



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL DE SUSPENSÕES
FLOCULENTAS**

Janaina Ferreira Nunes

Uberlândia – MG

2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL DE SUSPENSÕES FLOCULENTAS

Janaina Ferreira Nunes

Orientador: Prof. Dr. João Jorge Ribeiro
Damasceno

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N972e Nunes, Janaina Ferreira, 1980-
Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões
floculentas / Janaina Ferreira Nunes. - 2008.
80 f. : il.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Separação (Tecnologia) - Teses. 2. Floculação - Teses. I.
Damasceno João Jorge Ribeiro. II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. III. Título.

CDU:

66.066

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 29 DE FEVEREIRO DE 2008.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
(Orientador – FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
(FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Ubirajara Coutinho Filho
(FEQUI/UFU)

Dr. Fábio de Oliveira Arouca
(Pós - Doutorando – DEQ/UFSCar)

Dedico este trabalho aos meus pais, Angela e Valdir, que sempre me apoiaram e sem os quais não chegaria até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e pela força para poder concluir meus estudos.

Aos meus pais, Angela Maria Bastazine Ferreira Nunes e Valdir Amadeu Ferreira Nunes, pelo sacrifício para que eu pudesse chegar onde estou e dedicação em todos os momentos de minha vida.

Aos meus irmãos, Aline e Guilherme, pelo apoio e compreensão.

Aos meus familiares de um modo geral que sempre estiveram na torcida pelo meu sucesso.

Ao meu namorado, José Eduardo, pelo carinho e companheirismo.

Ao meu orientador e amigo, João Jorge Ribeiro Damasceno, o qual admiro muito e que me ajudou a crescer pessoal e profissionalmente.

Aos amigos Juliana Lira, Juliana Alves, Eliane, Lygia, Helena, Marcela, Maíra, Ballu, Walter e Fábio Arouca, que sempre me ajudaram e apoiaram quando precisei.

Aos funcionários Silvino, José Henrique, Anísio, Cleide, Thiago, Zuleide, Dona Ione e Sr. Alcides.

Aos integrantes da banca por aceitarem avaliar este trabalho.

A CAPES pelo suporte financeiro.

E a todos que em mim acreditaram e me ajudaram de algum modo.

"O que faz a gente ser grande é ser como o mar: incansável na sua procura pela onda perfeita,
até descobrir que a perfeição está na própria busca".

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABELAS	iii
SIMBOLOGIA	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
 CAPÍTULO 1	 1
 CAPÍTULO 2	 4
2.1 – Definições importantes	4
2.2 – Trabalhos relevantes na área	5
 CAPÍTULO 3	 21
3.1 – As equações da conservação da massa e da quantidade de movimento por meio da Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo	21
3.1.1 – Fundamentos da Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo.....	21
3.1.2 – A equação da conservação da massa dos componentes da mistura	22
3.1.3 – A equação da conservação da quantidade de movimento	23
3.1.4 – Aplicação da Teoria das Misturas ao caso de sistemas sólido - fluido	26
3.1.5 – Teoria constitutiva.....	27
3.1.6 – O sedimento compressível.....	29
3.2 – O modelo de TILLER e CHEN (1988).....	30
 CAPÍTULO 4	 34
4.1 – Materiais utilizados	34
4.2 – Unidade Experimental	35
4.3 – Metodologia	38
4.3.1 – Caracterização de suspensões floculentas	39
4.3.2 – Determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos	41
4.3.3 – Determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade ..	44

4.3.4 – Testes de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas.....	47
4.3.5 – Cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de KYNCH (1952).....	47
4.3.6 – Cálculo da capacidade do sedimentador pelo modelo de TILLER e CHEN (1988).....	48
4.3.7 – Procedimento para operação contínua do sedimentador convencional.....	48
CAPÍTULO 5	49
5.1 – Caracterização de suspensões floculentas.....	49
5.1.1 – Resultados do planejamento experimental.....	49
5.1.2 – Resultados do cálculo da densidade e diâmetro do floco.....	50
5.2 – Resultados dos testes de determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos.....	51
5.3 – Resultados dos testes de determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade.....	55
5.4 – Resultados dos testes de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas	58
5.5 – Resultados do cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de KYNCH (1952)	58
5.6 – Resultados do cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de TILLER e CHEN (1988)	59
5.7 – Procedimento sugerido para operação contínua do sedimentador convencional.....	60
CAPÍTULO 6	63
6.1 – Conclusões	63
6.2 – Sugestões.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
APÊNDICE A	69
APÊNDICE B.....	73
APÊNDICE C	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – O processo de sedimentação em batelada segundo a teoria de Kynch.....	7
Figura 3.1 – Vista esquemática ilustrando a diferença entre o sedimento de KYNCH ou incompressível e o sedimento compressível em termos da concentração no sedimento.	30
Figura 3.2 – Altura do sedimento em função do fluxo de sólidos em um espessador contínuo.	32
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica para o caulim.	34
Figura 4.2 – Esquema da unidade experimental.	35
Figura 4.3 – Desenho esquemático com as principais dimensões do sedimentador (SILVA 2004).....	36
Figura 4.4 – Teste de sedimentação em proveta para determinação da velocidade de sedimentação (SILVA 2004).	47
5.1 – Superfície de resposta do planejamento experimental	49
5.2 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento para sedimentação sem floculante	53
5.3 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento para sedimentação com floculação.....	54
5.4 – Comparativo da permeabilidade para experimentos de sedimentação e sedimentação com floculante.....	55
5.5 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) para sedimentação sem floculante	56
5.6 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) para sedimentação com floculante.....	56
5.7 – Teste de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas.....	57
5.8 – Curvas de capacidade para sedimentação sem e com floculante	58
Figura A.1 – Velocidade de sedimentação para pH 5,5 e 0,150 mL de floculante.....	69
Figura A.2 – Velocidade de sedimentação para pH 6,1 e 0,136 mL de floculante.....	69
Figura A.3 – Velocidade de sedimentação para pH 6,1 e 0,164 mL de floculante.....	70
Figura A.4 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,130 mL de floculante.....	70
Figura A.5 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de floculante 1.....	70
Figura A.6 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de floculante 2.....	71
Figura A.7 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de floculante 3.....	71
Figura A.8 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de floculante 4.....	71
Figura A.9 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,170 mL de floculante.....	72

Figura A.10 – Velocidade de sedimentação para pH 8,9 e 0,136 mL de floculante.....	72
Figura A.11 – Velocidade de sedimentação para pH 8,9 e 0,164 mL de floculante.....	72
Figura B.1 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,010$ na sedimentação.	73
Figura B.2 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,015$ na sedimentação.	73
Figura B.3 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,020$ na sedimentação.	74
Figura B.4 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,025$ na sedimentação.	74
Figura B.5 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,030$ na sedimentação.	74
Figura B.6 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,035$ na sedimentação.	75
Figura B.7 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,040$ na sedimentação.	75
Figura B.8 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,045$ na sedimentação.	75
Figura B.9 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,050$ na sedimentação.	76
Figura B.10 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,010$ na sedimentação com floculante.	76
Figura B.11 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,015$ na sedimentação com floculante.	76
Figura B.12 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,020$ na sedimentação com floculante.	77
Figura B.13 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,025$ na sedimentação com floculante.	77
Figura B.14 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,030$ na sedimentação com floculante.	77
Figura B.15 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,035$ na sedimentação com floculante.	78
Figura B.16 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,040$ na sedimentação com floculante.	78
Figura B.17 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,045$ na sedimentação com floculante.	78
Figura B.18 – Velocidade de sedimentação para $\epsilon_s = 0,050$ na sedimentação com floculante.	79
Figura C.1 – Velocidade de sedimentação para proveta de 3,9 cm de diâmetro.	80
Figura C.2 – Velocidade de sedimentação para proveta de 7,0 cm de diâmetro.	80
Figura C.3 – Velocidade de sedimentação para proveta de 8,0 cm de diâmetro.	81
Figura C.4 – Velocidade de sedimentação para o sedimentador convencional.....	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1– Parâmetros do modelo RRB.	35
Tabela 4.2 – Principais dimensões do sedimentador.	37
Tabela 4.3 – Planejamento experimental.....	39
Tabela 4.4 – Correção do expoente n em função do número de Reynolds.	40
Tabela 5.1 – Resultado do Planejamento Experimental.....	49
Tabela 5.2 – Caracterização do floco.	51
Tabela 5.3 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim na sedimentação sem flocculante.	52
Tabela 5.4 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim na sedimentação com flocculante.	53
Tabela 5.5 – Resultados de permeabilidade para os ensaios de sedimentação sem e com flocculante.	55
Tabela 5.6 – Parâmetros estimados para equação constitutiva de permeabilidade.....	56
Tabela 5.7 – Fluxo de sólidos pelo Método de KYNCH (1952).	58
Tabela 5.8 – Comparação entre os métodos de KYNCH e de TILLER e CHEN.	59

SIMBOLOGIA

a – parâmetro da equação 4.22	$M^0 L^0 T^0$
b – parâmetro da equação 4.22	$M^0 L^0 T^0$
C_D – coeficiente de arraste	$M^0 L^0 T^0$
d - diâmetro médio das partículas	$M^0 L^1 T^0$
d_f - diâmetro médio do floco	$M^0 L^1 T^0$
D' – parâmetro da equação 4.1	$M^0 L^1 T^0$
$\underline{F}_b$ – forças de campo	$M^0 L^1 T^{-2}$
$\underline{F}_s$ – forças de superfície	$M^0 L^1 T^{-2}$
$\underline{F}_{int}$ – forças de interação	$M^0 L^1 T^{-2}$
g – aceleração da gravidade	$M^1 L^{-2} T^0$
k – permeabilidade	$M^0 L^2 T^0$
k_f – grau de floculação	$M^0 L^0 T^0$
k_0 – parâmetro da equação 4.30	$M^0 L^0 T^0$
k_1 – parâmetro da equação 4.8	$M^0 L^0 T^0$
k_2 – parâmetro da equação 4.9	$M^0 L^0 T^0$
L – altura do sedimento	$M^0 L^1 T^0$
m_i – massa do constituinte i contido na mistura	$M^1 L^0 T^0$
m_s – massa de sólidos no sedimento	$M^1 L^0 T^0$
$\underline{m}$ – força resistiva	$M^1 L^{-2} T^{-2}$
n – parâmetro da equação 4.2	$M^0 L^0 T^0$
$\underline{n}$ - vetor normal-unitário à superfície S	$M^0 L^0 T^0$
P_s – pressão dos sólidos	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
P_a – parâmetro da equação 4.23	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
P_{sc} – pressão dos sólidos crítica	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
q_s - fluxo de sólidos no sedimentador	$M^0 L^1 T^{-1}$
Re_∞ - número de Reynolds	$M^0 L^0 T^0$
t - tempo	$M^0 L^0 T^1$
$\underline{\underline{T}}_i$ – tensor tensão no constituinte i	$M^1 L^{-1} T^{-2}$
$\underline{v}_i$ – vetor velocidade do componente i da mistura	$M^0 L^1 T^{-1}$
v_f – velocidade do fluido	$M^0 L^1 T^{-1}$
$\underline{v}^*$ – velocidade relativa fluido - sólido	$M^0 L^1 T^{-1}$

v_s - velocidade de sedimentação num ensaio em batelada	$M^0 L^1 T^{-1}$
v_{s0} - velocidade inicial de sedimentação num ensaio em batelada	$M^0 L^1 T^{-1}$
$v_{t\infty}$ - velocidade terminal da partícula isolada no regime de Stokes.....	$M^0 L^1 T^{-1}$
V - volume da mistura	$M^0 L^3 T^0$
V_f - volume do fluido	$M^0 L^3 T^0$
V_{floc} - volume de floculante	$M^0 L^3 T^0$
V_s - volume do sólido.....	$M^0 L^3 T^0$
V_{sed} - volume de sedimento	$M^0 L^3 T^0$
x - posição	$M^0 L^1 T^0$
Y - fração de tamanhos de partículas com diâmetro inferior a d	$M^0 L^0 T^0$
z_0 - altura inicial da suspensão em um teste de proveta.....	$M^0 L^1 T^0$
z_i - interseção da tangente à curva de sedimentação	$M^0 L^1 T^0$
β - parâmetro da equação 4.23	$M^0 L^0 T^0$
η - parâmetro da equação 4.30	$M^0 L^0 T^0$
ψ - propriedade volumétrica qualquer associada a uma mistura.....	$M^0 L^{-3} T^0$
μ - viscosidade do fluido	$M^1 L^{-1} T^{-1}$
ρ - densidade do fluido.....	$M^1 L^{-3} T^0$
ρ_i - concentração mássica aparente de um constituinte da mistura	$M^1 L^{-3} T^0$
ρ_{fl} - densidade do floco	$M^1 L^{-3} T^0$
ρ_s - densidade do sólido seco.....	$M^1 L^{-3} T^0$
ε_f - concentração volumétrica do fluido	$M^0 L^0 T^0$
ε_s - concentração volumétrica do sólido	$M^0 L^0 T^0$
ε_{sc} - concentração volumétrica de sólidos crítica	$M^0 L^0 T^0$
ε_{sm} - concentração volumétrica de sólidos máxima	$M^0 L^0 T^0$
ε_{s0} - concentração volumétrica inicial de sólidos	$M^0 L^0 T^0$
ε_{su} - concentração volumétrica de sólidos na lama	$M^0 L^0 T^0$
ϕ - esfericidade	$M^0 L^0 T^0$

RESUMO

A sedimentação é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química. Nela, as fases sólida e líquida são separadas devido à diferença de peso. Para o caso de partículas sólidas muito pequenas, a eficiência de separação diminui drasticamente, inviabilizando a separação com padrões aceitáveis, tornando-se então necessária a pesquisa de métodos para otimização da eficiência de separação. Uma maneira de contornar tal situação consiste na adição de agentes flocculantes, cuja ação consiste em produzir estruturas complexas (flocos) com os quais as partículas sólidas interagem e podem ser adsorvidas. Tais estruturas possuem peso suficientemente alto para promover a separação de forma adequada. Os objetivos desse trabalho foram estudar as variáveis que afetam o desempenho de sedimentadores convencionais operando com suspensões previamente flocculadas, tais como o pH e a massa de material flocculante e apresentar um procedimento para sedimentação contínua com flocculação utilizando o sedimentador convencional. Os experimentos foram conduzidos utilizando-se suspensões aquosas de caulim, com ajuste de pH, flocculada com sulfato férrico. Foram feitos experimentos em batelada em proveta para encontrar os pontos ótimos de pH e concentração de flocculante na sedimentação; experimentos em batelada em proveta e no sedimentador para determinação da taxa máxima de sedimentação pelos métodos de Kynch (1952) e Tiller e Chen (1988). O planejamento experimental resultou em um pH ótimo de operação de 7,5 e concentração ótima de flocculante de 0,0031mL/g de caulim; utilizando o processo de flocculação conseguiu-se um aumento do diâmetro médio da partícula de 2,9 para 311 μ m; os ensaios de proveta se mostraram muito eficientes apesar da simplicidade, pois obteve-se um bom ajuste dos resultados experimentais pelas equações constitutivas de TILLER e LEU (1980) para pressão e permeabilidade; houve uma influência da área da seção transversal na velocidade de sedimentação, as provetas de maiores diâmetros proporcionaram as maiores velocidades, indicando que o efeito de parede interfere no processo; o cálculo da capacidade do sedimentador pelos métodos de Kynch e Tiller e Chen forneceram um melhor desempenho utilizando-se o processo de flocculação, mostrando assim a importância de se utilizar este processo nos casos de sedimentação de partículas muito finas. O estudo da sedimentação com flocculação proporcionou a sugestão de um procedimento para a operação contínua do sedimentador convencional operando com suspensões previamente flocculadas.

Palavras chave: sedimentador, flocculação e velocidade de sedimentação.

ABSTRACT

The settling vessels are equipment destined to solid-liquid separation; usually have continuous operation, with a circular section, presenting one conic and one cylindrical part. The solid particle splitting with small granular becomes difficult through the operation of conventional sedimentation. An expedient very used in the industry is the flocculant substance addition, whose objective is to promote the precipitation of particles, in which decantation speed is upper than the single one. The present work aim the study of the burst operational conditions that influence the formation and the stability of these aggregates, the flake and the effect of pH and the concentration of flocculant in the capacity of conventional settling vessel, which area of the transversal remains constant, considering this operational conditions. The experiments were made using a kaolin suspension, with pH adjustment and iron sulfate as flocculant. It was made batch sedimentation tests to find great points of pH and flocculant concentration on sedimentation and calculate the maxim rate of sedimentation by Kynch (1952) method. The experimental design results in a great pH of 7,5 and flocculant concentration of 0,0031mL/g of kaulim; using the flocculation process the diameter particle raised of 5,06 to 311 μ m; the batch sedimentation experiments were very efficient in spite of simplicity, obtaining a good adjustment of experimental data by constitutive equations of TILLER e LEU (1980) for pression and permeability; the area of transversal section had an influence in sedimentation velocity, the biggest one provide a bigger velocity, indicating a wall effect in the process; calculating the settling vessel capacity by Kynch (1952) method, a great performance was showed up with flocculation process, showing its importance in sedimentation of very small particles, and this study ended in a suggestion of a procedure to a continuous operation of a conventional settling vessel with suspensions previously flocculated.

Key – words: settling vessel, flocculation and sedimentation velocity.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A sedimentação é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química. Nela, as fases sólida e líquida são separadas devido à diferença de peso. Os sedimentadores apresentam geralmente operação contínua, apresentando uma parte cilíndrica e outra cônica, esta com a função de facilitar a retirada da corrente de fundo do equipamento. A parte superior do equipamento é dotada de um vertedouro por onde transborda a corrente de líquido clarificado. A alimentação é posicionada na região central do equipamento, podendo ser feita no topo ou interior do mesmo.

As operações de sedimentação são divididas didaticamente em duas classes: espessamento e clarificação. No espessamento o produto de interesse é o sólido e na clarificação, o produto de interesse é o líquido clarificado.

A Figura (1.1) mostra uma vista esquemática de um sedimentador.

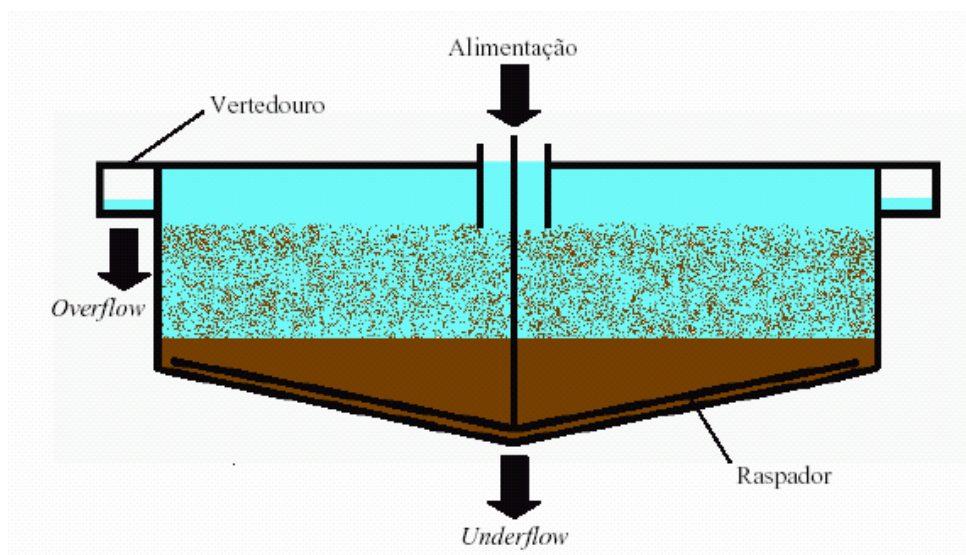


Figura 1.1 - Vista esquemática de um sedimentador.

Na Figura 1.2 encontra-se um sedimentador convencional utilizado industrialmente.



Figura 1.2 - Sedimentador convencional utilizado industrialmente.

A aplicação tecnológica da sedimentação começou com a invenção do espessador Dorr em 1905, utilizado nas plantas concentradas de minérios em Dakota do Sul, nos Estados Unidos.

Em 1952 KYNCH propôs um modelo cinemático da sedimentação com base apenas no desenvolvimento da equação da continuidade para fase sólida. A publicação de Kynch motivou a indústria mineral a explorar essa teoria para o projeto de sedimentadores. Este método, apresentado inicialmente por TALMAGE e FITCH (1955) e que recebeu o nome de método de KYNCH, consiste em realizar apenas um ensaio de sedimentação em batelada e, utilizando a teoria de KYNCH, deduzir a área mínima necessária de um sedimentador para se processar uma suspensão. A partir do trabalho de KYNCH houve um avanço significativo no entendimento do processo de sedimentação e apesar de existirem teorias mais elaboradas, o método de KYNCH é utilizado até hoje pela simplicidade de execução.

Para o caso de partículas sólidas muito pequenas, a eficiência de separação diminui drasticamente, inviabilizando a separação com padrões aceitáveis, tornando-se então necessária a pesquisa de métodos para otimização da eficiência de separação. Uma maneira de

contornar tal situação consiste na adição de agentes flocculantes, cuja ação consiste em produzir estruturas complexas (flocos) com os quais as partículas sólidas interagem e podem ser adsorvidas. Tais estruturas possuem peso suficientemente alto para promover a separação de forma adequada.

Os objetivos deste trabalho foram estudar algumas das variáveis que afetam o desempenho de sedimentadores convencionais operando com suspensões previamente flocculadas, o pH e a massa de material flocculante; encontrar equações constitutivas para pressão dos sólidos e permeabilidade; quantificar a capacidade de um protótipo de sedimentador contínuo em função de tais variáveis utilizando o Método de KYNCH e de TILLER e CHEN e apresentar um procedimento para sedimentação contínua com flocculação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Definições importantes

A floculação é um processo físico que promove a aglutinação das partículas já coaguladas, facilitando o choque entre as mesmas devido à agitação lenta imposta ao escoamento da água. A formação de flocos de impurezas facilita sua posterior remoção por sedimentação sob ação da gravidade, flotação ou filtração. A floculação pode ocorrer por processos hidráulicos ou mecanizados.

A floculação química consiste na adição de um reagente químico em uma suspensão, de forma a promover a precipitação das partículas. Sulfato de alumínio, cloreto férrico e cloreto de alumínio são os agentes floculantes mais habitualmente utilizados. Em alguns casos, substâncias naturalmente presentes em suspensões tais como o bicarbonato de cálcio e carbonato de magnésio, podem formar precipitados e, deste modo, também servir como promotores da floculação. Com o controle do pH meio reacional numa faixa apropriada, a reação de floculação ocorre, e os produtos de tal reação, que são relativamente insolúveis e inicialmente estão presentes sob a forma de colóides, se aglomeram em flocos. Durante o processo de aglomeração, essas partículas se associam a outros materiais em suspensão ou coloidais. O floco então aumenta de tamanho e precipita, levando consigo qualquer material insolúvel que tenha sido aprisionado durante a etapa de crescimento.

Alguns fatores influenciam a floculação: o tipo e quantidade de floculante, o pH da suspensão, o tempo de mistura, a temperatura, a agitação e presença de núcleos. A quantidade de floculante utilizada depende do tipo de separação desejada. Existe um pH ótimo encontrado experimentalmente para uma determinada suspensão. A agitação rápida faz com que o floculante se espalhe igualmente e a agitação lenta promove a formação do floco. A floculação ocorre melhor a temperaturas mais altas. Os coadjuvantes (aditivos de floculação) são substâncias capazes de promover núcleos mais densos para flocos mais pesados.

