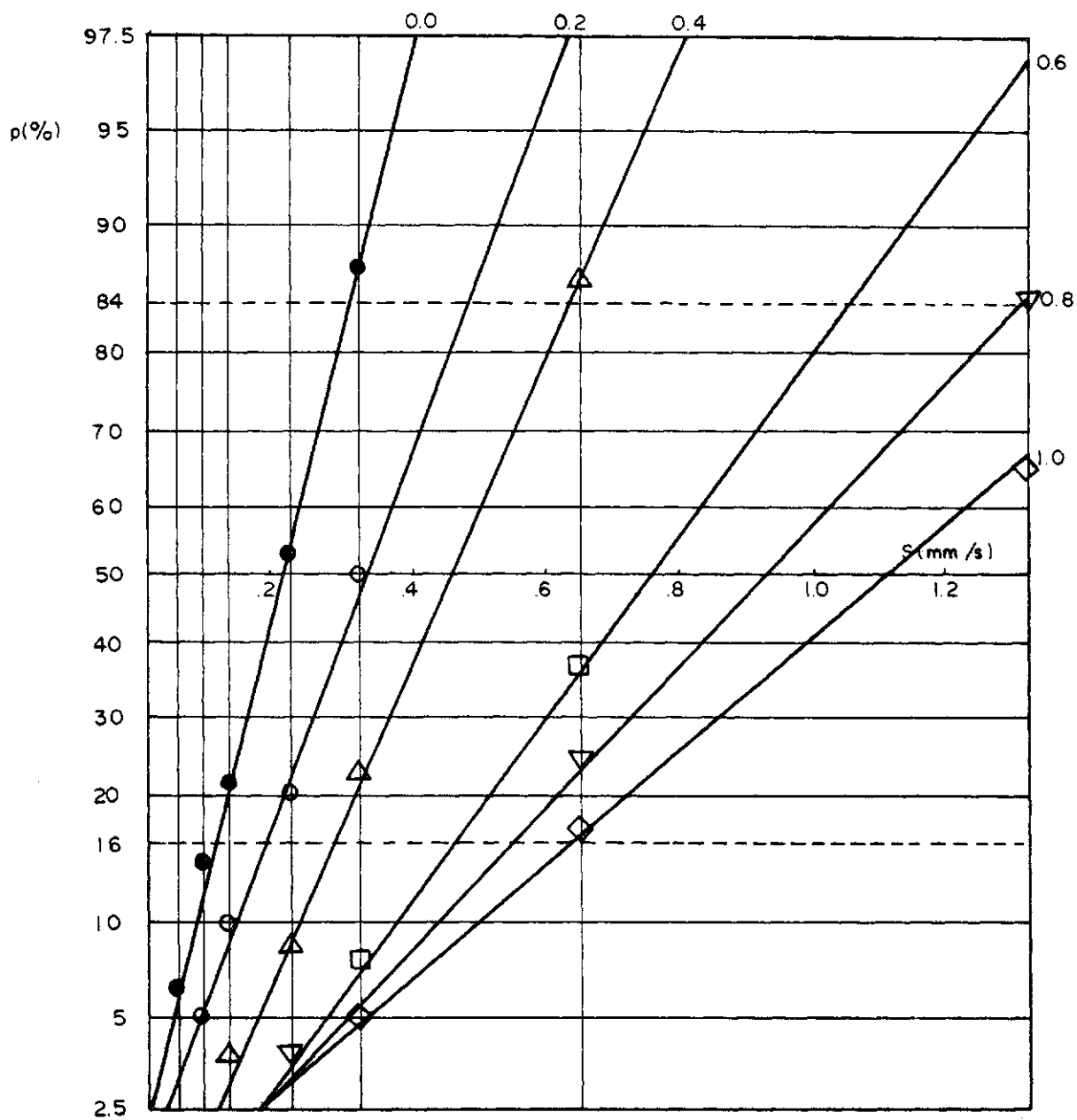


Fig. IV.3

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 55 ppm

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 307

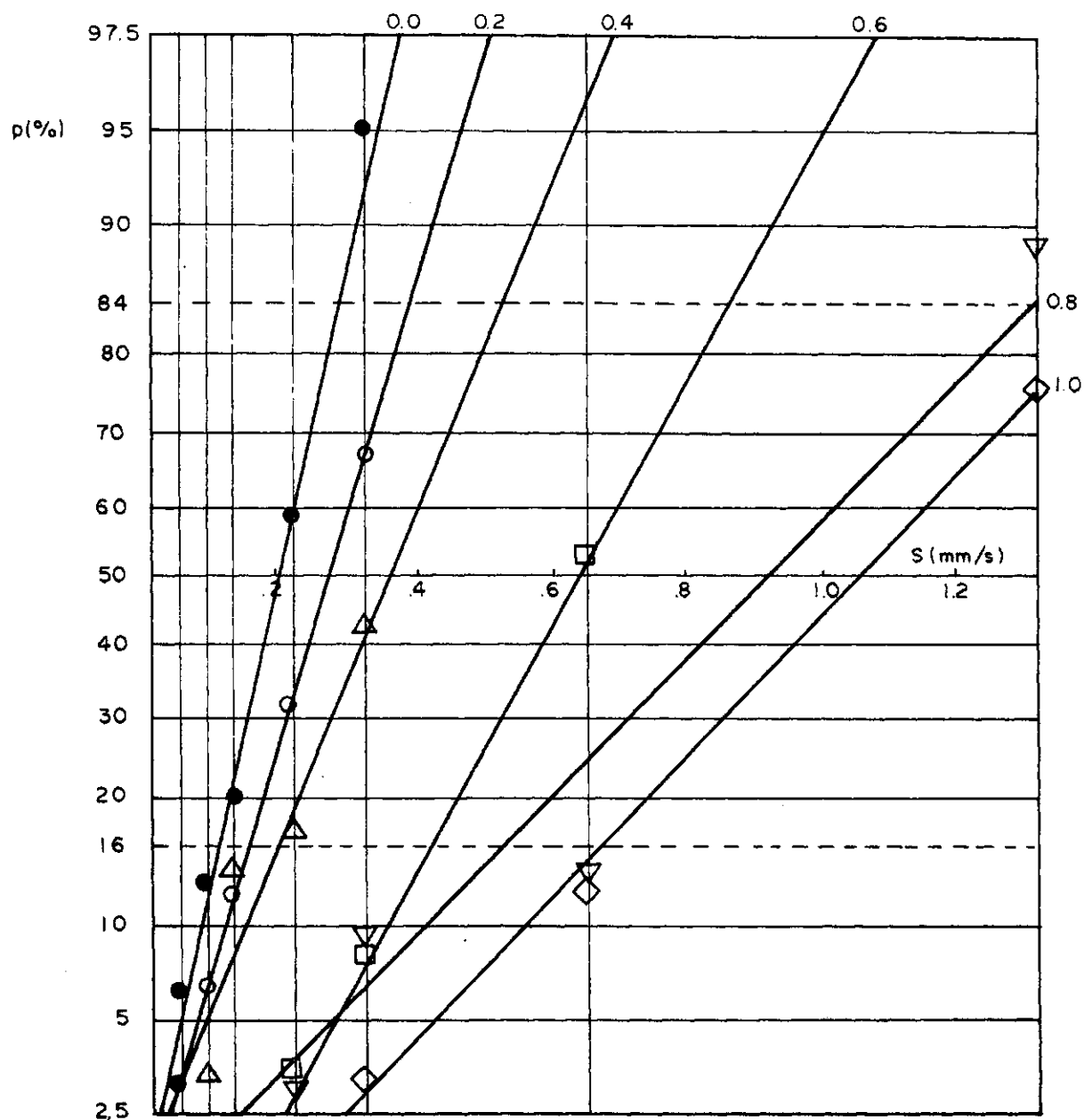


Fig.: IV. 4

Diagrama probabilístico de p em função de S .

Concentração de sulfato de alumínio: 70 ppm

Tipo de polietetrólito: Drawfloc 307

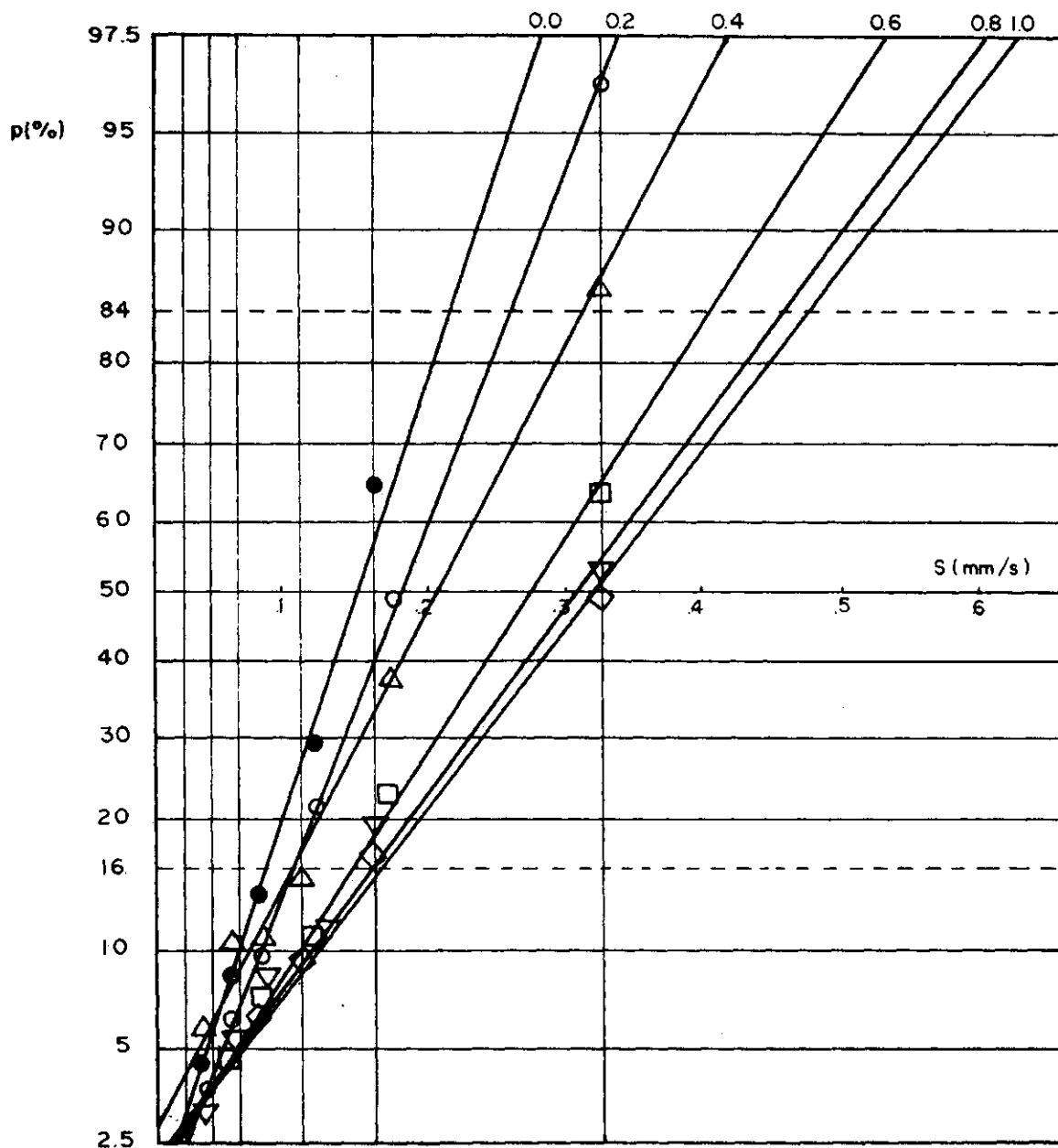


Fig. IV.5

Diagrama probabilístico de p em função de S .

