

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE
FILTRAÇÃO A VÁCUO PARA ESPESSAMENTO DE
LODO E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS
CARACTERÍSTICOS

Fabiano Barbosa Pezzo



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Hidráulica e Saneamento

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires

DEDALUS - Acervo - EESC



31100036119

São Carlos

1998

Class.	TESE/EESC
Cutt.	4442 ✓
Tombo	0189/98

31100036119

st 0984084

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

P522d Pezzo, Fabiano Barbosa
Desenvolvimento de equipamento de filtração a vácuo para espessamento de lodo e determinação de parâmetros característicos / Fabiano Barbosa Pezzo. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires.

1. Filtração a vácuo.
2. Modelos matemáticos.
3. Lodo.
4. Condicionamento de lodo.
5. Espessamento de lodo. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **FABIANO BARBOSA PEZZO**

Dissertação defendida e aprovada em 20-5-1998
pela Comissão Julgadora:



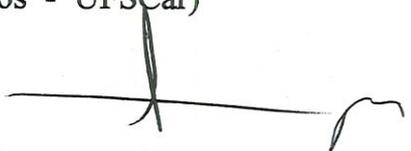
Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



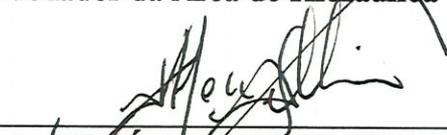
Prof. Doutor **EDSON LUIS SILVA**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Doutor **DEOVALDO DE MORAES JUNIOR**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

SUMÁRIO

Lista de figuras	i
Lista de tabelas	iii
Lista de símbolos	iv
Lista de abreviaturas e siglas	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
1 - Introdução	01
1.1-Apresentação	01
1.2- Objetivos	03
2 - Fundamentos	04
2.1 - O lodo	04
2.2 - Condicionamento do lodo	08
2.3 - Equipamentos simuladores do processo de filtração	09
2.4 - Teoria da filtração em filtros de correia a vácuo	14
2.4.1 - Filtros de correia a vácuo	14
2.4.2 - Fenômeno de espessamento em filtros de correia a vácuo	15
3 Modelagem matemática do processo de espessamento	17
4 - Metodologia Experimental	25
4.1 - Equipamento Experimental	25

4.2 - Coleta e preparação do lodo	29
4.3 - Planejamento Experimental	31
4.4 - Caracterização do lodo	33
4.5 - Determinação da dosagem de floculantes ao lodo	36
4.6 - Procedimento Experimental	38
4.7 - Procedimentos de Cálculo	39
4.7.1 - Conversão dos dados experimentais	39
4.7.2 - Avaliação do coeficiente de espessamento R^*	40
5 - Resultados e Discussões	41
5.1 - Comportamento do equipamento experimental	41
5.2 - Características da torta formada	42
5.3 - Comportamento da curva $h(t)$	43
5.4 - Comportamento do coeficiente de resistência R^*	58
5.4.1 - Influência da concentração no coeficiente R^*	59
5.4.2 - Influência da pressão no coeficiente R^*	60
5.4.3 - Influência do floculante no coeficiente R^*	61
6 - Conclusões e Sugestões	63
7 - Referências Bibliográficas	65
Anexo A	69
Anexo B	72

Anexo C

75

Anexo D

78

AGRADECIMENTOS

À meus pais, João e Maria Inês Pezzo, que sempre me apoiaram e deram motivação para nunca desistir. Gratidão eterna.

Aos amigos que muito contribuíram: Evandro Stéfano Crotti, Marco César Rodrigues da Silva, Francisco José Vela, Olímpio Gomes da Silva Neto e Marcelo Zaiat.

À Reinaldo Pisani Junior pelo apoio e amizade sempre incondicionais.

À Andréa Paula Buzzini pela atenção e paciência.

À todos os colegas, professores e funcionários da USP que auxiliaram na realização deste trabalho.

Ao professor Eduardo Cleto Pires, pela oportunidade.

À Cássia Rita Ferraz pelo companheirismo nos momentos difíceis.

Ao CNPq, que financiou este trabalho.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Distribuição da pressão da fase líquida e da concentração de sólidos ao longo da torta durante a filtração de lodos: (a) caso ideal incompressível e (b) lodo compressível. Adaptado de PIRES (1993).....	05
Figura 2.2 - Representação de floco de lodo. Adaptado de VESILIND(1994).....	06
Figura 2.3 - Curva hipotética da variação da distribuição da água ligada com a concentração de sólidos.....	07
Figura 2.4 - Influência da concentração na resistência específica.....	11
Figura 2.5 - Esquema do equipamento desenvolvido por PIRES (1993).....	12
Figura 2.6 - Influência da concentração na resistência específica, PIRES (1993).....	13
Figura 2.7 - Influência da pressão na resistência específica, PIRES (1993).....	13
Figura 2.8 - Ilustração de modelo característico de filtro de correia à vácuo.....	14
Figura 3.1- Modelo físico do fenômeno de espessamento, PIRES (1993).....	18
Figura 3.2 - Esquema do volume de controle para dedução da equação geral do esvaziamento do reservatório, PIRES (1993).....	19
Figura 4.1 - Ilustração do esquema geral do equipamento experimental.....	26
Figura 4.2 - Detalhamento do equipamento experimental utilizado.....	27
Figura 4.3: Fluxograma do funcionamento do sistema de aquisição de dados.....	29
Figura 4.4 - Distribuição granulométrica de partículas para os lodos ensaiados.....	34
Figura 4.5 - Fotomicroscopia eletrônica do lodo do curtume.....	34
Figura 4.6 - Fotomicroscopia eletrônica do lodo de papel.....	35

Figura 4.7 - Fotomicroscopia eletrônica do lodo preparado.....	35
Figura 5.1 -Variação da pressão com o tempo no interior da autoclave.....	41
Figura 5.2 - Gráfico de Teor de sólidos da torta (%) em função da Pressão (kPa) para o lodo preparado nos níveis de concentração C1, C2 e C3.....	43
Figura 5.3 - Gráfico de Teor de Sólidos da torta (%) em função da Pressão (kPa) para o lodo preparado, com adição de flocculante (PrepFloc) e sem adição de flocculante (Prep), nos níveis de concentração C1, C2 e C3.....	44
Figura 5.4 - Curvas h em função de t para a altura medida (hm) e a altura calculada (hc) pelo modelo, Concentração C1, lodo preparado.....	46
Figura 5.5 - Curvas h em função de t para a altura medida (hm) e a altura calculada (hc) pelo modelo, Concentração C2, lodo preparado.....	47
Figura 5.6 - Curvas h em função de t para a altura medida (hm) e a altura calculada (hc) pelo modelo, Concentração C3, lodo preparado.....	48
Figura 5.7 - Curvas h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C1, lodo preparado flocculado.....	49
Figura 5.8 - Curvas h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C2, lodo preparado flocculado.....	50
Figura 5.9 - Curvas h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C3, lodo preparado flocculado.....	51
Figura 5.10 - Curva h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C1, lodo do curtume.....	53
Figura 5.11 - Curva h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C2, lodo do curtume.....	54

Figura 5.12 - Curva h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C3, lodo do curtume.....	54
Figura 5.13 - Curva h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C1, lodo do curtume floculado.....	55
Figura 5.14 - Curva h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C2, lodo do curtume floculado.....	56
Figura 5.15 - Curva h em função de t para a altura medida (hm) e altura calculada pelo modelo (hc), Concentração C3, lodo do curtume floculado.....	57
Figura 5.16 - Gráfico de R* em função da Concentração para o lodo preparado.....	59
Figura 5.17 - Gráfico de R* em função da Concentração para o lodo do curtume.....	60
Figura 5.18 - Gráfico de R* em função da Pressão para o lodo preparado.....	60
Figura 5.19 - Gráfico de R* em função da Pressão para o lodo do curtume.....	61
Figura 5.20 - Gráfico da influência da adição de floculante em R*, lodo preparado, pressão P4.....	61
Figura 5.21 - Gráfico da influência da adição de floculante em R*, lodo do curtume, pressão P4.....	62

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Efeitos da pressão na resistência específica.....	10
Tabela 2.2 - Efeitos da adição de floculante na resistência específica.....	10
Tabela 2.3 - Efeitos da adição de floculantes na resistência específica.....	12
Tabela 4.1 - Valores das pressões e concentrações utilizadas nos ensaios e seus cruzamentos.....	31

Tabela 4.2 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo do curtume.....	32
Tabela 4.3 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo do curtume floculado.....	32
Tabela 4.4 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo preparado.....	32
Tabela 4.5 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo preparado floculado.....	33
Tabela 4.6 - Resultados das análises de sólidos para cada lodo.....	33
Tabela 4.7 - Análises de turbidez dos lodos, em Unidades de Turbidez(UT).....	36
Tabela 4.8 - Resultados da leitura de turbidez para o lodo do curtume.....	37
Tabela 4.9 - Resultados da leitura de turbidez para o lodo preparado.....	37
Tabela 5.1 - Resultados experimentais obtidos para R^*	58

Lista de Símbolos

Alfabeto latino

A	- área da seção transversal do filtro, (L^2);.....	05
A_f	- área do filtro, (L^2);.....	22
A_L	- área lateral do volume de controle, (L^2);.....	20
C	- concentração da massa, (ML^{-3});.....	22
F_B	- forças de corpo, (MLT^{-2});.....	18

F_{ext}	- forças externas ao volume de controle, (MLT ⁻²);.....	18
F_t	- força para manter a tela fixa em relação ao eixo do escoamento, (MLT ⁻²).....	20
F_s	- forças de superfície, (MLT ⁻²);.....	18
g	- aceleração da gravidade, (LT ⁻²);.....	20
H_0	- altura inicial da suspensão sobre a tela, (L);.....	23
$h(t)$	- altura da massa sobre a tela no instante t, (L);.....	20
$K(t)$	- fator de proporcionalidade, (L ⁻¹);.....	22
n	- coeficiente de compressibilidade, adim;.....	23
P_s	- pressão negativa sob a tela, (ML ⁻¹ T ⁻²);.....	20
P_{atm}	- pressão atmosférica sobre a superfície livre, (ML ⁻¹ T ⁻²);.....	20
$Q(t)$	- taxa de filtração em função do tempo, (L ³ T ⁻¹);.....	05
R	- coeficiente de resistência para escoamentos darcianos, (ML ⁻¹);.....	23
R^*	- coeficiente de resistência ao espessamento, (M ⁻¹ L ⁻¹ T);.....	24
R_f	- resistência da torta em formação, (L ⁻¹);.....	05
R_w	- resistência do meio suporte, (L ⁻¹);.....	05
V	- Velocidade, (LT ⁻¹);.....	19
$V_d(t)$	- velocidade de espessamento, (LT ⁻¹);.....	20
 Alfabeto grego		
β	- constante empírica, adim;.....	21

η	- coeficiente de retenção de sólidos, adim;.....	23
μ	- viscosidade do filtrado, (ML ⁻¹ T ⁻¹);.....	05
ν	- viscosidade cinemática do fluido, (L ² T ⁻¹);.....	22
ρ	- massa específica, (M L ⁻³);.....	19
τ	- tensão de cisalhamento das paredes laterais, (ML ⁻¹ T ⁻²);.....	20

Outros símbolos

ΔP	- diferença de total de pressão, (ML ⁻¹ T ⁻²);.....	05
dA	- diferencial de área, (L ²);.....	19
dV	- diferencial de volume, (L ³);.....	19
$\nabla(t)$	- volume acumulado de filtrado entre os instantes 0 e t, (L ³);.....	23
•	- produto escalar.....	15

Lista de abreviaturas e siglas

adim - adimensional

mm - milímetro

mmHg - milímetros de mercúrio

mV - milivolts

kPa - quiloPascal

SF - sólidos fixos, (ML⁻³);

SSF - sólidos suspensos fixos, (ML⁻³);

SSV - sólidos suspensos voláteis, (ML⁻³);

ST - sólidos totais, (ML⁻³);

STF - sólidos totais fixos, (ML⁻³);

STV - sólidos totais voláteis, (ML⁻³);

RESUMO

PEZZO, F.B. *Desenvolvimento de equipamento de filtração a vácuo para espessamento de lodo e determinação de parâmetros característicos*. São Carlos, 1998. 96p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um equipamento de filtração a vácuo para simulação do espessamento do lodo e determinação dos parâmetros característicos da filtração. Para descrever o comportamento do processo de filtração foi utilizado o modelo matemático proposto por PIRES (1993) que simula o esvaziamento de um reservatório por meio de uma diferença de pressão constante e com resistência crescente ao escoamento. Foram ensaiados dois tipos de lodo com concentrações de 3,2 , 5,8 e 8,2 g/l submetidos à pressões relativas negativas entre 26,6 e 79,9 kPa, em cinco níveis de intervalos de 13,3 kPa. A curva da altura medida em função do tempo e a curva da altura simulada não foram coincidentes, possivelmente pela modelagem considerar o coeficiente de compressibilidade constante ao invés de ser um parâmetro livre do modelo. A adição de floculante às amostras de lodo resultaram numa diminuição no coeficiente de resistência ao espessamento. Foram obtidas tortas com teores de sólidos de até 35%, sendo que o uso de floculante permitiu obtenção de tortas com maiores teores de sólidos. O equipamento experimental desenvolvido atingiu o objetivo inicialmente proposto de realização de filtração a pressão constante e apresentou boa reprodutibilidade. O maior valor observado para a variação da pressão de filtração foi de 1,47%.