Alguns flocculantes utilizados são: sulfato de alumínio, é um sólido cristalino de cor branco-acinzentada, contendo aproximadamente 17% de Al_2O_3 solúvel em água, é disponível em pedra, em pó ou em soluções concentradas; sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), é um sólido cristalino de cor branca esverdeada, que é obtido como subproduto de outros processos químicos, principalmente a decapagem do aço (disponível na forma líquida), é encontrado também na forma granular; dentre os alcalinizantes, o mais utilizado pelo seu baixo custo é a Cal (cal virgem ou viva, cal hidratada ou extinta, cal dolomítica, são outras denominações do óxido de cálcio).

Como auxiliares de floculação são utilizados: polímeros sintéticos, que são substâncias químicas orgânicas de cadeia longa e alto peso molecular, disponíveis numa variedade de nomes comerciais, polieletrólitos são classificados de acordo com a carga elétrica na cadeia do polímero, os carregados positivamente são chamados de catiônicos e os que não possuem carga elétrica são os não-iônicos; sílica ativada, que é o silicato de sódio tratado com ácido sulfúrico, sulfato de alumínio, dióxido de carbono ou cloro, como auxiliar de floculação ela apresenta como vantagens o aumento da taxa de reação química, reduz a dosagem de flocculante, aumenta a faixa de pH ótimo e produz um floculo com melhores propriedades de decantação e resistência, sua desvantagem em relação aos polieletrólitos é a necessidade de um controle preciso de preparo e dosagem; carvão ativado, aplicado na forma de pó, tem grande poder de adsorção.

2.2 – Trabalhos relevantes na área

HAZEM (1904) citado por DAMASCENO (1992) iniciou os estudos da sedimentação de partículas sólidas em água. Mostrou, nesta época, que o tempo de residência não é um fator necessário no projeto de sedimentadores e que a quantidade de sólidos removidos depende da área da seção transversal do tanque, das propriedades do material sólido e é inversamente proporcional ao fluxo através do tanque.

MISHLER (1912) propôs que a área da seção transversal do equipamento fosse calculada a partir da velocidade ascensional do líquido, suposta igual à velocidade de sedimentação das partículas.

COE e CLEVENGER (1916) citado por DAMASCENO (1992) propuseram uma metodologia para o projeto de sedimentadores com base na análise de sedimentação em proveta para diversas concentrações iniciais variando entre as concentrações da alimentação e da lama. Em sua metodologia a capacidade do sedimentador era encontrada a partir da Equação (2.1).

$$q_s = \frac{v_{so}}{\frac{1}{\varepsilon_{so}} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}}; \quad (2.1)$$

sendo q_s o fluxo de sólidos no sedimentador, v_{so} a velocidade inicial de sedimentação num ensaio em batelada com concentração ε_{so} , concentração volumétrica inicial de sólidos, e ε_{su} é a concentração de lama desejada. A capacidade do projeto é o menor valor dentre os encontrados para todas as concentrações testadas.

KYNCH (1952) desenvolveu uma teoria simplificada para descrever o fenômeno da sedimentação em batelada. Ele propôs um modelo matemático, com base na equação da continuidade para os sólidos, o que reduziu o número de ensaios em proveta. Sua teoria se baseia na hipótese de formação de sedimentos incompressíveis, e a sua utilização para projetos de sedimentadores, que devem operar com suspensões que produzem sedimentos com pequenos graus de compressibilidade pode produzir resultados aceitáveis. Ela admite as seguintes suposições:

- A sedimentação é unidimensional;
- A concentração aumenta no sentido do fundo do recipiente;
- A velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração atinge um valor máximo;
- A velocidade de sedimentação depende apenas da concentração local de sólidos;
- Os efeitos de parede não são considerados.

A teoria de Kynch apresenta quatro regiões distintas durante o projeto de sedimentação, essas regiões podem ser encontradas na Figura (2.1):

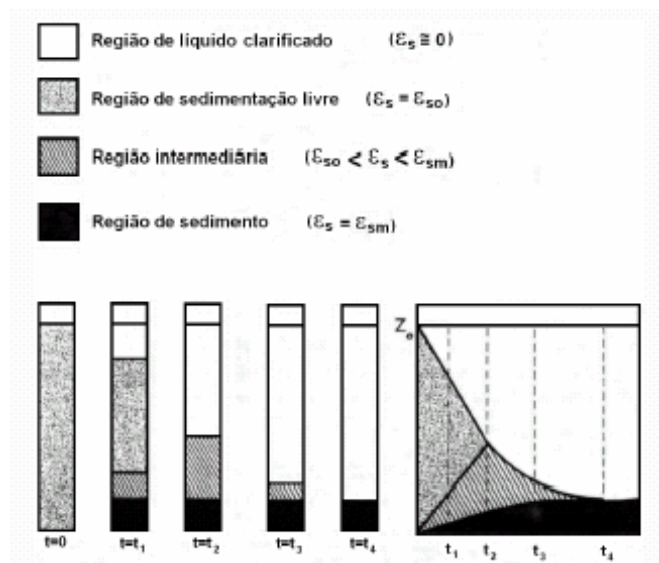


Figura 2.1 – O processo de sedimentação em batelada segundo a teoria de Kynch.

Apesar do trabalho de Kynch tratar apenas de sedimentação em batelada, pôde-se utilizar seus conceitos em sedimentadores contínuos, pois foi apresentada uma forma de calcular a concentração da interface superior em função do tempo de ensaio, em um ensaio de teste de proveta, que esta apresentada na Equação (2.2).

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{so} z_0}{z_i}; \quad (2.2)$$

sendo z_0 a altura inicial da suspensão em um teste de proveta e z_i é a interseção da tangente à curva de sedimentação, no tempo em questão, com a reta tangente.

A velocidade de sedimentação dos sólidos na interface superior pode ser calculada a partir da Equação (2.3).

$$v_s = -\frac{dz}{dt} = \frac{z_i - z}{t} \quad (2.3)$$

Pode-se observar a interpretação gráfica dos resultados de Kynch na Figura (2.2):

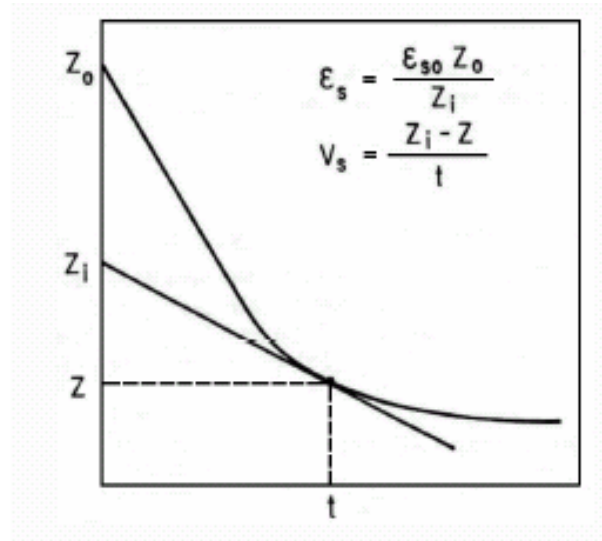


Figura 2.2 – Interpretação gráfica dos resultados de Kynch.

Utilizando o procedimento, adota-se um valor de t , encontra-se z e traça-se uma tangente obtendo assim z_i , para cada ponto chega-se ao par (ϵ_s, v_s) . Assim calcula-se a capacidade do sedimentador através da Equação (2.1) e adota-se o menor valor como sendo a capacidade do projeto.

Outra maneira de se efetuar este cálculo é substituindo as Equações (2.2) e (2.3) na Equação (2.1), possibilitando encontrar diretamente o valor do fluxo de sólidos mínimo:

$$q_{sm} = \frac{\epsilon_{s0} Z_0}{t} \quad (2.4)$$

em que t é o tempo transcorrido durante o ensaio em proveta para que a altura da interface clarificada seja z , dada por:

$$z = \frac{\epsilon_{s0} Z_0}{\epsilon_{su}} \quad (2.5)$$

A teoria de Kynch trouxe simplificações para ao projeto de sedimentadores, pois diminui o número de ensaios experimentais necessários.

MICHAELS e BOLGER (1962) apresentaram uma metodologia, até hoje utilizada para cálculo da densidade ρ_{fl} e diâmetro médio do floco d_{fl} , baseada em ensaios de sedimentação em batelada com diferentes concentrações. A partir desses ensaios são obtidos os pares (ϵ_s, v_s) , concentração inicial da suspensão e velocidade de sedimentação dos flocos necessários para o cálculo.

SHANNON *et al* (1963) citado por DAMASCENO (1992) desenvolveram um modelo para sedimentação contínua e em batelada com base na teoria de KYNCH. Realizaram experimentos onde relacionavam a velocidade com a concentração e comparavam seus resultados com os estimados por algumas correlações existentes na literatura. Concluíram que a teoria por eles desenvolvida leva a resultados razoáveis numa grande faixa de concentrações.

FITCH (1966) publicou um artigo onde os métodos de projeto de sedimentadores eram analisados e comparados e concluiu que o método de Kynch não apresenta bons resultados para sedimentos compressíveis.

LENNERTZ *et al* (1975) mostraram, através de comparação de resultados teóricos com os obtidos em experimentos com protótipo de sedimentador contínuo que o método de KYNCH produz melhores resultados para a capacidade que o de COE e CLEVENGER.

ADORJÁN (1975, 1976), mostrou que, no caso de operações com suspensões que levam à formação de sedimentos compressíveis, os ensaios de sedimentação em batelada não fornecem todas as informações necessárias. Esta metodologia inclui na equação da conservação da quantidade de movimento as forças de “resistência compressível” e “resistência específica”. ADORJÁN demonstrou, através de seu modelo, a influência da altura do sedimento sobre o projeto, indicando que existe uma faixa limitada de capacidades na qual o sedimentador pode operar, o que o levou a definir um fator de carga.

D’ÁVILA (1976) mostrou que, devido à restrição cinemática existente no fundo do recipiente, onde as velocidades do sólido e do fluido devem ser nulas, o problema da sedimentação em batelada pode ser abordado apenas pela resolução das equações de continuidade e do movimento relativas ao sólido, com a adoção de hipóteses constitutivas relativas à tensão nos sólidos e à força resistiva, a fim de tornar o sistema determinado. D’ÁVILA demonstrou que o sistema de equações diferenciais obtido possui caráter hiperbólico, apresentando por isso duas famílias de características e prevê o deslocamento de duas interfaces (uma ascendente e outra descendente), o que satisfaz o modelo físico.

Demonstrou que a teoria de KYNCH é um caso particular de seu modelo, pois possui a hipótese de que a velocidade de sedimentação só depende da concentração local de sólidos.

D'ÁVILA e SAMPAIO (1977a) enunciaram os teoremas de representação das tensões dos componentes de uma suspensão e da força resistiva para diversas condições de dependência funcional. Demonstraram que, se o tensor tensão nos sólidos é função apenas da porosidade da suspensão, ele apresenta apenas componentes relacionados à compressão. Propuseram algumas equações para tensão nos sólidos no caso da sedimentação.

D'ÁVILA e SAMPAIO (1977b) estudaram o projeto de sedimentadores a partir da solução numérica do sistema de equações diferenciais estabelecido por D'ÁVILA (1976), usando uma equação constitutiva para tensão nos sólidos linear em relação à porosidade. Os valores da velocidade de sedimentação e concentração volumétrica, obtidos por meio da resolução do sistema que necessariamente satisfazia à curva de sedimentação experimental, eram utilizados na equação da capacidade do sedimentador, sendo o valor mínimo adotado no projeto. Esta metodologia não levava em conta os efeitos da compressibilidade do sedimento, que, segundo ADORJÁN (1975, 1976), são extremamente importantes.

D'ÁVILA e SAMPAIO (1977c) estudaram a influência das equações constitutivas para a tensão do sólido no projeto de sedimentadores. Resolveram diversas vezes o problema de valor inicial associado ao sistema proposto por D'ÁVILA (1976), utilizando em cada caso uma equação constitutiva diferente. Consideraram as condições estabelecidas no ponto crítico (encontro das duas interfaces), determinado pela resolução do primeiro problema de valor inicial, como as condições iniciais de um novo problema de valor inicial, correspondendo a um segundo estágio no processo de sedimentação. Compararam suas soluções com os ensaios experimentais e, como resultado, escolheram a equação quadrática da tensão com relação à porosidade como sendo a que leva a melhores resultados.

CONCHA e BASCUR (1977) citado por Silva (2004) desenvolveram uma formulação para sedimentação que resultou numa única equação diferencial parcial não linear. Esta equação foi obtida com a substituição da velocidade relativa, isolada da equação do movimento, sem termos inerciais, nas equações de continuidade.

PARENTE (1980) utilizou a metodologia proposta por MICHAELS e BOLGER (1962) para a determinação de sistemas floculentos ($\text{CaO}/\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_4\text{OH}$). Os diâmetros de floco obtidos foram comparados com medidas feitas por microscopia, havendo uma boa concordância entre eles.

TILLER e LEU (1980) propuseram equações constitutivas para pressão nos sólidos e para permeabilidade, e apresentaram uma metodologia gráfica simples para a determinação dos parâmetros envolvidos nas equações sugeridas. Indicaram, ainda, uma maneira de determinar os parâmetros das equações constitutivas a partir de dados de porosidade e permeabilidade médias.

DAMASCENO e MASSARANI (1986) desenvolveram um sedimentador contínuo dotado de um fundo filtrante. O objetivo foi de projetar um equipamento com uma capacidade maior que a dos sedimentadores convencionais já existentes. Eles propuseram um método para o cálculo da capacidade deste sedimentador com base na teoria de Kynch (1952). Através de um balanço de massa para os sólidos e para o líquido, no equipamento, chegaram a uma equação de projeto para o sedimentador filtrante.

DAMASCENO *et al* (1987) realizaram experimentos em um sedimentador com fundo filtrante e concluíram que o modelo proposto por DAMASCENO e MASSARANI (1986) estima com boa precisão o desempenho desses equipamentos. Concluíram também que há um aumento substancial na capacidade do sedimentador filtrante.

CONCHA e BUSTOS (1987) propuseram uma modificação da condição de contorno implícita na teoria de KYNCH (1952), $\varepsilon_s(z = 0, t) = \varepsilon_{sm}$, com o objetivo de considerar as características compressíveis do sistema. A nova condição foi:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial z} \right)_{z=0} = \frac{(\rho_s - \rho) g \varepsilon_s}{\frac{dP_s}{d\varepsilon_s}}, (z = 0, t); \quad (2.6)$$

sendo ε_s a concentração volumétrica de sólidos, g é a aceleração da gravidade, P_s é a pressão dos sólidos, ρ_s e ρ são densidades do sólido e fluido, respectivamente.

Resolveram numericamente o problema e observaram que, para suspensões floculentas, o modelo proposto e o de KYNCH (1952) levam a resultados divergentes, onde o ponto mais crítico para suspensões floculentas, é observado além do ponto de compressão. Os resultados mostraram que a teoria de KYNCH só é válida para o caso de concentrações menores que uma concentração crítica. Concluíram que a sistemática proposta conseguia descrever melhor a sedimentação em batelada e que, no caso de suspensões compressíveis, as características não são linhas retas, como propôs KYNCH.

TILLER E CHEN (1988), inspirados nas idéias de ADORJÁN (1976), propuseram um modelo para descrever o escoamento no interior do sedimento, semelhante ao adotado na teoria da filtração. A resolução numérica desse modelo confirmou as conclusões de ADORJÁN, com relação à existência de uma faixa operacional para a capacidade de sedimentadores.

CHEN (1988) ampliou o modelo de TILLER E CHEN (1988) para a sedimentação unidimensional em regime transiente e simulou modificações entre dois estados estacionários. Demonstrou que um sedimentador pode operar diversos dias em regime transiente até alcançar um novo estado estacionário e apresentou alternativas operacionais para minimizar esse tempo.

DAMASCENO *et al.* (1989), utilizando a *Técnica de Atenuação de Raios Gama*, obtiveram a distribuição de concentrações em um sedimentador contínuo de seção retangular. Observaram, em seus experimentos, zonas de perturbação e estagnação, reveladas por meio de fortes desvios nas curvas de concentração constante, principalmente nas regiões próximas da entrada e da retirada de fundo.

DAMASCENO e MASSARANI (1990) efetuaram um estudo experimental sobre o projeto de sedimentadores pelo método de KYNCH (1952). Tomando por base ensaios de sedimentação em proveta com diversas alturas de coluna de suspensão, calcularam o diâmetro de sedimentadores para produzir diversas concentrações de lama. Seus resultados demonstraram que o valor calculado para o diâmetro depende da altura da coluna de suspensão, principalmente para os casos de alta concentração de lama. Estes autores concluíram que tal fato ocorre devido a não consideração da região de sedimento pela teoria de KYNCH e inferiram que o uso de seu método só deve ser indicado ao projeto de

sedimentadores para produzir lamas muito diluídas, como no caso de clarificadores. Além disso, observaram que, para o projeto de sedimentadores utilizando este método, deve-se realizar um ensaio de sedimentação em proveta, cuja altura da coluna de suspensão seja igual à altura do sedimentador.

DAMASCENO (1992) desenvolveu um modelo matemático baseado na Teoria da Mecânica do Contínuo, para equacionar o problema do espessamento contínuo. Propôs uma metodologia para a caracterização de sedimentos, com base na utilização da técnica de atenuação de raios gama e desenvolveu equações constitutivas para a tensão nos sólidos e permeabilidade do sedimento para algumas suspensões, admitindo que essas variáveis dependiam apenas da porosidade local. Obtidas as equações constitutivas, foram efetuadas simulações das operações de espessadores em regimes permanente e transiente, que demonstraram que esses equipamentos apresentam um grande tempo de resposta a alterações nas condições operacionais.

DAMASCENO e MASSARANI (1993) analisaram três metodologias utilizadas no projeto de sedimentadores. O método de CLOE e CLEVINGER (1916), o método de KYNCH (1952) e o método de TILLER E CHEN (1988). Uma comparação feita entre os três procedimentos mostrou que eles podem ser ordenados em dois grupos distintos: um que estuda o processo de sedimentação propriamente dito, os métodos de CLOE e CLEVINGER (1916) e de KYNCH (1952) e o outro que estuda o fenômeno da compressão, o método de TILLER E CHEN (1988). Para materiais pouco compressíveis o método de KYNCH (1952) é o indicado, pela simplicidade e bons resultados comprovados. O método de TILLER E CHEN (1988) também pode ser utilizado com confiabilidade para o projeto, porém mostra que, para a determinação das propriedades do sedimento, os ensaios de sedimentação em proveta não são suficientes, sendo indicado o uso de ensaios de adensamento, no caso de sedimentos compressíveis.

FONT e RUIZ (1993) estudaram, a partir da sedimentação em batelada, a simulação de espessadores contínuos em regime transiente, através da evolução da interface do sedimento e das linhas de concentração constantes. Estes autores verificaram que os testes em batelada podem ser aplicados também para o espessamento contínuo, considerando o deslocamento das linhas características do fundo até a superfície do sedimento e das linhas

divergentes de concentração nos sólidos na zona da compressão. Este método é válido para casos em que a concentração da lama está compreendida entre a concentração da suspensão de alimentação e a concentração de lama no ensaio em batelada.

CONCHA *et al* (1994) desenvolveram um modelo matemático para o espessamento de alta capacidade para espessadores de suspensões flocculentas. Segundo os autores, na configuração convencional, o mecanismo predominante do espessamento é a sedimentação livre. A capacidade destes equipamentos é limitada pela velocidade livre de sedimentação dos flocos na região compreendida entre as regiões de líquido clarificado e de compactação.

FRANÇA *et al.* (1995) desenvolveram uma metodologia simples para determinação dos parâmetros de equações constitutivas para pressão nos sólidos. Os autores realizaram ensaios de sedimentação, para várias concentrações iniciais de sólidos e observaram a altura final do sedimento, a partir destes resultados calcularam então concentrações médias e com o perfil de concentração a pressão nos sólidos. Os resultados obtidos por esta metodologia foram comparados com os obtidos por meio da *Técnica de Atenuação de Raios Gama*, DAMASCENO (1992) e concluíram que a metodologia proposta é adequada para determinação de parâmetros de equações constitutivas para pressão nos sólidos.

FRANÇA (1996) estudou a operação de três espessadores contínuos sendo alimentados próximos à base do equipamento. Esta modificação configuracional reduziu o processo de sedimentação, dando lugar a um processo semelhante à filtração e proporcionou um aumento de 25% na capacidade do espessador. Determinou também os parâmetros das equações da pressão nos sólidos e da força resistiva que o fluido exerce na matriz sólida, a partir das propriedades do sedimento.

COELHO e MASSARANI (1996) propuseram correlações para a fluidodinâmica da partícula, mais simples que as existentes e com precisão equivalente, podendo ser utilizadas para encontrar densidade e diâmetro de flocos na sedimentação com floculação fora do Regime de Stokes.

FRANÇA *et al.* (1996) propuseram uma nova abordagem na caracterização de suspensões flocculentas, baseada na metodologia proposta por MICHAELS e BOLGER (1962)

e correlações de COELHO e MASSARANI (1996), podendo ser aplicadas fora do regime de Stokes.

BHATTACHARYA (1997) citado por Silva (2004) estudou alguns aspectos da sedimentação e filtração de partículas de alumina muito finas. Verificou-se que a floculação pode ser efetivamente usada para melhorar a sedimentação. Concluiu que os efeitos da adição de floculante, da concentração do sólido e da pressão devem ser investigados para levantar as características de filtração. Desenvolveu, neste trabalho, um conceito de resistência média da torta, desenvolvida a partir de parâmetros de pressão e concentração, para ser considerado nos cálculos da taxa de filtração.

CARVALHO (1998) estudou a utilização do sedimentador lamelado na separação de suspensões floculentas visando definir um procedimento de projeto para esse tipo de equipamento. Ela realizou testes em batelada em provetas para cálculo da taxa de sedimentação máxima pelo método de Kynch, avaliando a influência da altura inicial da suspensão e a seção transversal das provetas; utilizou para encontrar as características do floco (densidade e diâmetro médio) a metodologia de MICHAELS e BOLGER (1962) e correlação de COELHO e MASSARANI (1996). A autora concluiu que a densidade e o diâmetro do floco são pouco influenciados pela proveta na qual o ensaio foi realizado e que caso se deseje uma máxima relação de concentração lama/alimentação, deve-se operar com o sedimentador lamelado inclinado 57° e com alimentação pela base.

RUIZ (2000) estudou o cálculo de equações constitutivas para pressão nos sólidos através de ensaios de sedimentação em batelada, utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama. O autor concluiu que a velocidade de sedimentação só pode ser definida como função da concentração local de sólidos para sedimentos pouco compressíveis.

FRANÇA (2000) estudou as equações constitutivas para suspensões floculentas (permeabilidade e pressão), através de testes de sedimentação contínua e em batelada. A autora concluiu que a metodologia utilizada é eficaz, promovendo resultados coerentes de previsão do comportamento de unidades contínuas operando com suspensões floculadas.

FARROW *et al* (2000) estudaram técnicas para melhoramento da floculação e da operação dos sedimentadores, analisando fatores como intensidade e duração da mistura,

concentração de sólidos, eficiência de floculação e, conseqüentemente o desempenho do sedimentador. Um modelo computacional dinâmico e amplo (CFD) foi desenvolvido para prever o desempenho do sedimentador sob várias condições de processo, com base no conhecimento do modelo do sedimentador, vazões da planta e a avaliação de laboratório da floculação da alimentação.