Concentração de sulfato de alumínio: 40 ppm

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21

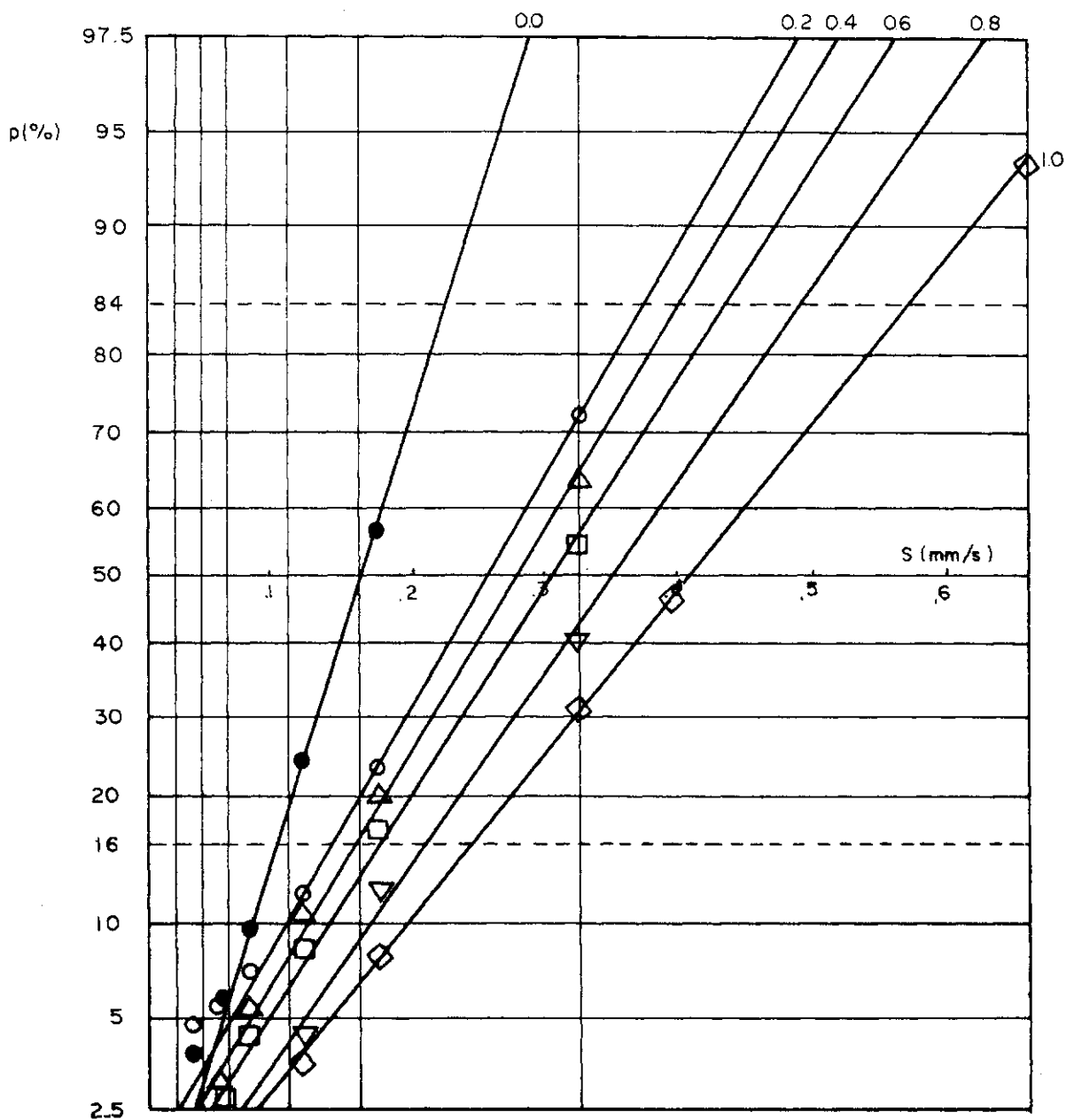


Fig. IV. 6

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 45 ppm

Tipo de polieletrólito: Drawfloc: 21

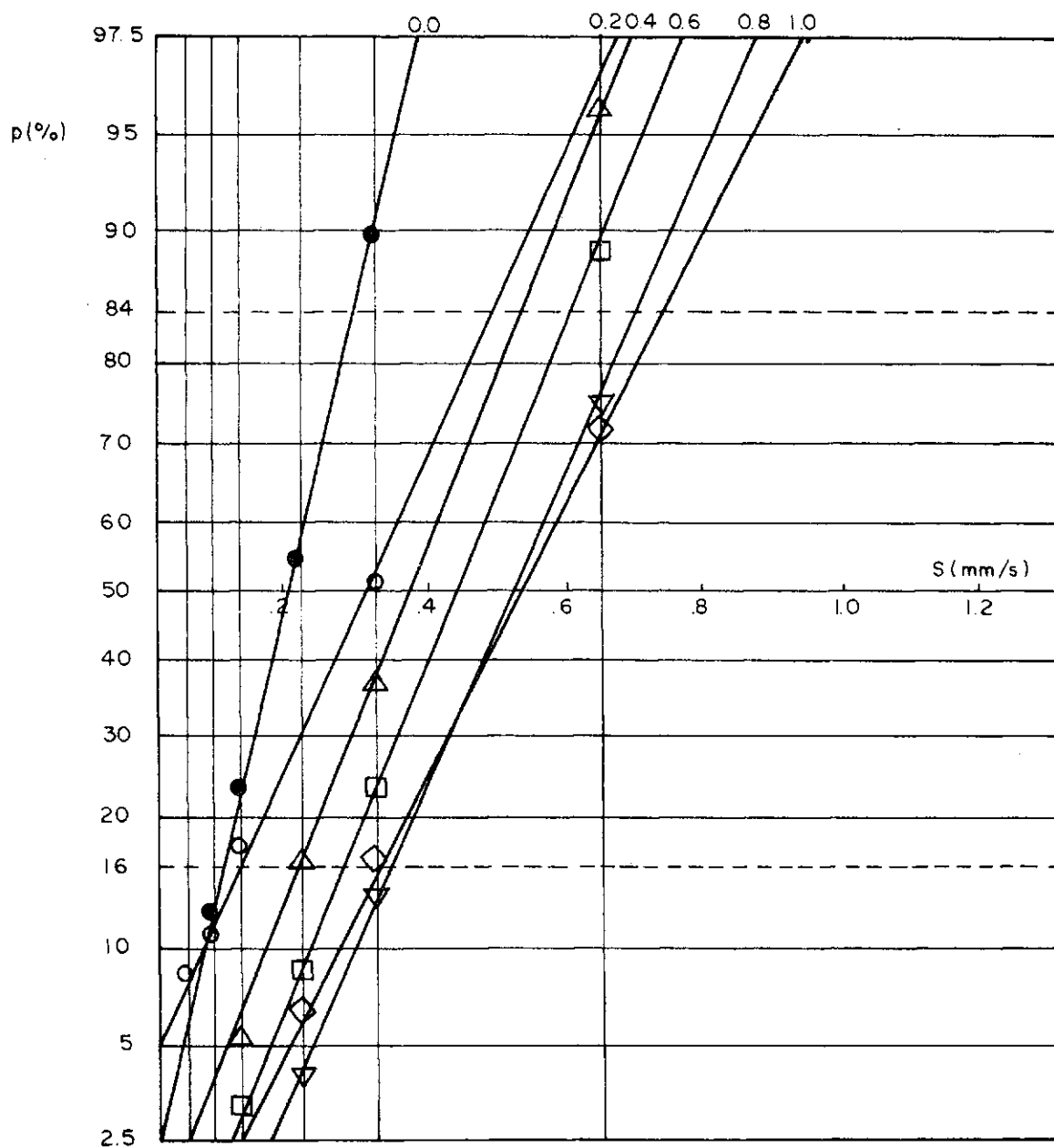


Fig.: IV. 7

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 55 ppm

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21

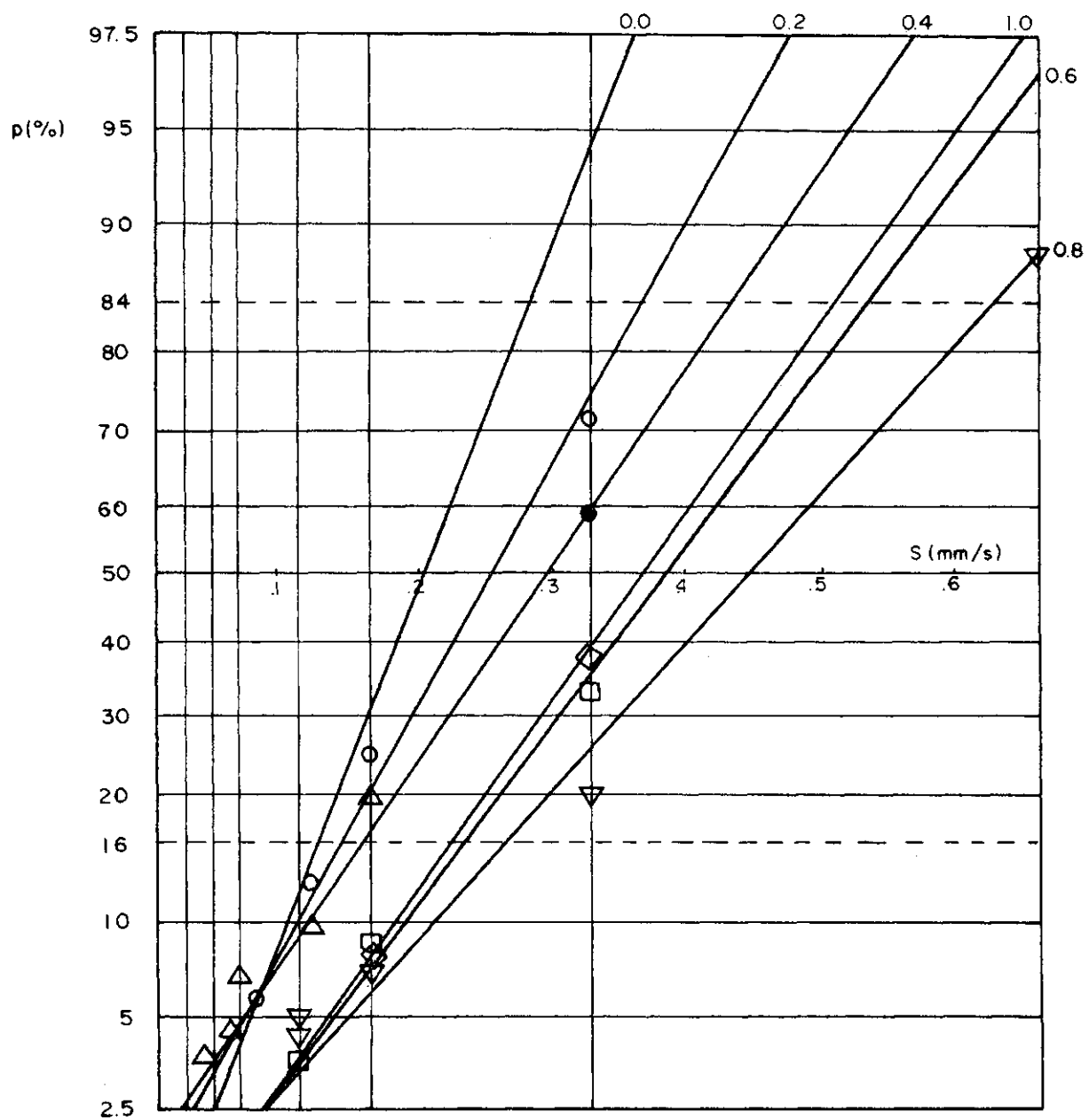


Fig: IV. 8

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 70 ppm

Tipo de polieletrólito: Drewfloc 21

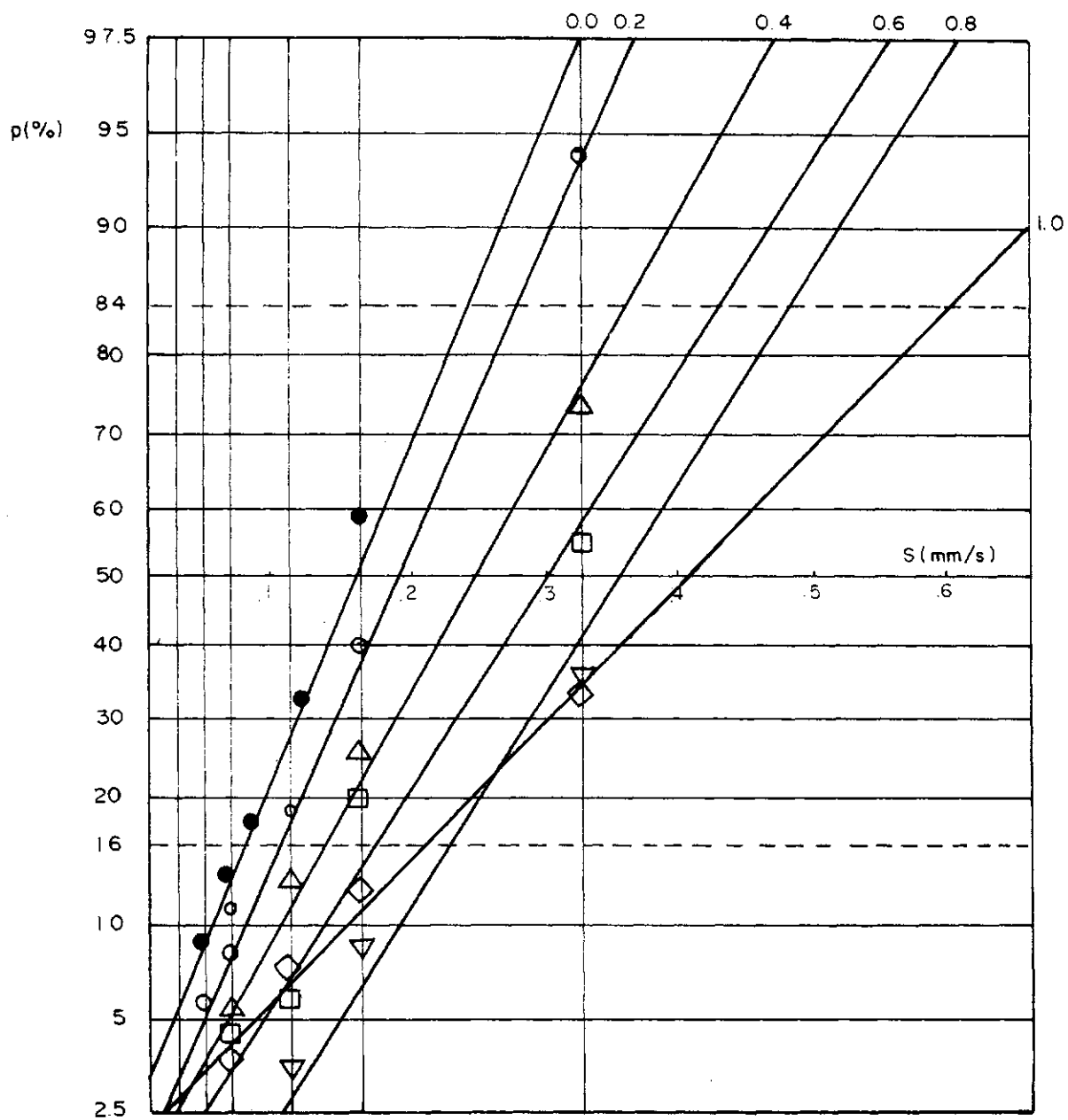


Fig: IV 9

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 40 ppm

Tipo de polieletrólito: Separam AP273 Premium

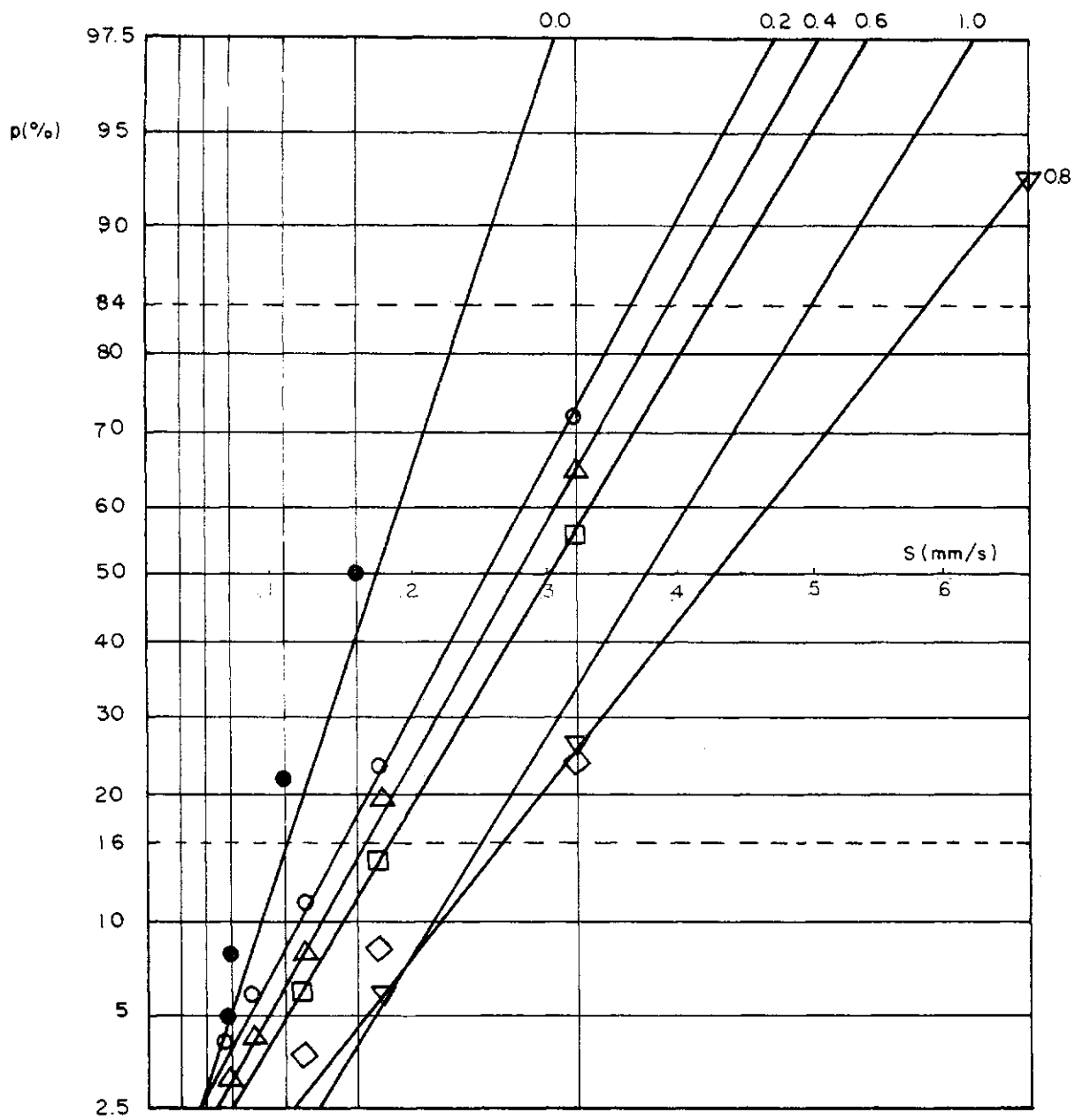


Fig.: IV 10

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 45 ppm

Tipo de polieletrólito: Separam AP 273 Premium

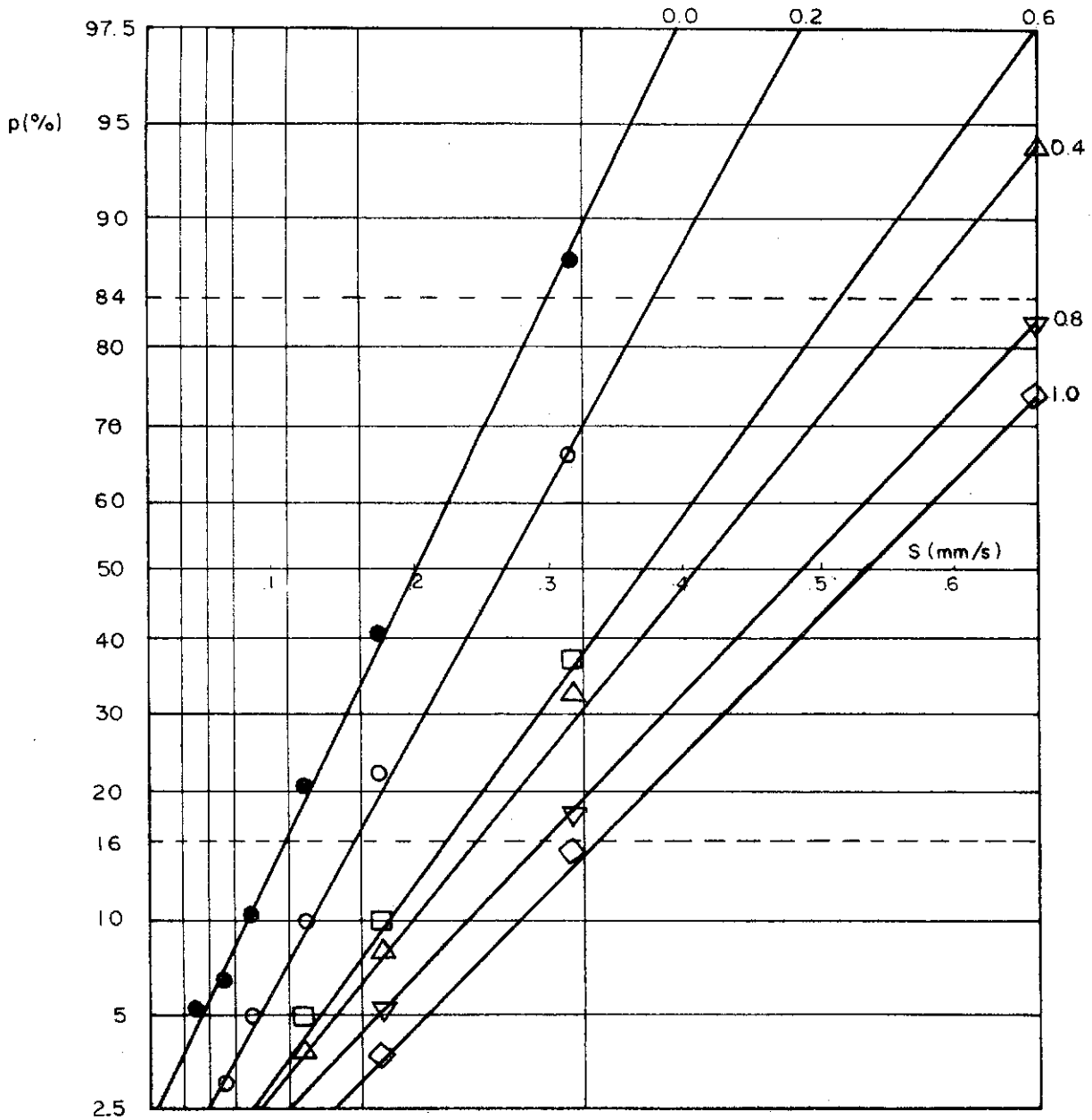


Fig. IV.11

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 55 ppm

Tipo de polieletrólito: Separam AP 273 Premium

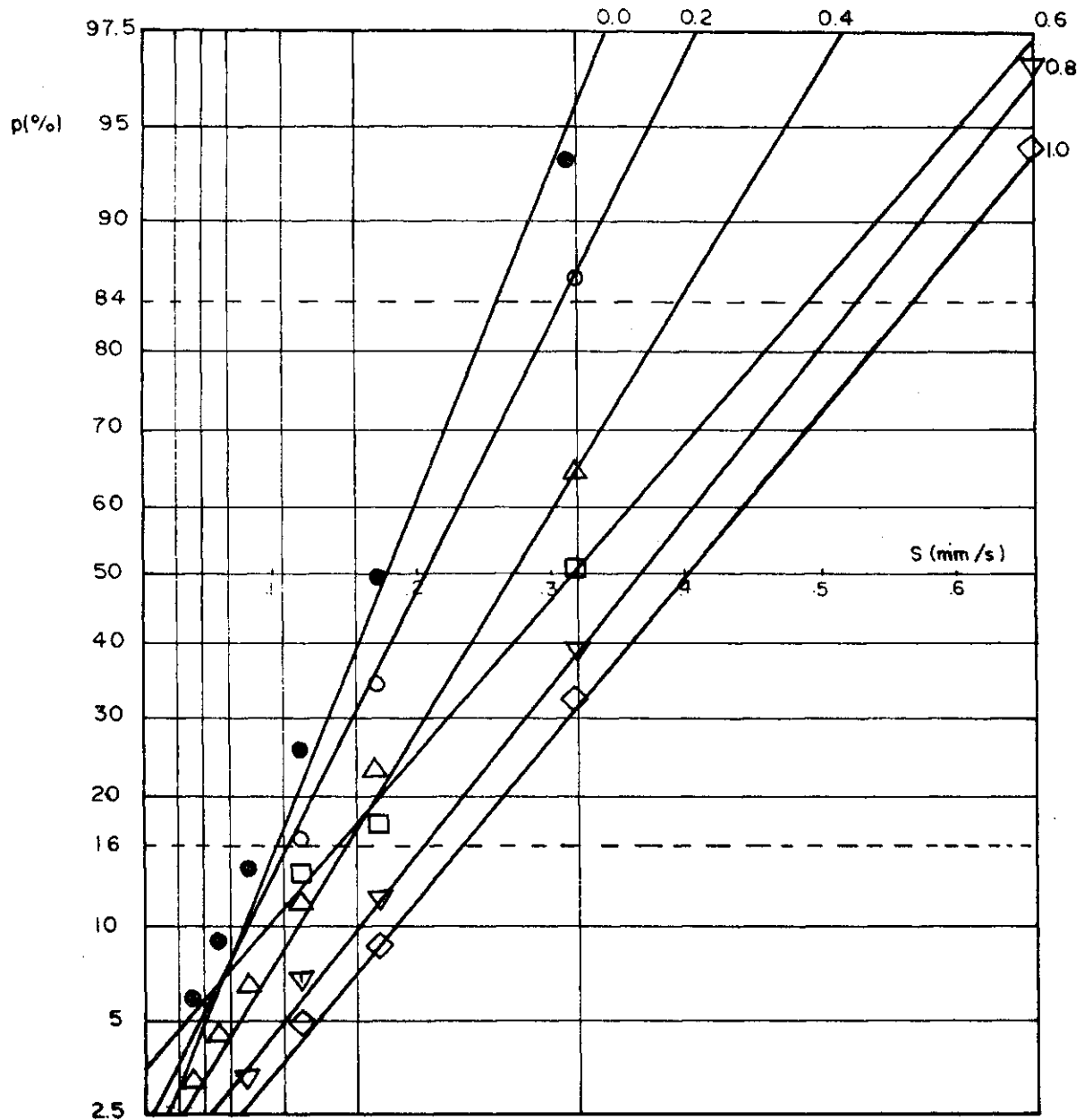


Fig. IV.12

Diagrama probabilístico de p em função de S.

Concentração de sulfato de alumínio: 70 ppm

Tipo de polieletrólito: Separam AP273Premium

TABELA IV.13

CONCENTRAÇÃO DO POLÍMERO	CONCENTRAÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO											
	40	45	55	70	40	45	55	70	40	45	55	70
0,0	0,19	0,17	0,20	0,19	0,16	0,17	0,19	0,20	0,16	0,18	0,20	0,19
0,2	0,32	0,29	0,45	0,27	0,18	0,26	0,30	0,26	0,18	0,26	0,28	0,22