Palavras-chave: filtração a vácuo, modelos matemáticos, lodo, condicionamento de lodo, espessamento de lodo.

ABSTRACT

PEZZO, F.B. *Development of vacuum filtration equipment for sewage thickening and determination of the characteristic parameters*. São Carlos, 1998. 96p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The purpose of this work was the development of vacuum filtration equipment for the simulation of sewage dewatering and determination of the characteristic filtration parameters. In order to describe the behavior of the filtration process, a mathematical model proposed by PIRES (1993) was used. This model simulates the draining of a reservoir by means of a constant pressure difference and with increasing resistance to flow. Two types of sewage - at concentrations of 3.2, 5.8 and 8.2 g/l - were tested. They were submitted to negative relative pressures between 26.6 and 79.9 kPa, in five 13.3 kPa intervals. The height curve measured as a function of time and the simulated height curve were not coincidental, probably due to the use of a constant compressibility coefficient, instead as a free parameter of the model. The addition of flocculant to the sewage samples resulted in the decrease of the thickening resistance coefficient. Cakes with solid content up to 35% were obtained, while the use of flocculant resulted in cakes with higher solid contents. The experimental equipment developed in this work fulfilled the initial objective of performing filtration at constant pressures and showed good reproducibility. The highest value observed for the pressure variation was 1.47%.

Keywords: vacuum filtration, mathematical models, sewage, sewage conditioning, thickening sewage.

1 - Introdução

1.1 - Apresentação

O desenvolvimento de novas tecnologias de tratamento e utilização racional dos recursos hídricos, bem como a preocupação na preservação do meio ambiente em toda a sua complexidade, tem alcançado avanços notáveis nas últimas décadas. Porém, como toda atividade humana que está integrada ao sistema de mercado, esta evolução é norteadada por um problema fundamental da economia: a escassez. WONNACOTT (1994) relaciona a escassez - relação entre os desejos ilimitados do ser humano e os recursos limitados do planeta - com a escolha que deve ser feita pela sociedade entre a produção de bens de consumo e bens de capital visando seu desenvolvimento econômico.

Esta escolha implica em um custo de oportunidade¹ que, quando visto sob a ótica do desenvolvimento de tecnologia resulta num deslocamento de recursos que deveriam ser destinados à produção de bens de consumo. Tal abordagem torna-se necessária quando consideramos a questão de conservação dos recursos hídricos. Uma vez que o desenvolvimento de tecnologias limpas de produção não acompanha a demanda de consumo do mercado por novos produtos e serviços, buscam-se medidas paliativas para a preservação do meio ambiente.

O tratamento de águas residuárias, independentemente do processo que a gerou, é também norteadado pelos custos de oportunidade. Considerando-se o descompasso citado anteriormente torna-se justificável a busca de metodologias que reduzam os impactos causados aos recursos hídricos pela contaminação através de efluentes líquidos gerados em processos industriais.

¹ - Custo de oportunidade de um produto é a alternativa que tem que ser sacrificada a fim de se obter esse produto.

É necessária, entre os diversos métodos de tratamento de água, uma etapa caracterizada pela retirada de água da suspensão de sólidos e conseqüente redução do volume de resíduos que posteriormente terão um destino final determinado de acordo com suas características. Esta etapa é denominada *Espessamento*² e envolve grande conhecimento dos parâmetros envolvidos no fenômeno para o projeto e otimização de equipamentos que envolvam princípios de separação sólido/líquido, como filtração, centrifugação e sedimentação.

A filtração, processo de separação de sólidos por passagem da suspensão através de um meio poroso, vem sendo largamente utilizada no processo de espessamento e contribuições valiosas foram feitas ao seu desenvolvimento desde a proposição, em 1856, da equação de Darcy. Podem ser encontrados no mercado diversos tipos de equipamentos baseados neste princípio, como filtros de correia a vácuo, filtros rotativos a vácuo e filtros prensa. Portanto, é de grande valia a utilização de simuladores do espessamento para determinação de parâmetros como pressão de operação do filtro, concentração de alimentação do lodo e área filtrante necessária, entre outros.

O presente trabalho pretende contribuir para o melhor conhecimento dos parâmetros envolvidos no espessamento de lodo através do desenvolvimento de equipamento de filtração a vácuo horizontal e da utilização do modelo matemático desenvolvido por PIRES (1993) para simular a filtração de suspensões de sólidos sob pressão constante, com formação de tortas compressíveis, conforme detalhamento apresentado nos capítulos seguintes.

² - O termo Espessamento empregado no presente trabalho deve ser compreendido como desidratação ou secagem de suspensões aquosas através de processo de filtração.

1.2 - Objetivos

São objetivos do presente trabalho:

- Adaptação e montagem de equipamento de filtração a vácuo para espessamento de suspensões em ensaios de laboratório para caracterização de lodos.
- Estudar o comportamento de diferentes tipos de lodo durante o espessamento buscando uma análise comparativa das variáveis que interferem na determinação dos parâmetros característicos do fenômeno.
- Estudar os efeitos do condicionamento do lodo no espessamento e nas características da torta.

2 - Fundamentos

2.1 - O Lodo

O tratamento de águas residuárias gera uma mistura, denominada lodo, que normalmente apresenta sólidos em suspensão, compostos orgânicos, inorgânicos e microorganismos que aliados à outros fatores tornam a suspensão de difícil manejo e forte odor. Como a composição dessa mistura depende do processo que a gerou, e estes são variados, pode-se encontrar lodos com as mais diversas características. Muitos pesquisadores têm concentrado esforços na determinação dessas características, sobretudo através de estudos empíricos, visando o melhor conhecimento de como elas interferem no processo de espessamento do lodo.

DICK & BALL (1980), em LOTITO et al. (1993), classificam em três categorias os fatores que influenciam o espessamento:

- a) propriedades do fluido: presença de água ligada, viscosidade e densidade;
- b) propriedades das partículas: distribuição de tamanho, forma, área e densidade;
- c) propriedades do lodo: concentração de sólidos, permeabilidade e propriedades eletrocinéticas.

Considerando-se que o processo de espessamento é resultado da interação desses diversos fatores é necessário a abordagem isolada de cada um deles para a compreensão do fenômeno como um todo.

PIRES (1993) destaca que a presença de bolhas gasosas presas às partículas sólidas bem como a agregação das partículas formam uma massa compressível que interfere, durante o espessamento, na distribuição da concentração de sólidos e no perfil da pressão ao longo da torta, conforme ilustra a Figura 2.1.

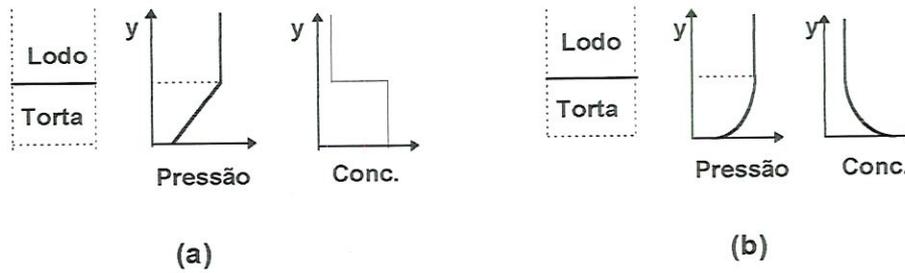


Figura 2.1 - Distribuição da pressão da fase líquida e da concentração de sólidos ao longo da torta durante a filtração de lodos: (a) caso ideal incompressível e (b) lodo compressível. Adaptado de PIRES (1993).

De acordo com SORENSEN & HANSEN (1993), a compressibilidade de um lodo significa que a resistência ao fluxo de líquido através da torta durante o espessamento é sensível à mudanças na pressão aplicada tornando-se necessárias adaptações à equação originalmente proposta por Darcy, representada pela equação 2.1, que expressa apenas que há uma relação de proporcionalidade entre a vazão de um escoamento em um meio poroso e uma diferença de pressão. Os mesmos autores propuseram um modelo que considera a compressibilidade da torta e obtiveram melhoras significativas ao modelo simplificado da equação de Darcy.

$$\Delta P = \frac{\mu Q(t)}{A} R_f + \frac{\mu Q(t)}{A} R_w \quad (2.1)$$

na qual

- ΔP - diferença de total de pressão, $(ML^{-1}T^{-2})$;
- $Q(t)$ - taxa de filtração em função do tempo, (L^3T^{-1}) ;
- μ - viscosidade do filtrado, $(ML^{-1}T^{-1})$;
- A - área da seção transversal do filtro, (L^2) ;
- R_f - resistência da torta em formação, (L^{-1}) ;
- R_w - resistência do meio suporte, (L^{-1})

O presente trabalho se limita à abordagem do modelo proposto por PIRES(1993), que compila em sua obra extensa análise dos modelos desenvolvidos em busca do melhor equacionamento para o fenômeno, conforme detalhamento apresentado na seção 03.

VESILIND (1994) aborda a influência da *água ligada* – água existente na suspensão de sólidos que está presente no interior dos flocos de lodo, constituindo portanto a fase sólida – no espessamento como sendo um parâmetro importante da operação. A água ligada pode se apresentar de três formas distintas: água intersticial, água vicinal e água de hidratação, conforme ilustração na Figura 2.2. Somente parte da água intersticial pode ser removida pelo espessamento mecânico, sendo a água vicinal e de hidratação os limitantes na redução de volume do lodo a ser desaguado. A Figura 2.3 ilustra uma curva hipotética mostrando a variação da distribuição da água ligada com a concentração de sólidos.

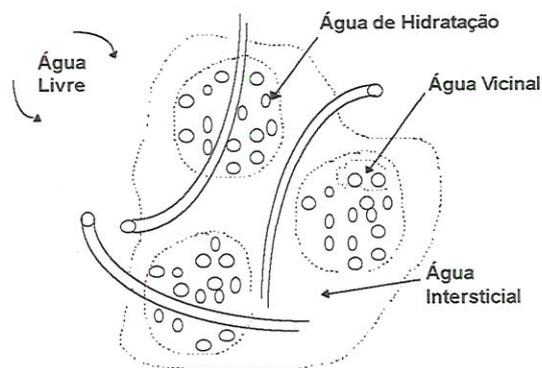


Figura 2.2 - Representação de floco de lodo. Adaptado de VESILIND(1994)

Por sua vez, COLIN & GAZBAR (1995) desenvolveram técnica de caracterização das formas de água ligada presentes em lodos válida para efluentes domésticos e industriais com resultados significativos.

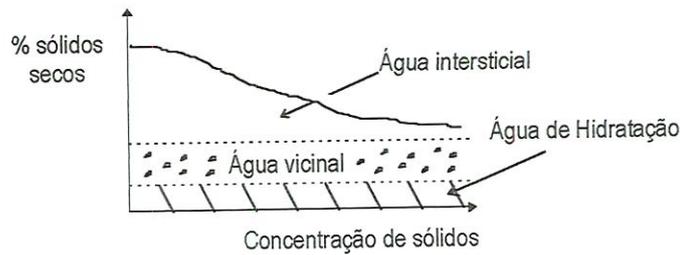


Figura 2.3 - Curva hipotética da variação da distribuição da água ligada com a concentração de sólidos.

A distribuição do tamanho de partículas presentes na suspensão é outro fator importante para caracterização do lodo. KARR & KEINATH (1978) citam que variações nas características do espessamento devido à fatores como pH, degradação biológica e condicionamento podem ser explicadas por mudanças na distribuição de tamanho das partículas.

KOENDERS & WAKEMAN (1996) e OLBOTER & VOGELPOHL (1993), salientam que a remoção de partículas pequenas durante o espessamento é aumentada pela presença de partículas maiores em suspensão. Os mesmos autores utilizaram para determinação da distribuição do tamanho de partículas, respectivamente, contadores de partículas HIAC/ROYCO e TALL Coulter. Por sua vez, MACKIE & BAI (1993) utilizaram-se de espectrômetros de difração de laser e ADIN & ALON (1993) de técnicas de fracionamento e microfotografia. PIRES (1993) utilizou-se de um analisador de comprimento de fibra KAJAANI FS 200, uma vez que a suspensão ensaiada consistia basicamente em partículas fibrosas.

Outras características como concentração de sólidos, porosidade e resistência mecânica das partículas, viscosidade da suspensão, estado de floculação, condicionamento e idade do lodo também interferem no espessamento (TSANG & VESILIND, 1990). O condicionamento do lodo é uma das características a serem

analisadas neste trabalho e a abordagem a este respeito está apresentada na seção seguinte.