DI BERNARDO e DI BERNARDO (2000), tendo em vista que os amidos (catiônicos ou não) não são nocivos à saúde do ser humano, uma vez que são utilizados na indústria de alimentos, e observando-se a potencialidade do uso destes como auxiliares de floculação, realizaram ensaios de coagulação (com sulfato alumínio), floculação e sedimentação em equipamento de reatores estáticos, objetivando verificar a influência do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na floculação após a adição de amido de mandioca catiônico. Esses autores obtiveram como conclusões que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação não proporcionou uma melhora na qualidade da água decantada; os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do amido 6 e 12 min após o início da floculação e que o amido de mandioca catiônico pode ser substituído em potencial dos polímeros sintéticos no tratamento de águas de abastecimento, quando utilizado como auxiliar de floculação.

PÁDUA e DI BERNARDO (2000) estudaram uma técnica indireta de comparação do tamanho de flocos resultantes da coagulação da água com cloreto férrico e com sulfato de alumínio, seguida da floculação. Os ensaios foram realizados em jarros teste passando-se as amostras de água decantada em mantas sintéticas não-tecidas com tamanho médio dos poros conhecido. Eles chegaram à conclusão de que os flocos formados na coagulação com cloreto férrico apresentavam maior tamanho que aqueles resultantes do uso de sulfato de alumínio. Observou-se também que para velocidades de sedimentação médias iguais e dosagens de coagulante equivalente, em geral foi obtida água decantada de melhor qualidade quando a coagulação foi realizada com cloreto férrico.

DI BERNARDO *et al* (2000) estudaram a coagulação (com sulfato alumínio), floculação e sedimentação em equipamento de reatores estáticos, objetivando verificar a influência do tempo de agitação na floculação após a adição de polímero sintético catiônico e de amidos de milho e mandioca catiônicos. Eles obtiveram como conclusões que as condições de aplicação do polímero exercem influência na eficiência de remoção de turbidez e cor

aparente, tendo resultado uma condição ótima específica para cada polímero e que em todos os ensaios realizados com os polímeros, o amido de mandioca catiônico foi o mais eficiente.

MARINELLI *et al* (2000) estudaram o uso de amidos de milho catiônico comum e híbrido, purificado e não purificado, como auxiliares de floculação. Esses autores chegaram à conclusão que o amido derivatizado, quando aplicado com dosagens acima de 1,0 mg/L e com velocidades de sedimentação altas (10,35 cm/min e 5,0 cm/min) concorre para melhorar a qualidade da água decantada; para velocidades de sedimentação inferiores a 2,7cm/min e dosagens menores que 1 mg/L também foram significativos na melhora da qualidade da água decantada; o amido catiônico de milho comum, que apresenta maior proporção de amilose (27%) com relação ao amido de milho híbrido (98% de amilopectina) apresentou certa vantagem na aplicação, já que em várias condições levou a resultados melhores; para dosagens aplicadas maiores que 1 mg/L, o amido catiônico de milho comum e o amido de milho híbrido apresentaram desempenho praticamente igual e os resultados indicaram que não há necessidade de purificar o amido, pois o desempenho, tanto do amido de milho comum quanto o do amido de milho híbrido não purificados foi muito próximo das formas purificadas.

LARROYD (2001) estudou um método alternativo para remover as impurezas coloridas contidas no caulim ultrafino do Rio Jarí (AP), mediante a adsorção seletiva com polímeros aquosolúveis, observando que a caracterização do minério define o tipo de contaminante (anatásio, óxido de titânio (TiO₂)) e as suas relações de contato com a caulinita (ausência de adesão física). Ele observou que a eficiência na remoção do anatásio, frente ao ambiente específico do meio e em combinação com a intensidade de carga aniônica do polímero floculante, define a condição mais favorável em termos de adsorção e seletividade, tal condição prevê a utilização de poliacrilamidas fracamente aniônicas em meio alcalino (pH = 10); que o aumento da concentração de hexametáfosfato-Na (dispersante de atividade eletrostática) provoca uma redução nos níveis de adsorção da caulinita, pelo aumento da sua carga superficial; que a seletividade do processo atinge o seu nível máximo com a adição de poliacrilato-Na (dispersante que combina a atividade eletrostática com o efeito estérico) e que o nível de adição química do meio também condiciona o grau de consistência dos flocos gerados, aumentando a cinética de sedimentação. Nos ambientes considerados altamente seletivos, a sedimentação dos flocos chega a atingir uma velocidade de 18 mm/minuto em polpa com 30% de sólidos. Nessas condições, remoções consideráveis de anatásio são

obtidas, fazendo com que o teor de TiO_2 contido no caulim caia de 1,3% para 0,2% e com que a recuperação permaneça em níveis satisfatórios (57%).

FREITAS (2002) estudou o levantamento experimental das curvas de capacidade para os sedimentadores filtrante e convencional, operando em regime contínuo e estacionário. A autora observou em seus experimentos que as curvas de capacidade destes sedimentadores apresentam o comportamento do modelo de TILLER e CHEN (1988). Concluiu também, que para sedimentadores filtrantes, a região de operação contínua ocorre em uma faixa de vazão maior que a do sedimentador convencional e que o fundo filtrante pode promover um aumento significativo na capacidade do equipamento.

NAVROTSKII *et al* (2002) estudaram a influência do pH na floculação do caulim utilizando piridina polieletrólítica por turbidimetria, microscopia óptica e sedimentometria e concluíram que existe uma extrema dependência da atividade da piridina polieletrólítica com o pH.

AROUCA (2003), influenciado pelo trabalho de DAMASCENO (1992), estudou o fenômeno da sedimentação em batelada, utilizando suspensões aquosas de caulim, monitorada por meio da *Técnica de Atenuação de Raios Gama*, permitindo a obtenção da distribuição de concentrações em sedimentos estáticos. Com os resultados experimentais obtidos, admitindo que a pressão nos sólidos e a permeabilidade do meio poroso eram funções exclusivas da concentração local de sólidos, o autor determinou os parâmetros das equações constitutivas de pressão nos sólidos e permeabilidade.

PEREIRA e LUZ (2003) durante o estudo do processo de floculação seletiva, em escala de bancada, visando à purificação do caulim, investigaram a influência da variação da concentração de floculantes aniônicos, bem como a influência do pH da polpa, no processo de floculação. Eles obtiveram como conclusões que o floculante de maior ionicidade apresentou o melhor rendimento, entre os demais estudados e que esse floculante apresentou seu melhor desempenho em concentrações de 50 e 75 g/t e pH 10, elevando a alvura do caulim de 80,2 % para 88 %.

GÓIS *et al* (2003) estudaram a sedimentação da lama vermelha, proveniente da planta de alumina da Alcoa de Poços de Caldas, os floculantes utilizados nos ensaios de sedimentação foram os hidroxamatos e a poliacrilamida. As conclusões obtidas foram que o

floculante poliacrilamida foi o reagente que proporcionou a maior taxa de sedimentação e que os flocculantes hidroxamatos possuem melhores potenciais de clarificação.

SILVA (2004) estudou sedimentadores convencional e divergente, operando continuamente, em estado estacionário, com suspensão aquosa de caulim, no modo clarificador e espessador. Ele verificou que a capacidade do clarificador foi mais influenciada pela variação da área da seção transversal do que os espessadores. Com os dados experimentais obtidos, admitindo, assim como AROUCA (2003), que a pressão nos sólidos e a permeabilidade do meio poroso eram funções exclusivas da concentração local de sólidos, o autor determinou os parâmetros das equações constitutivas de pressão nos sólidos e permeabilidade utilizando testes de sedimentação em batelada. Foi desenvolvido um modelo matemático baseado na Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo para simular numericamente a operação dos espessadores contínuos. Os resultados da modelagem foram comparados com os experimentais e apresentaram uma discordância, mostrando que há muito ainda o que estudar para que seja obtida uma melhor modelagem desses equipamentos.

KURENKOV *et al* (2005) estudaram a cinética da sedimentação de suspensões de caulim na presença de coagulantes polioxiclорido de alumínio e sulfato de alumínio e flocculantes aniônicos Praestol. Foi observado que houve um aumento da vazão de sedimentação com o aumento da concentração dos coagulantes e flocculantes Praestol. Houve também um aumento na substituição do polioxiclорido de alumínio por sulfato de alumínio e que a dependência do parâmetro de flocculação com polioxiclорido de alumínio na mistura de coagulantes simultaneamente com o uso de flocculantes passa por um máximo.

AROUCA (2007) estudou o fenômeno da sedimentação em batelada de suspensões aquosas de diferentes materiais sólidos, utilizando uma técnica não destrutiva baseada na medida de atenuação de raios gama. Para obtenção de equações constitutivas ele aprimorou um modelo matemático para sedimentação unidimensional introduzindo conceitos físicos do modelo de D'Ávila (1978) na abordagem do trabalho de BURGUER e CONCHA (1988), utilizando o pacote computacional DASSL disponível no *Scilab*. Os resultados das simulações numéricas mostraram que o modelo misto hiperbólico – parabólico apresentado descreve adequadamente o fenômeno físico sem que haja a necessidade do uso de condições de salto nas fronteiras móveis. O autor observou também que a qualidade da solução é melhor para sistemas pouco permeáveis e a qualidade das simulações se restringe a qualidade das

equações constitutivas obtidas para o material sólido. Por fim, uma rigorosa avaliação na obtenção de equações constitutivas apontou que o modelo de TILLER e LEU (1980) é dependente de uma estimativa inicial adequada para os parâmetros da equação e com base nos resultados foi apresentado um modelo de potências biparamétrico para a tensão nos sólidos.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 – As equações da conservação da massa e da quantidade de movimento por meio da Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo

3.1.1 – Fundamentos da Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo

A *Teoria das Misturas da Mecânica do Contínuo* tem sido utilizada com sucesso na descrição de sistemas particulados, TRUESDEL (1965), d'ÁVILA (1978), DAMASCENO (1992). Tal teoria pressupõe que cada partícula de fluido numa dada região do espaço é ocupada simultaneamente por todos os constituintes da mistura. Nela a partícula sólida perde sua identidade, comportando-se como um fluido hipotético.

A concentração mássica aparente de um constituinte da mistura é definida pela seguinte equação:

$$\bar{\rho}_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m_i}{\Delta V} = \frac{dm_i}{dV}; \quad (3.1)$$

sendo m_i a massa do constituinte i contido na mistura, V é o volume da mistura.

Na modelagem de sistemas sólido-fluido é apropriado introduzir-se a fração volumétrica do fluido e do sólido,

$$\varepsilon_f = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V_f}{\Delta V} = \frac{dV_f}{dV} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_s = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V_s}{\Delta V} = \frac{dV_s}{dV}; \quad (3.3)$$

em que os subscritos f e s referem-se ao fluido e sólido, respectivamente.

Se a mistura for constituída por um sólido e um fluido, tem-se $V = V_f + V_s$ e obtém-se:

$$\varepsilon_s + \varepsilon_f = 1 \quad (3.4)$$

Denotando-se por ρ e ρ_s as massas específicas dos constituintes fluido e sólido puros, respectivamente, pode-se concluir que:

$$\bar{\rho}_s = \rho_s \varepsilon_s = \rho_s (1 - \varepsilon_f) \quad (3.5)$$

$$\bar{\rho} = \rho \varepsilon_f \quad (3.6)$$

3.1.2 – A equação da conservação da massa dos componentes da mistura

Tomando-se uma propriedade $\psi(x, t)_i$, por unidade de volume, associada a um componente i da mistura, o Teorema do Transporte de Reynolds pode ser escrito como mostra a Equação (3.7), (DAMASCENO, 2002).

$$\frac{D}{Dt} \iiint \psi[x(t), t]_i dV = \iiint \frac{\partial \psi_i}{\partial t} \Big|_x dV + \iint (\psi \underline{v})_i \cdot \underline{n} dS; \quad (3.7)$$

em que t é o tempo, V é o volume, x é a posição, $\underline{v}_i$ é o vetor velocidade do componente i da mistura e $\underline{n}$ é o vetor normal-unitário à superfície S . Desta forma, o primeiro membro da equação apresenta as variações da grandeza ψ segundo as concepções de Lagrange, cuja derivada substantiva indica a variação da propriedade com o tempo tomando-se como base um referencial que acompanha as partículas de fluido, e o segundo membro da equação apresenta as variações dessa mesma propriedade com relação à coordenadas espaciais, concepção de Euler.

Seja um conjunto de partículas no interior de um volume material que se move com velocidade $\underline{v}_i$. Como, pela definição de volume material, não há entrada ou saída de massa de seu interior e fazendo $\psi_i = \bar{\rho}_i$, pode-se escrever que o balanço de massa para um constituinte i qualquer da mistura, na ausência de reação química, é:

$$\frac{D}{Dt} \iiint \bar{\rho}_i dV = 0 \quad (3.8)$$

Utilizando o Teorema do Transporte de Reynolds, Equação (3.7), tem-se:

$$\iiint \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} dV + \iint (\bar{\rho}_i \underline{v}_i) \cdot \underline{n} dS = 0 \quad (3.9)$$

Aplicando-se o Teorema da Divergência de Gauss, o qual relaciona integrais de superfície com integrais de volume, $\iiint \nabla \cdot \bar{\rho}_i \underline{v}_i dV = \iint (\bar{\rho}_i \underline{v}_i) \cdot \underline{n} dS$, obtém-se:

$$\iiint \left\{ \frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho}_i \underline{v}_i \right\} dV = 0 \quad (3.10)$$

Como $dV \neq 0$, obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho}_i \underline{v}_i = 0 \quad (3.11)$$

Uma vez que $\bar{\rho}_i = \rho_i \varepsilon_i$, chega-se finalmente a:

$$\frac{\partial \rho_i \varepsilon_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i \varepsilon_i \underline{v}_i = 0; \quad (3.12)$$

que é a equação da conservação da massa, para um componente i qualquer da mistura, muitas vezes chamada de equação da continuidade para um componente i da mistura.

3.1.3 – A equação da conservação da quantidade de movimento

O teorema do transporte de Reynolds aplicado a $\psi = \bar{\rho}_i \underline{v}_i$ leva a:

$$\frac{D}{Dt} \iiint \bar{\rho}_i \underline{v}_i dV = \iiint \frac{\partial(\bar{\rho}_i \underline{v}_i)}{\partial t} dV + \iint \bar{\rho}_i \underline{v}_i \otimes \underline{v}_i \cdot \underline{n} dS \quad (3.13)$$

O primeiro membro da Equação (3.13) representa a variação da quantidade de movimento de um volume material com relação ao tempo. Segundo Newton, tal variação só é possível se houver uma resultante de forças, ou seja,

$$\frac{D}{Dt} \iiint \bar{\rho}_i \underline{v}_i dV = \sum_j (\underline{F}_j)_i; \quad (3.14)$$

em que o segundo membro da Equação (3.14) é a soma de todas as forças que atuam sobre um componente i de uma mistura contida no volume material. Substituindo a Equação 3.14 na Equação 3.13, obtém-se:

$$\iiint \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_i \underline{v}_i) dV + \iint (\bar{\rho}_i \underline{v}_i \otimes \underline{v}_i) \cdot \underline{n} dS = \sum_j (\underline{F}_j)_i; \quad (3.15)$$

sendo que $\underline{v}_i \otimes \underline{v}_i$ representa o produto tensorial entre os vetores velocidades.

Assim, um ponto importante na dedução das equações do movimento consiste em determinar as diversas forças que atuam sobre o constituinte i no volume material. Da Física Clássica sabe-se que as forças podem ser divididas em dois grandes grupos:

- As forças de campo, que são aquelas que atuam sobre o constituinte i contido no volume material, sem que haja contato físico (forças de gravidade, elétrica, eletromagnética etc.); cuja expressão matemática é:

$$\underline{E}_b = \iiint (\bar{\rho}_i \underline{b}) dV; \quad (3.16)$$

em que $\underline{b}$ é o campo de forças (campo de forças gravitacionais, $\underline{b} = \underline{g}$).

- As forças de superfície, que são aquelas que atuam sobre o constituinte i contido no volume material através do contato físico por suas fronteiras (forças de tensão, pressão, compressão, etc.); sua expressão matemática é:

$$\underline{F}_s = - \iint \underline{T}_i \cdot \underline{n} dS; \quad (3.17)$$

em que $\underline{T}_i$ é o tensor tensão no constituinte i .

A Teoria das Misturas introduz um termo devido à força exercida sobre o constituinte i pelos demais componentes, diferentes de i , contidos no volume material. Tal termo é comumente chamado de força de interação. A expressão matemática dessa força é,

$$\underline{F}_{\text{int}} = \iiint (\bar{\rho}_i \underline{l}_i) dV \quad (3.18)$$

Pode-se, então, escrever que o somatório das forças que atuam sobre o componente i é dado por:

$$\sum_j (\underline{F}_j)_i = \iiint (\bar{\rho}_i \underline{b}) dV - \iint \underline{T}_i \cdot \underline{n} dS + \iiint (\bar{\rho}_i \underline{l}_i) dV \quad (3.19)$$

Esse resultado, quando substituído na Equação (3.16), leva a:

$$\iiint \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_i \underline{v}_i) dV + \iint (\bar{\rho}_i \underline{v}_i \otimes \underline{v}_i) \cdot \underline{n} dS = \iiint (\bar{\rho}_i \underline{b}) dV - \iint \underline{T}_i \cdot \underline{n} dS + \iiint (\bar{\rho}_i \underline{l}_i) dV \quad (3.20)$$

Aplicando o Teorema da Divergência de Gauss à Equação (3.20), e fazendo as manipulações algébricas cabíveis, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_i \underline{v}_i) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_i \underline{v}_i \otimes \underline{v}_i) = \bar{\rho}_i \underline{b} - \nabla \cdot \underline{T}_i + \bar{\rho}_i \underline{l}_i \quad (3.21)$$

Utilizando álgebra tensorial, pode-se mostrar que:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}_i \underline{v}_i) + \nabla \cdot \bar{\rho}_i \underline{v}_i \otimes \underline{v}_i = \bar{\rho}_i \left[\frac{\partial \underline{v}_i}{\partial t} + \underline{v}_i \cdot \nabla \underline{v}_i \right] + \underline{v}_i \left[\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho}_i \underline{v}_i \right] \quad (3.22)$$

Substituindo a Equação (3.22) na Equação (3.21), tem-se:

$$\bar{\rho}_i \left[\frac{\partial \underline{v}_i}{\partial t} + \underline{v}_i \cdot \nabla \underline{v}_i \right] + \underline{v}_i \left[\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho}_i \underline{v}_i \right] = \bar{\rho}_i \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{T}}_i + \bar{\rho}_i \underline{l}_i \quad (3.23)$$

O segundo termo entre colchetes é a expressão da equação da continuidade para o componente i , que é igual a zero, logo se tem:

$$\bar{\rho}_i \left[\frac{\partial \underline{v}_i}{\partial t} + \underline{v}_i \cdot \nabla \underline{v}_i \right] = \bar{\rho}_i \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{T}}_i + \bar{\rho}_i \underline{l}_i \quad (3.24)$$

Ou ainda:

$$\rho_i \varepsilon_i \left[\frac{\partial \underline{v}_i}{\partial t} + \underline{v}_i \cdot \nabla \underline{v}_i \right] = \rho_i \varepsilon_i \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{T}}_i + \rho_i \varepsilon_i \underline{l}_i \quad (3.25)$$

A Equação (3.25) é a equação da conservação da quantidade de movimento para o componente i da mistura, ou simplesmente equação do movimento para o componente i da mistura.

3.1.4 – Aplicação da Teoria das Misturas ao caso de sistemas sólido - fluido

As equações desenvolvidas anteriormente podem ser utilizadas para descrever o comportamento de misturas sólido – fluido.

Equação da continuidade para o fluido

$$\frac{\partial \rho \varepsilon_f}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \varepsilon_f \underline{v}_f = 0 \quad (3.26)$$

Equação da continuidade para o sólido

$$\frac{\partial \rho_s \varepsilon_s}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_s \varepsilon_s \underline{v}_s = 0 \quad (3.27)$$

Equação do movimento para o fluido

$$\rho \varepsilon_f \left[\frac{\partial \underline{v}_f}{\partial t} + \underline{v}_f \cdot \nabla \underline{v}_f \right] = \rho \varepsilon_f \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{T}}_f + \rho \varepsilon_f \underline{l}_f \quad (3.28)$$

Equação do movimento para o sólido

$$\rho_s \varepsilon_s \left[\frac{\partial \underline{v}_s}{\partial t} + \underline{v}_s \cdot \nabla \underline{v}_s \right] = \rho_s \varepsilon_s \underline{b} - \nabla \cdot \underline{\underline{T}}_s + \rho_s \varepsilon_s \underline{l}_s \quad (3.29)$$

Para o caso de sistemas sólido-líquido é comum desdobrar-se a força de interação em duas parcelas:

$$\rho \varepsilon_f \underline{l}_f = - \left[\underline{m} - \rho (1 - \varepsilon_f) \underline{b} \right]; \quad (3.30)$$

sendo que $\underline{m}$ é a força resistiva, que representa a força exercida pelo fluido sobre o sólido (matriz porosa) a menos da força de empuxo. Assim, uma vez que a soma das forças de interação sólido-fluido e fluido-sólido deve ser nula,

$$\sum_i \rho_i \varepsilon_i \underline{l}_i = \rho_s \varepsilon_s \underline{l}_s + \rho \varepsilon_f \underline{l}_f = 0; \quad (3.31)$$

chega-se às equações do movimento em suas formas mais usuais:

$$\rho \varepsilon_f \left[\frac{\partial \underline{v}_f}{\partial t} + \underline{v}_f \cdot \nabla \underline{v}_f \right] = -\nabla \cdot \underline{\underline{T}}_f - \underline{m} + \rho \underline{b} \quad (3.32)$$

$$\rho_s \varepsilon_s \left[\frac{\partial \underline{v}_s}{\partial t} + \underline{v}_s \cdot \nabla \underline{v}_s \right] = -\nabla \cdot \underline{\underline{T}}_s + \underline{m} + (\rho_s - \rho) \varepsilon_s \underline{b} \quad (3.33)$$

3.1.5 – Teoria constitutiva

A modelagem de sistemas sólido-fluido pode ser efetuada resolvendo-se simultaneamente as equações da continuidade e do movimento para os componentes sólido e fluido. No entanto, para resolver tal sistema de equações é indispensável a adoção de hipóteses constitutivas referentes às tensões nos sólidos e no fluido e para a força resistiva. Para isso, d'ÁVILA e SAMPAIO (1977) elaboraram uma teoria constitutiva complexa onde enunciaram e demonstraram três teoremas de representação das tensões dos componentes de uma suspensão e da força resistiva. d'ÁVILA e SAMPAIO consideraram como hipótese

básica o fato do sistema sólido-fluido ser um meio isotrópico e indicaram que os tensores tensão podem ser representados da seguinte forma:

$$\underline{\underline{T}}_i = P_i \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{T}}'_i \quad (3.34)$$

A parcela $P_i \underline{\underline{I}}$ representa a parcela estática do tensor tensão e o tensor $\underline{\underline{T}}'_i$ representa a sua parte dinâmica.

A seguir são apresentados três teoremas enunciados por d'ÁVILA e SAMPAIO (1977).

Teorema 1 – Se a tensão extra no constituinte da mistura depende apenas da porosidade do meio, então o tensor tensão total possui apenas componentes normais à superfície de contato, que dependem apenas da porosidade, isto é:

$$\underline{\underline{T}}_i(\varepsilon_f) = P_i(\varepsilon_f) \underline{\underline{I}}; \quad (3.35)$$

em que ε_f é a concentração volumétrica de fluido ou porosidade.