0,4	0,45	0,45	0,47	0,32	0,21	0,28	0,37	0,30	0,25	0,28	0,41	0,27
0,6	0,66	0,76	0,74	0,63	0,29	0,31	0,44	0,38	0,31	0,31	0,39	0,33
0,8	0,82	0,92	0,99	0,99	0,31	0,36	0,52	0,46	0,38	0,44	0,50	0,37
1,0	1,04	0,99	1,11	1,05	0,33	0,41	0,53	0,35	0,40	0,38	0,53	0,41
	DREWFLOC 307				DREWFLOC 21				SEPARAM AP 273 PREMIUM.			

- Velocidade média de Sedimentação " \bar{S} " em mm/s.

TABELA IV.14

CONCENTRAÇÃO DO POLIMERO	CONCENTRAÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO											
	40	45	55	70	40	45	55	70	40	45	55	70
0,0	0,08	0,08	0,10	0,09	0,07	0,07	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,09
0,2	0,15	0,14	0,18	0,12	0,08	0,12	0,15	0,11	0,09	0,11	0,12	0,11
0,4	0,21	0,21	0,21	0,16	0,12	0,12	0,15	0,14	0,12	0,12	0,16	0,13
0,6	0,31	0,31	0,28	0,23	0,13	0,13	0,17	0,16	0,14	0,12	0,15	0,18
0,8	0,38	0,39	0,42	0,42	0,15	0,14	0,17	0,19	0,14	0,16	0,18	0,16
1,0	0,44	0,40	0,47	0,38	0,16	0,16	0,18	0,15	0,19	0,14	0,20	0,17
	DREWFLOC 307				DREWFLOC 21				SEPARAM AP 273 PREMIUM			

- O desvio padrão da distribuição da velocidade de sedimentação " σ "

TABELA IV.15

CONCENTRAÇÃO DO POLIMERO	CONCENTRAÇÃO DE SULFATO DE ALUMÍNIO											
	40	45	55	70	40	45	55	70	40	45	55	70
0,0	35	25	3	3	35	23	2	3	37	25	3	5
0,2	29	17	2	2	25	13	2	1	54	22	3	2
0,4	25	13	1	2	19	11	1	0	49	23	4	3
0,6	25	13	1	2	14	8	2	0	46	21	2	2
0,8	36	12	2	2	9	8	2	2	54	25	4	3
1,0	57	12	3	2	8	6	2	2	58	28	6	5
	DREWFLOC 307				DREWFLOC 21				SEPARAM AP 273 PREMIUM			

- Porcentagem de Turbidez não removível por sedimentação $[(T_{\alpha}/T_0).100\%]$