2.2 - Condicionamento do lodo

O condicionamento do lodo, conforme pode ser observado em vasta bibliografia, é amplamente utilizado para facilitar a remoção de água livre durante a operação de espessamento. O condicionamento químico, seja por polímeros orgânicos ou coagulantes inorgânicos resulta na neutralização de partículas de lodo eletricamente carregadas, aglomeração de partículas dispersas e diminuição da água ligada entre as partículas agregadas (SENTHILNATHAN & SIGLER, 1993).

A importância do condicionamento do lodo e dos mecanismos de condicionamento por polímeros foi apresentada por CHRISTENSEN et al (1993) e VESILIND (1994) através de estudos que mostram que a adição de produtos químicos provavelmente não afeta a água vicinal, porém aumenta consideravelmente a remoção da água intersticial, resultando em tortas com maior teor de sólidos.

Em contrapartida, ERIKSSON & ALM (1993) apresentam um trabalho que utilizou três polieletrólitos catiônicos de diferentes densidades de carga para condicionar amostras de lodo ativado. Inicialmente o lodo apresentava alta turbidez residual após a sedimentação, alta resistência à filtração e pouca formação de flocos. Com a adição de polieletrólitos o lodo apresentou grande formação de flocos e boa resistência mecânica, porém sem influência nas propriedades da filtração. Os mesmos autores alertam para a baixa eficiência do condicionamento em lodos com alta concentração de sólidos e que, devido à complexidade do fenômeno, são necessários estudos que abordem detalhadamente as interações entre as moléculas da suspensão.

SINGH (1997) afirma que a adição de condicionantes ao lodo reduz a tensão superficial da fase líquida, aumentando a capacidade de espessamento e permitindo também a obtenção de tortas com maiores teores de sólidos. O mesmo autor destaca que

deve ser quantificada, como parte da etapa de caracterização do lodo, a mobilidade eletrocinética da amostra e apresenta como um dos resultados de seu trabalho a obtenção de tortas com teor de umidade de 11%.

WOODARD & WUKASC (1994) obtiveram tortas com 50% de teor de sólidos de lodos anteriormente incapazes de serem filtrados através de tratamentos termoquímicos e adição de ácidos e polímeros catiônicos em lodos de estações de tratamento de água de abastecimento.

2.3 - Equipamentos simuladores do processo de filtração

Por mais complexo e representativo que seja o equacionamento desenvolvido para descrever o processo de filtração sempre haverá a necessidade de parâmetros experimentais que representem, com a máxima fidelidade possível, as condições reais de trabalho de equipamentos de filtração. Os equipamentos simuladores do processo de filtração, para determinação desses parâmetros, tem portanto, fundamental importância na evolução do conhecimento do fenômeno.

Para processos de simulação de filtração a vácuo, sob pressão constante, o funil Büchner acoplado a um recipiente graduado e sob a ação de uma bomba de vácuo constitui a mais simples alternativa. A graduação no recipiente permite que a taxa de filtração seja determinada por observação direta do volume filtrado com o tempo.

Os primeiros pesquisadores que sintetizaram trabalhos preliminares de outros autores e que utilizaram esse tipo de equipamento para a determinação de características de espessamento de lodo foram COACKLEY & JONES (1956). Segundo os autores, o conceito de resistência ao espessamento mostra-se adequado ao uso para comparação da eficiência de diferentes tratamentos de pré-filtração, da adição de floculantes e para pesquisas experimentais de filtração de lodo.

Através do monitoramento de variáveis relacionadas ao equipamento, como área filtrante, pressão aplicada e taxa de filtração, e variáveis relacionadas ao lodo, como concentração de sólidos e adição de flocculantes, os autores aplicaram a teoria de Carman¹ para determinação da resistência específica ao espessamento de amostras de lodo digerido, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2:

Tabela 2.1 - Efeitos da pressão na resistência específica

Pressão (kPa)	Resistência específica (cm/g)
0.5	4.7×10^9
1.0	7.4×10^9
1.5	$9,4 \times 10^9$
2.0	1.25×10^{10}
3.0	1.58×10^{10}
3.5	1.77×10^{10}
4.0	1.92×10^{10}
5.0	2.22×10^{10}
6.0	2.88×10^{10}

Tabela 2.2 - Efeitos da adição de flocculante na resistência específica

Flocculante*	Resistência específica (cm/g)
0.0	3.6×10^{10}
0.29	1.5×10^{10}
0.58	6.8×10^9
0.87	1.1×10^9

*Cloreto férrico, como porcentagem de sólidos totais no lodo.

¹- Para acompanhar o desenvolvimento do equacionamento da teoria de Carman recomenda-se o trabalho de COACKLEY & JONES, *Interpretation of results by the concept of specific resistance*, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 28, No 08, 1956.

Pode ser observado através das tabelas anteriores que a resistência específica à filtração aumenta com o aumento da pressão aplicada, ocorrendo o inverso com a adição de floculantes. No mesmo estudo, os autores também afirmam que o aumento na concentração de sólidos presentes na suspensão implica no aumento da resistência específica, conforme apresentado na Figura 2.4:

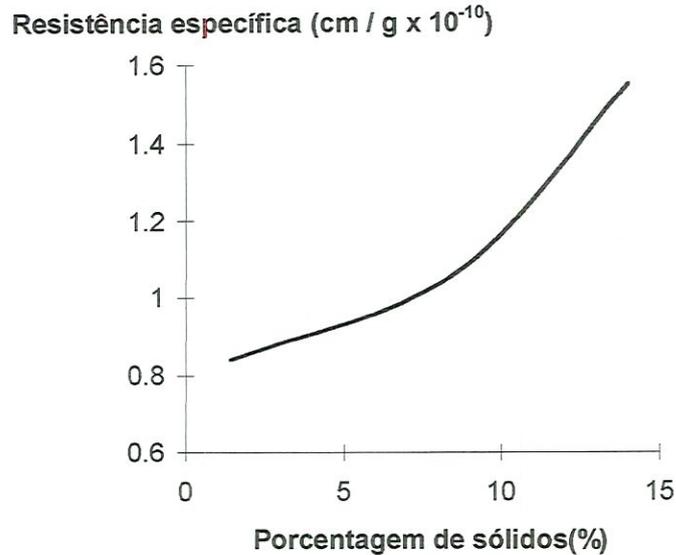


Figura 2.4 - Influência da concentração na resistência específica.

CHRISTENSEN et al. (1993) também desenvolveram trabalho de filtração a vácuo utilizando o funil Büchner para filtrar lodos ativados de estações de tratamento. A análise de caracterização do lodo foi também baseada no conceito de resistência específica e pode-se notar, conforme apresentado na Tabela 2.3, a redução no valor da resistência específica com a adição do polímero catiônico de alto peso molecular de nome comercial Praestol 644 BC.

Outro trabalho sobre a influência da adição de floculantes na resistência específica é o de ARHAN et al.(1996), que através do uso do funil Büchner e utilizando lodos gerados em processos aeróbios e anaeróbios apresenta resultados experimentais também demonstram os efeitos observados pelos autores citados anteriormente.

Tabela 2.3 - Efeitos da adição de polímero na resistência específica

Polímero*	Resistência específica (cm/g)
0.0	1.80×10^{14}
3.5×10^{-4}	1.42×10^{14}
1.0×10^{-3}	0.44×10^{14}
1.3×10^{-3}	0.21×10^{14}
1.0×10^{-2}	0.13×10^{14}
1.3×10^{-2}	0.25×10^{14}
1.0×10^{-1}	3.84×10^{14}

* em Kg polímero/kg suspensão

PIRES (1993) desenvolveu um equipamento para simular um filtro de correia á vácuo com uma grande vantagem em relação ao tradicional funil Büchner: um sistema de aquisição automático de dados que permite o monitoramento da queda de pressão no filtro e da variação da altura da suspensão com o tempo, não sendo, portanto, necessária a leitura do volume de filtrado acumulado com o tempo. A Figura 2.5 ilustra o equipamento utilizado nos experimentos.

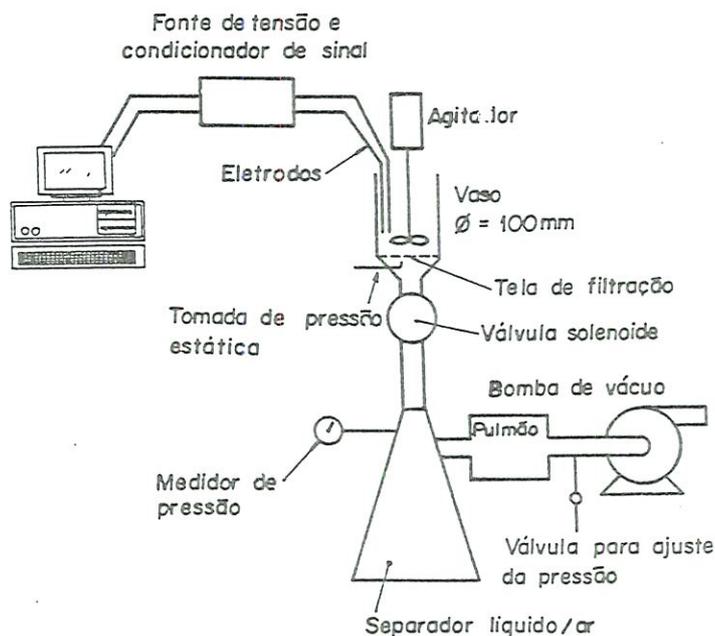


Figura 2.5 - Esquema do equipamento desenvolvido por PIRES (1993).

Com a utilização desse equipamento para espessamento de polpas celulósicas, PIRES(1993) analisou a influência da concentração de sólidos e da pressão aplicada no coeficiente de resistência ao espessamento (definido no próprio trabalho), cujos resultados estão apresentados graficamente nas Figuras 2.6 e 2.7. Pode-se observar, de acordo com a Figura 2.6, que o efeito da concentração de sólidos no coeficiente de resistência, abordado por COACKLEY & JONES (1956), se repete nesse trabalho.

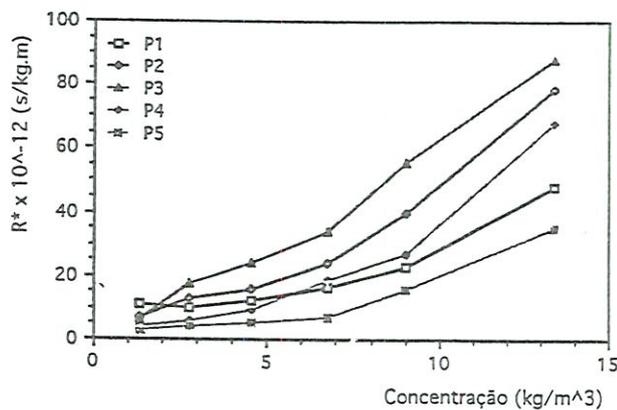


Figura 2.6 - Influência da concentração na resistência específica, PIRES (1993).

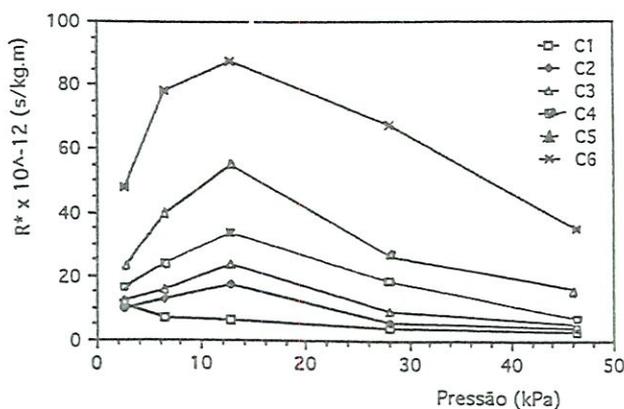


Figura 2.7 - Influência da pressão na resistência específica, PIRES (1993).

2.4 - Teoria da filtração em filtros de correia a vácuo

2.4.1 - Filtros de correia a vácuo

O modelo matemático empregado neste trabalho aplica-se aos filtros de correia a vácuo. As principais características desse tipo de filtro são, devido à posição horizontal da tela, a possibilidade de empregar o espessamento por ação gravitacional no estágio inicial da formação da torta e a auto-sustentação da suspensão e da torta sobre a tela.

SEVERIN & GRETHLEIN (1996) realizaram simulações em laboratório do espessamento de lodos condicionados de estações de tratamento para desenvolvimento de um novo modelo derivado da equação de Darcy. A utilização desse tipo de equipamento é de grande aplicação para espessamentos preliminares de lodos floculados como lodos industriais e lodos de estações de tratamento de água.

A figura 2.8 apresenta ilustração de modelo característico de filtro de correia a vácuo.