Teorema 2 - Se a tensão extra no constituinte da mistura e a força resistiva dependerem do gradiente de porosidade e da porosidade do meio, então o tensor tensão total e a força resistiva são dados, respectivamente, por:

$$\underline{\underline{T}}_i(\varepsilon_f, \nabla \varepsilon_f) = P_i(\varepsilon_f, |\nabla \varepsilon_f|) \underline{\underline{I}} + \gamma(\varepsilon_f, |\nabla \varepsilon_f|) \nabla \varepsilon_f \otimes \nabla \varepsilon_f \quad (3.36)$$

$$\underline{\underline{m}}(\varepsilon_f, |\nabla \varepsilon_f|) = \alpha(\varepsilon_f, |\nabla \varepsilon_f|) \nabla \varepsilon_f; \quad (3.37)$$

em que $\otimes$ representa o operador produto tensorial.

Teorema 3 - Se a tensão extra no constituinte da mistura e a força resistiva dependerem da velocidade relativa líquido-sólido, $\underline{\underline{v}}^* = \underline{\underline{v}}_f - \underline{\underline{v}}_s$, e da porosidade do meio, então a tensão total e a força resistiva são dadas por:

$$\underline{\underline{T}}_i(\varepsilon_f, \underline{\underline{v}}^*) = P_i(\varepsilon_f, |\underline{\underline{v}}^*|) \underline{\underline{I}} + \gamma(\varepsilon_f, |\underline{\underline{v}}^*|) \underline{\underline{v}}^* \otimes \underline{\underline{v}}^* \quad (3.38)$$

$$\underline{m}(\varepsilon_f, \underline{v}^*) = \alpha(\varepsilon_f, |\underline{v}^*|) \underline{v}^* \quad (3.39)$$

Para a força resistiva, no caso de escoamentos lentos e unidimensionais em meios porosos, para sistemas binários, constituído por fluido newtoniano e sólido, um número considerável de autores apontam a equação de Darcy:

$$\underline{m} = \frac{\mu \varepsilon_f}{k(\varepsilon_f)} (\underline{v}_f - \underline{v}_s); \quad (3.40)$$

sendo μ a viscosidade do fluido e k a permeabilidade do meio poroso e a equação acima está escrita na sua forma escalar.

Considerando as hipóteses de k e P_s serem funções apenas de ε_f , então é possível obter expressões para tais funções através da realização de experimentos relativamente simples em laboratório.

No caso do tensor $\underline{T}_i'$, de acordo com o Teorema 1, só existirá um componente da tensão, no caso de escoamento unidimensional. Tal componente é a pressão nos sólidos, P_s .

Considerando um meio poroso, P_s representa o peso a menos das forças de empuxo e resistiva de uma camada superior de sólidos sobre uma camada imediatamente inferior. Além disso, existe uma concentração de sólidos mínima em que uma camada inferior de sólidos sofre a influência de P_s devido a uma camada superior. Tal concentração é a chamada concentração crítica. A expressão matemática para P_s fornece informações úteis relativas à compressibilidade do sedimento.

3.1.6 – O sedimento compressível

Embora seja de grande importância para a sedimentação, a descrição matemática de KYNCH (1952) não considera as características de compressão do sedimento. Segundo a descrição de KYNCH, as camadas de sólidos sedimentam-se de tal modo que na base do recipiente de testes, o sedimento formado apresenta acomodação máxima, com concentração constante e igual a concentração máxima, ε_{sm} .

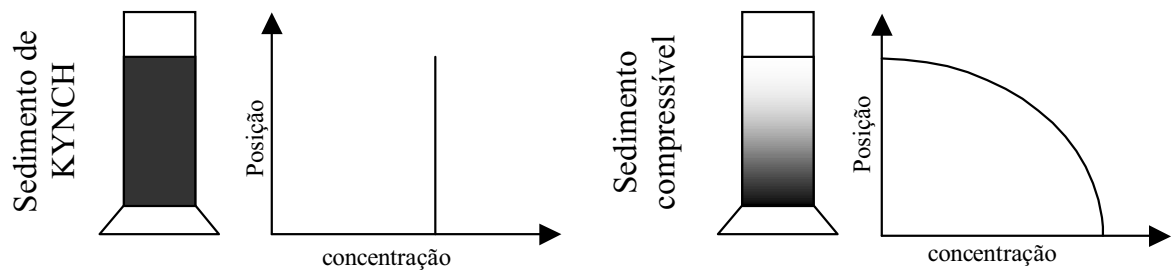


Figura 3.1 – Vista esquemática ilustrando a diferença entre o sedimento de KYNCH ou incompressível e o sedimento compressível em termos da concentração no sedimento.

A Figura (3.1) mostra a diferença entre um sedimento incompressível e um compressível quanto à distribuição de concentrações. A compressibilidade é uma característica de cada tipo de material que constitui o sedimento e pode ser influenciada por diversos fatores como: o tamanho das partículas, a distribuição granulométrica, a massa específica, a forma, o estado de agregação, etc.

De forma geral, a maioria dos sedimentos encontrados na prática apresenta características compressíveis, uns em menor e outros em maior grau.

3.2 – O modelo de TILLER e CHEN (1988)

O modelo de TILLER e CHEN (1988), citado por DAMASCENO (1992), é uma consequência do trabalho de ADORJAN (1976), onde foi demonstrado que as características do sedimento devem ser levadas em consideração no projeto de sedimentadores que operam com suspensões floculentas e que produzem depósitos compressíveis. TILLER e CHEN (1988) propuseram um modelo físico para descrever a sedimentação contínua baseados na teoria simplificada da filtração e nas seguintes hipóteses:

- A operação é unidimensional e estacionária;
- Os constituintes da mistura são incompressíveis;
- Os tensores tensões são função apenas da porosidade local;
- O escoamento através do sedimento ocorre em regime de Darcy;
- Na retirada da lama tem-se $v_f = v_s$;
- Os termos de aceleração são desprezíveis nas equações do movimento.

Consideradas as hipóteses adotadas, pode-se escrever as equações que descrevem o processo:

$$\frac{d(\varepsilon_f v_f)}{dz} = 0, q_f = \varepsilon_f v_f = cte_1 \quad (3.41)$$

$$\frac{d(1 - \varepsilon_f) v_s}{dz} = 0, q_s = 1 - \varepsilon_f = cte_2 \quad (3.42)$$

$$-\frac{dP_f}{dz} - \frac{\mu \varepsilon_f}{k(\varepsilon_f)} (v_f - v_s) + \rho g = 0 \quad (3.43)$$

$$-\frac{dP_s}{dz} + \frac{\mu \varepsilon_f}{k(\varepsilon_f)} (v_f - v_s) + (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_f) g = 0 \quad (3.44)$$

Para determinar os perfis de velocidades e a distribuição de porosidade na região de compressão é necessário resolver um sistema constituído pelas Equações de (3.41) a (3.44) considerando as devidas hipóteses constitutivas para a pressão e permeabilidade.

A substituição das Equações (3.41) e (3.42) na Equação (3.44) leva a:

$$\frac{dP_s}{dz} = \frac{\mu \varepsilon_f}{k(\varepsilon_f)} \left(\frac{q_f}{\varepsilon_f} - \frac{q_s}{1 - \varepsilon_f} \right) + (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_f) g \quad (3.45)$$

Devido a hipótese que $v_f = v_s$, pode-se escrever:

$$\left(\frac{q_f}{q_s} \right)_U = \left(\frac{\varepsilon_f}{1 - \varepsilon_f} \right)_U ; \quad (3.46)$$

como em regime estacionário q_f e q_s são constantes, pode-se generalizar a equação anterior de modo a obter:

$$\frac{q_f}{q_s} = \left(\frac{\varepsilon_f}{1 - \varepsilon_f} \right)_u = \frac{\varepsilon_{fu}}{1 - \varepsilon_{fu}} \quad (3.47)$$

A substituição da Equação (3.47) na (3.45) produz finalmente a equação diferencial que descreve o fenômeno da compressão do sedimento:

$$\frac{dP_s}{dz} = (\rho_s - \rho) \varepsilon_s g - \frac{\mu q_s}{k(\varepsilon_s)} \left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{su}} \right) \quad (3.48)$$

As condições iniciais necessárias para resolução do problema são:

- $z = 0 \Rightarrow \varepsilon_s = \varepsilon_{sc}, \quad P_s = P_{sc};$

em que o índice c indica o início da região de compressão.

Deve-se formular hipóteses constitutivas para P_s e k para se resolver a Equação (3.48). TILLER e CHEN (1988) admitiram que tanto a permeabilidade quanto a pressão nos sólidos são função da concentração local. Assim a Equação (3.48) se reduz a:

$$\frac{dz}{d\varepsilon_s} = \frac{\frac{dP_s}{d\varepsilon_s}}{\left((\rho_s - \rho) \varepsilon_s g - \frac{\mu q_s}{k(\varepsilon_s)} \left(\frac{1}{\varepsilon_s} - \frac{1}{\varepsilon_{su}} \right) \right)}; \quad (3.49)$$

que deve ser integrada de ε_s a ε_{su} para fornecer a altura do sedimento (L).

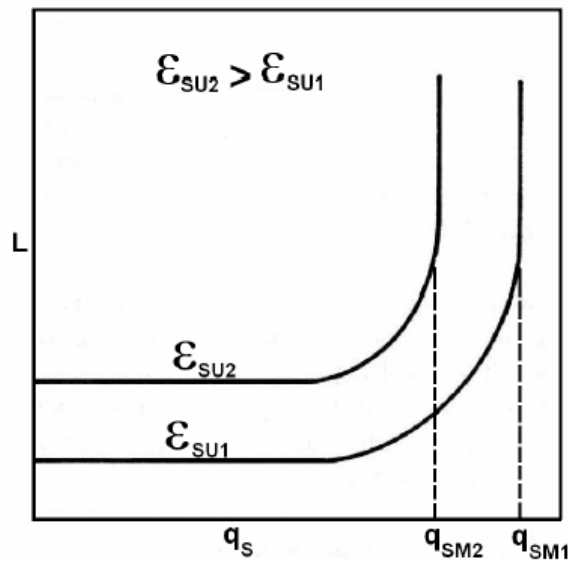


Figura 3.2 – Altura do sedimento em função do fluxo de sólidos em um espessador contínuo.

Quando se plota a altura do sedimento (L) com o fluxo de sólidos (q_s), como mostra a Figura (3.2), percebe-se a existência de duas assíntotas: uma horizontal, para baixos valores de fluxo, e uma vertical que ocorre quando o fluxo atinge o seu valor máximo.

Pela modelagem de TILLER e CHEN percebe-se, que para uma dada concentração de lama, o sedimentador pode operar em regime permanente apenas em uma faixa de fluxo de sólidos menor que q_{SM} , que é o fluxo que exigiria uma altura de sedimento infinita para alcançar a concentração de lama desejada.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Materiais utilizados

O material sólido utilizado neste trabalho para a preparação das suspensões foi o caulim ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$), adquirido com a empresa Brasclay de Campinas, SP. A densidade do sólido foi determinada por meio de picnometria a quente e também por picnometria a Hélio, realizada na Universidade Federal de São Carlos, onde o valor encontrado foi $2,56 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$.

A análise granulométrica do material sólido foi conduzida no MasterSizer® MicroPlus MAF 5001. Neste equipamento o espalhamento de luz laser de baixo ângulo ou difração de Fraunhofer foi utilizado para inferir o diâmetro das partículas.

A Figura (4.1) apresenta a distribuição granulométrica do material:

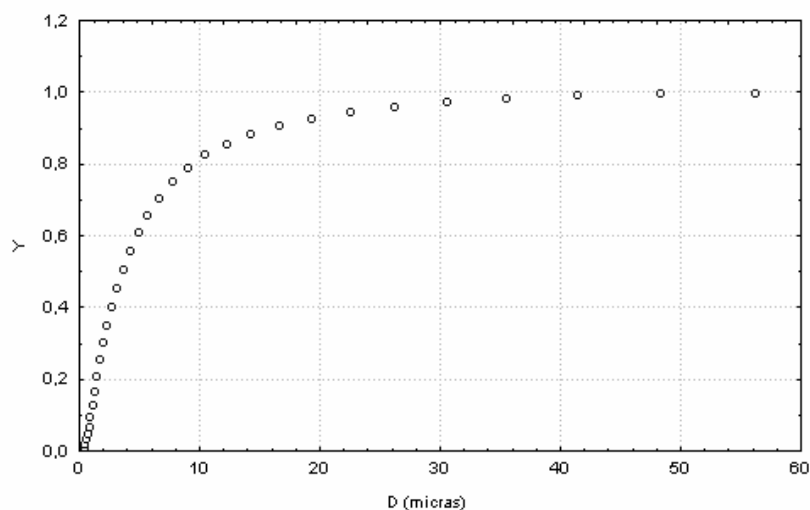


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica para o caulim.

A distribuição granulométrica do caulim ajustou-se ao modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB) representado pela Equação (4.1).

$$Y = 1 - \exp \left(- \left(\frac{d}{D'} \right)^n \right) \quad (4.1)$$

Os parâmetros do modelo RRB para a distribuição granulométrica do caulim são apresentados na Tabela (4.1).

Tabela 4.1– Parâmetros do modelo RRB.

PARÂMETROS	VALORES
D' (µm)	5,6 ± 0,2
n	1,065 ± 0,02

A água empregada no preparo das suspensões foi coletada diretamente da torneira de abastecimento de água do laboratório. O floculante utilizado foi o Genfloc Clarificante Auxiliar de Filtração Genco[®], a base de cloreto de alumínio (Al₂Cl₆) 26,4% e 73,6% de água.

4.2 – Unidade Experimental

Construiu-se a unidade experimental representada na Figura (4.2).

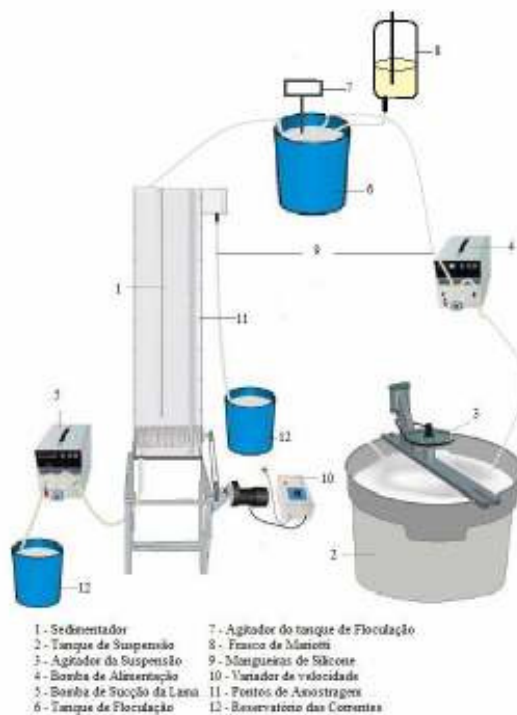


Figura 4.2 – Esquema da unidade experimental.

Os principais componentes dessa unidade encontram-se listados a seguir:

1) Sedimentador

Foi utilizado um sedimentador convencional, na forma de uma fatia de um sedimentador cilíndrico, construído em acrílico, dotado de um vertedouro na parte superior para recolhimento do líquido clarificado (*overflow*).

Na base, o equipamento era dotado de um raspador tipo parafuso sem fim para facilitar a remoção de sólido sedimentado. Uma placa de acrílico posicionada, internamente, próxima à alimentação, impedia o arraste de sólidos para o *overflow*.

A Figura (4.3) e a Tabela (4.2) mostram as principais dimensões do sedimentador.

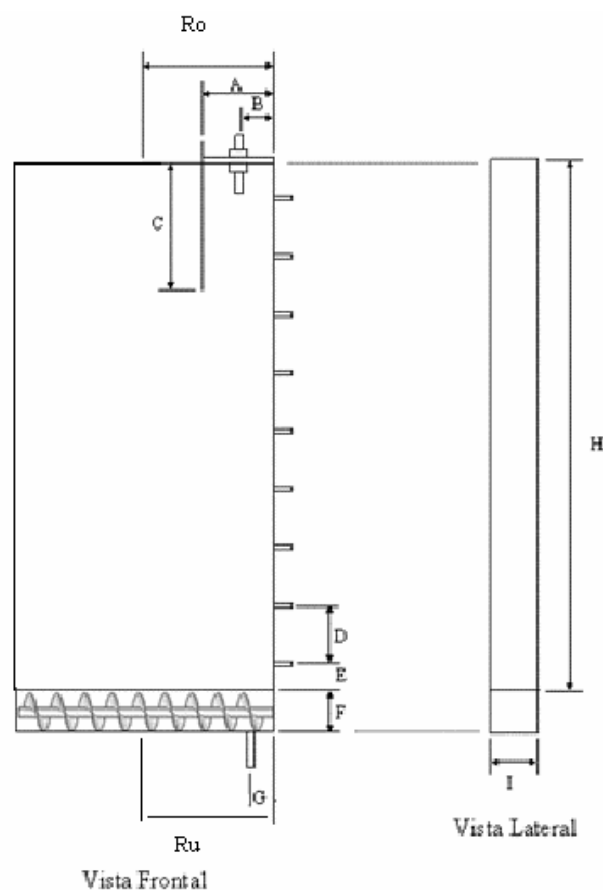


Figura 4.3 – Desenho esquemático com as principais dimensões do sedimentador (SILVA 2004).

Tabela 4.2 – Principais dimensões do sedimentador.

...	DIMENSÃO (cm)
A	11
B	6
C	20
D	8
E	2,3
F	6,5
G	2
H	7,2
I	92
R _O	22
R _U	22
Diâmetro do tubo de alimentação	0,7
Diâmetro do tubo de underflow	0,7

2) Tanque de suspensão

Foi utilizado um reservatório de 500 L, com quatro chicanas, dispostas simetricamente, para aumentar a eficiência do processo de agitação.

3) Agitador da suspensão

Para homogeneizar a suspensão dentro do tanque, foi utilizado um agitador mecânico impulsionado por um motor de indução monofásico de 1720 rpm e ½ CV.

4) Bomba de alimentação

A alimentação da suspensão ao sedimentador era feita por uma bomba peristáltica da marca Masterflex[®] L/S Digi-Staltic[®], modelo 7526-00.

5) Bomba do *underflow*

A corrente de underflow era succionada por uma bomba peristáltica da marca Masterflex[®] L/S Digi-Staltic[®], modelo 7526-05.

6) Tanque de floculação

Construído em acrílico, em formato cilíndrico.

7) Agitador do tanque de floculação

Utilizado para espalhar o floculante em toda suspensão, mantido à agitação de 50rpm para os flocos não se desfaçam.

8) Frasco de Mariotte

Para aplicar o floculante no tanque de floculação a uma taxa constante.

9) Mangueiras de silicone

Utilizadas para o transporte das correntes de alimentação, *overflow* e *underflow* a seus respectivos recipientes de coleta.

10) Variador de velocidade

A rotação do raspador podia ser alterada por meio de um variador de corrente, era mantida constante e baixa para não haver perturbação no sedimentador.

11) Pontos de amostragem

Os sedimentadores eram dotados de pontos de amostragens laterais, constituídos por tubos de cobre com 3 cm de comprimento e 0,7 cm de diâmetro.

12) Reservatórios do *overflow* e *underflow*

As correntes provenientes do *overflow* e *underflow* eram coletadas por um reservatório de 100 Litros.

4.3 – Metodologia

A metodologia se divide em: caracterização de suspensões floculentas; determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos; determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade; testes de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas; cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de KYNCH (1952) e cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de TILLER e CHEN (1988).

4.3.1 – Caracterização de suspensões floculentas

A formação dos flocos depende das condições de concentração de sólidos, do agente floculante e do pH da suspensão, por isso, suas características mudam com grandes variações destas condições. Portanto a caracterização dos flocos deve ser feita sob as mesmas condições em que serão estudadas na sedimentação.

Para encontrar o pH e concentração de floculante ótimos foi feito um planejamento experimental composto central (Tabela (4.3)). Utilizou-se um fatorial completo de 2^2 , incluindo os quatro pontos axiais e quatro pontos centrais, totalizando 12 ensaios em batelada em proveta de um litro, utilizando uma concentração volumétrica de sólidos de 0,020.

Baseando-se na literatura (PEREIRA e LUZ (2003), DI BERNARDO e DI BERNARDO (2000)), adotou-se uma faixa de pH e volume de floculante, utilizou-se o software *Statistica* para encontrar um valor de α ortogonal para o planejamento e encontrou-se o valor de $\pm 1,41$.

Tabela 4.3 – Planejamento experimental.

ENSAIOS	pH	V _{floc}
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	$-\alpha$	0
6	$+\alpha$	0
7	0	$-\alpha$
8	0	$+\alpha$
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Quando se trabalha com suspensões floculentas a fase sólida é constituída por aglomerado de partículas e água, unidas por forças de superfícies, que são os flocos. Assim, a

fase sólida sofre além de modificações estruturais, modificações de comportamento, tornando necessário o uso de metodologias apropriadas para a determinação das propriedades físicas deste sistema.

Neste trabalho a determinação da densidade e diâmetro do floco foi feita segundo FRANÇA *et al* (1996), utilizando a metodologia de MICHAELS e BOLGER (1962) para o cálculo da densidade do floco e as correlações propostas por COELHO e MASSARANI (1996) para o cálculo do diâmetro do floco, pois estas correlações podem ser utilizadas fora do regime de Stokes. Para isso foram realizados ensaios em batelada com concentrações diferentes, respeitando a dosagem de floculante, para obtenção dos pares (ε_s , v_s).

Equações de MICHAELS e BOLGER (1962):

$$v_s = v_{t\infty} (1 - k_f \varepsilon_s)^n \quad (4.2)$$

O valor do coeficiente n na Equação (4.2) é dado em função do número de Reynolds, Equação (2.5), pelos valores da Tabela (4.4).

$$Re_\infty = \frac{\rho v_{t\infty} d_{fl}}{\mu} \quad (4.3)$$

Tabela 4.4 – Correção do expoente n em função do número de Reynolds.

Re_∞	$Re_\infty < 0,2$	$0,2 < Re_\infty < 1$	$1 < Re_\infty < 500$	$Re_\infty > 500$
n	4,65	$4,35 Re_\infty^{-0,03}$	$4,45 Re_\infty^{-0,1}$	2,39

$$\rho_{fl} - \rho = \frac{\rho_s - \rho}{k_f \rho_s} \quad (4.4)$$

$$v_{t\infty} = \frac{d_{fl}^2 (\rho_{fl} - \rho) g}{18\mu}; \quad (4.5)$$

sendo ρ_s , a densidade do sólido seco; ρ , a densidade do fluido; μ a viscosidade do fluido e g a aceleração da gravidade. Esta metodologia pode ser aplicada para suspensões diluídas, com concentração variável entre 0,006 e 0,05 g de sólido/cm³.

Correlações de COELHO e MASSARANI (1996):

$$Re = \left[\left(\frac{24}{k_1 \left(\frac{C_D}{Re} \right)} \right)^{0,65} + \left(\frac{k_2}{\left(\frac{C_D}{Re} \right)} \right)^{1,30} \right]^{\frac{1}{1,30}} ; \quad (4.6)$$

sendo:

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4(\rho_{fl} - \rho)\mu g}{3\rho^2 v_{t\infty}^3} \quad (4.7)$$

$$k_1 = 0,843 \log \left(\frac{\phi}{0,065} \right) \quad (4.8)$$

$$k_2 = 5,31 - 4,88\phi \quad (4.9)$$

Com os pares (ε_s, v_s) , estimou-se os parâmetros da Equação (4.2) e foi encontrada a densidade do floco pela Equação (4.4), utilizando as correlações, considerando esfericidade um, encontrou-se o valor de Reynolds pela Equação (4.6) e o valor do diâmetro do floco pela Equação (4.3).