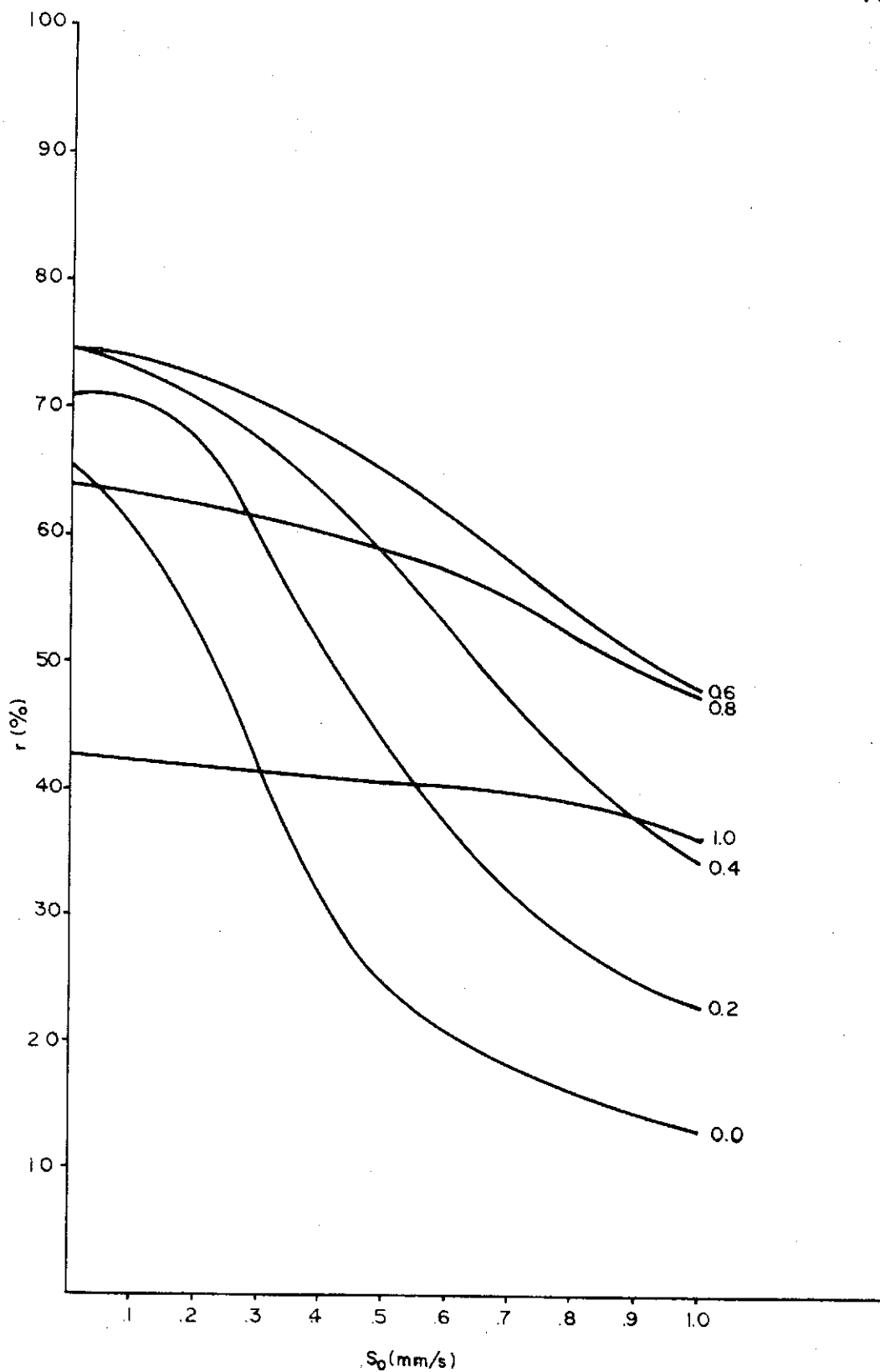


Fig. IV.13 - r em função de S₀

40 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 307

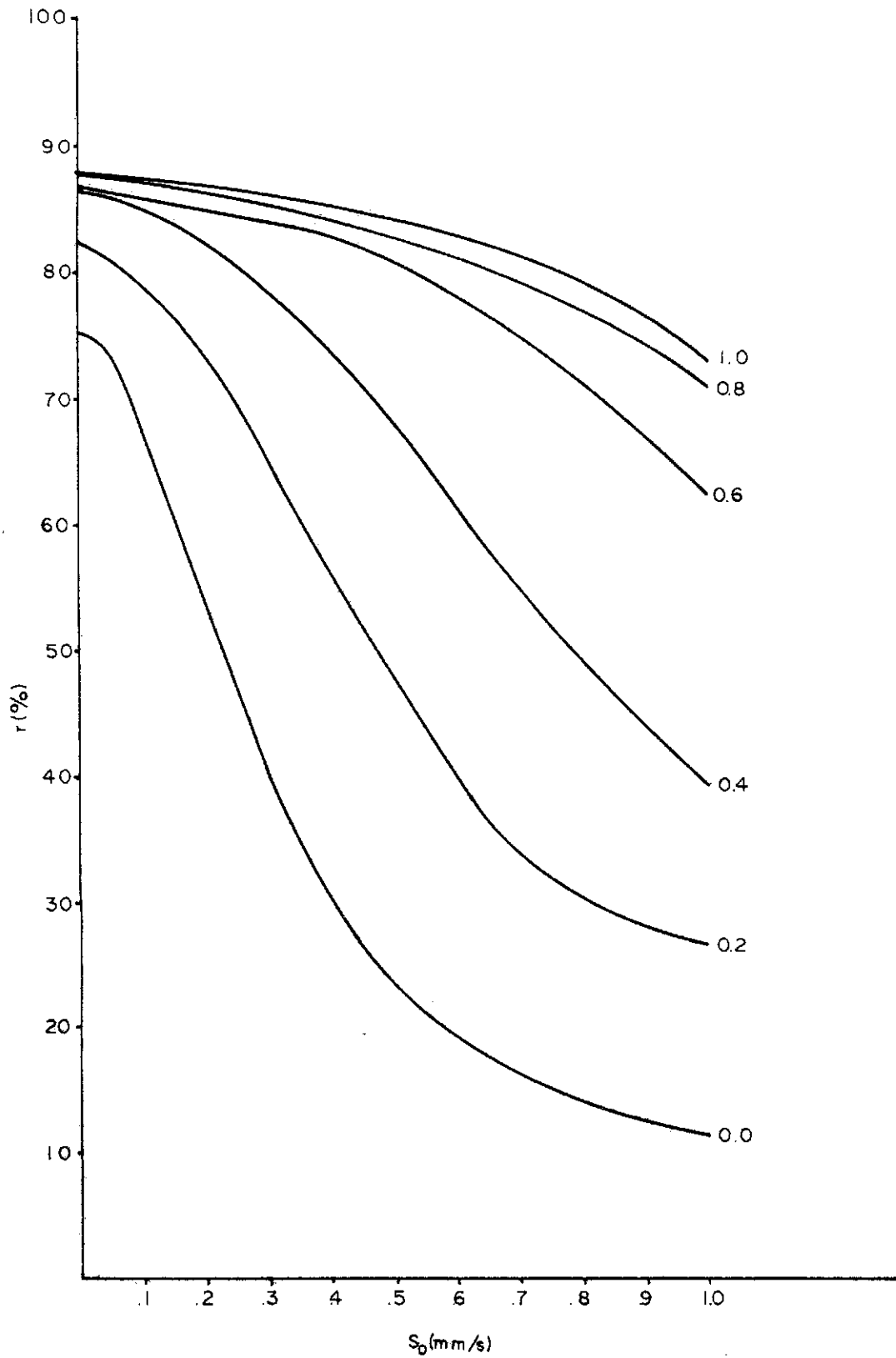


Fig. IV.14 - r em função de S₀

45 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 307

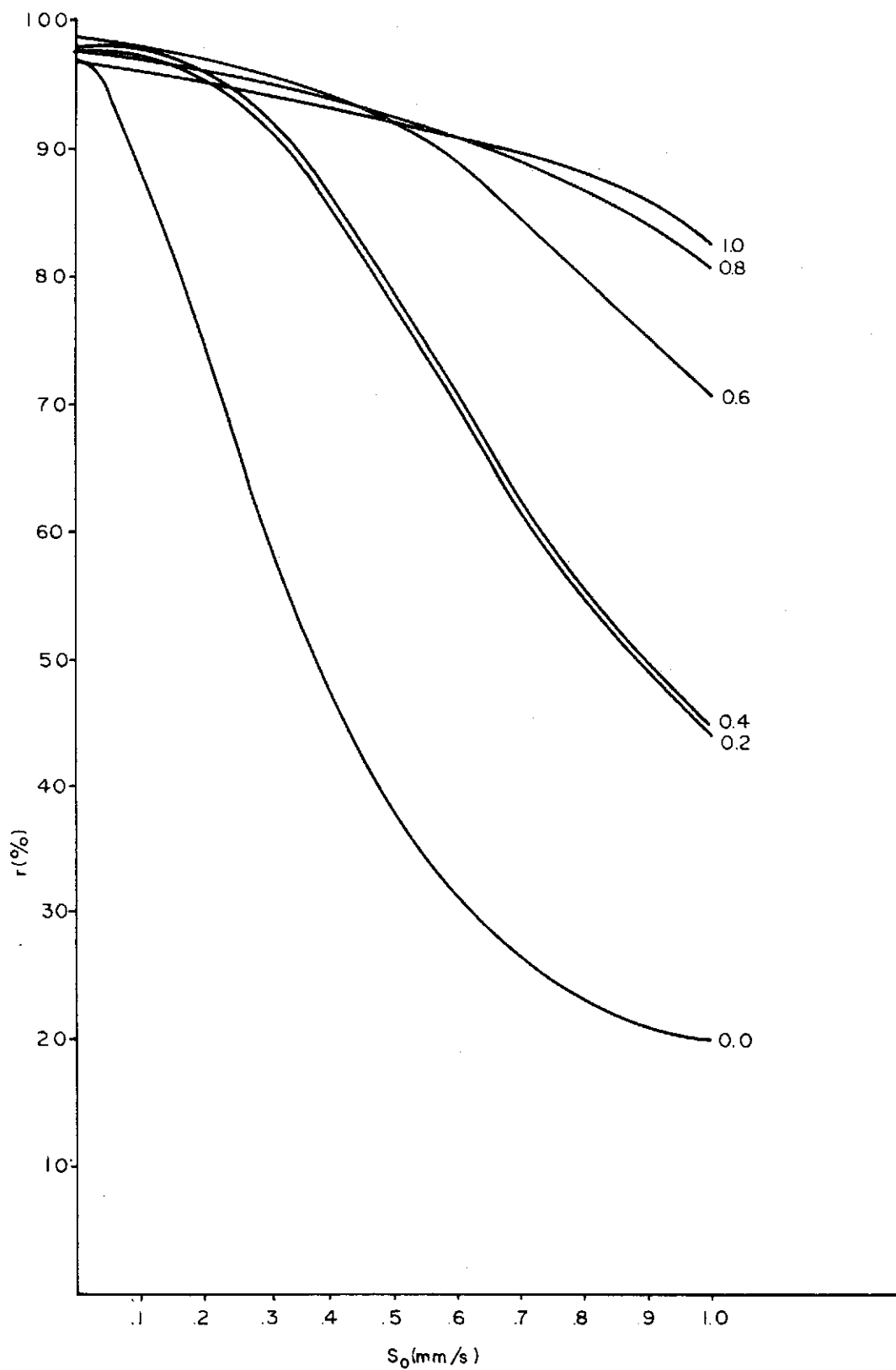


Fig. 1V. 15 - r em função de S_0

55 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 307

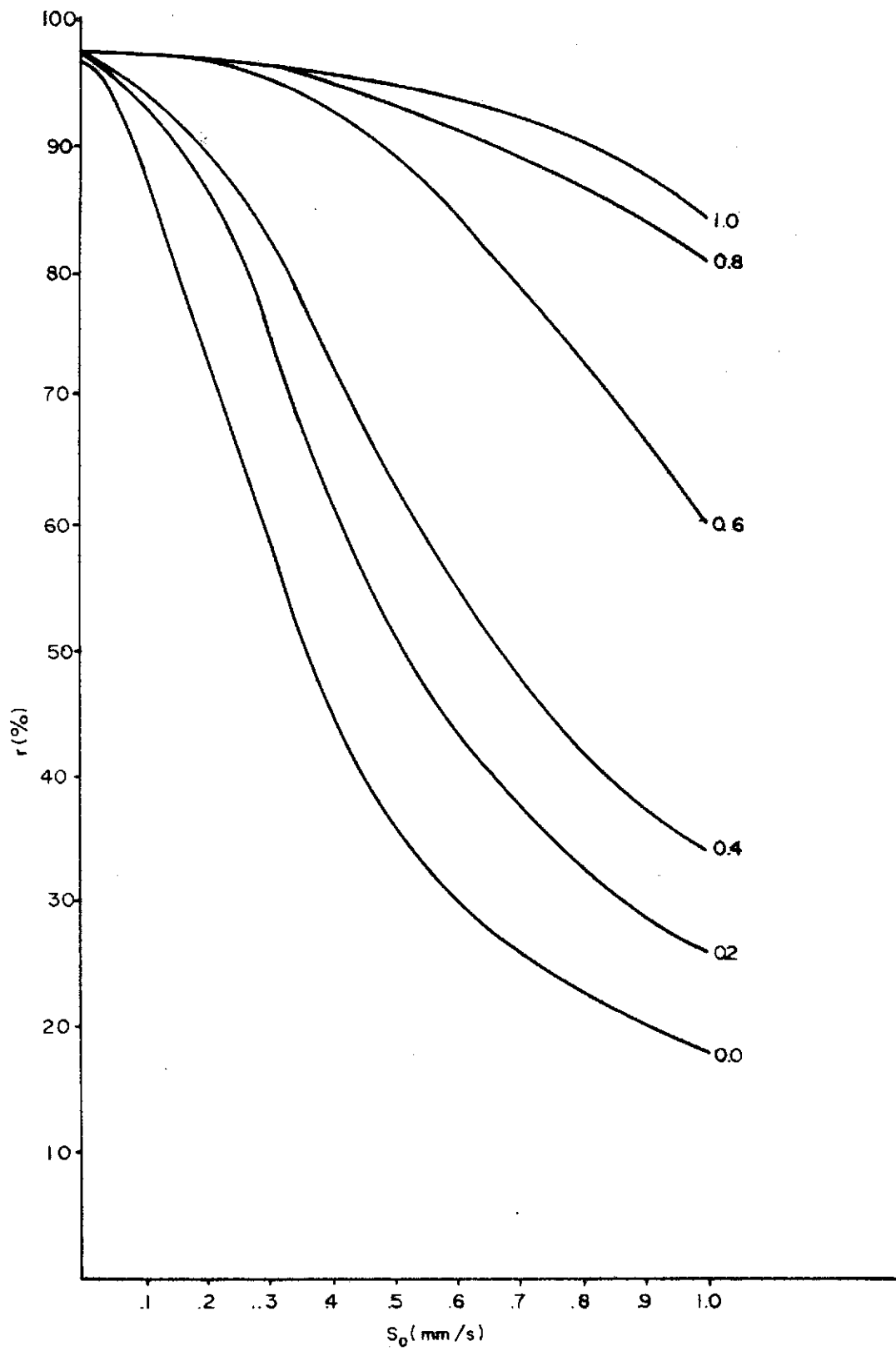


Fig. IV. 16 - r em função de S_0

70 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 307

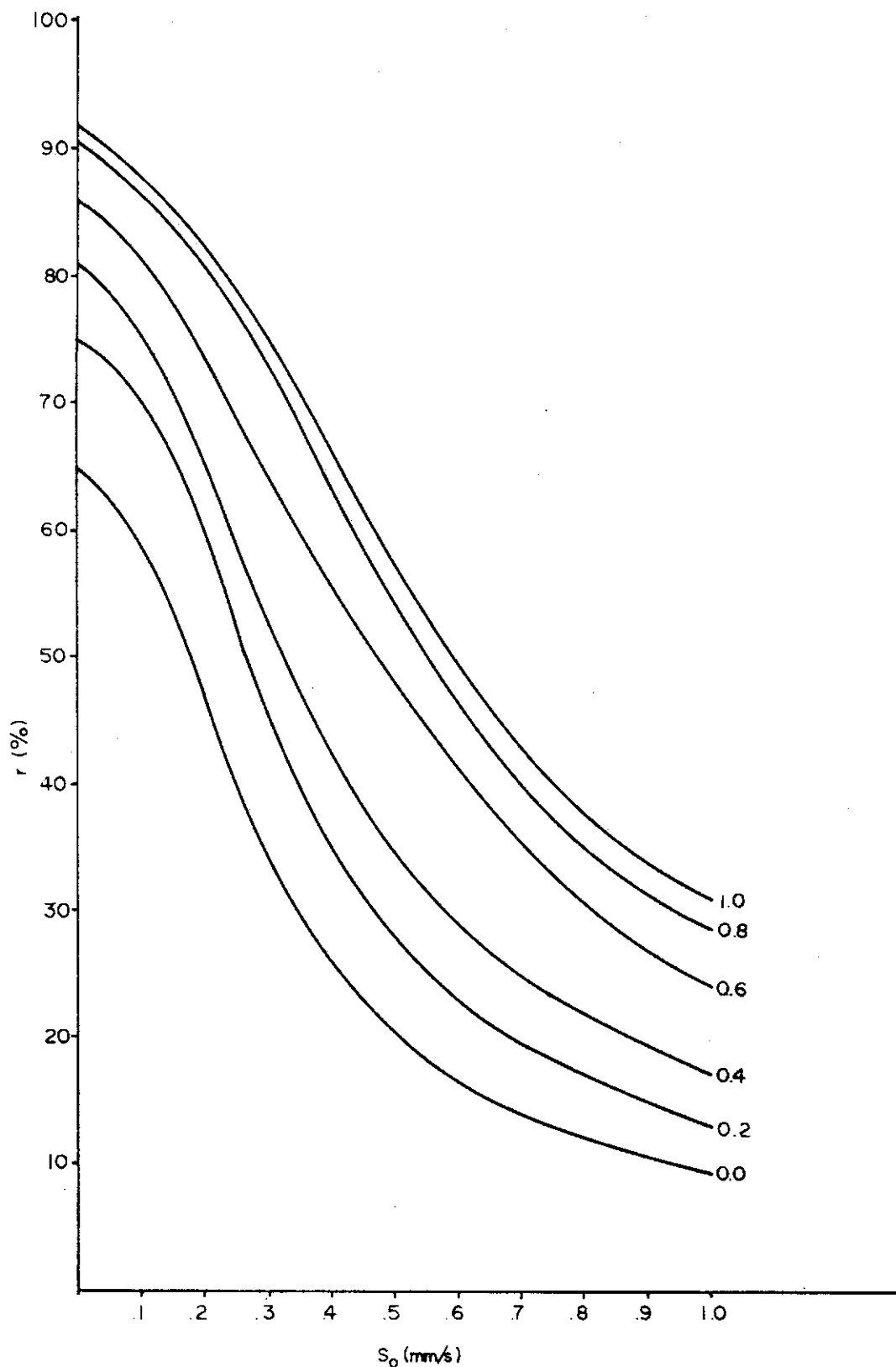


Fig. IV. 17- r em função de S_0

40 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 21

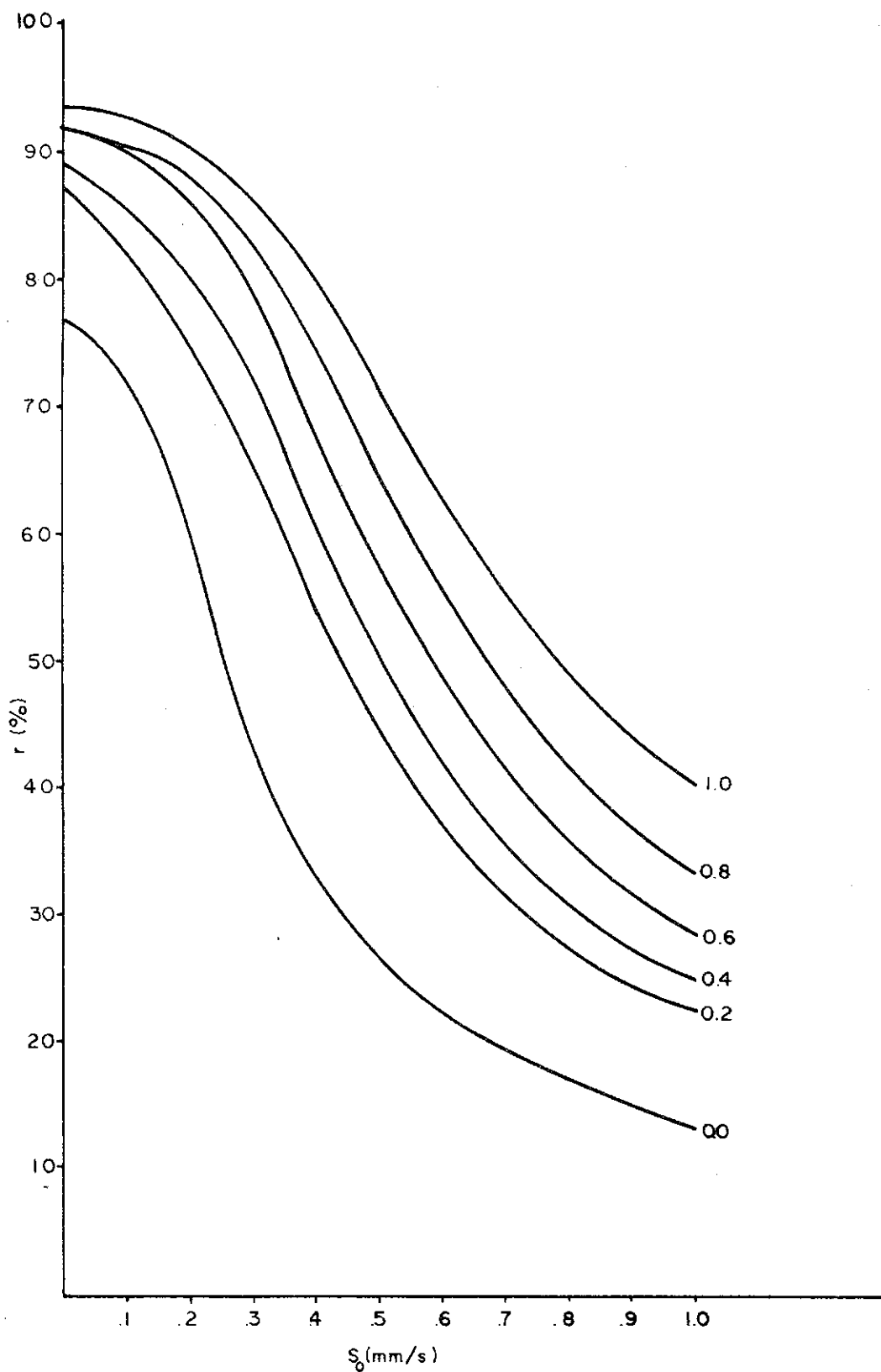


Fig. IV. 18 - r em função de S_0

45 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 21

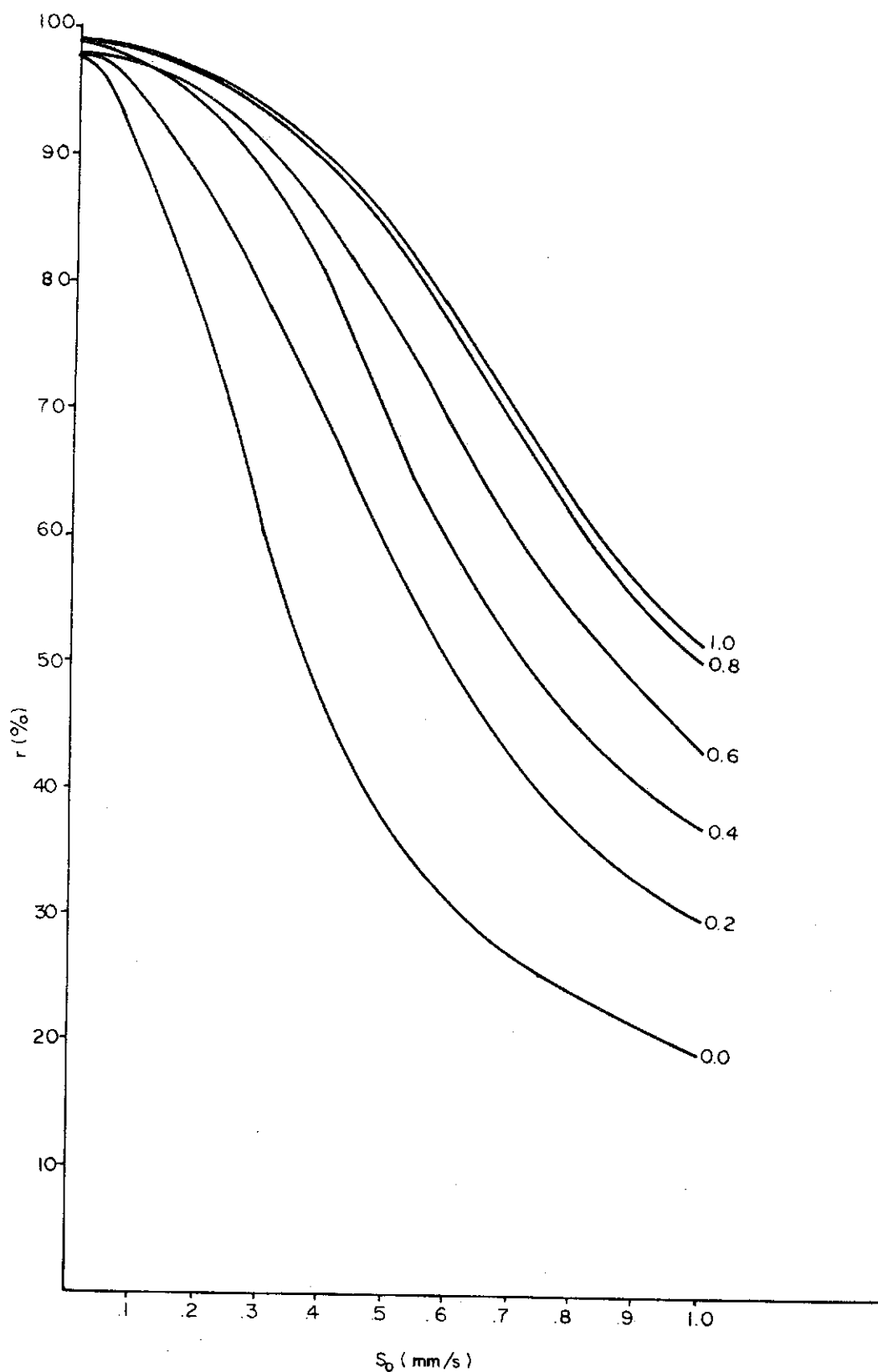


Fig. IV. 19- r em função de S₀

55 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 21

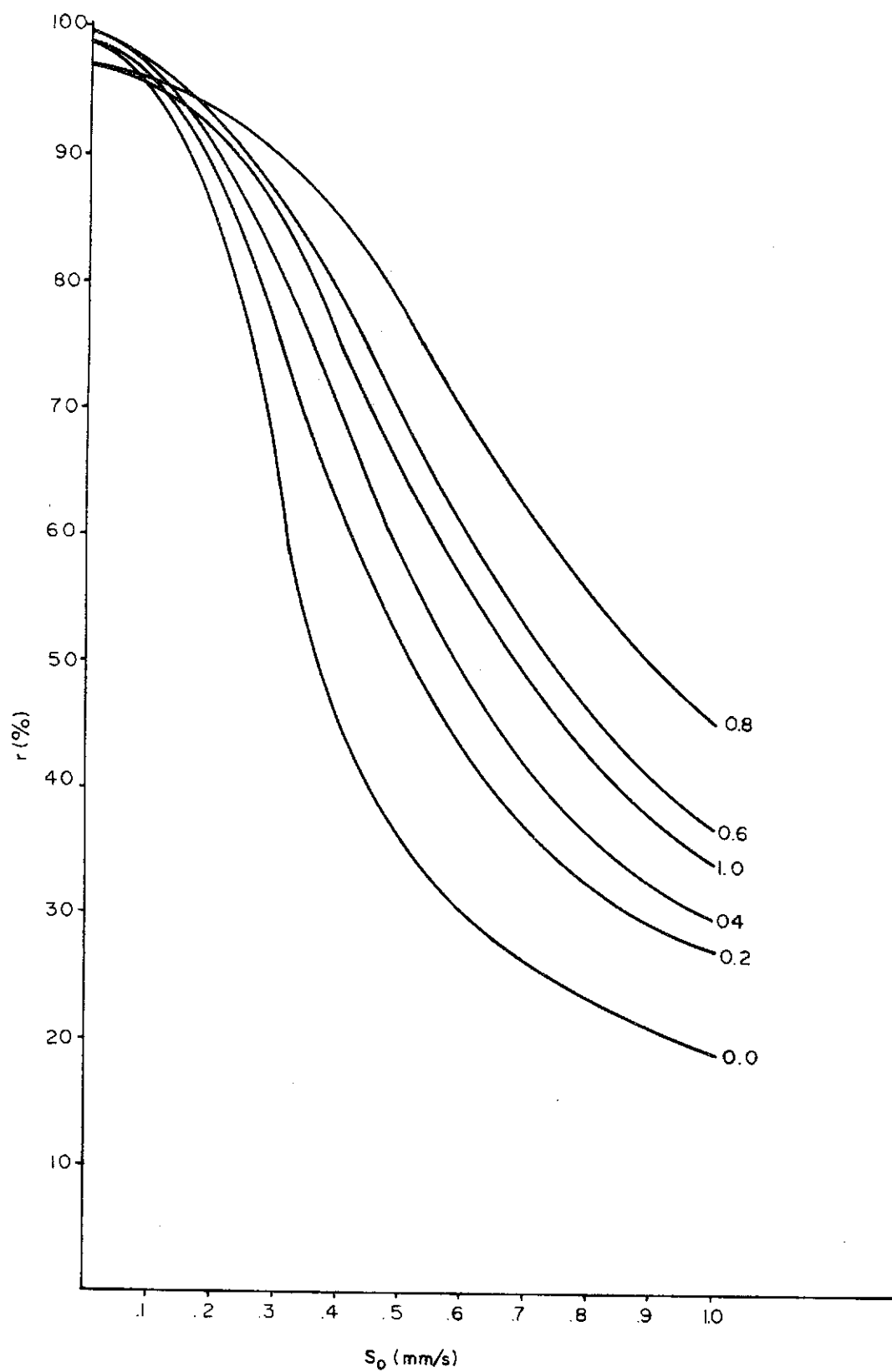


Fig. 20 - r em função de S₀

70 ppm de sulfato de alumínio

Drewfloc 21

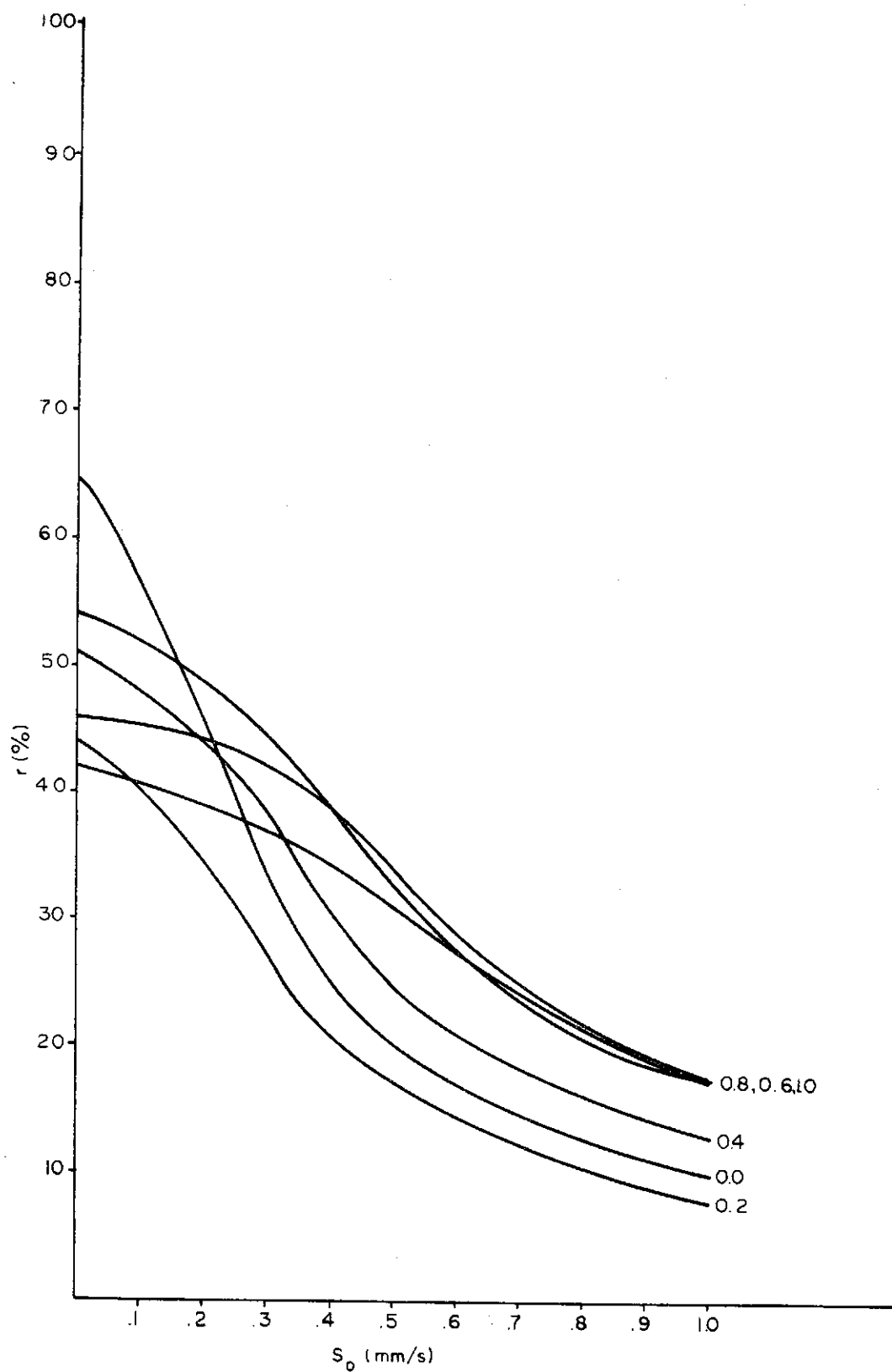


Fig. IV. 21 - r em função de S_0

40 ppm de sulfato de alumínio

Separam AP 273 Premium

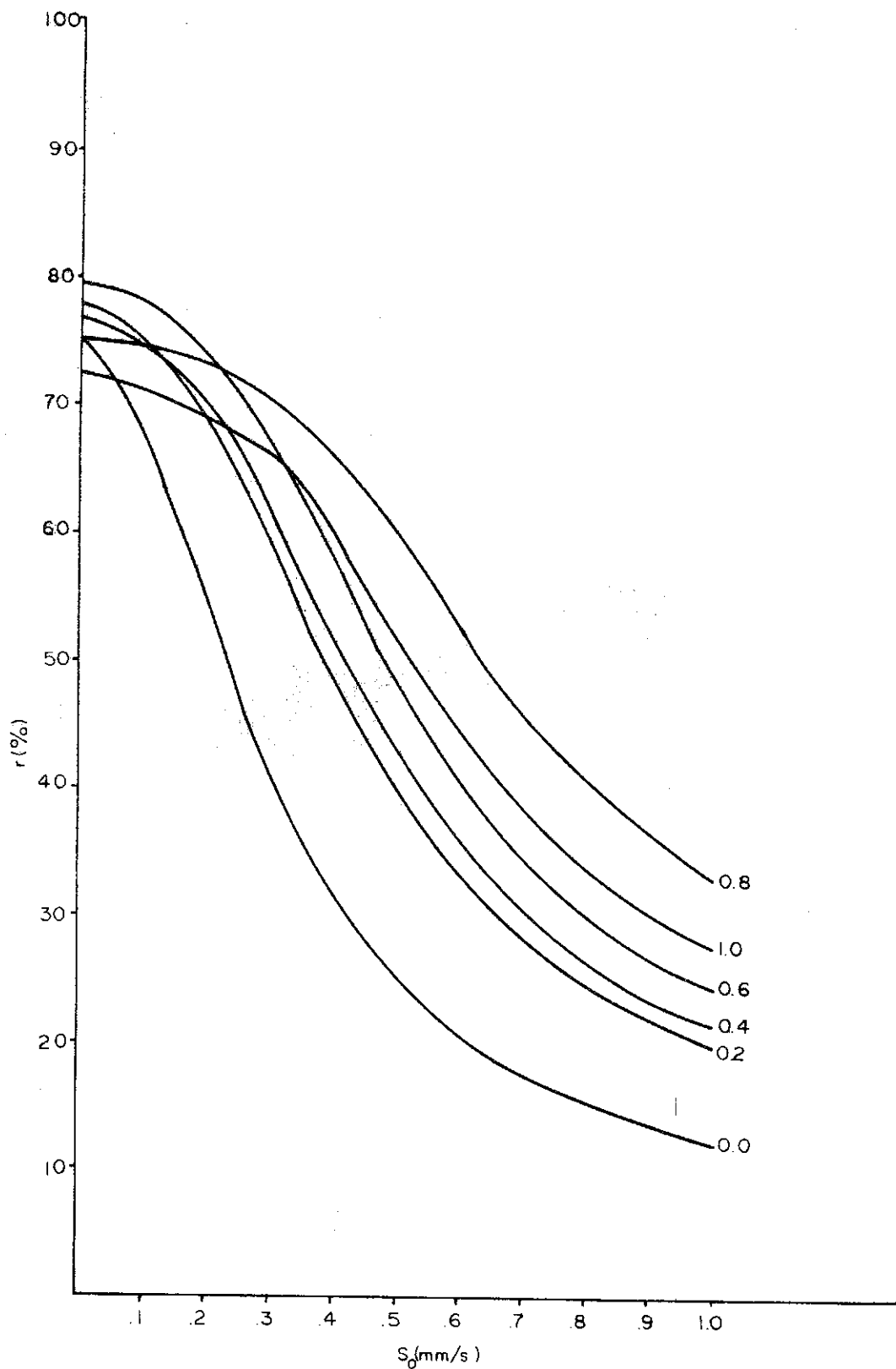


Fig. IV. 22 - r em função de S_0

45 ppm de sulfato de alumínio

Separam AP 273 Premium

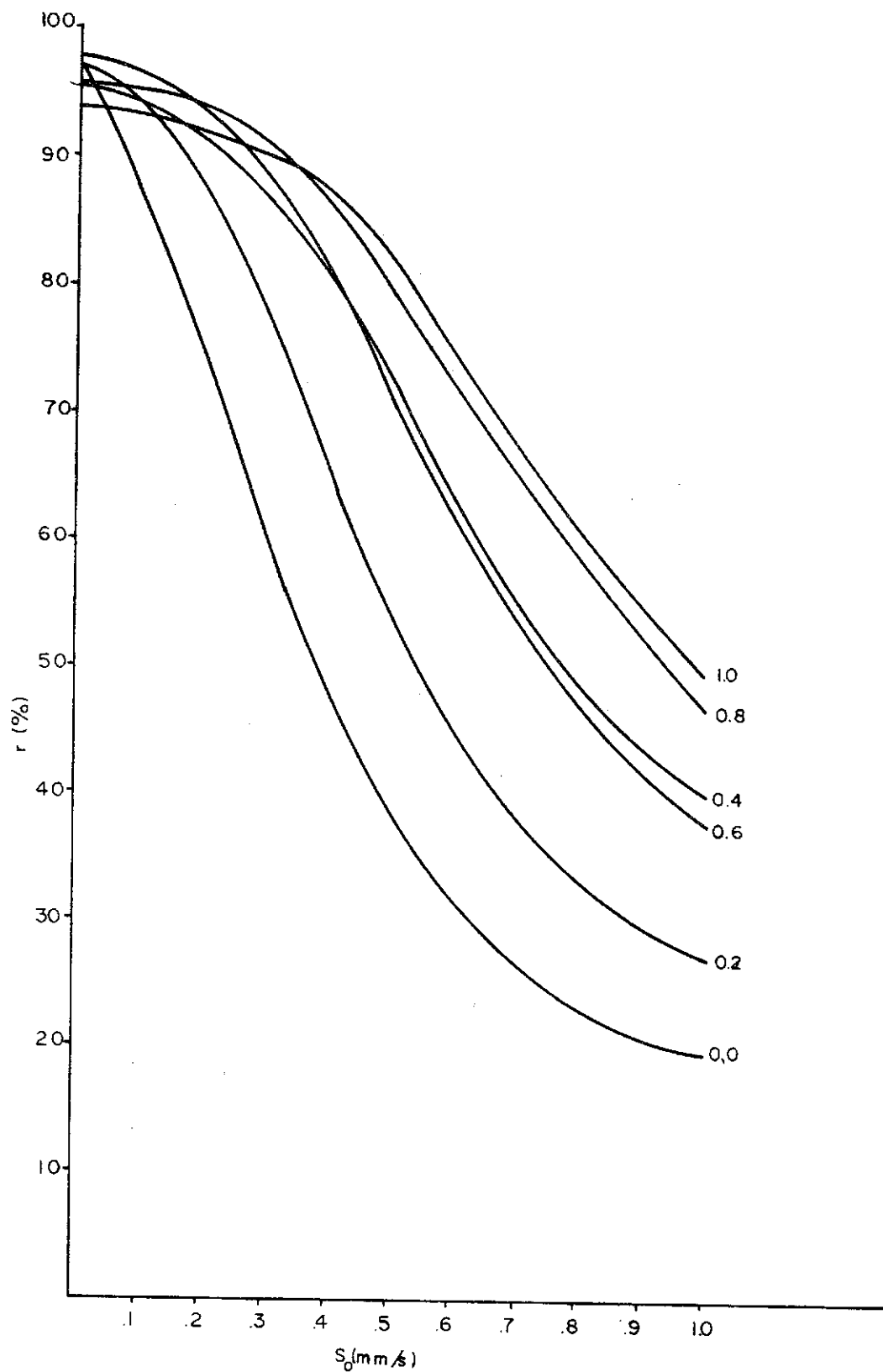


Fig. IV. 23- r em função de S_0

55 ppm de sulfato de alumínio

Separam AP 273 Premium

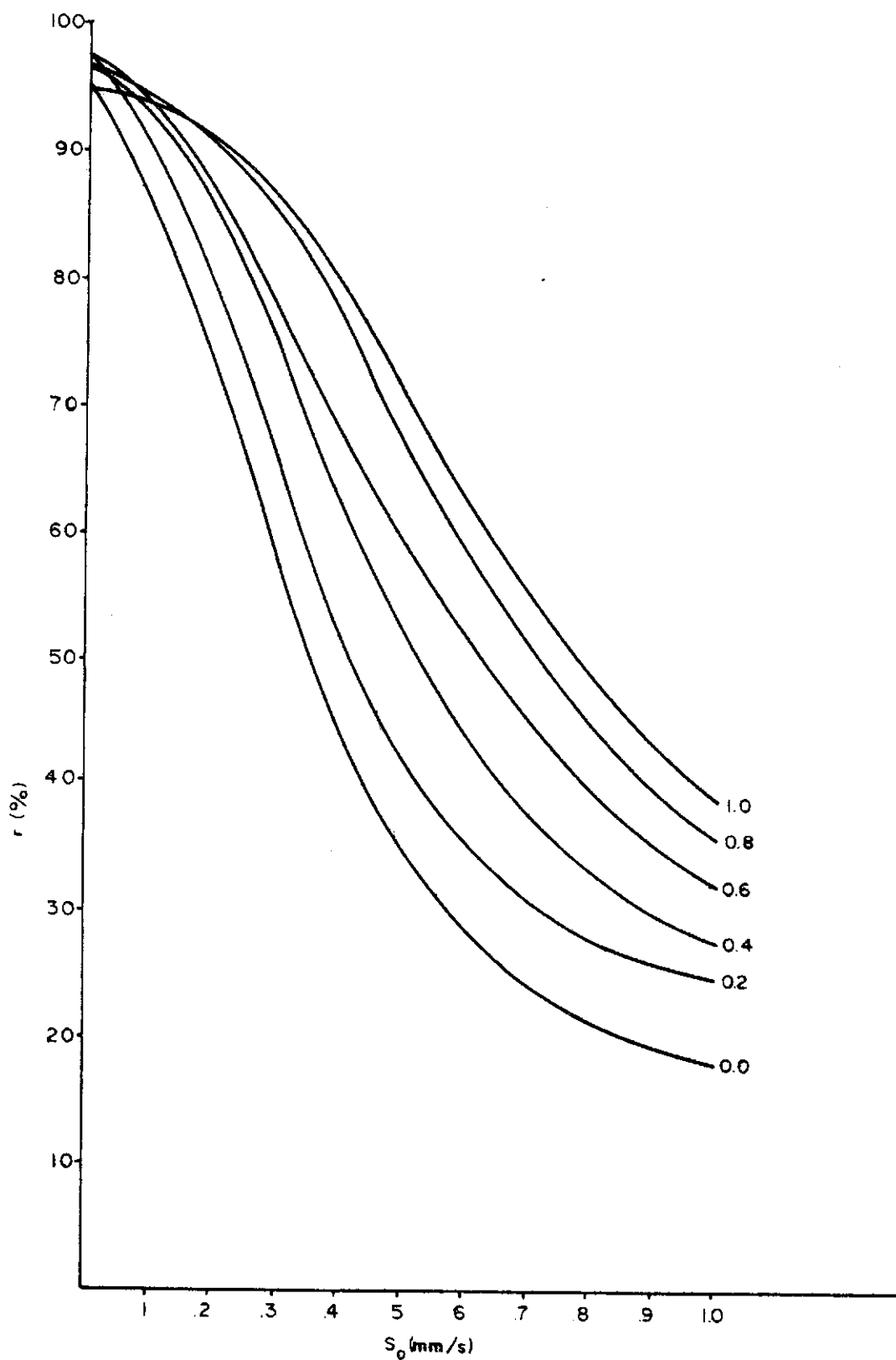


Fig. N. 24- r em função de S_0

70 ppm de sulfato de alumínio

Separom AP 273 Premium

CAPÍTULO V

D I S C U S S Ã O

V.1 - CONSIDERAÇÕES

A realização de ensaios em Jar-Tester possibilita a avaliação da eficiência de processos de clarificação, pela análise da relação entre a variação da turbidez e a velocidade de sedimentação. Torna-se esta análise difícil e trabalhosa quando esta relação, ou seja, a função da distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação não é conhecida. A eficiência da remoção de turbidez pode ser calculada pela Equação II.17,

$$r = 1 - (T_{\alpha}/T_0) \cdot (1/S_0) \cdot \int_0^{T/T_0} S_s d(T/T_0)$$

desde que se determine o valor da integral. Propõem-se métodos laboriosos e de precisão limitada para a determinação da integral, tais como: a determinação por planímetro ou pelo peso da área da integral $\int_0^{T/T_0} S_s d(T/T_0)$. O problema torna-se mais relevante, face a validade da determinação da integral para uma única taxa de escoamento superficial. Para outras taxas de escoamento superficial, todo o processo tem que ser repetido. Neste trabalho propõe-se uma relação entre "T" e "S_s", a qual, mostrou-se válida para todos os ensaios realizados. A turbidez e a distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação estão relacionadas conforme Equação II.20, aqui transcrita:

$$p' = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_{-\infty}^{S_0 - \bar{S}/\sigma} \exp\left(-\frac{(S - \bar{S})^2}{2\sigma^2}\right) d\left(\frac{S - \bar{S}}{\sigma}\right)$$

A eficiência de remoção de turbidez pode agora ser calculada sem maiores dificuldades, para qualquer taxa de escoamento superficial pela Equação II.24, ou seja:

$$r = 1 - \frac{T_\infty}{T} - \frac{T_0 - T_\infty}{T_0} \frac{\sigma}{S_0} \int_{-\infty}^x F(x) dx$$

Os valores de " \bar{S} " e " σ " podem ser calculados quando (p') é colocado em função de " S_s ", em diagrama probabilístico, e o valor de T_∞/T_0 é determinado diretamente dos dados obtidos e ensaio no Jar-Tester. A tabe-

la I - Apêndice I - fornece os valores da integral para $-2,9 \leq x \leq 2,9$. A eficiência de remoção da turbidez pode então ser calculada facilmente, para qualquer taxa de escoamento superficial. Um programa de computação para a determinação de "r" encontra-se no Apêndice II. A utilização deste programa simplifica consideravelmente a interpretação dos resultados obtidos de ensaios em Jar-Tester. Devido a sua flexibilidade, o programa permite a determinação da eficiência dos processos de clarificação, para qualquer estudo desenvolvido no Jar-Tester. A precisão do método em proposição, depende essencialmente da exatidão com que os parâmetros característicos " \bar{S} ", " σ ", e " T_{∞}/T_0 ", são determinados.

V.2 - REMOÇÃO DE TURBIDEZ EM TANQUES DE SEDIMENTAÇÃO

A eficiência na remoção de turbidez, nos processos de clarificação, depende, essencialmente, dos seguintes fatores:

Fração de Turbidez não Removível: - A razão T_{∞}/T_0 dá exatamente o valor da turbidez relativa a partículas não sedimentáveis. Representa a parte das partículas que não são afetadas pelos processos de clarificação, permanecendo em estado coloidal.

Distribuição Acumulativa da Velocidade de Sedimentação: As partículas coloidais coaguladas e floculadas adquirem velocidades de sedimentação " S_s ",

podendo ser removidas em tanques de sedimentação. Em todos os ensaios realizados, a distribuição acumulativa da velocidade de sedimentação mostra-se aproximada à distribuição acumulativa normal, significando que aquela pode ser perfeitamente caracterizada pelos parâmetros: velocidade média de sedimentação " \bar{S} " e desvio padrão " σ ".

Taxa de Escoamento Superficial:

Em tanques de sedimentação a remoção de partículas sedimentáveis aumenta, à medida que a velocidade de deslocamento horizontal da partícula (que é a velocidade de deslocamento do líquido) diminui, ou seja, à medida que a taxa de escoamento superficial diminui. Por outro lado, uma menor taxa de escoamento superficial acarretaria a necessidade da aplicação de grandes tanques de sedimentação, o que na prática não é economicamente viável. O aumento da taxa de escoamento superficial conduziria a tanques de sedimentação menores ou taxa de escoamento "Q" maior.

Sedimentação Floculenta: A remoção de partículas que floculam no decorrer do processo de sedimentação, é maior quando a tendência à floculação é grande, pois a soma das velocidades de sedimentação de cada partícula, resultará numa velocidade de assentamento maior que a velocidade de sedimentação das particuladas tomadas individualmente.

Fatores Hidrodinâmicos: A característica hidrodinâmica particular de cada Estação de Tra

tamento de Água, geralmente influi negativamente na eficiência dos processos de sedimentação. Em um tanque de sedimentação ideal, não são consideradas influências de fatores hidrodinâmicos tais como: intensidade de turbulência, estabilidade de escoamento, arrastamento de partículas do fundo do tanque, distribuição do tempo de permanência, diferença de temperatura (insolação) ventos, etc.. Em um tanque de sedimentação ideal, prevalece o escoamento de "pistão ideal", e partículas removidas não entram novamente em suspensão.

V.3 - REMOÇÃO DE TURBIDEZ EM JAR-TESTER

A pesquisa se limita a análise dos três primeiros fatores, descritos no parágrafo anterior, sobre a influência do processo de clarificação. Nas experiências realizadas em Jar-Tester, a influência de uma sedimentação flocculenta pode ser desprezada, o que é justificado por ser tão pequena a profundidade de sedimentação (7 a 8 cm), que a possibilidade de agregação apreciável dos flocos deve ser excluída. Não são considerados, também, os fatores hidrodinâmicos que possam alterar a eficiência de remoção de turbidez. A Tabela IV.15 mostra que a relação entre a turbidez relati-

Todas as considerações aqui apresentadas são deduzidas de ensaios onde se mantêm constantes parâmetros como: gradiente de velocidade de mistura rápida e lenta, pH, alcalinidade, temperatura, qualidade da água analisada e métodos de ensaio.

va a flocos não sedimentáveis e a turbidez inicial (T_{∞}/T_0), é determinada por:

1 - Concentração de Sulfato de Alumínio: como é de se esperar, a razão " T_{∞}/T_0 " diminui com o aumento da concentração de Sulfato de Alumínio, até o ponto correspondente à dosagem ótima do coagulante. Nos ensaios realizados com a água bruta da ETA do Alto Branco, a dosagem ótima de Sulfato de Alumínio corresponde aproximadamente a 55 ppm, onde T_{∞} assume valores de 1 a 2% do valor de T_0 . Dosagens do coagulante além de 55 ppm não produzem redução na razão T_{∞}/T_0 , e sim tendem a incrementá-la.