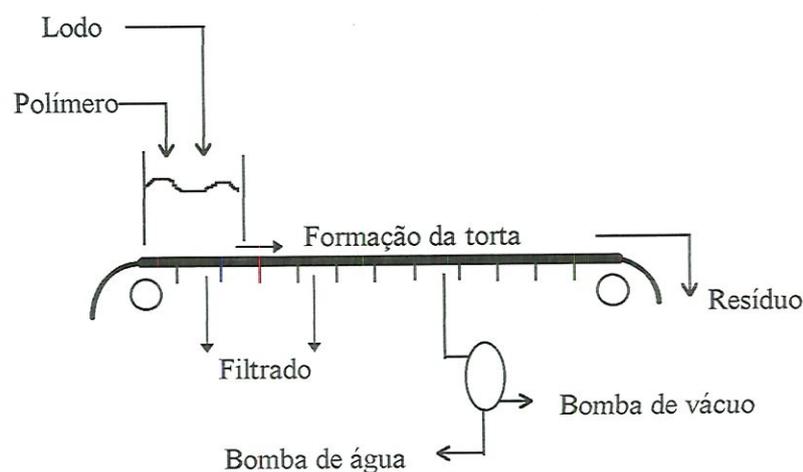


Figura 2.8 - Ilustração de modelo característico de filtro de correia a vácuo.

PIRES (1993) apresenta em sua obra uma compilação sobre o assunto que aborda, entre outros, os trabalhos desenvolvidos por HARWORTH & ROBERTS (1978), que discutem o conceito, a teoria e fatores que afetam o desempenho de filtros de correia e DEMBITZ (1978), HOWELL (1978), PRINSSSEN (1979) e SCHONSTEIN (1991), que apresentam o uso do filtro de correia na separação de diversos tipos de suspensões comparando suas características com aquelas encontradas em outros equipamentos de filtração.

São citados também HARRISON (1979), que fornece resultados de uso industrial através da comparação de diversos modelos de filtros e WAKEMAN & TARLETON (1990 e 1991), que utilizaram um filtro de correia como base para um sistema de filtração, no qual foram desenvolvidos modelos para a simulação, projeto e otimização de processos de separação sólido-líquido e posteriormente o modelo foi incorporado a um sistema que auxilia no projeto de processos e seleção de equipamentos para separação sólido-líquido.

2.4.2 - Fenômeno de espessamento em filtros de correia a vácuo

A utilização do modelo matemático proposto por PIRES (1993) pressupõe que o fenômeno de espessamento ocorra em três etapas que se distinguem pela mobilidade dos flocos de lodo enquanto são dispostos sobre a tela de filtração. A modelagem matemática apresentada na seção 03 se aplica à segunda etapa do processo de espessamento.

As três etapas podem ser caracterizadas como se segue:

Primeira etapa: ocorre quando a suspensão de flocos é lançada sobre a tela de filtração e os flocos encontram-se dispersos, com mobilidade total e acompanhando o escoamento da fase líquida.

Segunda etapa: Com o início da drenagem, induzida por caixas de vácuo que aplicam uma pressão relativa negativa sob a tela, caracteriza-se a segunda etapa e consequente deposição de flocos sobre tela, com a formação de uma torta cuja espessura

aumenta a medida que a água é drenada. É nessa etapa que ocorre a maior parte da retirada de água do processo.

Terceira etapa: Quando a torta é compactada, os flocos perdem a mobilidade, não há mais escoamento através do manto e somente água do próprio manto é retirada atingindo-se a terceira etapa. Pode então haver escoamento de ar através do manto, o que não ocorre nas outras etapas.

Como consequência da interação hidrodinâmica entre a torta e o meio filtrante a perda de carga total na filtração é maior que a soma de suas partes medidas isoladamente como o empregado na teoria clássica da filtração derivada da equação de Darcy (PIRES, 1993).

Por se tratar de estudo empírico e estritamente limitado às características de cada lodo e cada tela de filtração e suas interações, foi utilizado neste trabalho um único meio filtrante nos ensaios (disponível no laboratório), que foi uma tela monofilamento tipo Duplex GS 324, fabricada pela Huyck U.S.A, com abertura de 150 mesh nas duas direções. Essa HARDMAN (1994) apresenta completa abordagem sobre a aplicação de diversos tipos de meios filtrantes à separação líquido-sólido bem como orientações para a escolha de telas de acordo com as características do lodo a ser filtrado.

3 - Modelagem matemática do processo de espessamento

O modelo matemático empregado neste trabalho foi desenvolvido por PIRES (1993), que utilizou como modelo físico do fenômeno de espessamento um reservatório esvaziado pela ação de diferença de pressão entre a superfície superior livre e a superfície inferior do reservatório por onde há o esvaziamento. Pode-se, portanto, transpor esse reservatório a um equipamento de espessamento como sendo um volume de controle fixo em relação à tela bem como aplicá-lo na simulação do equipamento experimental utilizado no presente trabalho.

O autor baseou-se na conjugação da aplicação de equações de conservação de massa e quantidade de movimento ao volume de controle definido pelas fronteiras do reservatório com equações constitutivas baseadas em regras empíricas e semi-empíricas. A escolha por equações constitutivas baseadas em regras empíricas e semi-empíricas, ao invés de fundamentadas nos princípios físicos do escoamento em meios porosos deve-se, segundo o autor, à complexidade das equações e parâmetros de difícil avaliação resultantes da segunda opção. Nesta seção, para facilitar o acompanhamento deste trabalho apresenta-se, de forma resumida, o modelo proposto por PIRES(1993).

O modelo físico adotado consiste num vaso fixo à tela de filtração e que no instante inicial contém um volume definido pela altura H_0 , conforme ilustrado pela figura 3.1:

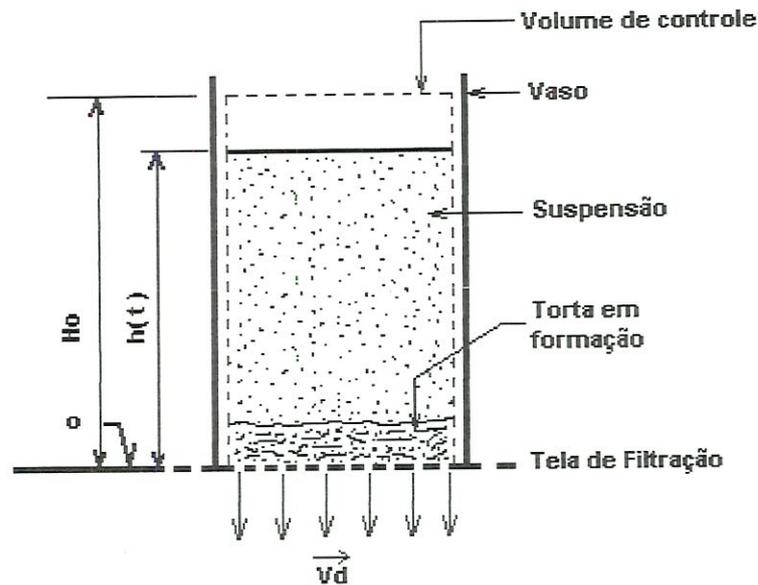


Figura 3.1- Modelo físico do fenômeno de espessamento, PIRES (1993).

Aplicando-se uma diferença de pressão entre a superfície livre superior e superfície por onde há o esvaziamento, na parte inferior do vaso, no instante t_0 , inicia-se o escoamento e a deposição de fibras sobre a tela. Para a determinação da força necessária para manter a tela fixa em relação ao escoamento aplica-se a equação de quantidade de movimento para o volume de controle fixo, equação 3.1, baseada no esquema do volume de controle apresentado na figura 3.2, que resulta em:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \sum \vec{F}_s + \sum \vec{F}_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \vec{v} \alpha dV + \int_{sc} \vec{v} \rho \vec{v} \cdot dA \quad (3.1)$$

na qual

F_{ext} - forças externas ao volume de controle;

F_s - forças de superfície;

F_B - forças de corpo;

V - Velocidade ;

dV - diferencial de volume;

dA - diferencial de área;

ρ - massa específica

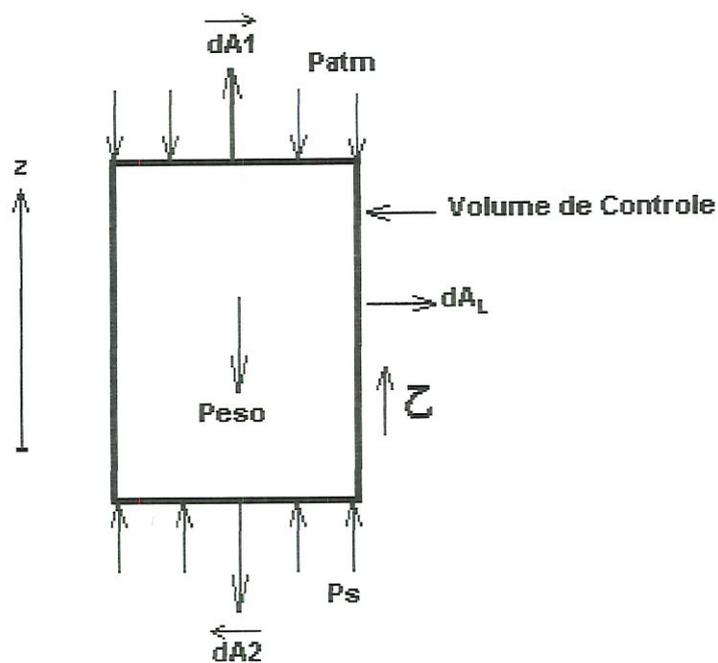


Figura 3.2 - Esquema do volume de controle para dedução da equação geral do esvaziamento do reservatório, PIRES (1993)

Para F_B e F_S , através de balanço de forças no volume de controle na direção vertical, temos as equações 3.2 e 3.3, respectivamente:

$$\sum F_B = -\rho \cdot g \cdot h(t) \cdot A \quad (3.2)$$

e

$$\sum F_s = P_s.A - P_{atm}.A + F_t + \tau.A_L \quad (3.3)$$

nas quais

g - aceleração da gravidade;

$h(t)$ - altura da massa sobre a tela no instante t ;

A - área de escoamento da água drenada;

P_s - pressão negativa sob a tela;

P_{atm} - pressão atmosférica sobre a superfície livre;

F_t - força para manter a tela fixa em relação ao eixo z do escoamento;

τ - tensão de cisalhamento das paredes laterais;

A_L - área lateral do volume de controle.

Considerando, por hipótese, que a velocidade de escoamento seja uniforme ao longo de superfícies paralelas à tela e que a velocidade média de escoamento em qualquer ponto do interior do volume de controle seja igual à velocidade de espessamento, aplica-se a equação de conservação de massa ao volume de controle para obtenção da equação que correlaciona velocidade de espessamento e taxa de variação da altura da massa, equação 3.4:

$$-V_d(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (3.4)$$

na qual $V_d(t)$ é a velocidade de espessamento.

Como

$$\vec{V} = -V_d(t) \quad (3.5)$$



substitui-se as equações (3.4) e (3.5) nas integrais de superfície e volume e obtêm-se

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{ve} \vec{V} \rho dV = \rho A \left[\left(\frac{dh}{dt} \right)^2 + h \frac{d^2 h}{dt^2} \right] \quad (3.6)$$

e

$$\int_{sc} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = -\rho A \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \quad (3.7)$$

Portanto, a equação geral para variação da altura da massa em relação ao tempo durante o processo de espessamento na seção de filtração é dada pela substituição das equações (3.2), (3.3), (3.6) e (3.7) na equação de quantidade de movimento (3.1). Essa substituição, após simplificações, resulta:

$$h \frac{d^2 h}{dt^2} + gh = \frac{P_s - P_{atm}}{\rho} + \frac{F_t}{\rho A} + \frac{\tau A_L}{\rho A} \quad (3.8)$$

O termo $d^2 h/dt^2$ representa a aceleração da suspensão, não desprezível em processos rápidos de filtração, e o termo $\tau A_L/\rho A$ (forças de cisalhamento distribuídas ao longo da parede do vaso) pode ser desprezado em relação ao termo das forças de pressão, $(P_s - P_{atm})/\rho$, e à força necessária para sustentação da tela, $F_t/\rho A$.

Para a avaliação do valor das forças exercidas sobre a tela e a parede lateral na equação (3.8) foi desenvolvido um equacionamento semi-empírico para os termos referentes à queda de pressão considerando o escoamento como não-darciano, ou seja, escoamento em que a soma dos termos $\tau A_L/\rho A$ e $F_t/\rho A$ pode ser considerada proporcional ao produto da velocidade de escoamento elevada a um expoente β , maior que a unidade, devido à influência das forças inerciais no escoamento, $(dh/dt)^\beta$ pela viscosidade cinemática do fluido que atravessa a manta de fibras, ν .

Ainda, por analogia com o escoamento em um duto sob pressão, verifica-se que igualando-se β a 2 obtêm-se boa aproximação para grande parte dos casos. Como a espessura da manta aumenta com a quantidade de massa filtrada, pode-se obter a equação (3.9):

$$\frac{F_i}{\rho A} + \frac{z A_L}{\rho A} = -K(t) \nu \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \quad (3.9)$$

na qual

$K(t)$ - fator de proporcionalidade, (L⁻¹);

ν - viscosidade cinemática do fluido, (L²T⁻¹).