4.3.2 – Determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos

Os parâmetros constitutivos de equações de pressão nos sólidos são frequentemente determinados a partir de ensaios em prensa de adensamento, TILLER e LEU (1980), ou pela utilização de medidas não destrutivas, como a atenuação de raios gama, DAMASCENO (1992), AROUCA (2003).

Em 1995, FRANÇA propôs uma técnica experimental que evita a medida da distribuição de concentração ao longo do sedimento, adotando seu valor médio para diferentes valores da altura total de sedimento na proveta, permitindo a estimação dos parâmetros para baixas pressões, esta técnica foi utilizada por SILVA (2004).

Em uma mistura sólido-fluido submetida a testes em proveta, a equação do movimento para o sólido, adotando como referencial o sentido positivo do eixo z do topo à base do sedimento e desprezando-se os efeitos de aceleração convectiva, é dada por:

$$\rho_s \varepsilon_s \frac{\partial v_s}{\partial t} = -\frac{\partial P_s}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon_f}{k} (v_f - v_s) + (\rho_s - \rho) \varepsilon_s g \quad (4.10)$$

Ao final do teste em proveta, quando o sedimento está completamente formado, as velocidades do fluido e do sólido são nulas. Considerando que a pressão e a concentração volumétrica de sólido variam apenas ao longo da altura do sedimento, a Equação (4.10) pode ser escrita na forma:

$$\frac{dP_s}{dz} = (\rho_s - \rho) g \varepsilon_s(z) \quad (4.11)$$

Integrando a Equação (4.11) de $z = 0$ até $z = L$, onde L é a altura total do sedimento, obtém-se:

$$P_s(z = L) = (\rho_s - \rho) g \int_0^L \varepsilon_s(z) dz \quad (4.12)$$

Uma vez que o valor médio da concentração volumétrica de sólidos é dado por:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{1}{L} \int_0^L \varepsilon_s(z) dz \quad (4.13)$$

Obtém-se:

$$P_s(z = L) = (\rho_s - \rho) g L \bar{\varepsilon}_s \quad (4.14)$$

A concentração volumétrica média de sólidos, $\bar{\varepsilon}_s$, pode ser calculada diretamente através de:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\left(\frac{m_s}{\rho_s} \right)}{V_{sed}} \quad (4.15)$$

em que m_s é a massa de sólidos no sedimento, V_{sed} é o volume do sedimento e ρ_s é a densidade do sólido.

Com isso, encontra-se uma relação direta entre a pressão no sólido na base do sedimento e o volume do sedimento formado na proveta.

Foram realizados vários testes em proveta para suspensões aquosas de caulim com diferentes massas, o pH foi ajustado com solução de hidróxido de sódio 0,1 molar, e foram ajustadas as concentrações de floculante, a fim de formar sedimentos de volumes distintos. Os testes foram realizados em quatro provetas de diferentes diâmetros e volumes. As massas de sólido variaram desde 0,03 a 200 g.

As diferentes suspensões de caulim eram preparadas e postas em repouso dentro da proveta, até a completa sedimentação das partículas. As variáveis medidas a cada teste eram m_s e L , utilizadas para o cálculo do volume de sedimento. As variáveis $\bar{\varepsilon}_s$ e $P_s(L)$ foram calculadas posteriormente por meio das Equações (4.15) e (4.14), respectivamente.

Para a determinação dos parâmetros constitutivos para a pressão no sólido, foi utilizada a equação proposta por TILLER e LEU (1980), abaixo apresentada.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{sc} \left(1 + \frac{P_s}{P_a} \right)^\beta \quad (4.16)$$

Utilizando-se a equação do movimento para o teste em proveta, dada pela Equação (4.11), e substituindo-se a Equação (4.16), tem-se:

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc} \left(1 + \frac{P_s}{P_a} \right)^\beta \quad (4.17)$$

que pode ser rearranjada na forma:

$$\frac{dP_s(z)}{\left(1 + \frac{P_s}{P_a} \right)^\beta} = (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc} dz \quad (4.18)$$

Integrando membro a membro a equação anterior de $z = 0$ a um z genérico, chega-se a:

$$\frac{P_a}{1 - \beta} \left[\left(1 + \frac{P_s(z)}{P_a} \right)^{1-\beta} - 1 \right] = (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc} z \quad (4.19)$$

Explicitando $P_s(z)$ na equação anterior, chega-se finalmente a:

$$P_s(z) = P_a \left\{ \left[1 + \frac{(1-\beta)}{P_a} (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc} z \right]^{\frac{1}{1-\beta}} - 1 \right\} \quad (4.20)$$

Aplicando a Equação (4.18) para $z = L$, tem-se:

$$P_s(z=L) = P_a \left\{ \left[1 + \frac{(1-\beta)}{P_a} (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc} L \right]^{\frac{1}{1-\beta}} - 1 \right\} \quad (4.21)$$

que pode ser reescrita como:

$$P_s(z=L) = P_a \left\{ [1 + aL]^b - 1 \right\} \quad (4.22)$$

em que $a = \frac{(1-\beta)}{P_a} (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc}$ e $b = \frac{1}{1-\beta}$

Os parâmetros a , b e P_a (e conseqüentemente β e ε_{sc}) foram estimados através de regressão não-linear, adotando como variável de entrada a altura L , como variável medida $P_s(z=L)$. O Parâmetro ε_{sc} representa a menor concentração volumétrica de sólidos em que começa haver o efeito da pressão nos sólidos, a concentração crítica.

Rearranjando a Equação (4.22) em função de P_a , β e ε_{sc} , tem-se:

$$P_s = P_a \left\{ \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}} \right)^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right\} \quad (4.23)$$

4.3.3 – Determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade

Os parâmetros de equações constitutivos para permeabilidade podem ser determinados por vários métodos, dentre os quais se destacam a fluidização homogênea,

FRANÇA (1995), e a técnica de atenuação de raios gama, DAMASCENO (1992), AROUCA (2003).

Neste trabalho foi utilizada uma metodologia alternativa (DAMASCENO (1992)), que tem como base testes de sedimentação em proveta onde a interface superior é monitorada com o tempo, na região de sedimentação livre.

Utilizando-se a equação do movimento para o sólido, aplicada para um referencial situado na interface superior de um teste de sedimentação em proveta, e direcionado, positivamente, para baixo, tem-se:

$$\rho_s \varepsilon_s \frac{\partial v_s}{\partial z} = -\frac{\partial P_s}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon_f}{k} (v_f - v_s) + (\rho_s - \rho) \varepsilon_s g \quad (4.24)$$

Em um teste de sedimentação em proveta com concentração inicial menor que a concentração crítica, observa-se que nos primeiros instantes a interface superior apresenta velocidade de queda constante.

Sabendo-se que na região de sedimentação livre não há efeito de pressão nos sólidos e a velocidade de queda da interface superior é a velocidade de queda dos sólidos nela contidos, que é constante, a equação do movimento, Equação (4.25), pode ser simplificada para:

$$0 = \frac{\mu \varepsilon_f}{k} (v_f - v_s) + (\rho_s - \rho) \varepsilon_s g \quad (4.25)$$

Pode-se mostrar que, devido à restrição cinemática na base da proveta que implica na igualdade das velocidades do fluido e sólido a zero, a velocidade relativa fluido-sólido é dada por:

$$\varepsilon_f v_f + \varepsilon_s v_s = q(t) = 0 \quad (4.26)$$

Como:

$$v_f = -\frac{(1 - \varepsilon_f)}{\varepsilon_f} v_s \Rightarrow v_f - v_s = \left(-\frac{(1 - \varepsilon_f)}{\varepsilon_f} - 1 \right) v_s \quad (4.27)$$

Tem-se:

$$(v_f - v_s) = -\frac{v_s}{\varepsilon_f} \quad (4.28)$$

Substituindo a Equação 4.28 na Equação 4.25 e explicitando k , obtém-se:

$$k = \frac{\mu v_s}{(\rho_s - \rho) \varepsilon_s g} \quad (4.29)$$

Considerando a Equação (4.29), e utilizando a equação constitutiva de TILLER e LEU (1980) para a permeabilidade,

$$k = k_o \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}} \right)^{-\eta} \quad (4.30)$$

Foram feitos testes em proveta para se determinar os pares k e ε_s necessários para a estimativa dos parâmetros da Equação (4.30). Os testes foram conduzidos em uma proveta de 1L dotada de uma escala, previamente afixada.

Cada suspensão com concentração volumétrica de sólidos conhecida era inicialmente homogeneizada no interior da proveta, depois de encerrada a homogeneização, era colocado o floculante, nos casos dos ensaios com floculação (para evitar que qualquer agitação quebrasse os flocos) e um cronômetro digital era acionado. Em seguida, eram feitas leituras da posição da interface superior (limite entre a suspensão e o líquido límpido) e do tempo correspondente. Ao final do teste, os dados de posição versus tempo eram colocados em um gráfico.

A velocidade de sedimentação do sólido, na concentração inicial do teste em proveta, era determinada por meio da inclinação da reta na região linear do gráfico. Com v_s e ε_s conhecidos, calculava-se a permeabilidade, k , através da Equação (4.29). Os resultados foram obtidos para concentrações volumétricas de sólidos, ε_s , entre 0,010 e 0,050.

A Figura (4.4) ilustra o procedimento gráfico utilizado.

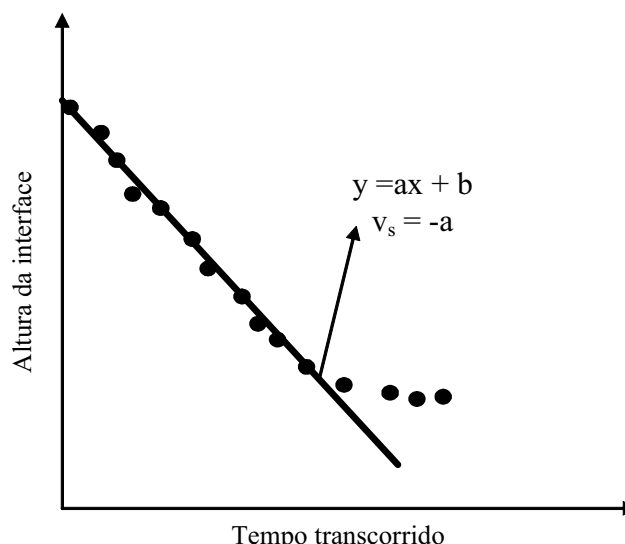


Figura 4.4 – Teste de sedimentação em proveta para determinação da velocidade de sedimentação (SILVA 2004).

4.3.4 – Testes de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas

Para verificar o efeito das paredes do recipiente na velocidade de sedimentação de uma suspensão, foram feitos testes de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas de seção transversal. Para isso, foram utilizadas três provetas com diâmetros internos iguais a 80, 70 e 39mm correspondendo a áreas de seção iguais a 503, 385 e 119mm², respectivamente, e também o sedimentador convencional, apresentando área de seção transversal igual a 1584 mm².

Os testes foram conduzidos utilizando-se uma suspensão com concentração volumétrica de sólidos de 0,020, ajustados o pH e concentração de flocculante. Inicialmente enchia-se o recipiente de testes com a suspensão, e em seguida acionava-se um cronômetro digital, foram então obtidos resultados de posição da interface em função do tempo para os diferentes recipientes.

4.3.5 – Cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de KYNCH (1952)

A partir dos testes de proveta do planejamento experimental, de posse das condições ótimas de pH e concentração de flocculante, utilizou-se os resultados nas Equações (2.2) e (2.3) de KYNCH (1952) e Equação (2.4) para encontrar a capacidade do sedimentador.

4.3.6 – Cálculo da capacidade do sedimentador pelo modelo de TILLER e CHEN (1988)

Encontradas as equações constitutivas de pressão e permeabilidade e utilizando a Equação (3.49), estimou-se a capacidade do sedimentador pelo modelo de TILLER e CHEN (1988).

4.3.7 – Procedimento para operação contínua do sedimentador convencional

Após o estudo da sedimentação em batelada, um procedimento para operação contínua do sedimentador convencional foi estudado, baseado no procedimento utilizado por SILVA (2004) e será apresentada no Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Caracterização de suspensões floculentas

5.1.1 – Resultados do planejamento experimental

Realizando o planejamento composto central citado no Seção 4.3.1, utilizando-se o software *Statística*, obteve-se os resultados demonstrados na Tabela (5.1).

Tabela 5.1 – Resultado do Planejamento Experimental.

ENSAIOS	pH	V _{floc}	pH	V _{floc} (mL)	v _s (cm/s)
1	-1	-1	6,1	0,136	0,009
2	+1	-1	8,9	0,136	0,010
3	-1	+1	6,1	0,164	0,009
4	+1	+1	8,9	0,164	0,011
5	-1,41	0	5,5	0,150	0,009
6	+1,41	0	9,5	0,150	0,008
7	0	-1,41	7,5	0,130	0,010
8	0	+1,41	7,5	0,170	0,013
9	0	0	7,5	0,150	0,010
10	0	0	7,5	0,150	0,010
11	0	0	7,5	0,150	0,011
12	0	0	7,5	0,150	0,011

Foi feita a análise dos resultados do planejamento para verificar o ponto que maximiza a velocidade de sedimentação. Utilizando o software *Maple* fez –se o cálculo das raízes características da matriz do planejamento, obtendo-se um valor negativo, isto indica que há um ponto que maximiza a velocidade de sedimentação, o ponto encontrado está dentro

da região experimental (0,1931; 0,8503), utilizando a equação de codificação do planejamento têm-se:

$$x_1 = \frac{pH - 7,5}{1,4} \quad (5.1)$$

$$x_2 = \frac{V_{floc} - 0,150}{0,014} \quad (5.2)$$

$$pH = 1,4x_1 + 7,5 = 7,7 \quad (5.3)$$

$$V_{floc} = 0,014x_2 + 0,150 = 0,162 \quad (5.4)$$

Na Figura (5.1) pode-se observar a superfície de resposta do planejamento, em que a região com melhor velocidade de sedimentação encontra-se no pH 7,5 e volume de floculante variando entre 0,150 e 0,170mL.

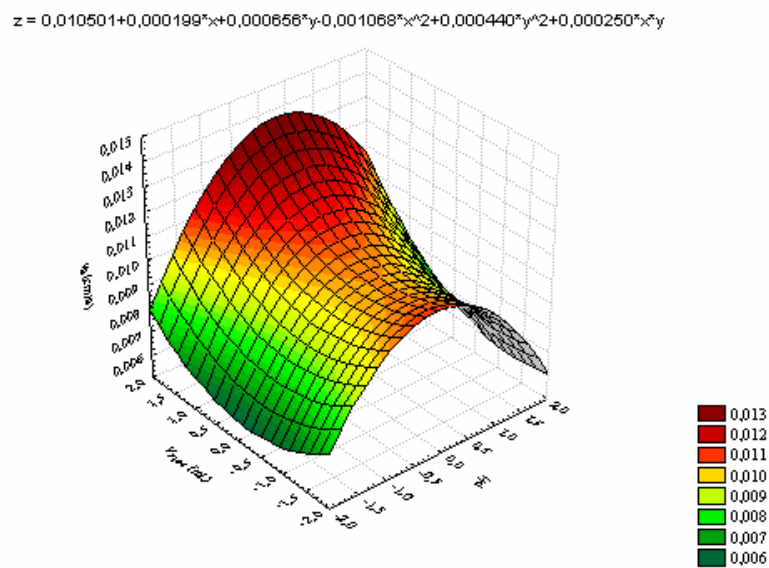


Figura 5.1 – Superfície de resposta do planejamento experimental.

Obtêm-se então um ponto ótimo de operação com pH=7,7 e concentração de floculante de 0,0031mL/g de caulim.

5.1.2 – Resultados do cálculo da densidade e diâmetro do floco

A Tabela (5.2) apresenta os resultados da caracterização do floco.

Foi utilizando a metodologia citada no capítulo anterior, considerando uma esfericidade 1, densidade do fluido 1,0 g/cm³ e viscosidade 0,01g/cm.s.

Tabela 5.2 – Caracterização do floco.

Parâmetros ajustados: k_f (cm³/g)	14,34
$v_{t\infty}$ (cm/s)	0,063
Coefficiente de correlação	0,99
Expoente n	4,035
Densidade do floco (g/ cm³)	1,042
Diâmetro do floco (µm)	311

Analisando os resultados obtidos, observa-se que houve um grande aumento no tamanho da partícula, já que antes do processo de floculação o diâmetro médio do caulim era de 2,9 µm.

5.2 – Resultados dos testes de determinação dos parâmetros da equação constitutiva para pressão nos sólidos

As Tabelas (5.3) e (5.4) trazem os resultados das variáveis estudadas pela metodologia de FRANÇA (1995).

Os resultados apresentados foram utilizados para encontrar os parâmetros da equação constitutiva da pressão de TILLER e LEU (1980):

$$P_s = P_a \left[\left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sc}} \right)^{\frac{1}{\beta}} - 1 \right] \quad (4.23)$$

A Equação (4.23) teve seus parâmetros P_a , β e ε_{sc} ajustados por meio da Equação (4.22), utilizando-se o software *Statística*.

$$P_s(z=L) = P_a \left\{ [1 + aL]^b - 1 \right\} \quad (4.22)$$

em que $a = \frac{(1-\beta)}{P_a} (\rho_s - \rho) g \varepsilon_{sc}$ e $b = \frac{1}{1-\beta}$

Tabela 5.3 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim na sedimentação sem floculante.

M_s – massa de sólido (g)	Diâmetro da proveta (cm)	L – altura do sedimento (cm)	$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\left(\frac{m_s}{\rho_s}\right)}{V_{sed}}$	$P_s(L) = (\rho_s - \rho)gL\bar{\varepsilon}_s$ (dyn/cm²)
200	3,9	37,4	0,1749	10259,76
175	3,9	34,0	0,1684	8977,29
100	3,9	21,8	0,1501	5129,88
20	3,9	6,3	0,1039	1025,98
10	3,9	3,4	0,0962	512,99
5	3,9	1,3	0,1258	256,49
100	3,0	33,0	0,1675	8669,50
75	3,0	27,0	0,1536	6502,12
50	3,0	18,3	0,1511	4334,75
35	3,0	15,4	0,1256	3034,32
25	1,3	43,4	0,1696	11542,23
20	1,3	35,8	0,1645	9233,78
15	1,3	28,7	0,1539	6925,34
10	1,3	21,5	0,1370	4616,89
3	1,3	7,0	0,1262	1385,07
1,5	1,3	3,7	0,1194	692,53
1,0	1,3	2,5	0,1178	461,69
0,25	0,5	4,4	0,1131	780,25
0,16	0,5	2,8	0,1137	499,36
0,13	0,5	1,9	0,1362	405,73
0,11	0,5	1,4	0,1564	343,31
0,08	0,5	1,1	0,1448	249,68
0,06	0,5	0,7	0,1706	187,26
0,03	0,5	0,3	0,1990	93,63

Tabela 5.4 – Pressão dos sólidos para o sedimento de caulim na sedimentação com floculante.

M_s – massa de sólido (g)	Diâmetro da proveta (cm)	L – altura do sedimento (cm)	$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\left(\frac{m_s}{\rho_{fl}}\right)}{V_{sed}}$	$P_s(L) = (\rho_{fl} - \rho)gL\bar{\varepsilon}_s$ (dyn/cm²)
200	3,9	37,4	0,4298	661,67
175	3,9	34,0	0,4137	578,96
100	3,9	21,8	0,3687	330,83
20	3,9	6,3	0,2552	66,17
10	3,9	3,4	0,2364	33,08
5	3,9	1,3	0,3091	16,54
100	3,0	33,0	0,4116	559,11
75	3,0	27,0	0,3773	419,33
50	3,0	18,3	0,3711	279,55
35	3,0	15,4	0,3087	195,69
25	1,3	43,4	0,4167	744,37
20	1,3	35,8	0,4041	595,50
15	1,3	28,7	0,3781	446,62
10	1,3	21,5	0,3365	297,75
3	1,3	7,0	0,3100	89,32
1,5	1,3	3,7	0,2933	44,66
1,0	1,3	2,5	0,2894	29,77
0,25	0,5	4,4	0,2778	50,32
0,16	0,5	2,8	0,2794	32,20
0,13	0,5	1,9	0,3346	26,17
0,11	0,5	1,4	0,3842	22,14
0,08	0,5	1,1	0,3556	16,10
0,06	0,5	0,7	0,4192	12,08
0,03	0,5	0,3	0,4890	6,04

Encontrados os parâmetros, as equações finais para sedimentação sem floculante ficaram:

$$P_s(z=L) = 7,08 \left\{ [1 + 9,46L]^{1,23} - 1 \right\}, dyn/cm^2 \quad (5.5)$$

$$P_s = 7,08 \left[\left(\frac{\varepsilon_s}{0,054} \right)^{5,35} - 1 \right], dyn/cm^2 \quad (5.6)$$

E para sedimentação com floculante:

$$P_s(z=L) = 2,40 \left\{ [1 + 2,37L]^{1,24} - 1 \right\}, dyn/cm^2 \quad (5.7)$$

$$P_s = 2,40 \left[\left(\frac{\varepsilon_s}{0,171} \right)^{5,15} - 1 \right], dyn/cm^2 \quad (5.8)$$

As Figuras (5.2) e (5.3) representam os pontos experimentais obtidos juntamente com a equação de ajuste de $P_s(z=L)$.

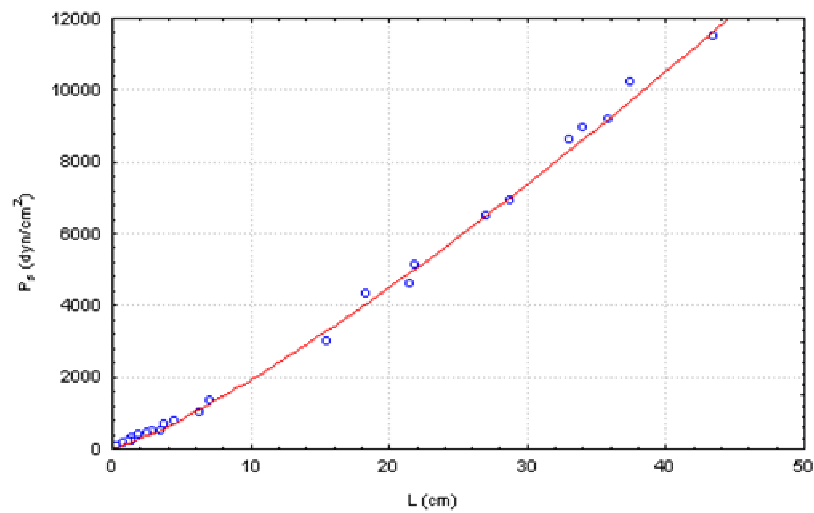


Figura 5.2 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento para sedimentação sem floculante.

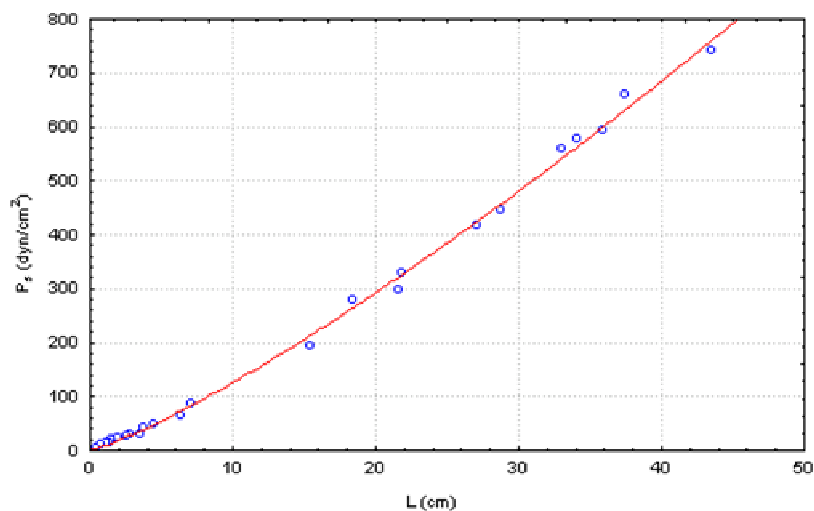


Figura 5. 3 – Distribuição de pressão nos sólidos na base do sedimento para sedimentação com floculante.