2 - Concentração e tipo de polieletrólito: A faixa de dosagens para todos os polieletrólitos pesquisados é em torno de 0,8 ppm. Dos polímeros estudados, "Drewfloc 21" mostrou-se mais eficiente na redução da razão T_{∞}/T_0 . Os polímeros pesquisados não mostraram tendência a coagulantes primários, não obstante ter-se verificado a sua eficiência quando utilizados como auxiliares a coagulantes metálicos. A combinação de 0,8 ppm de "Drewfloc 21" com 45 ppm de Sulfato de Alumínio, resulta numa porcentagem de turbidez não removível (T_{∞}) igual a 6% do valor inicial da turbidez (T_0), enquanto que para 55 ppm de Sulfato de Alumínio e 0,0 ppm de "Drewfloc 21", " T_{∞} " é igual a 2% de " T_0 ". O comportamento do "Drewfloc 307" e do "Separam AP 273 Premium" é um tanto irregular quanto à eficiência de redução da fração " T_{∞}/T_0 ". Para concentrações baixas de Sulfato de Alumínio (40 a 45 ppm), a redução da fração T_{∞}/T_0 é pouco ex

pressiva (Drewfloc 21), ou mesmo negativa (Separam AP 273 Premium). Para concentrações altas de Sulfato de Alumínio (55 a 70 ppm), os dois polímeros não são mais ativos quanto à redução de " T_{∞}/T_0 ". Entretanto, comparados ao "Drewfloc 21", os polímeros "Drewfloc 307" e "Separam AP 273 Premium" são menos expressivos.

A expressão " $1 - T_{\infty}/T_0$ " representa a remoção máxima que se pode obter em um tanque de sedimentação. A remoção máxima de turbidez ($1 - T_{\infty}/T_0$) só é verificada para uma taxa de escoamento superficial " S_0 " próxima a zero. Na prática, os valores de " S_0 " estão geralmente compreendidos entre 0,5 mm/s (baixa capacidade) e 1,0 mm/s (alta capacidade). A diminuição da eficiência de remoção de turbidez do seu valor máximo ($1 - T_{\infty}/T_0$ para $S_0 = 0$), para um valor correspondente a taxa de escoamento superficial aplicada na prática ($0,5 < S_0 < 1,0$ mm/s), depende da distribuição da velocidade de sedimentação. Nas Figuras IV.13 a IV.24, observa-se que a diminuição mais acentuada da eficiência de remoção, ocorre quando a velocidade média de sedimentação é igual à taxa de escoamento superficial.

Portanto, para uma alta eficiência de remoção de turbidez é necessário que a velocidade média de sedimentação seja grande comparando com a taxa de escoamento superficial. Para o caso particular da velocidade média de sedimentação ser igual à taxa de escoamento superficial, a eficiência de remoção é calculada:

$$r = 1 - (T_{\infty}/T_0) - (T_0 - T_{\infty})/T_0 \frac{\sigma}{\bar{S}} \int_{-\infty}^0 F(x) dx$$

$$r = 1 - (T_{\infty}/T_0) - (T_0 - T_{\infty})/T_0 \frac{\sigma}{\bar{S}} = 0,4$$

Em todas as experiências o valor de " \bar{S}/σ " estão na ordem de 2 a 3 de modo que, sob estas condições, a percentagem não removida, relacionada com partículas sedimentáveis é de 16 a 20% da fração total de turbidez removível.

As Figuras V.1 e V.2 mostram a eficiência de remoção de turbidez para concentrações de Sulfato de Alumínio de 40, 45, 55 e 70 ppm e para 1,0 ppm de "Drewfloc 21", "Drewfloc 307" e "Separam AP 273 Premium", quando se considera taxas de escoamento superficial de 0,5 mm/s e 1,0 mm/s.

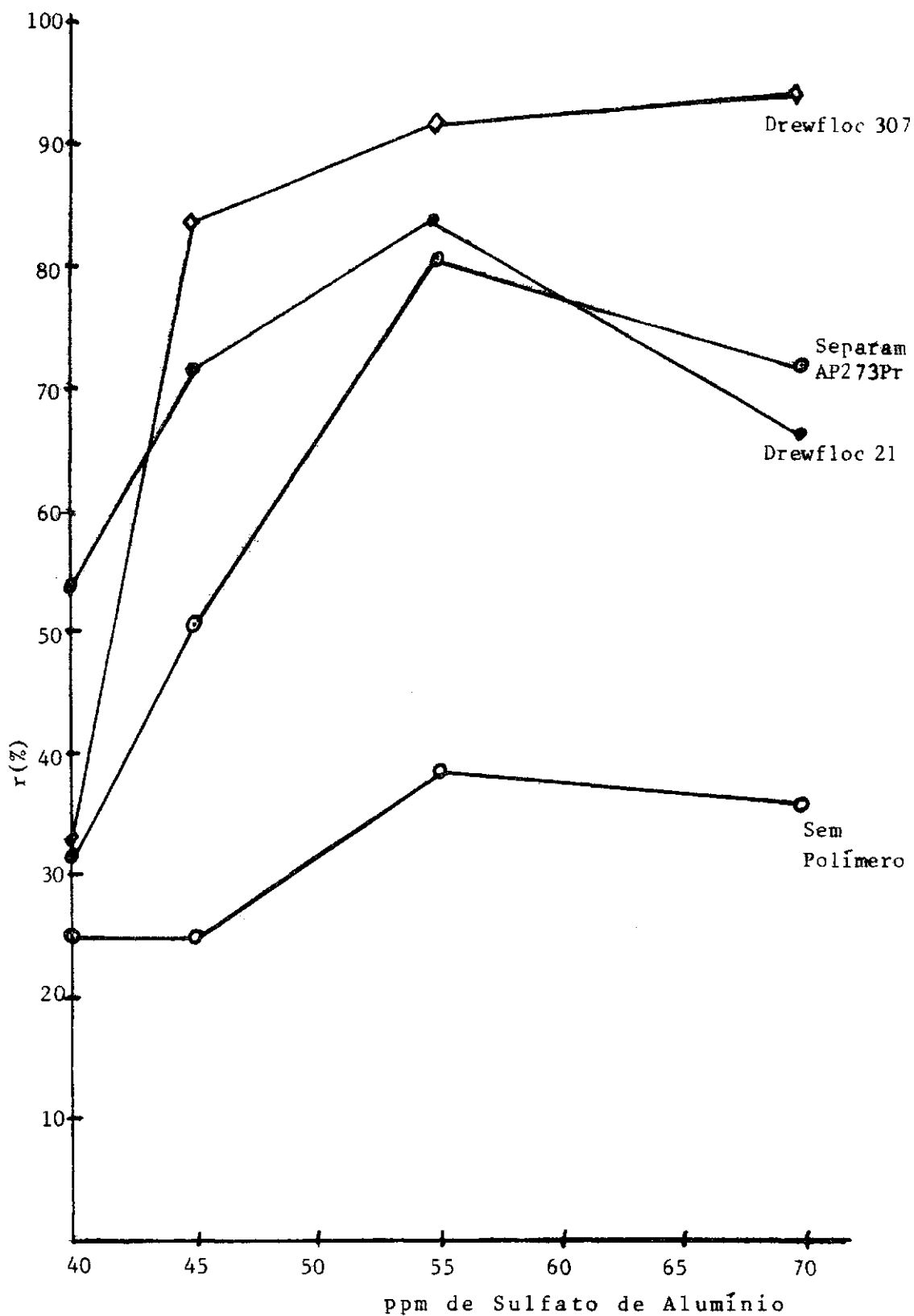


FIG.V.I - O rendimento de remoção de turbidez em um tanque ideal de sedimentação com uma taxa de escoamento superficial. $S_o=0,5$ mm/s (taxa baixa). A concentração de polieletrólitos é 1.0 ppm.

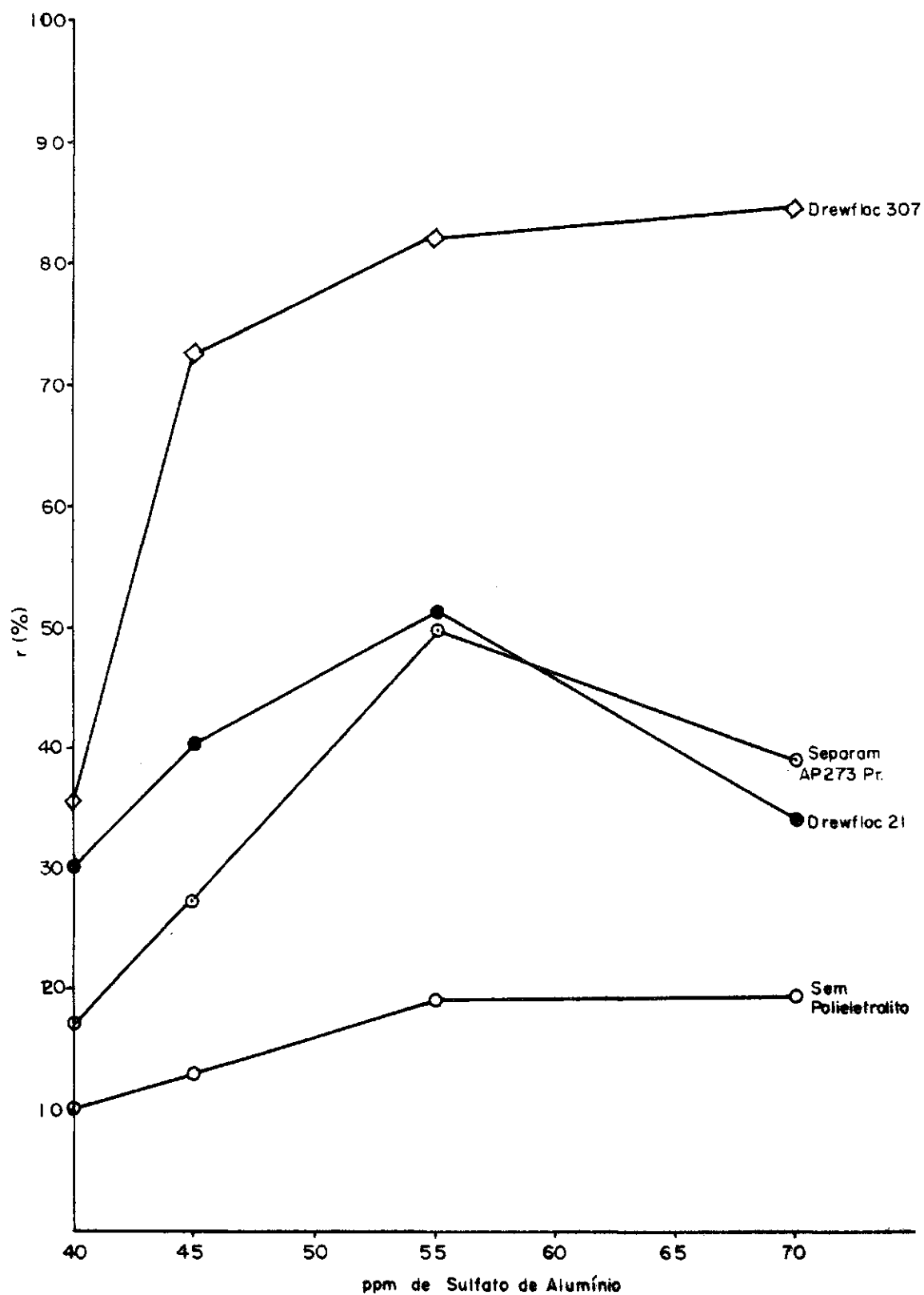


Fig V.2 - O rendimento de remoção de turbidez em um tanque ideal de sedimentação com uma taxa escoamento superficial $S_0 = 1.0 \text{ mm/s}$ (taxa alta). A concentração dos polieletrólitos é 1.0 ppm.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

1 - A distribuição da velocidade de sedimentação dos flocos formados da coagulação com Sulfato de Alumínio e polímeros sintéticos, pode ser aproximada à distribuição acumulativa normal quando se toma a turbidez como medida da concentração dos flocos.

2 - A distribuição da velocidade de sedimentação caracteriza-se por dois parâmetros: velocidade média de sedimentação " \bar{S} " e desvio padrão " σ ".

3 - A eficiência dos processos de clarificação, em termos de redução de turbidez, é determinada pela fórmula:

$$r = 1 - (T_{\infty}/T_0) - (T_0 - T_{\infty})/T_0 \cdot \frac{\sigma}{S_0} \cdot \int_{-\infty}^x F(x) dx$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-x^2/2} \quad \text{com, } x = \frac{S_s - \bar{S}}{\sigma}$$

onde, " S_0 " é a taxa de escoamento superficial, " \bar{S} " é a velocidade média de sedimentação, " σ " é o desvio padrão, " T_0 " é a turbidez da água bruta, e " T_∞ " é a turbidez após um longo período de sedimentação.

4 - Os ensaios em Jar-Tester possibilitam a determinação das grandezas " \bar{S} ", " σ " e " T_∞/T_0 ", características do processo de sedimentação assim como o cálculo da eficiência de clarificação para qualquer valor da taxa de escoamento superficial.

5 - Para uma alta eficiência do processo de clarificação, impõem-se duas condições: Fração baixa (T_∞/T_0) de turbidez não removível por sedimentação e valor alto da razão entre a velocidade média de sedimentação e a taxa de escoamento superficial (\bar{S}/S_0)

6 - O modelo matemático, ora proposto, oferece condições para um estudo comparativo dos processos de clarificação desenvolvidos em ensaios no Jar-Tester. O seu emprêgo, no estudo da influência de polímeros como auxiliares aos processos de clarificação de águas, possibilita a determinação da combinação ótima do tipo e concentração do coagulante e material auxiliar.

7 - O modelo matemático possibilita, ainda, outros estudos de forma individual ou combinada, tais como: Influência do gradiente de velocidade de mistura, pH ótimo de coagulação, dosagem ótima de coagulante e dosagem e tipo do polieletrólito.

8 - Particularmente para a água bruta da ETA do Alto Branco, o "Drewfloc 307" mostrou-se mais eficiente quanto à remoção de turbidez do que os demais polímeros estudados. A uma dosagem de 1,0 ppm de "Drewfloc 307", para concentrações de Sulfato de Alumínio de 55 ppm e 70 ppm, a turbidez removida corresponde a mais de 80% da turbidez inicial, para uma velocidade crítica de sedimentação (taxa de escoamento superficial) igual a 1,0 mm/s.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES

O presente trabalho propõe, para futuras pesquisas, as seguintes sugestões:

1 - Aplicação do modelo matemático desenvolvido a outros parâmetros e grandezas relevantes dos processos de clarificação, tais como:

- Análise do pH ótimo,
- Tempo de permanência durante a mistura lenta (determinação do valor ótimo do parâmetro característico GT).

2 - Utilização do modelo matemático desenvolvido, na relação entre a turbidez e outros parâmetros e grandezas afetados pelo processo de clarificação, como sejam:

- Cor,
- NMP (número mais provável)

de coliformes,

- Demanda de Cloro;

3 - Implantação do modelo matemático desenvolvido na prática do controle e otimização do tratamento de qualquer tipo de água.