O fator de proporcionalidade $K(t)$ representa a resistência à filtração imposta pela torta e, devido à $(dh/dt)^2$ ser negativa, o membro ao lado direito da equação (3.9) torna-se negativo como compensação.

O aumento da espessura da torta depositada sobre a tela é proporcional à concentração inicial de sólidos, ao volume de filtrado e à eficiência de retenção de sólidos, conforme a equação (3.10):

$$K(t) = R \frac{C \nabla(t) \eta}{A_f} \quad (3.10)$$

na qual

A_f - área do filtro, (L²);

C - concentração da massa, (ML⁻³);

R - coeficiente de resistência ao espessamento para escoamentos darcianos (ML⁻¹);

η - coeficiente de retenção de sólidos, adim;

$\nabla(t)$ - volume acumulado de filtrado entre os instantes 0 e t (L³).

A aplicação da equação de conservação de massa, desprezando-se o volume ocupado pela fase sólida da suspensão, fornece o volume acumulado de filtrado entre os instantes 0 e t .

$$\forall(t) = (H_0 - h(t))^n A_f \quad (3.11)$$

na qual

H_0 - altura inicial da suspensão sobre a tela, (L);

$h(t)$ - altura da suspensão no instante t , (L);

n - coeficiente de compressibilidade, adim.

Deve ser observado na equação (3.11) que o termo $(H_0 - h)$ está elevado ao expoente n , pois os efeitos de compressibilidade da suspensão aumentam proporcionalmente ao aumento da espessura da torta depositada sobre a tela, representado pelo termo $(H_0 - h)$.

Assim sendo, substituindo as equações (3.10) e (3.11) na equação (3.9) e a viscosidade cinemática pela razão entre a viscosidade absoluta e a massa específica obtém-se:

$$\frac{F_t}{\rho A} + \frac{\tau A_L}{\rho A} = -R \frac{\mu \eta}{\rho} C (H_0 - h)^n \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \quad (3.12)$$

Portanto, o modelo para escoamento não-darciano através da torta resulta:

$$\frac{d^2 h}{dt^2} + g = \frac{P_s - P_{atm}}{h \rho} + R^* \frac{\mu}{\rho} \eta C \frac{(H_0 - h)^n}{h} \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \quad (3.13)$$

na qual R^* é o novo coeficiente de resistência ao espessamento, em $(M^{-1}L^{1-n}T)$ e o expoente n , adimensional, denominado de coeficiente de compressibilidade, foi fixado em

dois para a análise do comportamento do coeficiente R^* em função da concentração e pressão. Neste caso, a unidade de R^* é $(M^{-1}L^{-1}T)$.

Transformando a equação (3.13) em um sistema de duas equações de primeira ordem têm-se:

$$\frac{dh}{dt} = V$$

$$\frac{dV}{dt} = R^* \frac{\mu}{\rho} \eta C \frac{(H_0 - h)^2}{h} V^2 + \frac{P_s - P_{atm}}{\rho h} - g \quad (3.14)$$

com as condições iniciais, para $t = 0$:

$$V = 0$$

$$h = H_0$$

Como a equação (3.14) não possui solução analítica, foi utilizado o método de resolução numérica de Runge-Kutta com o uso de programa desenvolvido para a determinação do coeficiente de resistência ao espessamento, R^* , conforme descrito no capítulo seguinte.

4 - Metodologia Experimental

Estão descritos neste capítulo o equipamento experimental utilizado, os procedimentos efetuados para a preparação do material a ser ensaiado e a metodologia para determinação dos parâmetros experimentais envolvidos.

4.1 - Equipamento experimental

O equipamento utilizado foi desenvolvido por PIRES (1993) em seus estudos, porém algumas alterações foram introduzidas no presente trabalho visando adaptar o equipamento aos ensaios de rotina.

A figura 4.1. ilustra um esquema geral do equipamento, que consiste em um vaso cilíndrico com diâmetro nominal de 100 mm e altura de 150 mm que é acoplado, por meio de sistema de engate rápido, a um suporte para a tela de filtração. Este suporte está conectado a uma válvula solenóide de diâmetro nominal de 25 mm que por sua vez está ligada a uma autoclave de 50 litros que exerce a função de pulmão do sistema. Para obtenção de vácuo no sistema está acoplada à autoclave uma bomba de vácuo que permite pressões relativas negativas de até 650 mmHg.

Pode-se observar, também, o sistema de medição de altura (eletrodos) que está conectado ao vaso e à placa de aquisição de dados e os medidores eletrônicos de pressão posicionados na autoclave e na parte inferior da tela de filtração, ambos conectados à placa de aquisição de dados. Esta, por sua vez, completa o sistema através da conexão ao microcomputador utilizado para simulação do fenômeno da filtração.

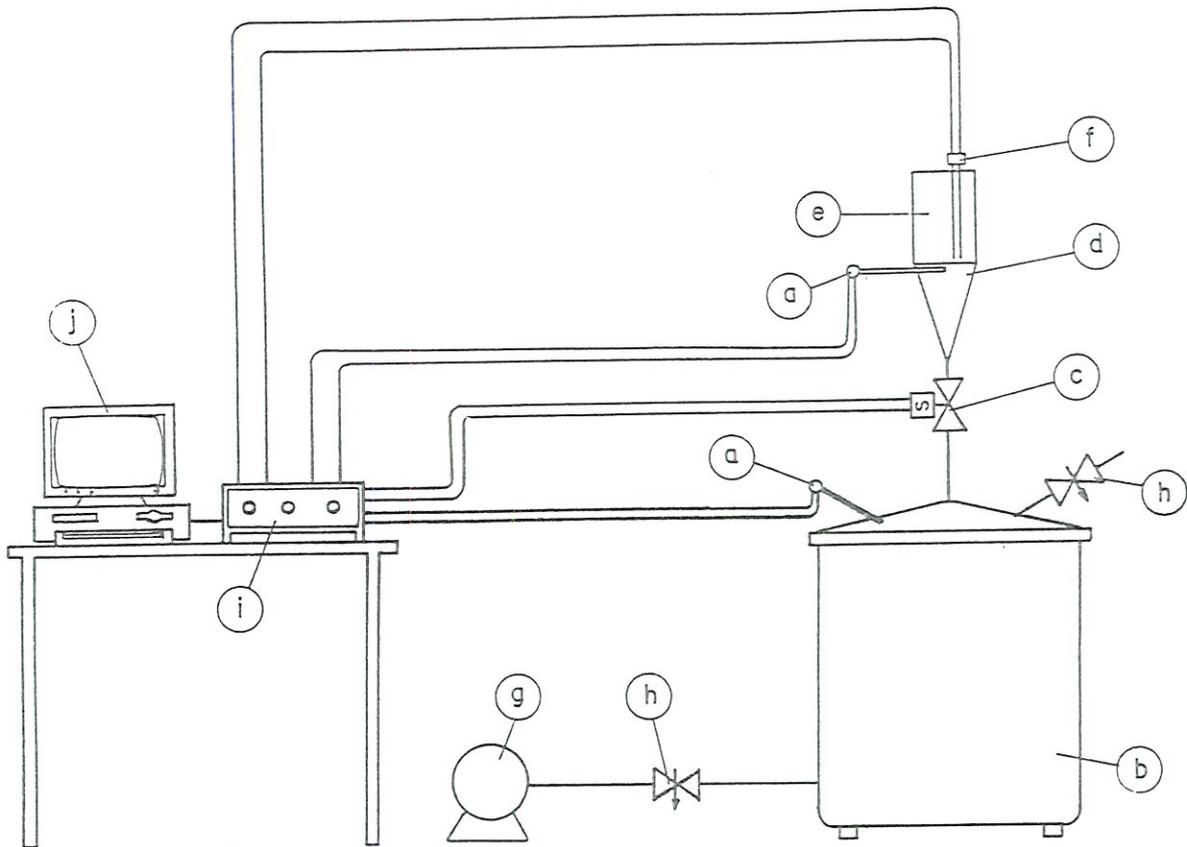


Figura 4.1 - Ilustração do esquema geral do equipamento experimental: a- micromanômetro eletrônico; b- autoclave; c- válvula solenóide; d- tela de filtração; e- vaso cilíndrico; f- eletrodos; g- bomba de vácuo; h- válvula agulha; i- placa de aquisição de dados; j- microcomputador.

A autoclave atua como pulmão do sistema, de modo que a operação de filtração seja realizada a pressão constante. O monitoramento da pressão de operação é realizado pelo manômetro ligado ao pulmão. A regulação da pressão desejada é feita por meio de duas válvulas agulha que permitem a entrada de ar no sistema. A figura 4.2 apresenta o detalhamento do equipamento experimental utilizado.

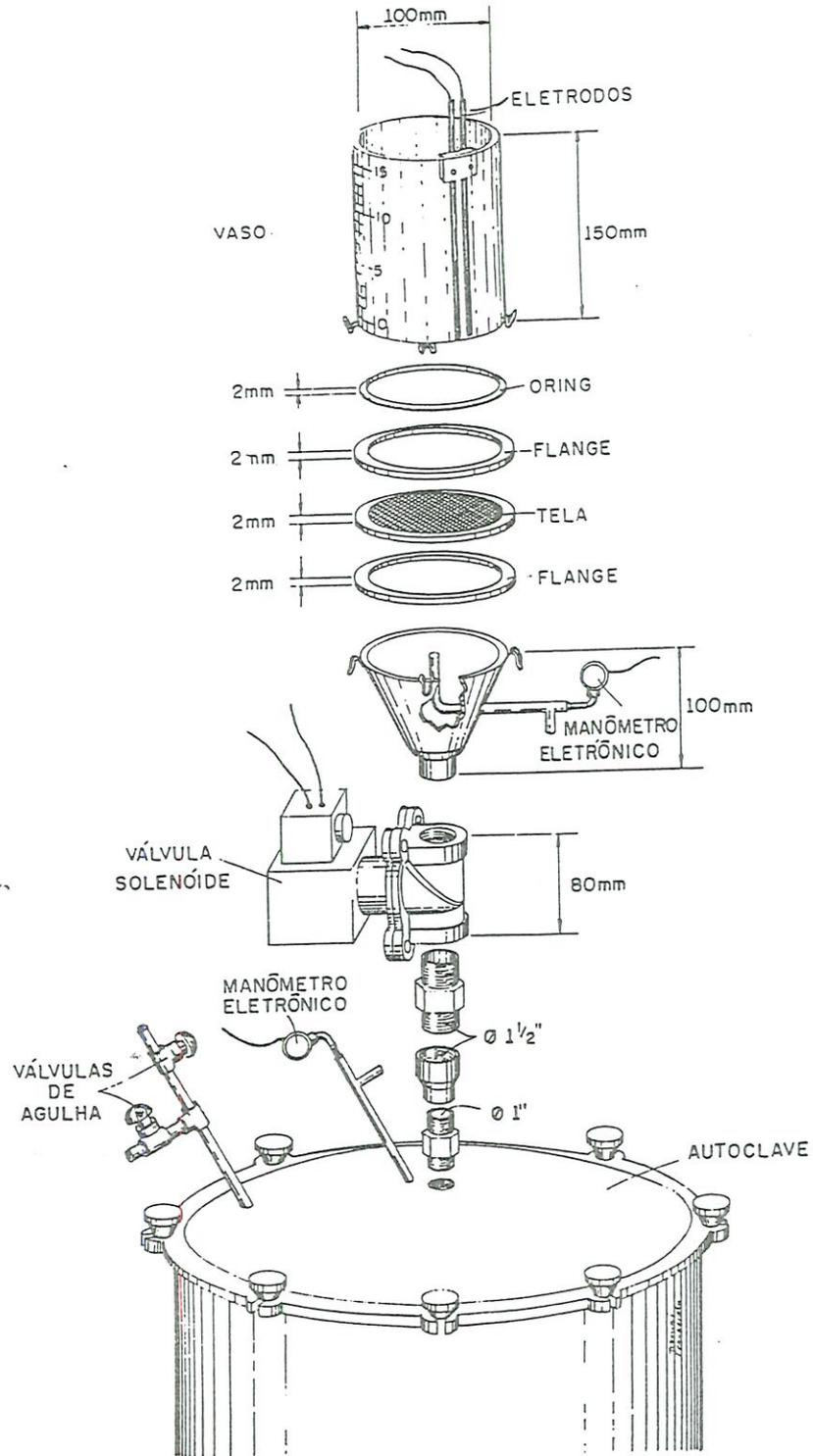


Figura 4.2 - Detalhamento do equipamento experimental utilizado.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi desenvolvido pela T&S Equipamentos Eletrônicos com a seguinte configuração da instrumentação utilizada:

Manômetros eletrônicos: transdutores eletrônicos de pressão que convertem a diferença de pressão entre o sistema e a atmosfera em sinais elétricos com sensibilidade de 25 mv/mmHg, fundo de escala de 800 mmHg e resolução mínima não inferior a 1,0 mmHg;

Medidor de nível: condutivímetro cuja sonda é composta de duas hastes de aço inox acopladas ao reservatório que fornece um sinal elétrico proporcional ao nível da suspensão sob ensaio, com resolução mínima não inferior a 0,5 mm.