Pode-se perceber que os resultados experimentais foram bem ajustados pela Equação (4.22), mostrando que apesar de ser uma técnica simples, os ensaios de proveta trazem bons resultados para estimação de parâmetros da equação constitutiva da pressão.

5.3 – Resultados dos testes de determinação dos parâmetros da equação constitutiva para permeabilidade

A partir dos testes em proveta e da Equação (4.29), obteve-se os resultados pra permeabilidade encontrados nas Tabelas (5.5).

Tabela 5.5 – Resultados de permeabilidade para os ensaios de sedimentação sem e com floculante.

ε_s	v_s (cm/s)	k (cm ²)	v_s (cm/s)	k (cm ²)
	sem floculante		com floculante	
0,010	0,038	$2,50 \cdot 10^{-5}$	0,038	$9,23 \cdot 10^{-4}$
0,015	0,017	$7,46 \cdot 10^{-6}$	0,020	$3,24 \cdot 10^{-4}$
0,020	0,009	$2,96 \cdot 10^{-6}$	0,013	$1,58 \cdot 10^{-4}$
0,025	0,009	$2,37 \cdot 10^{-6}$	0,011	$1,07 \cdot 10^{-4}$
0,030	0,006	$1,32 \cdot 10^{-6}$	0,008	$6,48 \cdot 10^{-5}$
0,035	0,005	$9,40 \cdot 10^{-7}$	0,007	$4,86 \cdot 10^{-5}$
0,040	0,003	$4,94 \cdot 10^{-7}$	0,006	$3,64 \cdot 10^{-5}$
0,045	0,002	$2,92 \cdot 10^{-7}$	0,005	$2,70 \cdot 10^{-5}$
0,050	0,001	$1,32 \cdot 10^{-7}$	0,002	$9,72 \cdot 10^{-6}$

Pode-se observar que para a menor concentração volumétrica a velocidade de sedimentação foi a mesma para os dois casos, indicando que a baixas concentrações o efeito da floculação é pequeno, pois constatou-se o aumento da permeabilidade para todos os casos. Para as outras concentrações volumétricas a velocidade de sedimentação teve um maior aumento conforme aumentou-se a concentração.

Na Figura (5.4) pode-se observar um comparativo dos valores de permeabilidade para os experimentos de sedimentação e sedimentação com flocculante.

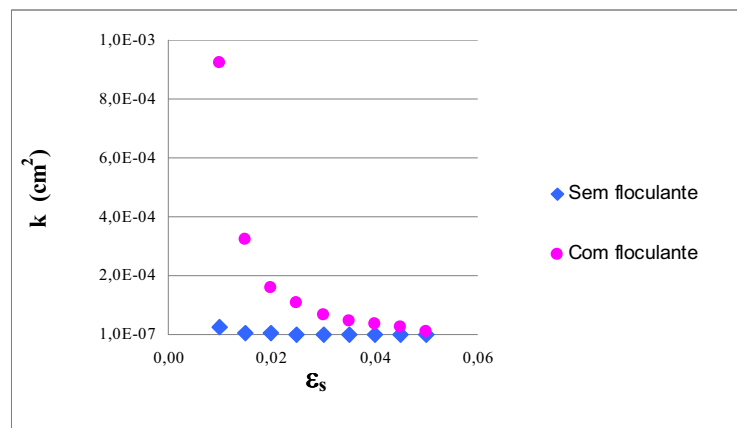


Figura 5.4 – Comparativo da permeabilidade para os experimentos de sedimentação e sedimentação com flocculante.

Os dados foram obtidos para concentrações volumétricas de sólidos, ϵ_s , entre 0,010 e 0,050, sendo que a concentração crítica encontrada na seção anterior foi de 0,054. Com os pares (ϵ_s , k), contidos no apêndice B, foi possível estimar os parâmetros da equação constitutiva de TILLER e LEU (1980), Tabela (5.6).

$$k = k_o \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{sc}} \right)^{-\eta} \quad (4.30)$$

Tabela 5.6 – Parâmetros estimados para equação constitutiva de permeabilidade.

Parâmetros	Valores para sedimentação	Valores para sedimentação com flocculante
k_0 (cm ²)	$(1,86 \pm 0,04) \cdot 10^{-7}$	$(8,20 \pm 0,003) \cdot 10^{-7}$
η	$2,91 \pm 0,03$	$2,49 \pm 0,04$

Com isso chega-se as Equações (5.9) e (5.10):

$$k = 1,8610^{-7} \left(\frac{\varepsilon_s}{0,054} \right)^{-2,91} \quad (5.9)$$

$$k = 8,210^{-7} \left(\frac{\varepsilon_s}{0,171} \right)^{-2,49} \quad (5.10)$$

As Figuras (5.5) e (5.6) apresentam o ajuste dos resultados experimentais com as Equações (5.7) e (5.8).

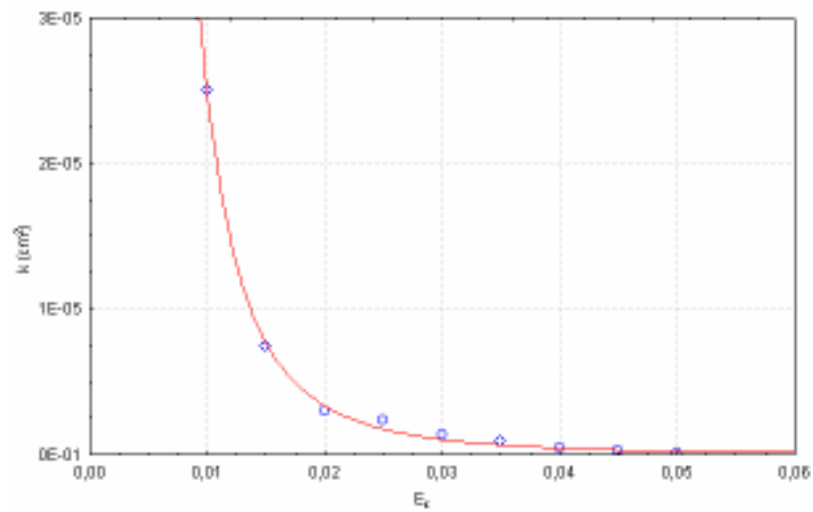


Figura 5.5 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) para sedimentação sem floculante.

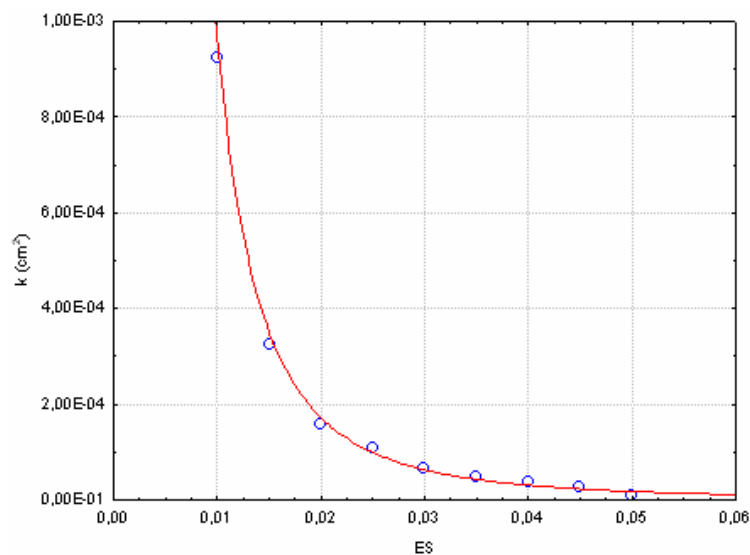


Figura 5.6 – Ajuste dos dados experimentais pela equação de TILLER e LEU (1980) para sedimentação com floculante.

O ajuste para a equação da permeabilidade se mostrou bastante adequado, confirmando a eficiência dos testes em proveta.

5.4 – Resultados dos testes de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas

Verificou-se com estes testes a influência da área da secção transversal na velocidade de sedimentação, no processo com flocculante, da suspensão. Na Figura 5.6 pode-se observar o resultado dos testes utilizando $\varepsilon_s = 0,020$, em que D_i é o diâmetro interno da proveta, H é a altura da interface em função do tempo t .

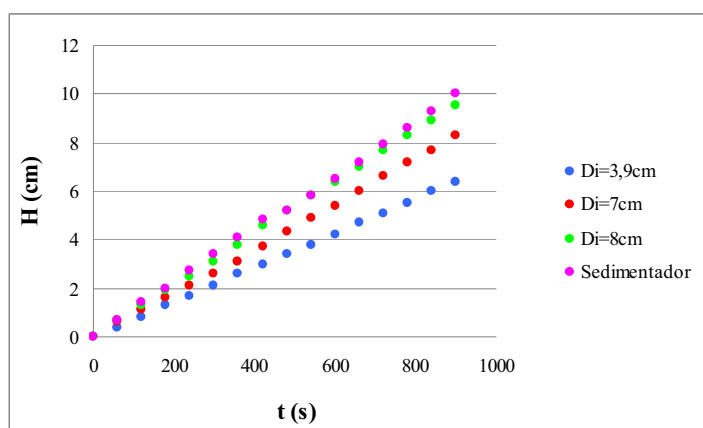


Figura 5.7 – Teste de sedimentação em batelada em recipientes de diferentes áreas.

Os resultados experimentais mostram que a área do recipiente afetou a velocidade de sedimentação, indicando que há efeito de parede.

5.5 – Resultados do cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de KYNCH (1952)

Os resultados de capacidade se encontram na Tabela (5.7).

Tabela 5.7 – Fluxo de sólidos pelo Método de KYNCH (1952).

Variáveis	Valores para sedimentação	Valores para sedimentação com flocculante
ε_{s0}	0,02	0,02
ε_{su}	0,07	0,07
v_s (cm/s)	0,009	0,013
q_s (cm/s)	$(1,1 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(1,7 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$

Pelos resultados obtidos observa-se um maior fluxo de sólidos nos experimentos de sedimentação com floculante, o que indica que uma maior capacidade é obtida quando se utiliza suspensão floculenta no sedimentador.

5.6 – Resultados do cálculo da capacidade do sedimentador pelo método de TILLER e CHEN (1988)

A Figura (5.8) mostra as curvas de capacidade para o processo de sedimentação sem e com floculante e a Tabela (5.8) uma comparação entre os métodos de cálculo da capacidade.

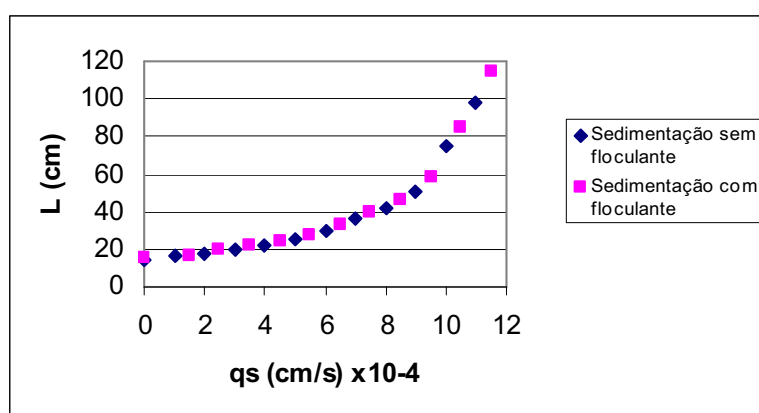


Figura 5. 8 – Curvas de capacidade para sedimentação sem e com floculante.

Tabela 5.8 – Comparação entre os métodos de KYNCH e de TILLER e CHEN.

	Método de KYNCH	Método de TILLER e CHEN
$q_s \text{ (cm/s)}$		
sedimentação sem floculante	$(1,1 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(1,0 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$
$q_s \text{ (cm/s)}$		
sedimentação com floculante	$(1,7 \pm 0,01) \cdot 10^{-4}$	$(1,5 \pm 0,02) \cdot 10^{-4}$

Pelos resultados obtidos pelo método de TILLER e CHEN observa-se também um maior fluxo de sólidos nos experimentos de sedimentação com floculante, obteve-se, comparando os dois métodos, um valor muito próximo, o que reforça a importância do processo de floculação.

5.7 – Procedimento sugerido para operação contínua do sedimentador convencional

Todos os ensaios devem ser conduzidos com o sedimentador operando continuamente no modo clarificador, com suspensão aquosa de caulim, até o estabelecimento do estado estacionário.

Antes do início do ensaio experimental, o agitador do tanque de alimentação deve ser acionado pelo menos cinco minutos antes de se iniciar os ensaios para que a suspensão fique completamente homogênea. O sistema de agitação permanece em funcionamento durante todo o ensaio.

A suspensão do tanque de alimentação deve ser bombeada para o tanque de floculação onde será acrescentado hidróxido de sódio para ajuste de pH e o floculante advindo do Frasco de Mariotti. A suspensão deve ficar sob agitação baixa, em torno de 50 rpm, para evitar que os flocos se quebrem. Antes da partida do sedimentador, os mesmos devem ser completamente preenchidos com suspensão do tanque de floculação.

Logo após o enchimento do sedimentador deve ser acionado o motor do raspador para evitar o acúmulo de sedimento na base do equipamento. Quando a interface da suspensão alcançar a altura de aproximadamente 40 cm da base, devem ser acionadas as bombas de alimentação e de *underflow*. As vazões das bombas devem ser ajustadas de tal forma que a relação entre a vazão de alimentação e de *underflow* seja aproximadamente igual à relação entre a concentração volumétrica de sólidos no *underflow*, desejada, e a concentração de sólidos na alimentação:

$$\varepsilon_{sF}Q_F = \varepsilon_{so}Q_o + \varepsilon_{su}Q_u, \quad (5.8)$$

sendo que ε_{sF} , ε_{so} e ε_{su} são as concentrações volumétricas de sólidos na alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente; Q_F , Q_o e Q_u são as vazões volumétricas da alimentação, *overflow* e *underflow*, respectivamente.

Como o sedimentador é operado de modo a fornecer um *overflow* isento de sólidos, a Equação (5.8) pode ser colocada na forma:

$$\frac{Q_F}{Q_u} = \frac{\varepsilon_{su}}{\varepsilon_{sF}} \quad (5.9)$$

Logo, mantendo-se a relação $\frac{Q_F}{Q_u}$ e ε_{sF} constantes, o sedimentador é operado de forma a obter em todos os ensaios mesma concentração de sólidos no *underflow*, ε_{su} .

Para retirar amostras dos resultados é preciso que o sedimentador tenha alcançado o estado estacionário, isso acontece quando a altura do leito poroso expandido e a concentração de sólidos no *underflow* permanecem constantes. O monitoramento da concentração de sólidos na corrente de *underflow* pode ser feito por meio de amostragens. Constatado o estado estacionário, deve-se efetuar a leitura das alturas do leito poroso expandido ou do sedimento, por meio de uma escala, devidamente fixada no sedimentador. Em seguida devem ser feitas as amostragens das correntes.

Para determinação da distribuição de concentrações no sedimentador, devem ser retiradas alíquotas de cerca de 30 mL dos pontos de amostragem laterais, começando pelos pontos próximo à base seguindo em direção ao topo do sedimentador. A concentração das amostras é determinada por análise gravimétrica.

Para cada corrente de fluxo devem ser feitas três amostragens. As correntes de *underflow* e *overflow* devem ser amostradas primeiro, para evitar que a retirada da corrente de alimentação perturbe o sistema. Cada amostra pode ser coletada com simultânea cronometragem, com isso, por análise gravimétrica, determina-se as vazões e concentrações das correntes, sendo adotados os valores médios como valores de operação.

A concentração volumétrica de sólidos, ε_s , e a vazão de cada corrente, Q , são calculadas através das Equações (5.10) e (5.11), respectivamente.

$$\varepsilon_s = \frac{m_s / \rho_s}{V_T} \quad (5.10)$$

$$Q = \frac{V_T}{t} \quad (5.11)$$

sendo que m_s e ρ_s são a massa e a densidade do sólido, V_T é o volume total amostrado e t é o tempo de coleta da amostra.

Com os procedimentos adotados, podem ser obtidos os dados de altura de sedimento, vazão e concentração volumétrica de sólidos, necessários para o estudo do sedimentador convencional.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 – Conclusões

A partir dos resultados obtidos chegou-se as seguintes conclusões:

- O planejamento experimental resultou em um pH ótimo de operação de 7,7 e concentração de floculante de 0,0031mL/g de caulim, confirmando a influência do pH e do floculante no processo de sedimentação;
- Utilizando o processo de floculação conseguiu-se um aumento da partícula de 2,9 para 311µm, portanto bastante significativo. A metodologia utilizada por FRANÇA *et al.* (1996) mostrou-se adequada para o cálculo da densidade e diâmetro do floco;
- Os ensaios de proveta se mostraram muito eficientes apesar da simplicidade, pois obteve-se um bom ajuste dos resultados experimentais pela equação constitutiva de TILLER e LEU (1980) tanto no caso da sedimentação quanto na sedimentação com floculante;
- Os valores de permeabilidade também foram bem ajustados pela equação constitutiva de TILLER e LEU (1980), para ambos os casos, os valores de permeabilidade foram maiores para a sedimentação com floculante, indicando a influência positiva deste processo.
- Houve uma influência da área da seção transversal na velocidade de sedimentação, as provetas de maior diâmetro proporcionaram uma maior velocidade, indicando que há um efeito de parede no processo;
- Calculando a capacidade do sedimentador pelo método de KYNCH e de TILLER E CHEN obteve-se um valor próximo, sendo maiores os valores de sedimentação com

floculante, confirmando a importância da floculação no processo de sedimentação de partículas muito finas.

6.2 – Sugestões

- Estudar outros fatores que influenciam o processo de sedimentação com floculação como o tipo de agente flocculante e ação de agentes auxiliares de floculação;
- Dar continuidade ao estudo experimental da sedimentação com floculação utilizando o sedimentador convencional e sedimentadores com outras configurações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADORJÁN, L. A. (1975), “A Theory of Sediment Compression”, 11th International Mineral Congress, Cagliari, Itália.
- ADORJÁN, L. A. (1976), “Determination of Thickener Dimension from Sediment Compression and Permeability Tests Results”, *Trans. Inst. Min. Met.*, 85, 157-163.
- AROUCA, F. O. (2003), “Obtenção Experimental das Equações Constitutivas para o Espessamento e Filtração Utilizando Técnica de Atenuação de Radiações de Altas Energias”. Dissertação de Mestrado, 131 páginas, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- AROUCA, F. O. (2007), “Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada”. Tese de Doutorado, 286 páginas, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- BHATTACHARYA, I. N. (1997), “Settling and Filtration Characteristics of Fine Alumina Trihydrate Slurrie”. *AIChE Journal*, 49 (1-2), 107-118.
- CARVALHO, S. H. V. (1998), “Projeto e Análise do Desempenho de um Sedimentador Lamelado Piloto para Suspensões Floculentas”. Tese de Doutorado, 78 páginas, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- CHEN, W (1988), “Simulation of Transient States in Continuous Thickener”, *Fluid / Particle Separation Journal*, 1 (1), 61-66.
- COE, H. S. e CLEVENGER G. H. (1916), “Methods of Determining the Capacities of Slime - Settling Tanks”. *Am. Inst. Min. Engrs.* 55, 356-384.
- CONCHA, F. J. e BASCUR, O. (1977), “Phenomenological Model of Sedimentation”. XII International Mineral Processing Congress, São Paulo, Brasil.
- CONCHA, F., BARRIENTOS, A., BUSTOS, M. C. (1994), “A Phenomenological Model of Hight Capacity Thickening”.
- D’ÁVILA, J. S. (1976), “Uma Análise da Teoria de Kynch para Sedimentação”. *Revista Brasileira de Tecnologia*, 7, 447-53.
- D’AVILA, J. S., SAMPAIO, R. (1977A), “Equações de Estado para a Pressão no Sólido”. II Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, Brasil.
- D’ÁVILA J. S. e SAMPAIO, R. (1977B), “Projeto de um Sedimentador Usando as Equações da Continuidade e do Movimento”. III Simpósio Brasileiro de Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos, Rio de Janeiro, Brasil.

- DAMASCENO, J. J. R. (1992), “Uma Contribuição ao Estudo de Espessamento Contínuo”. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- DAMASCENO, J. J. R. (2002), “Fenômenos de Transporte – Notas de Aula”. Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química, FEQUI/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- DAMASCENO, J. J. R. e MASSARANI, G. (1986), “Estudo de um Sedimentador com Fundo Filtrante”. Anais do XIV Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 283-290.
- DAMASCENO, J. J. R. e MASSARANI, G. (1990), “Uma Análise do Método de Kynch para o Projeto de Sedimentadores”. Anais do XVII Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 283-290.
- DAMASCENO, J. J. R. e MASSARANI, G. (1993). “Cálculo da Capacidade de Sedimentadores Através da Determinação da Permeabilidade do Sedimento”. Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, 233-242, Ouro Preto, Brasil.
- DAMASCENO J. J. R., BARROSO, M. A. S., HENRIQUE, H. M. (1987), “Estudo da Dinâmica de um Sedimentador Filtrante”. Anais do XV Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 303-307.
- DAMASCENO, J. J. R., SOUZA, R. e MASSARANI, G. (1989), “Determinação do Perfil de Concentrações em Sedimentador Contínuo Através da Técnica de Atenuação de Raios Gama”. Anais do XVII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, 97-108, São Carlos, Brasil.
- DI BERNARDO A., S. e DI BERNARDO L. (2000), “Uso de Amido de Mandioca Catiônico como Auxiliar de Flocculação”. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- DI BERNARDO A., S., DI BERNARDO L. e FROLLINE E. (2000), “Influência do Tempo de Aplicação de Polímeros na Eficiência da Flocculação / Sedimentação”. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- FARROW, J. B., FAWELL, P. D., JOHNSTON, R. R. M. e NGUYEN, T. B. (2000), “Recent Developments in Techniques and Methodologies for Improving Thickener Performance”. Chemical Engineering Journal, 80, 149-155.
- FITCH, E. B. (1983), “Kynch Theory and Compression Zones”, *AIChE Journal* 29(6), 940-946.
- FITCH, E. B. (1966), “Current Theory and Thickener Design, Part 2”. Ind. Eng. Chem., 58 (10), 18-28.