APÊNDICE I

Valores de $\int_{-\infty}^x F(x) dx$ para diferentes "x" no intervalo $-2,9 \leq x \leq 2,9$. Para $x \leq -3$ é válido:

$$\int_{-\infty}^x F(x) dx = 0,000.$$

Para $x \geq 3$ é válido:

$$\int_{-\infty}^x F(x) dx = x$$

TABELA 1

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-2	0.008	0.006	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000
-1	0.084	0.070	0.057	0.046	0.037	0.030	0.023	0.018	0.014	0.011
-0	0.403	0.355	0.311	0.270	0,233	0.200	0.171	0.145	0.122	0.102
0	0.403	0.455	0.511	0.570	0.633	0,700	0.771	0.845	0.922	1.002
1	1.084	1.169	1.257	1.345	1.437	1.529	1.623	1.718	1.814	1.911
2	2.008	2.106	2.204	2.303	2.402	2.502	2.601	2.701	2.800	2.900

APÊNDICE II

1. Programa em linguagem FOR-
TRAM, para a execução do modelo matemático desenvolvido nes-
te trabalho.

\$ JOB

EXECUÇÃO MODELO

```

INTEGER TEMP(7), ENTRAD/5/, SAIDA/6/
DIMENSION X(7), Y(7), T(9), PP(7), KAUX(4), ITPOL(2)
DATA KAUX/40, 45, 55, 70/, ITPOL/307,21/
H = 84
READ (ENTRAD, 960, END = 300)NUM
5 CONTINUE
WRITE (SAIDA, 800)
800 FORMAT (1H1)
READ (ENTRAD,900, END=300)KOD, KSAL, CON,(T(I),I=1,9),
1(TEMP(I), I=1, 7)
900 FORMAT (2I1, F3.1,9F6.2, 7I2)
IF(KOD.EQ.3)WRITE (6,55)
IF(KOD.NE.3) WRITE (SAIDA, 6) ITPOL (KOD)
WRITE (SAIDA, 8) KAUX(KSAL)
WRITE (SAIDA),9) CON
WRITE (SAIDA,25) (T(I), I=1,9), (TEMP(I),I = 1,7)
DO 22 I=1, 7
X(I) = (H-2*(I+1))/(TEMP(I)*60)
22 PP(I)=(T(I+1)-T(9))/(T(1)-T(9))*100
NC = 0
J = 0
I = 0
10 CONTINUE
I = I+1
50 CONTINUE

```

```

PA = 0
J = J+1
IF(NUM.EQ.NC) GOTO 200
7 P=PP(J)
  ESCALA = -1
  NC = NC+1
  IF (P.LT. 2.5) GOTO 50
  IF (P.GT.97.5) GOTO 50
  IF (P.LT.50.) GOTO 60
  PA = 1
  P = 100.-P
60 ESCALA = -ESCALA
  CONTINUE
  Y(I) = ESCALA*TABELA(P)
  IF(PA.EQ.1) PP(I)=100.-P
  IF(PA.NE.1) PP(I)=P
  X(I) = X(J)
200 GOTO 10
  CONTINUE
  K = I-1
  SUMX = 0.
  SUMY = 0.
  DO 15 I = 1,K
  WRITE (SAIDA, 920) I, X(I), I, PP(I), I, Y(I)
15 SUMX = SUMX + X(I)
  SUMY = SUMY + Y(I)
  XBAR = SUMX/K
  YBAR = SUMY/K
  XYDIFF = 0.
  XSQDF = 0.
  DO 20 I=1, K
  XYDIFF=XYDIFF + (X(I) - XBAR)* (Y(I)-YBAR)
20 XSQDF = XSQDF + (X(I) - XBAR) **2
  A = XYDIFF/XSQDF
  B = YBAR - A*XBAR
  WRITE (SAIDA, 930)A,B
  VAL1= -B/A
  VAL2 = (.994-B)/A
  VAL=VAL2-VAL1
  RO=1 - T(9)/T(1)
  WRITE (SAIDA, 950)RO, VAL, VAL1
  IF(VAL.LE.0.)GO TO 28
  IF(VAL1.LT.1.8*VAL)GO TO 29
  DO 30 I= 10,80
  ZI= I-30
  Z=ZI/10
  S1=VAL*Z+VAL1
  IF(S1.LT.0.1)GO TO 30
  R = 1-T(9)/T(1)-((T(1)-T(9))/T(1)*VAL/S1*VALOR(Z)
30 WRITE(SAIDA, 940)S1,$
  CONTINUE
  IF(S1.GE.1.)GO TO 5
31 Z=Z+0.1

```

```

S1=VAL*Z+VAL1
R=1-T(9)/T(1)-(T(1)-T(9))/T(1)*VAL/S1*VALOR(Z)
WRITE(SAIDA,970)S1,R
IF(S1.LT.1.)GO TO 31
GO TO 5
28 WRITE(6,26)
GO TO 5
29 WRITE(6,27)
GO TO 5
300 CONTINUE
55 FORMAT(//,10X,'TIPO DE POLIELETROLITO: SEPARAN AP273PR')
6 FORMAT(//,10X,'TIPO DE POLIELETROLITO: DREWFLOC ',I3)
8 FORMAT(//,10X,'CONCENTRAÇÃO DE SULFATO DE ALUMINIO ',I2)
9 FORMAT(//,10X,'CONCENTRAÇÃO DE POLIELETROLITO',F3.1)
25 FORMAT(//,10X,'TURBIDEZ DE ENTRADA: ',9(F6.2,2X),//,TEMPO DE
1ENTRADA: ',7(I2,2X))
920 FORMAT(/,10X,'X(',I1,')=',F6.2,' P(',I1,')=',F6.2,' Y(',I1,')=',F
16.2)
930 FORMAT(//,10X,'A=',F9.6,2X,' B = ',F9.6)
940 FORMAT(10X,'S1=',F9.7,2X,' R=',F9.7)
950 FORMAT(/,10X,'RENDIMENTO MAXIMO=',F9.7,//,10X,'SIGMA=',F9.7,//,1
10X,'S MEDIA=',F9.7)
970 FORMAT(//,10X,'S1 ESPECIAL=',F9.7,' R ESPECIAL = ',F9.7)
26 FORMAT(//,10X,'ERRO: SIGMA TEM VALOR NEGATIVO
27 FORMAT(//,10X,'ERRO: S MEDIA PEQUENO MENOR OU IGUAL A 1.8 SIGMA')
960 FORMA T(I1)
STOP
END

```

```

FUNCTION TABELA (PERCNT)
REAL MAP(116)
DATA (MAP(I), I=1,44)/
*1.960,1.943,1.926,1.910,1.896,1.881,1.867,1.853,1.838,1.826,1.812,
*1.799,1.786,1.774,1.763,1.751,1.739,1.728,1.717,1.706,1.695,1.685,
*1.675,1.655,1.655,1.645,1.635,1.626,1.617,1.608,1.599,1.589,1.580,
*1.571,1.563,1.555,1.547,1.539,1.531,1.523,1.515,1.507,1.499,1.491/
DATA (MAP(I), I=45,88)/
*1.483,1.475,1.468,1.461,1.454,1.447,1.440,1.433,1.426,1.419,1.412,
*1.405,1.398,1.391,1.384,1.377,1.371,1.365,1.359,1.353,1.347,1.341,
*1.335,1.329,1.323,1.317,1.311,1.305,1.299,1.293,1.287,1.282,1.227,
*1.175,1.126,1.080,1.036,0.994,0.954,0.915,0.878,0.842,0.806,0.772/
DATA (MAP(I), I=89,116)/
*0.739,0.706,0.674,0.643,0.613,0.583,0.553,0.524,0.496,0.468,0.440,
*0.412,0.385,0.358,0.332,0.305,0.279,0.253,0.228,0.202,0.176,0.151,
*0.126,0.100,0.075,0.050,0.025,0.000/
IF(PERCNT.LT. 10.) I = 76.1-((10-PERCNT)*10)
IF (PERCNT.GE. 10.) I=PERCNT+66.1
TABELA = MAP(I)
RETURN
END

```

```
FUNCTION VALOR (X)
DIMENSION TAB(50)
DATA TAB/0.008,0.011,0.014,0.018,0.023,0.030,0.037,0.046,0.057,
100.070,0.084,0.102,0.122,0.145,0.171,0.200,0.233,0.270,0.311,
100.355,0.403,0.455,0.511,0.570,0.633,0.700,0.771,0.845,0.922,
101.002,1.084,1.169,1.257,1.346,1.437,1.529,1.623,1.718,1.814,
101.911,2.008,2.106,2.204,2.303,2.402,2.502,2.601,2.701,2.800,
102.900/
IF(X.LE.0)I=X*10+21
IF(X.GE.3)GO TO 1
I=X*10.+21.01
VALOR=TAB(I)
RETURN
1 VALOR=X
RETURN
END

$ENTRY
```

2 - Resultados obtidos da execução do modelo matemático pelo Programa, para 1,0 p.p.m. de "Drewfloc 21" e para 55 p.p.m de Sulfato de Alumínio.

TIPO DE POLIELETROLITO: DREWFLOC 21

CONCENTRAÇÃO DE SULFATO DE ALUMINIO 55

CONCENTRAÇÃO DE POLIELETROLITO 0.8

TURBIDEZ DE ENTRADA: 110.00 110.00 83.00 17.00 6.30 4.70 3.60 3.10 2.00

TEMPO DE ENTRADA: 1 2 4 6 10 15 30

X(1) = 0.65 P(1) = 75.00 Y(1) = 0.67

X(2) = 0.32 P(2) = 13.89 Y(2) = -1.13

X(3) = 0.21 P(3) = 3.98 Y(3) = -1.76

A = 5.464041 B = -2.873355

RENDIMENTO MAXIMO = 0.9818182

SIGMA = 0.1819165

S MEDIA = 0.5258663

ST =0.1620332	R =0.9729998
S1 =0.1802250	R =0.9709168
S1 =0.1984167	R =0.9692158
S1 =0.2166082	R =0.9669759
S1 =0.2347999	R =0.9643224
S1 =0.2529915	R =0.9606385
S1 =0.2711832	R =0.9574490
S1 =0.2893749	R =0.9534259
S1 =0.3075665	R =0.9487174
S1 =0.3257582	R =0.9434381
S1 =0.3439497	R =0.9381980
S1 =0.3621414	R =0.9315116
S1 =0.3803331	R =0.9245256
S1 =0.3985247	R =0.9168329
S1 =0.4167164	R =0.9085259
S1 =0.4349080	R =0.8996819
S1 =0.4530997	R =0.8899712
S1 =0.4712913	R =0.8794942
S1 =0.4894829	R =0.8683365
S1 =0.5076746	R =0.8569229
S1 =0.5258663	R =0.8449405
S1 =0.5440579	R =0.8324462

S1 =0.5622495	R =0.8194897
S1 =0.5804412	R =0.8064222
S1 =0.5986329	R =0.7929555
S1 =0.6168245	R =0.7791249
S1 =0.6350161	R =0.7649616
S1 =0.6532078	R =0.7507669
S1 =0.6713995	R =0.7365434
S1 =0.6895911	R =0.7222933
S1 =0.7077828	R =0.7082711
S1 =0.7259743	R =0.6942134
S1 =0.7441661	R =0.6801230
S1 =0.7623576	R =0.6664708
S1 =0.7805493	R =0.6529973
S1 =0.7987410	R =0.6399139
S1 =0.8169326	R =0.6269760
S1 =0.8351243	R =0.6143878
S1 =0.8533159	R =0.6021271
S1 =0.8715076	R =0.5901732
S1 =0.8896993	R =0.5787082
S1 =0.9078909	R =0.5675061
S1 =0.9260826	R =0.5567438
S1 =0.9442741	R =0.5462071
S1 =0.9624659	R =0.5360689
S1 =0.9806576	R =0.5261247
S1 =0.9988492	R =0.5167214
S1 =1.0170400	R =0.5074785
S1 =1.0352310	R =0.4987332
S1 =1.0534230	R =0.4901211
S1 =1.0716150	R =0.4818004
S1 =1.0898060	R =0.4737580
S1 =1.1079980	R =0.4659798
S1 =1.1261900	R =0.4584528
S1 =1.1443810	R =0.4511647
S1 =1.1625730	R =0.4441052
S1 =1.1807650	R =0.4372630
S1 =1.1989560	R =0.4306284
S1 =1.2171480	R =0.4241924
S1 =1.2353400	R =0.4179456
S1 =1.2535320	R =0.4118805
S1 =1.2717230	R =0.4059887
S1 =1.2899150	R =0.4002628
S1 =1.3081060	R =0.3946964
S1 =1.3262980	R =0.3892828
S1 =1.3444900	R =0.3840155
S1 =1.3626810	R =0.3788888
S1 =1.3808730	R =0.3738976
S1 =1.3990650	R =0.3690358
S1 =1.4172560	R =0.3642989
S1 =1.4354480	R =0.3596822

B I B L I O G R A F I A

- 1 - Bier, M. and Cooper, F.C., "Electrical Phenomena at Surfaces", Proc. Fourth Rudolfs Res. Conf. Rutgers, N. Jersey, John Wiley & Sons Inc., N.Y., 220-221 (1967)
- 2 - Haandel, A.C., "Apostila de Tratamento de Água", Cap. III e IV, Dep. Eng. Civil, CCT.U.F.Pb. (1976).
- 3 - Singley, J.F., "Theory and Mechanism of Polyelectrolytes as Coagulant Aids", Ed. Committee of Amer. Water Works Assoc., Chicago/Illinois, June 4, (1972).
- 4 - Overbeek, J.Th.G., and Lijklema, J., "Electric Potentials in Colloidal", Academic Press Inc., N.Y. (1959).
- 5 - Derjaguin, B.V., and Landau, L., Acta Physicochimica, 14, 633 (1941).
- 6 - LaMer, V.K., "Coagulation versus the Flocculation of Colloidal Dispersion by High Polymers (Polyelectrolytes)", Proc. Fourth Rudolf Res. Conf. Rutgers, N. Jersey, John Wiley & Sons Inc., N.Y., 260-262 (1967).
- 7 - Brønsted, J.N., and Volqvartz, K., Z. Physik Chem., 134, 97 (1928).
- 8 - Black, A.P., Proc. First Rudolfs Res. Conf., 106 (1960)
- 9 - Black, A.P., and Christman, R.G., J. Amer. Water Works Assoc., 53, 737 (1961)

- 10 - C.E.P.I.S., "Diseño y Control de los Processos de Clarificación del Agua".
- 11 - The Dow Chemical Company, "Separam Polymers".
- 12 - LaMer, V.K., and Healey, T.W., J.Phys.Chem., **67**,2417(1963)
- 13 - Fair, G.M., Geyer, J.C., and Okun, D.A., "Water and Wastewater Engineering", vol 2, Chap. 25,1-13, John Wiley & Sons, N.Y. (1968).
- 14 - Camp, T.R., and Stein, P.C., "Velocity Gradients and Internal Work in Fluid Motion", J.Boston Soc. Civ.Eng., **30**,219-237(1943).
- 15 - Kalinski, A.A., "Settling Characteristics of Suspensions in Water Treatment Process", J.Amer.Water Works Assoc., **40**, N.2,113-114(1947).
- 16 - McGauhey, P.H., "Theory of Sedimentation", J.Amer. Water Works Assoc., 437-446(1956).
- 17 - Weber, W.J.Jr., "Physicochemical Processes for Water Quality Control", John Wiley & Sons, N.Y.(1972).
- 18 - Hazen,A., "On Sedimentation", Amerc.Soc.Civ.Eng., **53**,45(1904)
- 19 - Knoppert, P.L., "Benzinking", Rotterdam, Netherlands.
- 20 - Fernandez, P.J., "Introdução à Teoria das Probabilidades", Livros Tec. e Cient., Ed.S.A., Ed.Univ.Brasilia, R.J., GB(1973).

- 21 - Camp, T.R., "Study of Rational Design of Settling Tanks",
Sew.Ind.Wastes, **8**,742(1936).
- 22 - Camp, T.R., "Studies of Sedimentation Design", Sew.Ind.
Wastes, **25**,1(1953).
- 23 - Black, A.P., "Electrokinetic Characteristics of Hydrous
Oxides of Aluminium and Iron", Proc. Fourth Rudolfs
Res.Conf.Rutgers, N.Jersey, John Wiley & Sons Inc.,
N.Y.,278(1967).
- 24 - Matijević,E., "Charge Reversal of Lyophobic Colloids",
Proc.Fourth Rudolfs Res.Conf.Rutgers,N.Jersey, John
Siley & Sons Inc., N.Y.,328(1967)
- 25 - Thomas, J.B., "Statiscal Communication Theory", **44**,298
(1968).
- 26 - Spiegel, M.R., "Estatistica", Trad. Constantino, P.,Ao
Livro Tecnico, S.A., Rio, 200-561(1968).