Placa de aquisição de dados: placa com possibilidade de leitura de até 16 canais analógicos externos e 24 linhas digitais para o controle de abertura e fechamento de válvulas solenóides ou atuadores elétricos. A placa conta ainda com um relógio interno para controle da taxa de aquisição (número de leituras por segundo). Demais especificações da placa estão listadas a seguir:

- Canais analógicos: resolução de 12 bits (4096 níveis);
- Tensão de entrada: ± 10 Volts;
- Tempo de conversão: 15 μ s/canal;
- Linhas digitais: 24 linhas tipo liga/desliga;
- Base de tempo: ajustável para taxas de 40 a 1000 leituras por segundo.

A figura 4.3 apresenta o fluxograma do funcionamento do sistema de aquisição de dados:

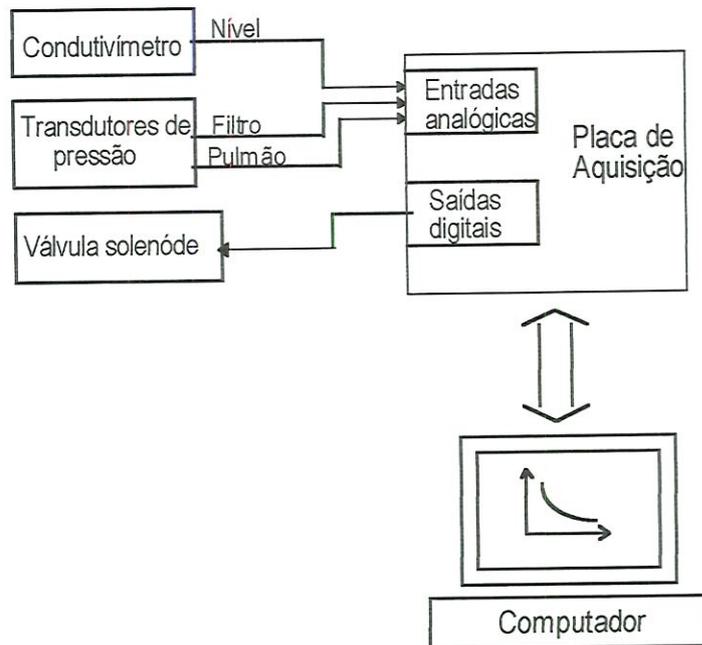


Figura 4.3 - Fluxograma do funcionamento do sistema de aquisição de dados.

4.2 - Coleta e preparação do lodo

Foram realizados ensaios com dois diferentes tipos de lodo industriais, provenientes do curtume Monterrosa e da indústria de papéis reprocessados Papel São Carlos S.A. Uma terceira amostra também foi utilizada após o preparo em laboratório visando simular um lodo com características de fábrica de papel. O seguinte procedimento foi necessário para a utilização das amostras:

Lodo do Curtume Monterrosa: O curtume é uma indústria de beneficiamento de couro localizada na área urbana de São Carlos. A amostra foi coletada na estação de tratamento de efluentes, num volume de 120 litros, após o sistema de aeração e tratamento com cal para correção de pH. Após a determinação da concentração de sólidos em suspensão a mostra foi dividida em duas partes de 60 litros para ensaios com adição de floculante e sem adição de floculante. Posteriormente, cada amostra foi diluída ou

concentrada para obtenção das concentrações C_j definidas no planejamento de experimentos, item 4.3.

Lodo da Papel São Carlos SA : A empresa, localizada na área urbana de São Carlos, reprocessa diversos tipos de papelão através da diluição do papel em um reator de mistura perfeita e posterior formação das folhas em máquinas tipo Fourdrinier. As amostras que foram coletadas no processo, num volume de 80 litros, eram provenientes da área de produção da indústria, anteriormente à estação de tratamento de efluentes, com grande concentração de fibras porém sem resíduos sanitários ou adição de produtos químicos. Após a determinação da concentração de sólidos em suspensão a amostra foi diluída, ou concentrada, para obtenção das concentrações C_j definidas no planejamento de experimentos, item 4.3.

Lodo Preparado : As suspensões foram preparadas com folhas de papel jornal adotando-se o mesmo procedimento utilizado por PIRES (1993) para o preparo das suspensões e que consistiu nas seguintes etapas:

- Para cada ensaio correspondente à concentração C_j definido no planejamento de experimentos, item 4.3, foram preparados 15 litros de suspensão.
- As amostras de papel foram pesadas, cada uma correspondente a uma das concentrações desejadas, e reidratadas durante 24 horas em um litro de água.
- Após a reidratação, as amostras foram trituradas em um liquidificador industrial por 20 minutos e diluídas para a concentração desejada.
- O procedimento descrito acima foi o mesmo utilizado para os ensaios com a adição de floculante.

4.3 - Planejamento Experimental

Foram escolhidos três tipos de lodo para os experimentos, conforme a descrição na seção 4.2, sendo cada um deles abordado de dois modos: com a adição de floculante e sem a adição de floculante, conforme metodologia descrita em 4.5.

Com o objetivo de avaliar os efeitos que a concentração de sólidos e a pressão aplicada sob a tela exercem no coeficiente de resistência ao espessamento foram desenvolvidos testes preliminares segundo um planejamento fatorial completo 5P x 3C, ou seja, a pressão variando em cinco níveis e a concentração em três níveis, com tréplicas. Os valores de pressão e concentração planejados para todos os lodos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores das pressões e concentrações planejadas para os ensaios e seus cruzamentos.

	P ₁ (26,63)*	P ₂ (39,95)	P ₃ (53,26)	P ₄ (66,58)	P ₅ (79,90)
C ₁ (3,2)*	X	X	X	X	X
C ₂ (5,8)	X	X	X	X	X
C ₃ (8,2)	X	X	X	X	X

* - As unidades de Pressão e Concentração estão em kPa e g/l, respectivamente.

X - representa experimento planejado.

Devido a problemas como o selamento da torta nos instantes iniciais da filtração e das características do equipamento utilizado, alguns experimentos planejados não puderam ser realizados. Dessa forma, os experimentos efetivamente realizados estão apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.5, não sendo possível a realização de ensaios com o lodo da Papel São Carlos.

Tabela 4.2 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo do curtume.

	P ₁ (26,63)*	P ₂ (39,95)	P ₃ (53,26)	P ₄ (66,58)	P ₅ (79,90)
C ₁ (3,2)*	X	X	X	X	X
C ₂ (5,8)			X	X	X
C ₃ (8,2)				X	X

* - As unidades de Pressão e Concentração estão em kPa e g/l, respectivamente.

X - representa experimento realizado.

Tabela 4.3 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo do curtume floculado.

	P ₁ (26,63)*	P ₂ (39,95)	P ₃ (53,26)	P ₄ (66,58)	P ₅ (79,90)
C ₁ (3,2)*	X	X	X	X	X
C ₂ (5,8)		X	X	X	X
C ₃ (8,2)		X	X	X	X

* - As unidades de Pressão e Concentração estão em kPa e g/l, respectivamente.

X - representa experimento realizado.

Tabela 4.4 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo preparado.

	P ₁ (26,63)*	P ₂ (39,95)	P ₃ (53,26)	P ₄ (66,58)	P ₅ (79,90)
C ₁ (3,2)*	X	X	X	X	X
C ₂ (5,8)	X	X	X	X	X
C ₃ (8,2)	X	X	X	X	X

* - As unidades de Pressão e Concentração estão em kPa e g/l, respectivamente.

X - representa experimento realizado.

Tabela 4.5 - Valores das pressões e concentrações efetivamente realizadas nos ensaios e seus cruzamentos, lodo preparado floculado.

	P ₁ (26,63)*	P ₂ (39,95)	P ₃ (53,26)	P ₄ (66,58)	P ₅ (79,90)
C ₁ (3,2)*	X	X	X	X	X
C ₂ (5,8)	X	X	X	X	X
C ₃ (8,2)	X	X	X	X	X

* - As unidades de Pressão e Concentração estão em kPa e g/l, respectivamente.

X - representa experimento realizado

4.4 - Caracterização do lodo

Foram realizadas as seguintes análises para a caracterização física de cada lodo :

– Análises de ST, STF, STV, SST, SSF e SSV, utilizando procedimentos usuais de amostragem, pesagem e secagem para determinação da quantidade de sólidos em suspensões aquosas, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados das análises de sólidos para cada lodo.

Tipo de Análise	Curtume (mg/l)	Papel SA (mg/l)	Preparado (mg/l)
ST	6.973	6.310	7.377
STF	2.836	1.409	0
STV	4.137	4.901	7.377
SST	4.780	4.014	7.220
SSF	1.090	1.100	80
SSV	3.690	2.914	7.140

– Análise da distribuição granulométrica de partículas, utilizando o analisador de partículas Galai CIS-1 do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, que está apresentada na Figura 4.4 :

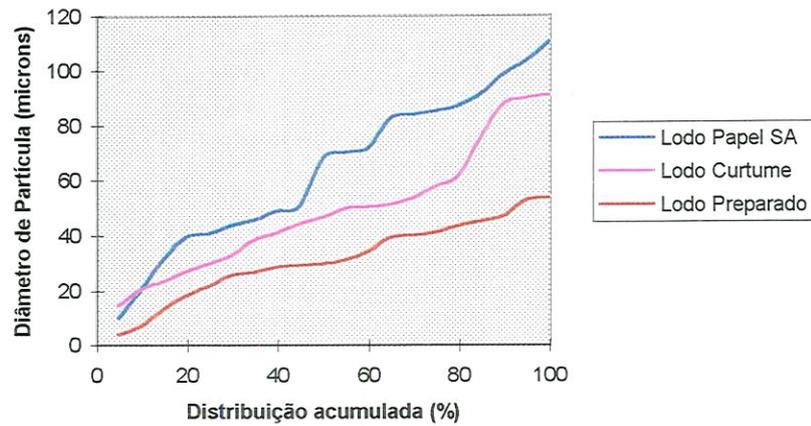


Figura 4.4 - Distribuição granulométrica de partículas de cada lodo.

– Fotomicroscopia ótica, ilustrado pelas figuras 4.5 a 4.7.

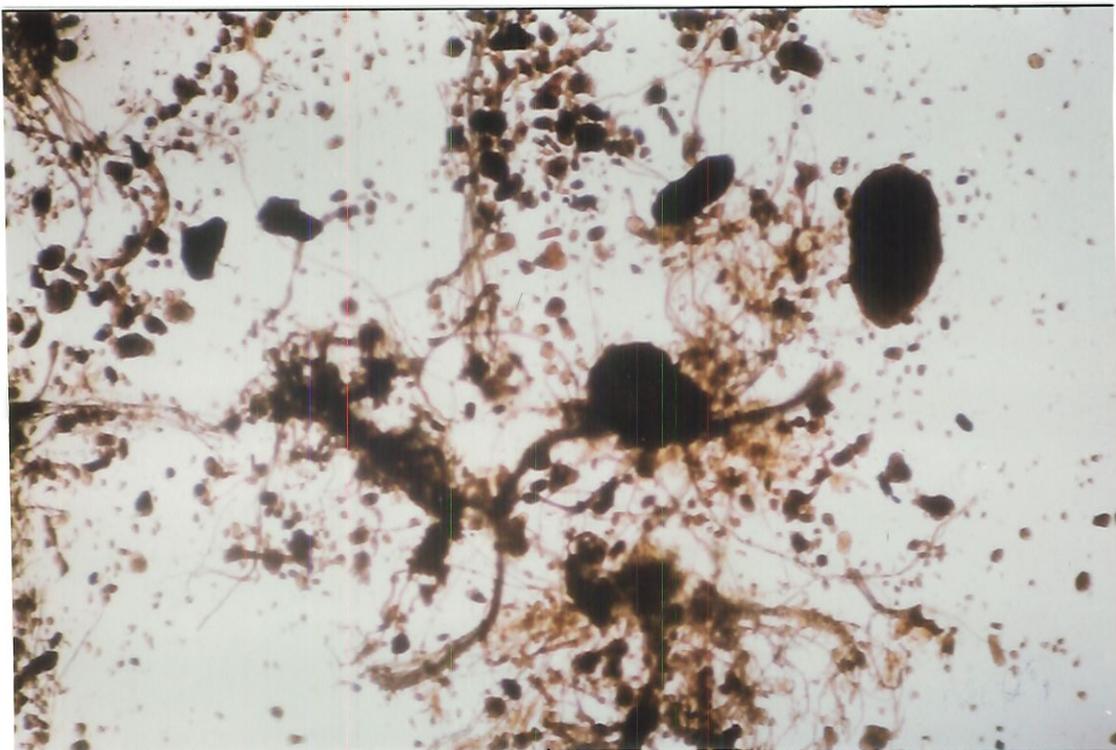


Figura 4.5 - Fotomicroscopia ótica do lodo do curtume (ampliação de 50 vezes).