- FONT, R., RUIZ, F. (1993), "Simulation of Batch and Continuous Thickeners". Chemical Engineering Science, 48(11), 2039-2047.
- FRANÇA, S. C. A. (1996), "Operação de Espessadores Não-Convencionais". Dissertação de Mestrado, 54 páginas, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- FRANÇA, S. C. A. (2000), "Equações Constitutivas para a Sedimentação de Suspensões Floculentas". Tese de Doutorado, 96 páginas, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- FRANÇA, S. C. A., BISCAIA Jr., E. C. e MASSARANI, G. (1995), "Estimação de Parâmetros em Equações Constitutivas de Sedimentos". XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, Brasil.
- FREITAS, K., A. (2002), "Efeito da Vazão de Alimentação Sobre a Altura do Leito Poroso Expandido em um Sedimentador Filtrante Operando em Estado Estacionário". Dissertação de Mestrado, 145 páginas, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- GÓIS, C. C., LIMA, R. M. F. E MELO, A. C. (2003), "Sedimentação de Resíduo Bayer Utilizando Floculantes Hidroxamatos e Poliacrilamida". REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 56, 119-122.
- HAZEM, A. (1904), "On sedimentation", Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs, 53, 45-71.
<http://www.deq.ufpe.br/disciplinas/Processos>
- KYNCH, G. J. (1952), "A Theory of Sedimentation". Trans. Faraday Society, 48, 166-177, London.
- KURENKOV, V. F., SHATOKHINA, E. V., LOBANOV, F. I. (2005), "Sedimentation of Kaolin Suspension in the Presence of Praestol Anionic Flocculant and Aluminum Polyoxychloride and Sulfate Coagulants". Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 78, N°11, 1872-1875.
- LARROYD, F. e SAMPAIO, C. H. (2001), "Separação Caulinita-Dióxido de Titânio por Floculação Seletiva: Mecanismo, Seletividade e Aplicação no Caulim do Rio Jari (Ap)". Tese de Doutorado, UFRGS, Rio Grande do Sul, Brasil.
- LENNERTZ, L. C., MASSARANI, G. e d'AVILA, J. S. (1975), "Projeto de um Sedimentador Contínuo". Anais do III Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 203-213, Maringá, Brasil.
- MICHLER, R. T. (1912), "Settling Slimes at the Tiger Mill". 94, 643-646 Engng. Mill. J., 94, 643-646.
- MARINELLI P. S., FROLLINI E., BERNARDO A. S. e BERNARDO, L. (2000), "Emprego de Amidos de Milho Catiônico Comum e Híbrido como Auxiliares de Coagulação / Floculação". XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.

- MISHLER, R. T. (1912), "Settling Slimes at the Tiger Mill". Engng. Min. J., 94, 643-646.
- NAVROTSKII, A. , V., DRYABINA, S. S., MALYSHEVA, Zh. N., SHULEVICH, Yu. V. e NOVAKOV, I. A. (2002), "Influence of Medium pH on the Flocculation of Dispersions by Pyridinium Polyelectrolytes". Colloid Journal, Vol.65, Nº6, 752-756.
- PÁDUA, V. L. e DI BERNARDO, L. (2000), "Método Comparativo do Tamanho dos Flocos Formados após Coagulação com Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico". XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- PEREIRA, M. F. N. e LUZ, A., B. (2003), "Purificação de Caulim por Flocculação Seletiva".
- RODRIGUES, M. I. e IEMMA, A. F., Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos, 1ª Edição, Campinas – SP, Casa do Pão Editora, 2005, 326p.
- RUIZ, M. I. (2000), "Estudo da Sedimentação em Batelada com o Auxílio da Técnica de Atenuação de Raios Gama". Dissertação de Mestrado, 174 páginas, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- SHANNON, P. T., STROUPE, E. e TORY, E. M. (1963), " Batch and Continuous Thickening". Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 2, 203-211.
- SILVA, T. A. (2004), "Estudo Teórico – Experimental da Operação de Sedimentadores Divergentes". Dissertação de Mestrado, 181 páginas, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- TILLER , F. M. , LEU, W. (1980), "Basic Data Fitting in Filtration", Chin. Inst. Chem. Engrs, 1, 61-70.
- TILLER, F. M., CHEN, W. (1988), "Limiting Operating Condition for Continuous Thickeners". Chem. Engng. Sci, 43(7), 1695-1704.

APÊNDICE A

GRÁFICOS DOS TESTES DE SEDIMENTAÇÃO BATELADA EM PROVETA DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

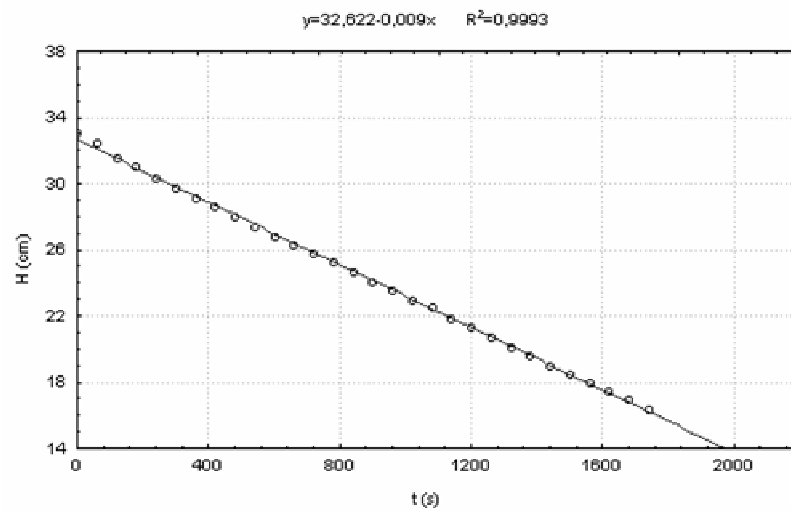


Figura A.1 – Velocidade de sedimentação para pH 5,5 e 0,150 mL de flocculante.

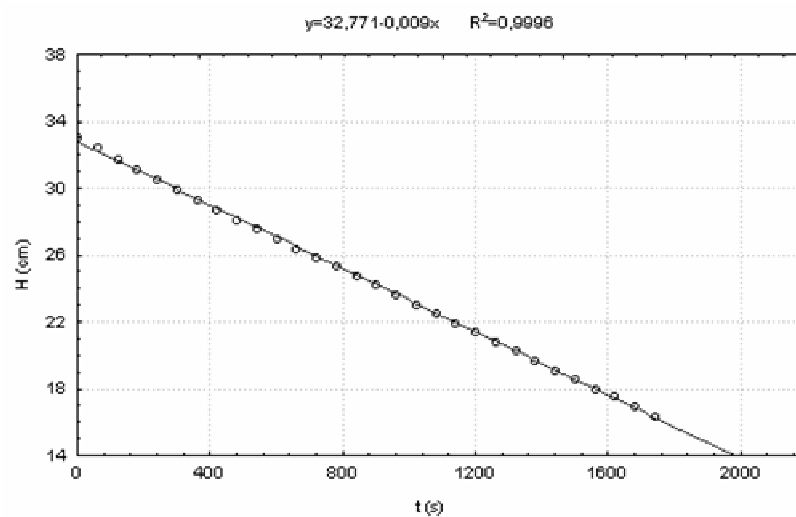


Figura A.2 – Velocidade de sedimentação para pH 6,1 e 0,136 mL de flocculante.

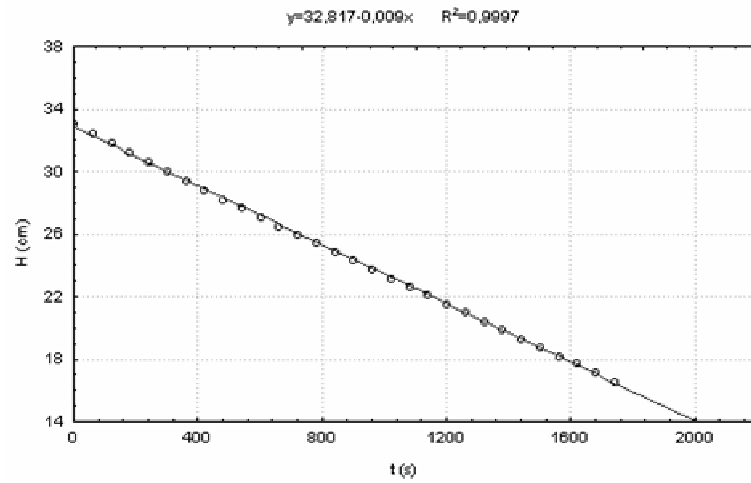


Figura A.3 – Velocidade de sedimentação para pH 6,1 e 0,164 mL de flocoante.

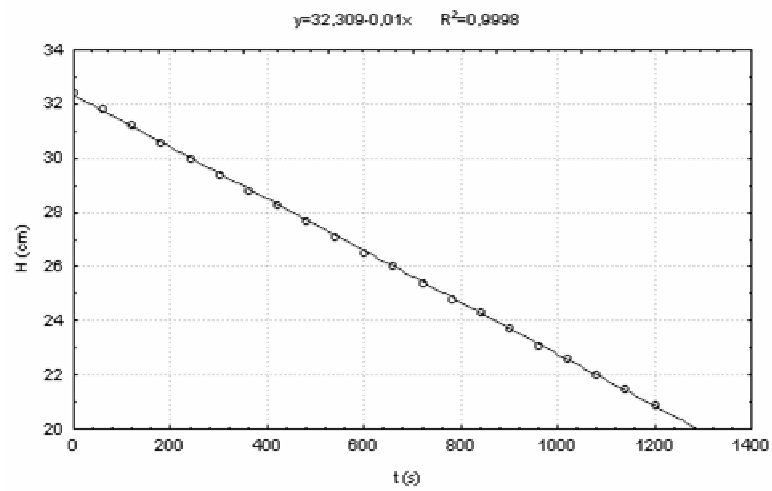


Figura A.4 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,130 mL de flocoante.

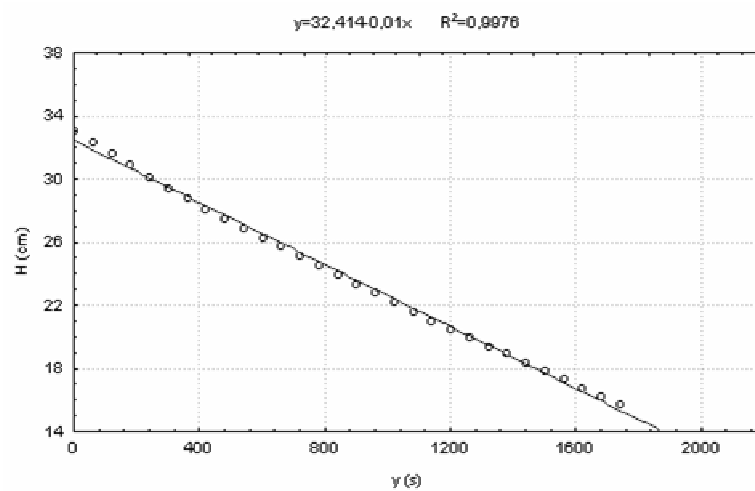


Figura A.5 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de flocoante 1.

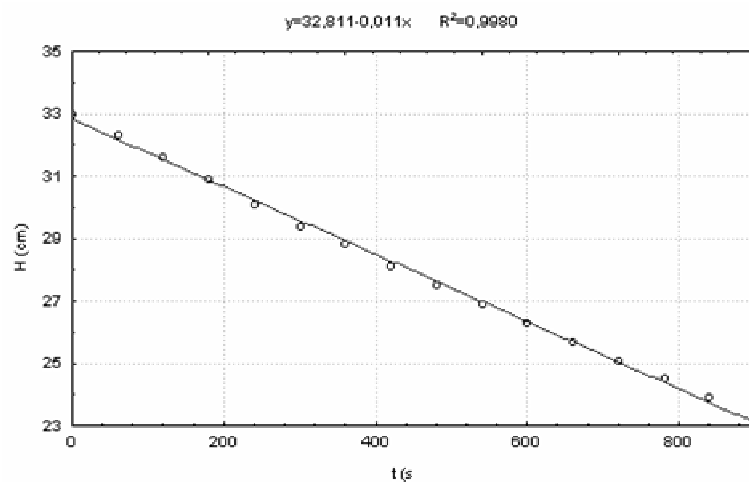


Figura A.6 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de flocculante 2.

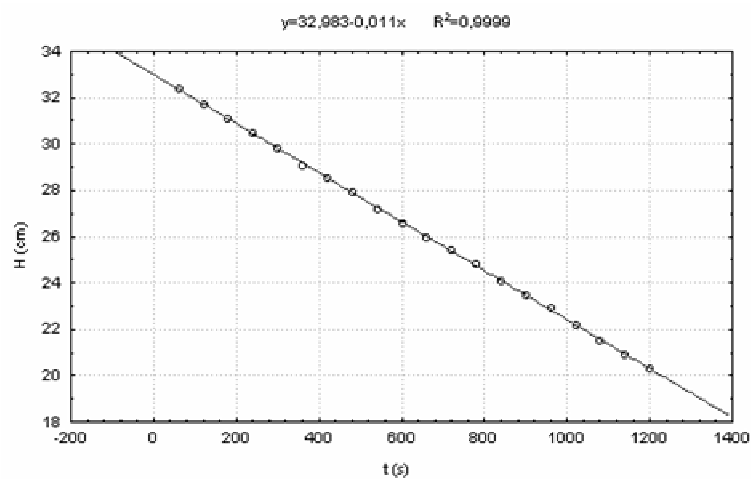


Figura A.7 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de flocculante 3.

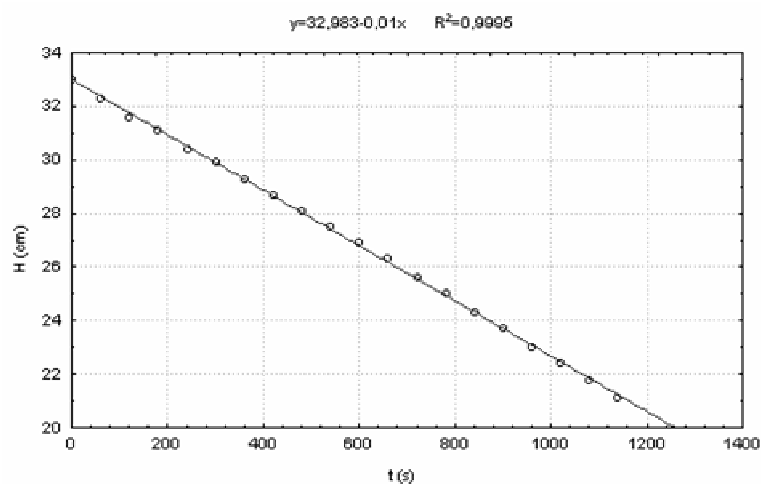


Figura A.8 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,150 mL de flocculante 4.

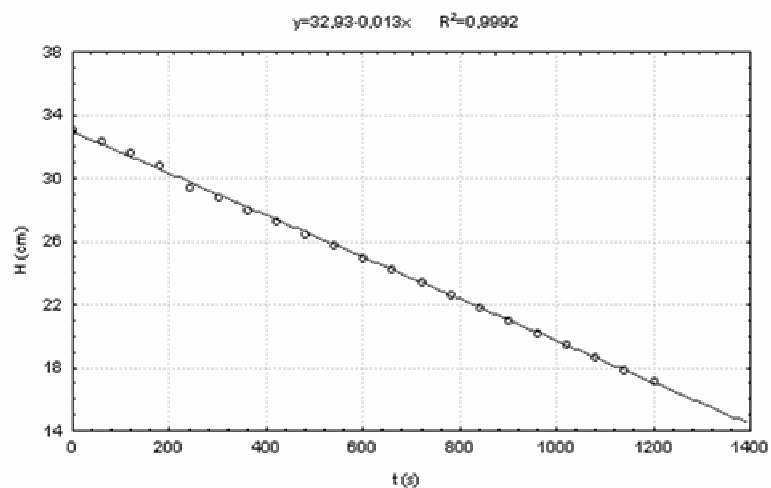


Figura A.9 – Velocidade de sedimentação para pH 7,5 e 0,170 mL de floculante.

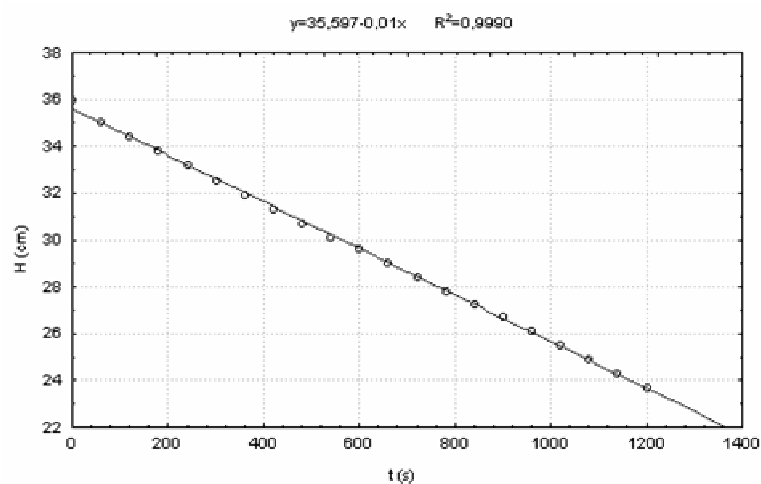


Figura A.10 – Velocidade de sedimentação para pH 8,9 e 0,136 mL de floculante.

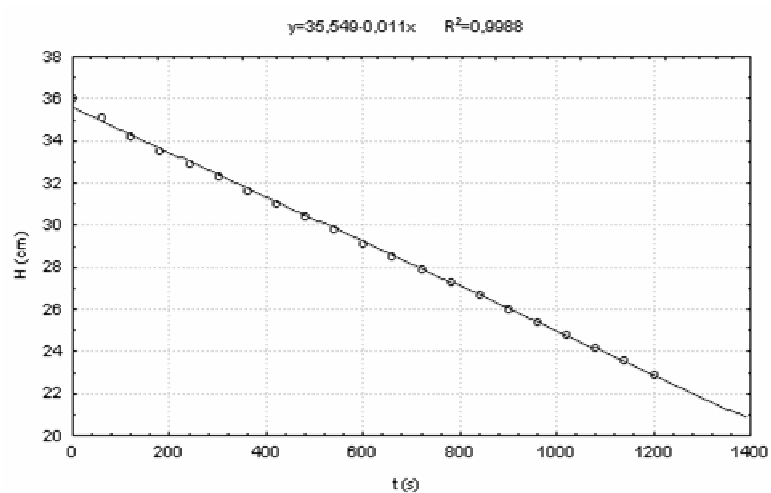


Figura A.11 – Velocidade de sedimentação para pH 8,9 e 0,164 mL de floculante.

APÊNDICE B

GRÁFICOS DOS TESTES DE SEDIMENTAÇÃO BATELADA EM PROVETA PARA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO E DENSIDADE DO FLOCO E DA PERMEABILIDADE

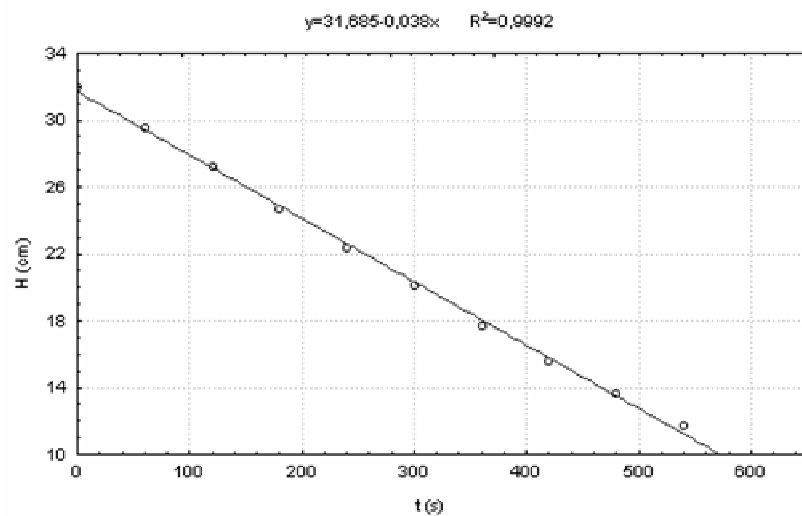


Figura B.1 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,010$ na sedimentação.

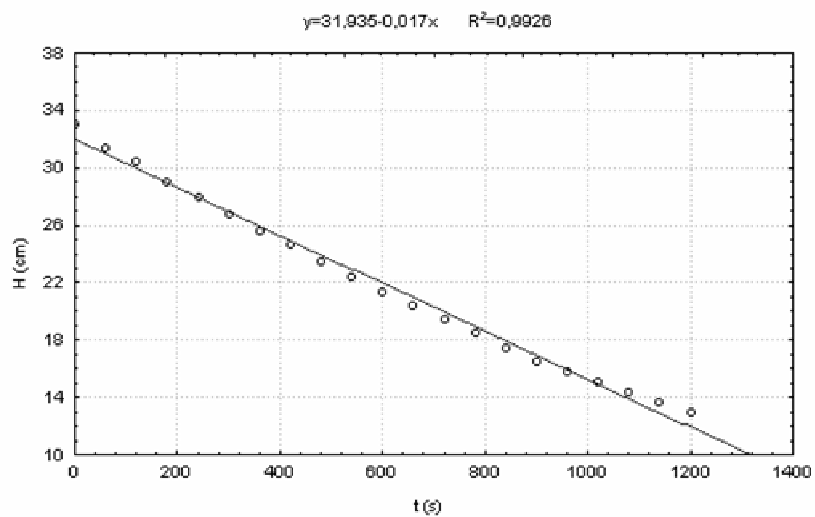


Figura B.2 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,015$ na sedimentação.

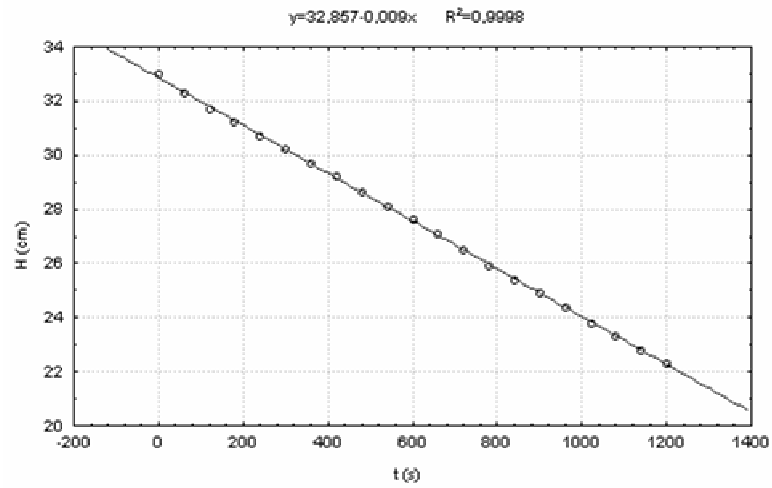


Figura B.3 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,020$ na sedimentação.

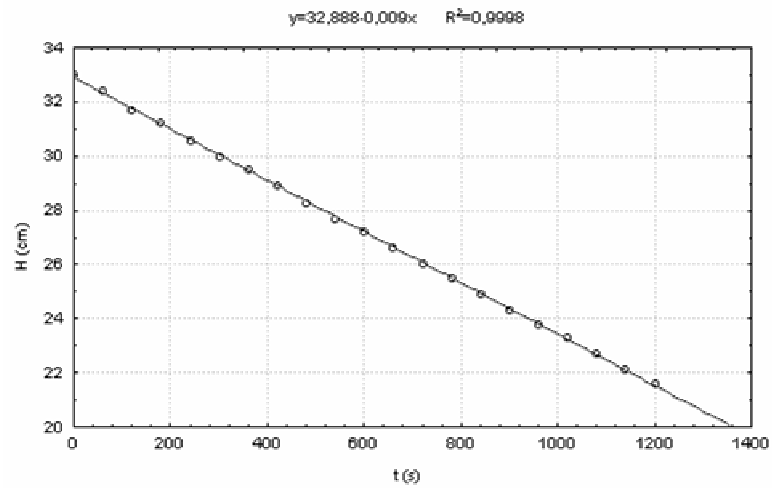


Figura B.4 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,025$ na sedimentação.