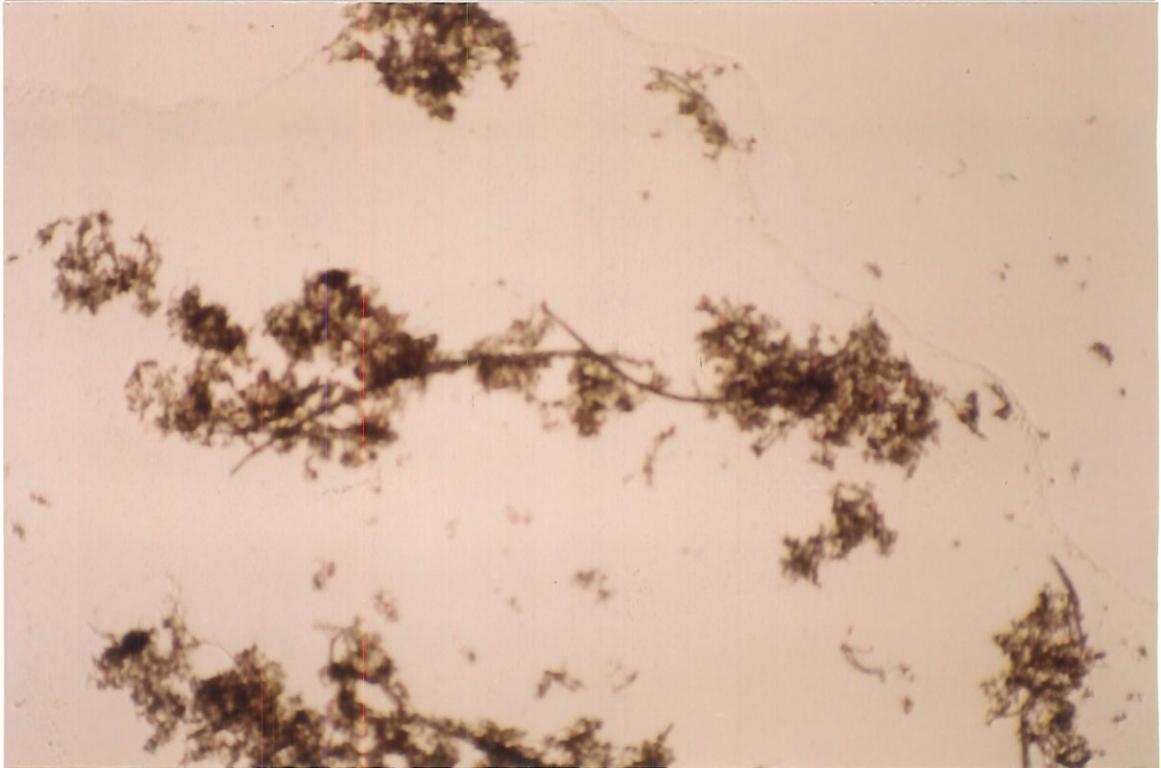


Figura 4.6 - Fotomicroscopia ótica do lodo de papel (ampliação de 50 vezes).



Figura 4.7 - Fotomicroscopia ótica do lodo preparado(ampliação de 50 vezes).

– Determinação da turbidez das suspensões no estado bruto através de um turbidímetro, marca Micronal, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Análises da turbidez dos lodos, em Unidades de Turbidez(UT).

Tipo de Lodo	Turbidez(UT)
Papel São Carlos SA	4430
Curtume Monterrosa	2890
Lodo Preparado	2380

Deve ser observado que na determinação da turbidez do lodo da Indústria Papel São Carlos foi necessária a realização de diluição, na proporção de uma parte de lodo para quatro partes de água, e posterior aplicação de uma correlação fornecida pelo fabricante do equipamento para a determinação da turbidez do lodo no estado bruto.

4.5 - Determinação da dosagem de flocculantes ao lodo

Foi utilizado o polímero Adesol W342 na concentração 0,1% v/v nas formas catiônica e aniônica para determinação da dosagem de flocculante ao lodo. O procedimento consistia, conforme metodologia desenvolvida por BERNHARDT & SCHELL (1993), em colocar 500 ml de cada tipo de lodo em seis recipientes e realizar um ensaio de floculação com a adição do polímero em dosagens diferentes (1, 5, 10, 20, 30 e 50 ml de polímero por litro de lodo). Após, as amostras foram submetidas a 01 minuto de mistura rápida(160 rpm), seguidos de 05 minutos de mistura lenta (30 rpm) e 10 minutos de sedimentação.

Procederam-se então as leituras de turbidez para o sobrenadante de cada recipiente e os resultados observados para o lodo do curtume estão ilustrados na Tabela 4.8 e para o lodo preparado na Tabela 4.9. Os resultados indicaram que a dosagem de polímero que remove a maior quantidade de turbidez (e portanto maior floculação do lodo) para o lodo do curtume foi de 20 ml/l de polímero catiônico, uma vez que dosagens

maiores pouco alteram os resultados. Da mesma forma, a melhor dosagem encontrada para o lodo preparado foi de 10 ml/l de polímero catiônico. Para o lodo da Indústria Papel São Carlos não foi possível a leitura de turbidez devido às limitações de escala do equipamento que só media valores inferiores a 2000 UT, adotando-se então a mesma dosagem que a obtida para o lodo do curtume.

Tabela 4.8 - Resultados da leitura de turbidez para o lodo do curtume

Dosagem de polímero (ml/l)	Turbidez observada (UT) para Polímero Aniônico	Turbidez observada (UT) para Polímero Catiônico
50	1290	11
30	785	12
20	535	17
10	296	60
05	275	516
01	261	995
00	2890	2890

Tabela 4.9 - Resultados da leitura de turbidez para o lodo preparado.

Dosagem de polímero (ml/l)	Turbidez observada (UT) para Polímero Aniônico	Turbidez observada (UT) para Polímero Catiônico
50	186	199
30	209	137
20	214	116
10	478	89
05	633	225
01	754	595
00	2380	2380

4.6 - Procedimento Experimental

Para a construção da curva de variação da altura da suspensão durante o espessamento foi realizado o seguinte procedimento para cada concentração:

a - Adicionou-se lentamente a suspensão de modo que a cada acréscimo de um centímetro de coluna de líquido observado no vaso cilíndrico fosse anotada a tensão até a altura de 10 centímetros. Pôde-se então determinar a curva de calibração, através de relações lineares, que forneceram a relação entre a tensão e a altura da coluna de líquido no interior do vaso.

Foi realizado o seguinte procedimento para todos os lodos a serem estudados:

a - Acessou-se o programa de aquisição de dados, fornecendo o intervalo de tempo desejado entre cada ponto e também o número total de pontos a serem registrados;

b - Ligou-se o registrador eletrônico de variação da altura (eletrodos) e o registrador eletrônico de variação da pressão, estando os mesmos estejam zerados;

c - Acionou-se a bomba de vácuo e ajustou-se a pressão de operação através do uso da válvula agulha posicionada na autoclave;

d - Adicionou-se 300 ml de água limpa ao cone de suporte da tela de filtração (entre a válvula solenóide e a tela de filtração) para se obter um meio líquido contínuo e eliminar as bolhas de ar que eventualmente fiquem presas à tela;

e - Acoplou-se os anéis de vedação e o vaso cilíndrico à tela através do sistema de engate rápido e os eletrodos foram posicionados com as extremidades próximas à ela;

f - Introduziu-se no vaso 500 ml de suspensão homogeneizada em um tanque com agitação e acionou-se a botoeira para início da aquisição de dados e consequente abertura da válvula solenóide para o início da filtração.

g - Após encerrado o ensaio, salvou-se o arquivo gerado com os dados experimentais, retirando a tela e separando-se a torta para análise posterior. Em seguida, limpou-se a tela e o equipamento foi preparado para novos ensaios, repetindo-se o procedimento descrito nos passos anteriores;

h - A torta gerada na filtração foi pesada e então levada à uma estufa à temperatura de 120°C para secagem por 12 horas e posterior pesagem para determinação do teor de sólidos.

4.7 - Procedimentos de Cálculo

Uma vez realizados os experimentos e de posse dos arquivos de dados, foram realizados os cálculos para a determinação do coeficiente de resistência ao espessamento, R^* , apresentado na equação 3.14. O processo foi dividido em duas etapas: inicialmente fez-se a conversão das tensões das grandezas medidas e montagem dos arquivos de trabalho e como etapa posterior a busca do valor de R^* que forneceu o melhor ajuste entre a curva teórica e a experimental.

4.7.1 - Conversão dos dados experimentais.

Os dados experimentais, armazenados em milivolts pelo programa de aquisição de dados foram convertidos por meio da aplicação de relações lineares que correlacionam as tensões elétricas medidas com os valores de altura da suspensão observados nos ensaios durante a calibração, admitindo-se toda a faixa de resposta como sendo linear.

A montagem dos arquivos de trabalho foi realizada através do uso de um programa em linguagem Pascal, listado no Anexo A, para utilização na avaliação do coeficiente de espessamento que está descrita na seção seguinte.

4.7.2 - Avaliação do coeficiente de espessamento R^* .

O coeficiente de resistência ao espessamento foi avaliado por um método indireto, utilizado por PIRES(1993), que compara os valores fornecidos dentro de um intervalo provável, até encontrar o valor que propicia o melhor ajuste entre o modelo matemático e a curva experimental. Dessa forma estima-se, para cada valor fornecido de R^* , o desvio quadrático médio entre as alturas medidas e aquelas previstas pelo modelo. Com a utilização do algoritmo de Fibonacci realiza-se a busca, para uma dada precisão para o ponto de mínimo, do ponto que resulta no menor desvio.

Para determinação do intervalo provável de R^* foram feitos os seguintes procedimentos:

- De posse dos arquivos originais obtidos em laboratório, foi utilizado um programa em linguagem Pascal, Anexo B, para determinar as derivadas primeiras e segundas de cada experimento de h em função de t . Uma vez determinadas, seus valores eram anotados para utilização na etapa seguinte;

- Com o auxílio de outro programa em linguagem Pascal, Anexo C, foram estimados os coeficientes R^* a partir dos valores das derivadas primeiras e segundas, da concentração de cada ensaio, da altura inicial, da altura no instante t e da diferença de pressão.

- Estimados os valores de R^* , foram então montados os arquivos de inicialização utilizados pelo programa de busca.

O programa de busca foi elaborado por PIRES(1993) em linguagem C++ e modificações foram feitas para adaptá-lo às novas condições de trabalho. Como saída o programa, que está listado no Anexo D, fornece o coeficiente R^* e as alturas e velocidades teóricas de massa em função do tempo.



5 - Resultados e Discussões

Nesta seção estão apresentados os resultados experimentais em conjunto com a análise e discussão dos mesmos.

5.1- Comportamento do equipamento experimental

Com o objetivo de verificar se a filtração foi realizada a pressão constante, conectou-se um manômetro eletrônico à autoclave para o monitoramento da pressão interna durante os ensaios. Em todos os experimentos realizados a variação da pressão registrada não foi superior a 1,5%, tendo atingido o maior valor, que foi de 1,47%, para a mais baixa pressão de ensaio, 26,6 kPa. Uma vez que a apresentação de todos os valores observados seria desnecessária, encontram-se na Figura 5.1 os resultados do monitoramento da pressão para um ensaio do lodo preparado a uma concentração de 8,2 g/l, na qual pode-se observar a variação quase nula da pressão durante o intervalo de tempo em que a maior parte do registro de dados foi feito.

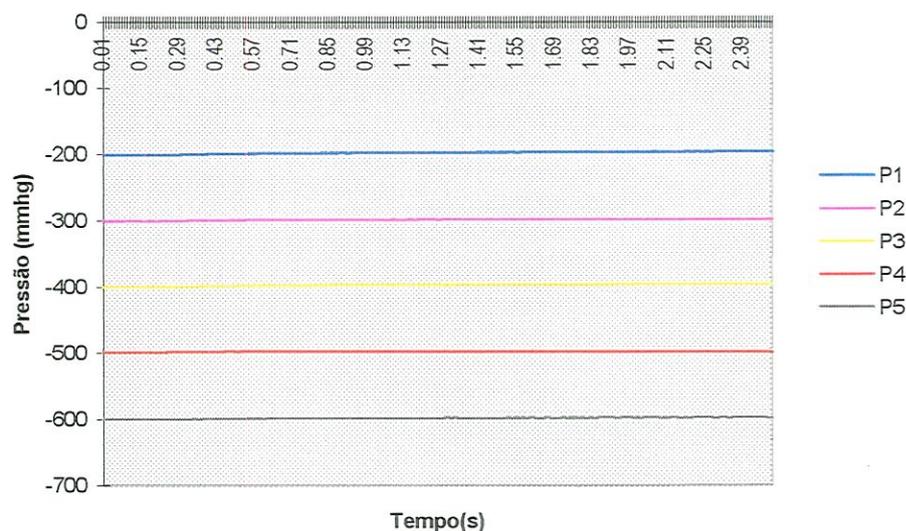


Figura 5.1 - Variação da pressão com o tempo no interior da autoclave.