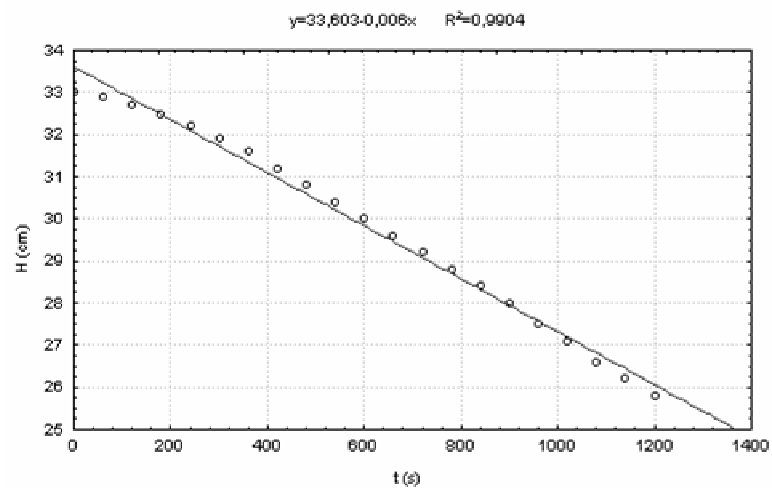
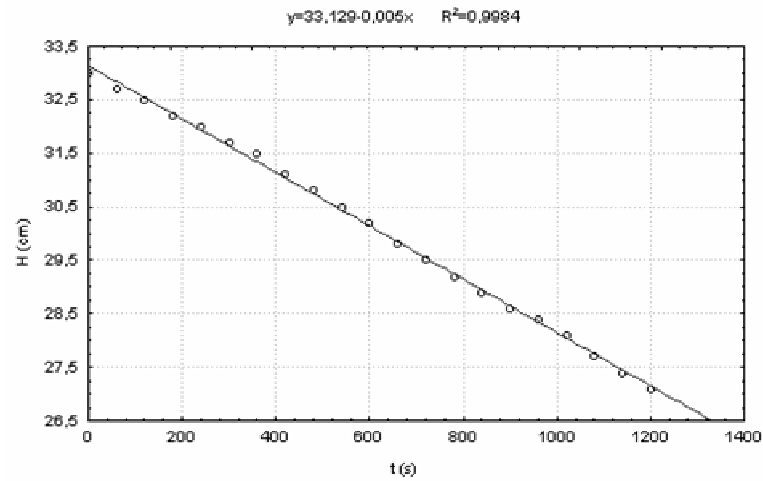
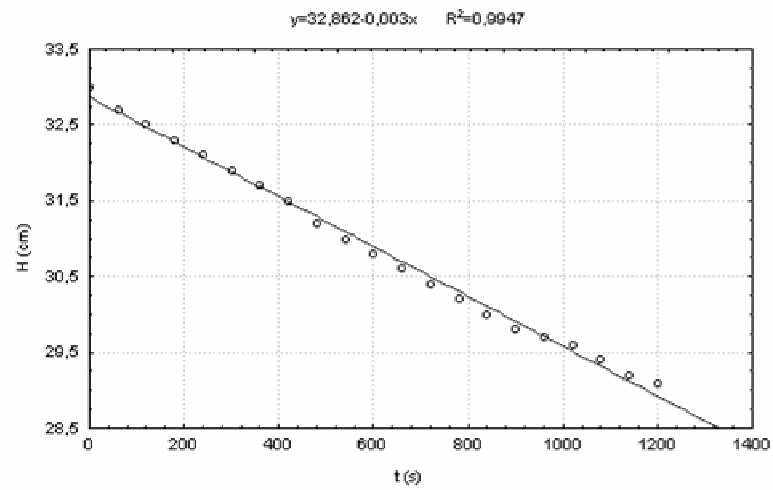
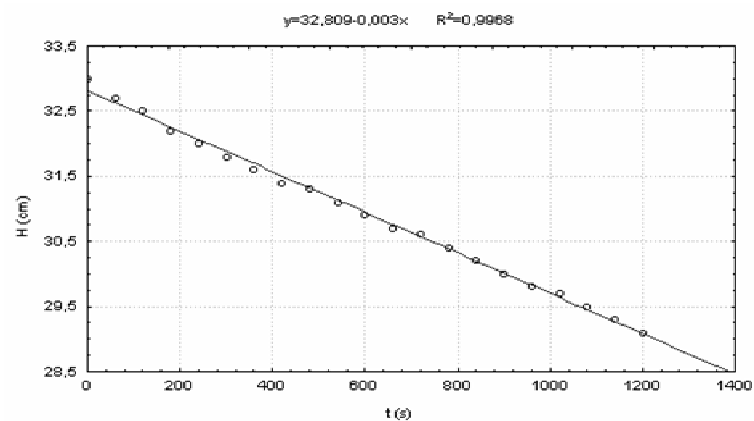


Figura B.5 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,030$ na sedimentação.

Figura B.6 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,035$ na sedimentação.Figura B.7 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,040$ na sedimentação.Figura B.8 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,045$ na sedimentação.

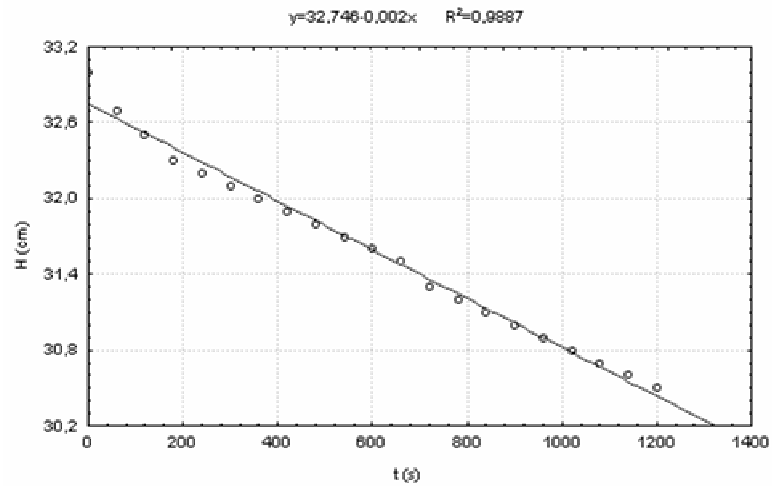


Figura B. 9 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,050$ na sedimentação.

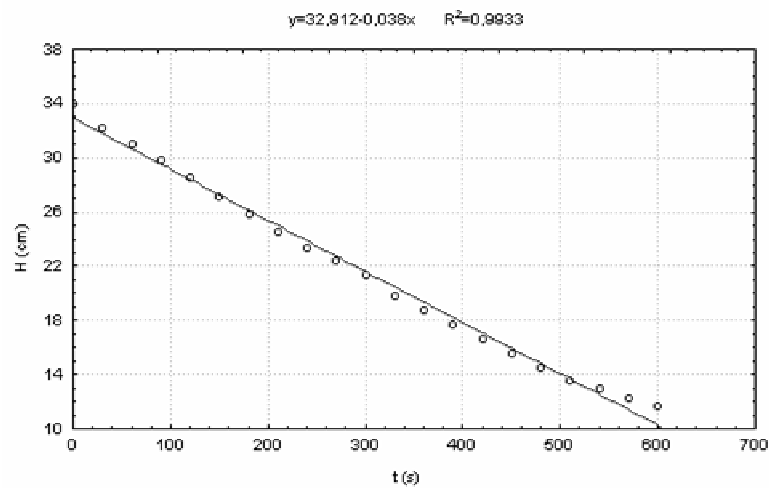


Figura B. 10 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,010$ na sedimentação com floculante.

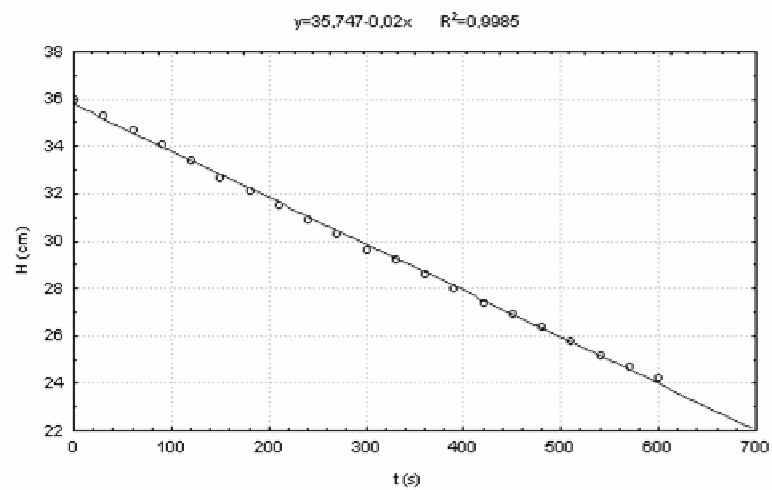
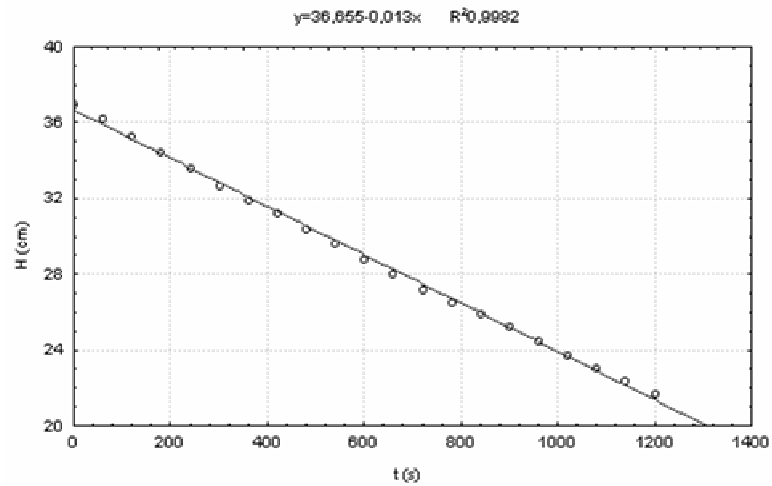
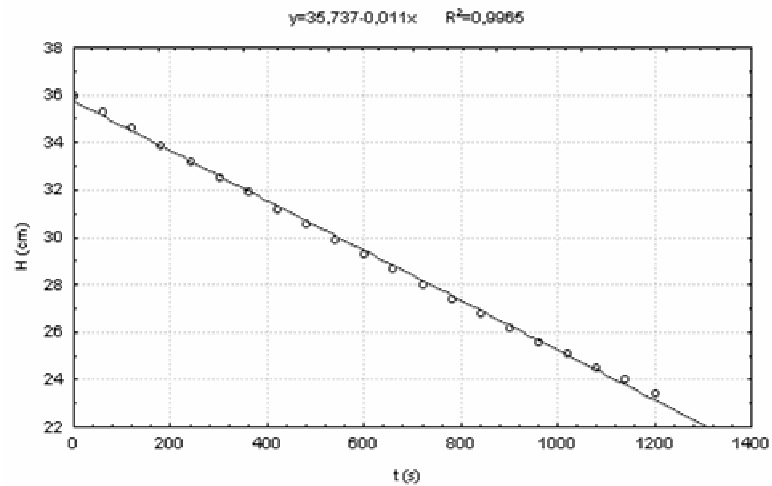
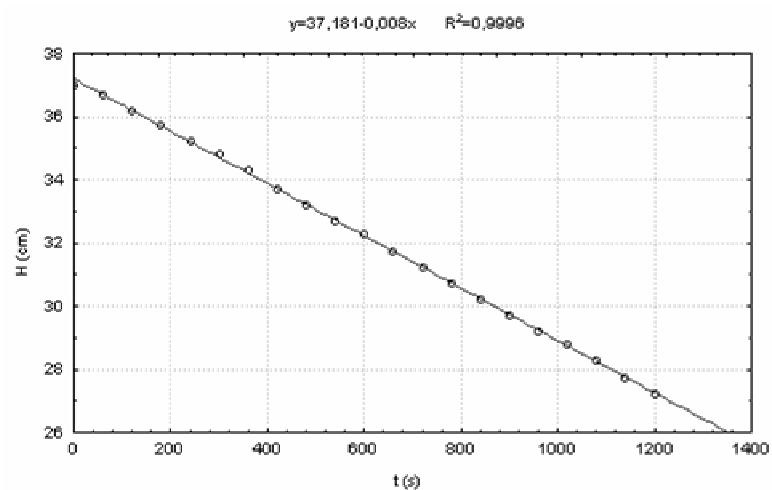


Figura B.11 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,015$ na sedimentação com floculante.

Figura B. 12 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,020$ na sedimentação com floculante.Figura B.13 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,025$ na sedimentação com floculante.Figura B.14 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,030$ na sedimentação com floculante.

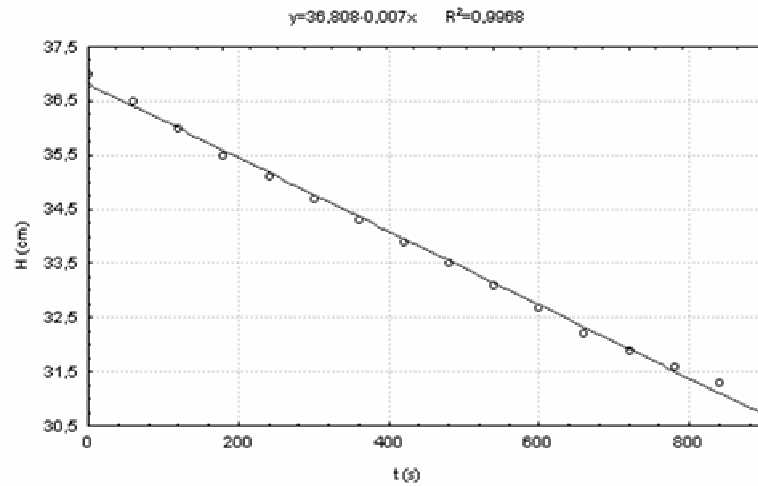


Figura B. 15 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,035$ na sedimentação com floculante.

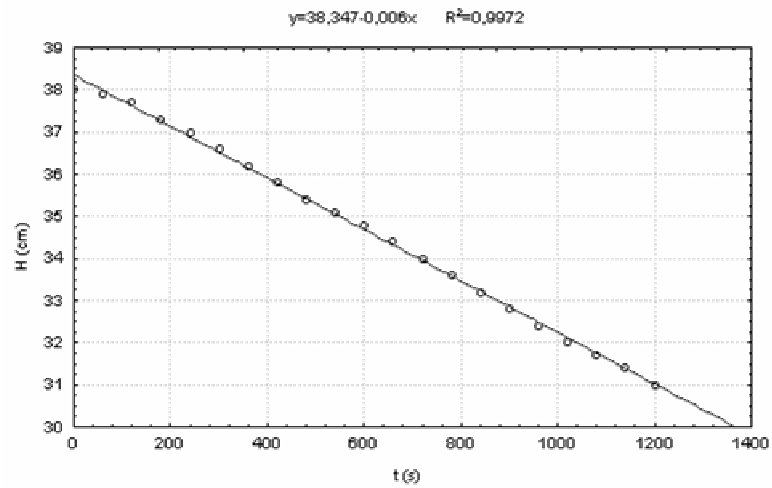


Figura B. 16 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,040$ na sedimentação com floculante.

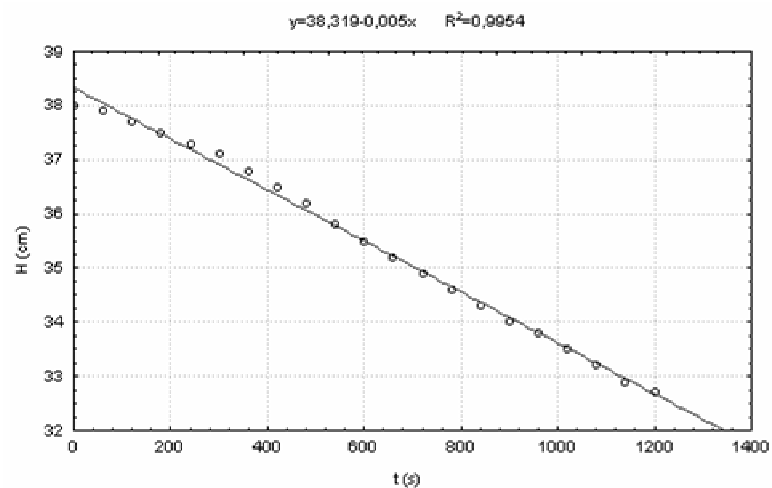


Figura B. 17 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,045$ na sedimentação com floculante.

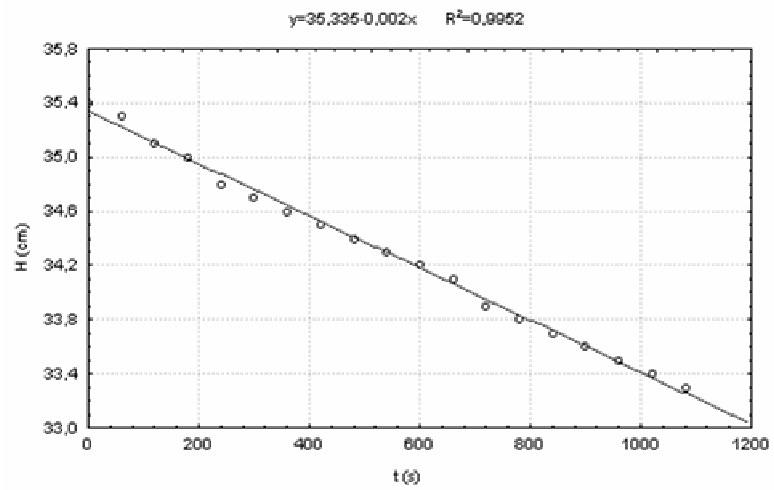


Figura B. 18 – Velocidade de sedimentação para $\varepsilon_s = 0,050$ na sedimentação com flocculante.

APÊNDICE C

RESULTADOS DOS TESTES DE SEDIMENTAÇÃO EM BATELADA EM PROVETAS DE DIFERENTES DIÂMETROS E SEDIMENTADOR CONVENCIONAL

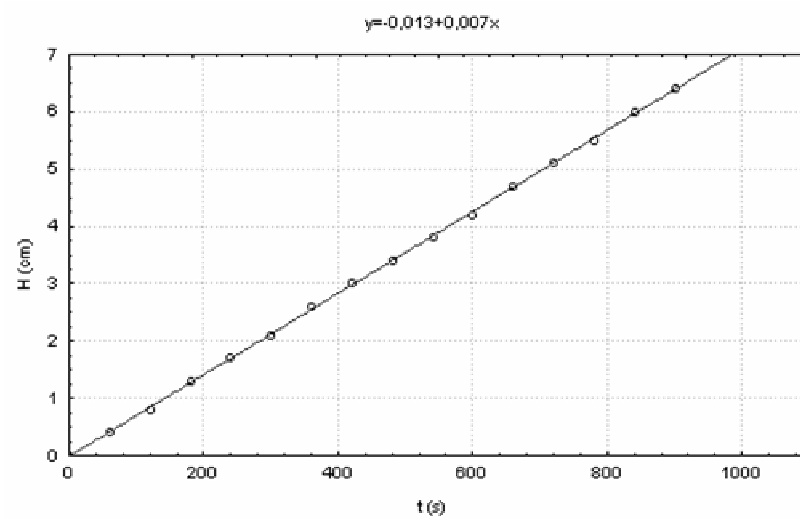


Figura C.1 – Velocidade de sedimentação para proveta de 3,9 cm de diâmetro.

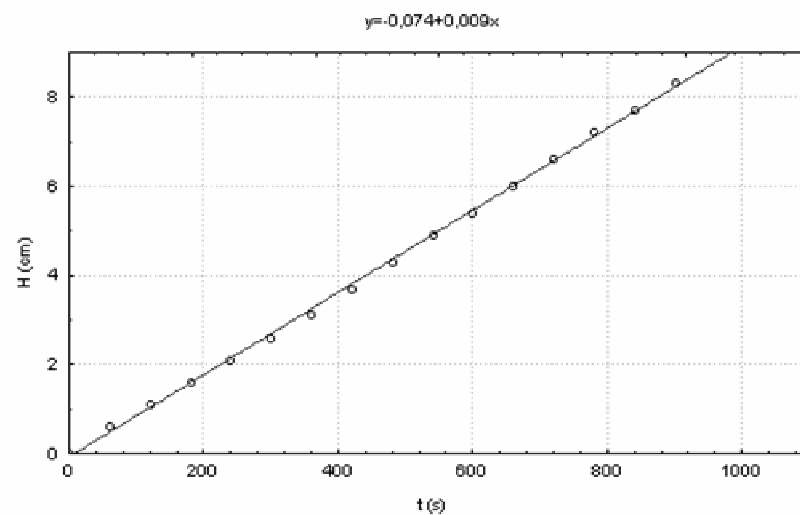


Figura C.2 – Velocidade de sedimentação para proveta de 7,0 cm de diâmetro.

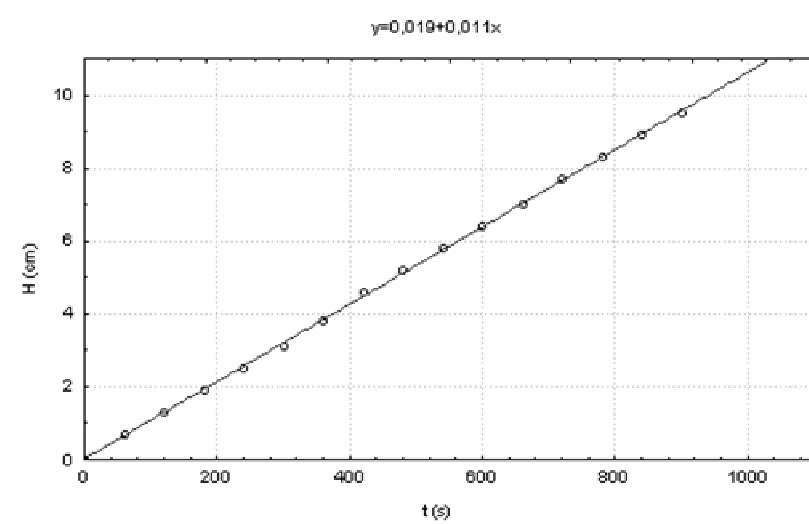


Figura C.3 – Velocidade de sedimentação para proveta de 8,0 cm de diâmetro.

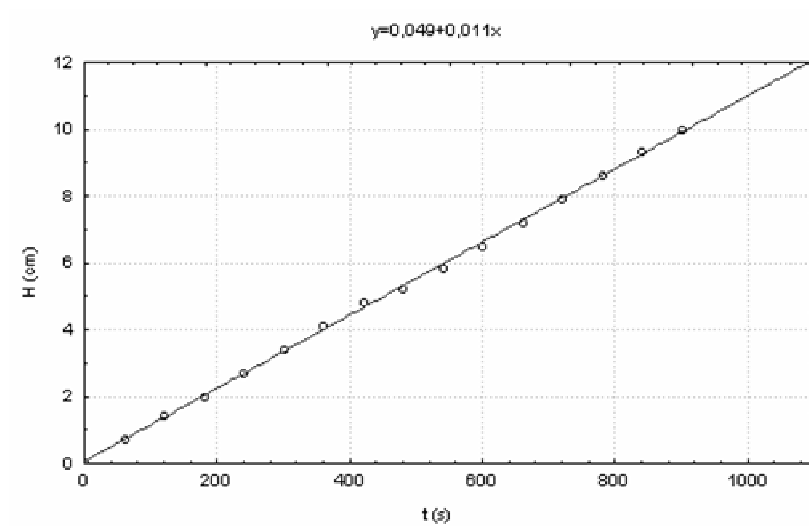


Figura C.4 – Velocidade de sedimentação para o sedimentador convencional.