Verificou-se que o sistema de medição de nível apresentou desvio de 3,5% para a menor altura medida, que foi de 14,5 mm e 0,08% para a maior altura medida, que foi de 60,2 mm, valores que não apresentam influência significativa sobre os resultados experimentais.

Com relação aos medidores eletrônicos de pressão, a empresa que forneceu e calibrou o equipamento assegura resolução mínima de 1,0 mmHg, o que implica em desvios de 0,2% para a maior pressão aplicada (600 mmHg) e 0,5% para a menor pressão aplicada (200 mmHg), portanto desprezíveis.

5.2 - Características da torta formada

Os resultados das análises de teores de sólidos presentes no filtrado das suspensões para todos os tipos de lodo apresentaram valores sempre inferiores a 1% em peso o que demonstra a alta retenção de sólidos obtida durante a filtração.

Para as tortas obtidas na filtração do lodo preparado foi observado que o teor de sólidos na torta aumenta com o aumento da pressão relativa negativa aplicada e também com o aumento da concentração de sólidos em suspensão, como pode ser observado na Figura 5.2. O máximo valor de teor de sólidos obtido foi de 25,2%, correspondente ao ensaio realizado com o maior valor de pressão (79,9 kPa) e o maior valor de concentração (8,2 g/l).

O comportamento crescente do teor de sólidos com o aumento da pressão relativa negativa (vácuo) e com a concentração pode ser explicado por uma maior compactação da torta por consequência de um aumento na perda de carga durante a filtração, implicando numa maior retirada da água ligada intersticial presente na torta.

Com a adição do floculante ocorre acentuado aumento no teor de sólidos das tortas. Na Figura 5.3, que apresenta os valores dos teores de sólidos obtidos para o lodo preparado com adição de floculante e sem adição de floculante, pode-se notar que as

curvas superiores do gráfico pertencem aos ensaios realizados com a presença de floculante. Como exemplo, o máximo valor de teor de sólidos obtido, que era de 25,2% em peso, foi elevado a 33,7%, o que representa um aumento de 34% no parâmetro em questão.

Segundo SENTHILNATHAN & SIGLER(1993) a adição de polímeros orgânicos ao lodo resulta na neutralização de partículas de lodo eletricamente carregadas, aglomeração de partículas dispersas e diminuição da água ligada intersticial entre as partículas agregadas, o que justifica os resultados obtidos experimentalmente para pressões acima de 30 kPa.

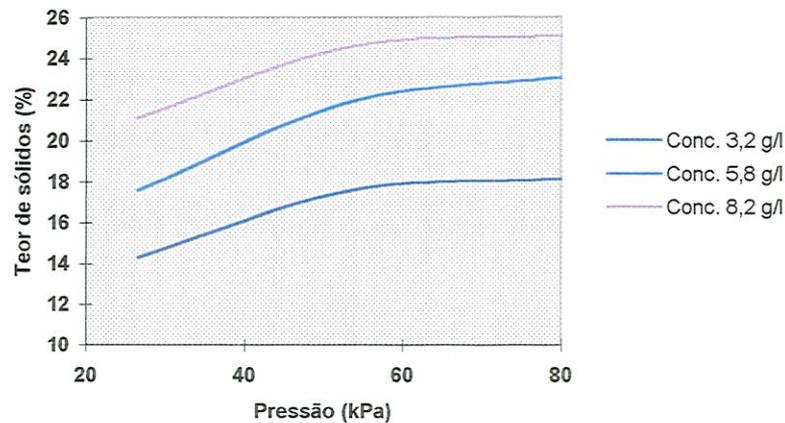


Figura 5.2 - Gráfico de Teor de sólidos da torta (%) em função da Pressão (kPa) para o lodo preparado nos níveis de concentração C1, C2 e C3.

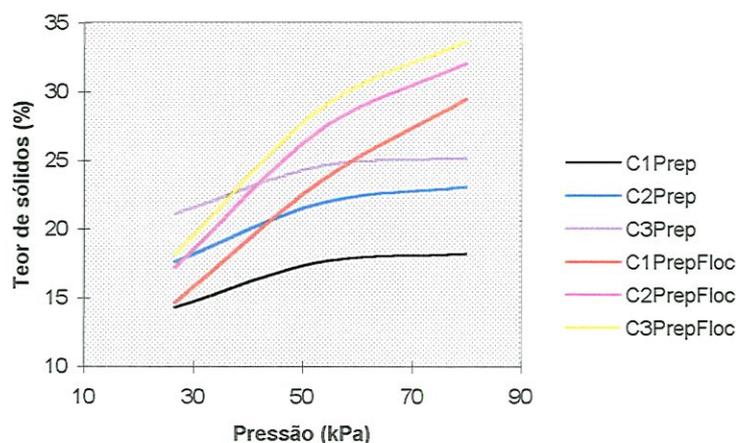


Figura 5.3 - Gráfico de Teor de Sólidos da torta (%) em função da Pressão (kPa) para o lodo preparado, com adição de floculante (PrepFloc) e sem adição de floculante (Prep), nos níveis de concentração C1, C2 e C3.

5.3 - Comportamento da curva $h(t)$

Os resultados obtidos do comportamento da curva de variação de altura da suspensão em função do tempo apresentaram-se da forma prevista, ou seja, uma curva descendente não-linear acentuada no início da filtração com curvatura amenizada com o decorrer do ensaio, em razão da formação da torta que aumenta a resistência à filtração.

Pode-se observar nas figuras 5.4 a 5.15, que a comparação entre a variação de altura medida experimentalmente e a variação de altura calculada pelo modelo matemático mostra que as curvas não foram coincidentes.

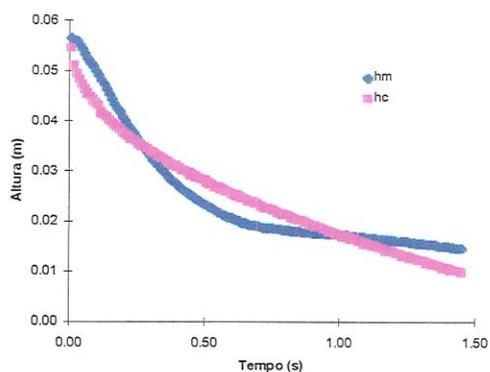
Com relação ao lodo preparado, figuras 5.4 a 5.7, o modelo se ajusta bem à curva experimental no primeiro 0,2 segundo de filtração. Após, o modelo superestima a altura em função do tempo em relação à curva experimental até aproximadamente 0,9 segundo de filtração. Em seguida, o modelo subestima a altura em função do tempo em relação à curva experimental até o final do processo.

A superestimativa observada pode ser atribuída ao aumento, após os instantes iniciais da filtração, da compressibilidade da torta. Este aumento não é percebido pelo modelo, que necessitaria de um coeficiente de compressibilidade n maior que dois para melhor representar o fenômeno.

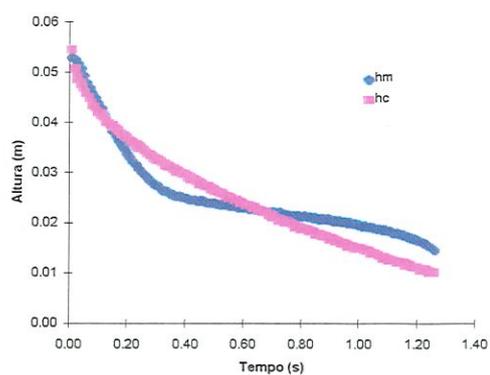
De forma análoga, a subestimativa observada é justificada pela menor compressibilidade da torta, sendo necessária a utilização do coeficiente de compressibilidade menor que dois, uma vez que a torta tende a um comportamento incompressível nos instantes finais da filtração ($n = 1$).

Assim sendo, uma alternativa para que o modelo represente melhor o fenômeno seria o desenvolvimento de uma correlação empírica para o coeficiente de compressibilidade (característico de cada lodo), ou empregar n como sendo um parâmetro livre da modelagem.

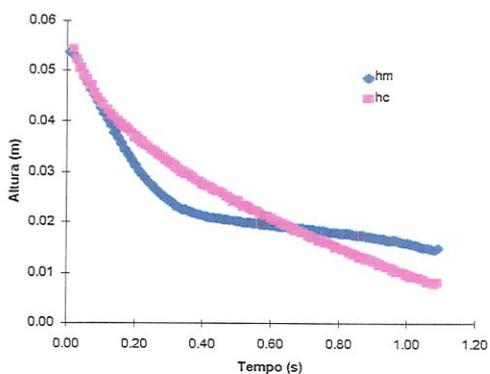
Ao se analisar as figuras 5.8 a 5.9, que ilustram as curvas da altura em função do tempo para o lodo preparado com adição de floculante, pode ser observado que houve uma redução na superestimativa do modelo devido a ação do floculante provocar uma diminuição da resistência ao espessamento nos instantes iniciais da filtração. Em seguida, ocorre o selamento da torta com aumento na resistência após o instante 0,2 segundo, no qual ocorre a diminuição da compressibilidade da torta com o valor de n se aproximando de dois. Este comportamento fica mais evidenciado quando se compara os resultados experimentais dos ensaios com floculante e sem floculante.



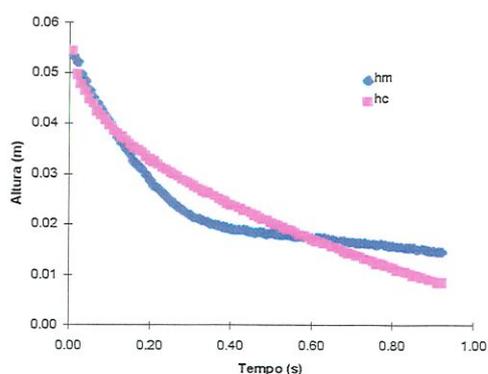
C1P1



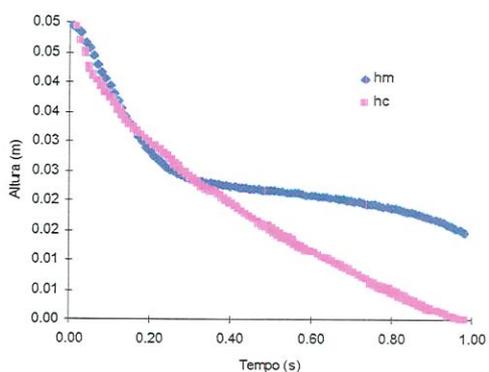
C1P2



C1P3

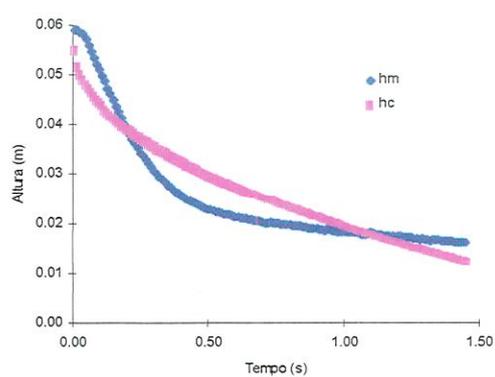


C1P4

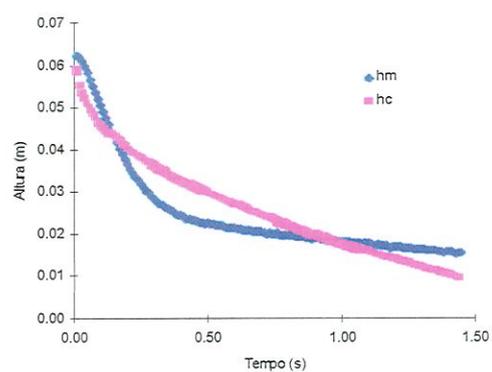


C1P5

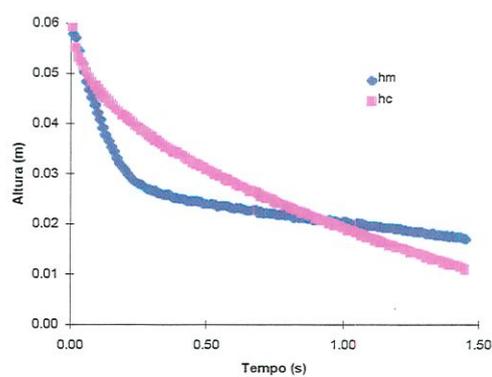
Figura 5.4 - Curvas h em função de t para a altura medida (h_m) e a altura calculada (h_c) pelo modelo, Concentração C1, lodo preparado.



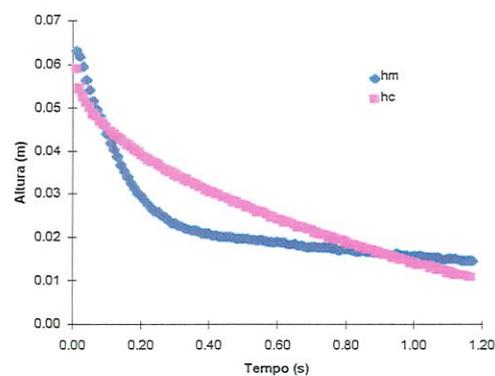
C2P1



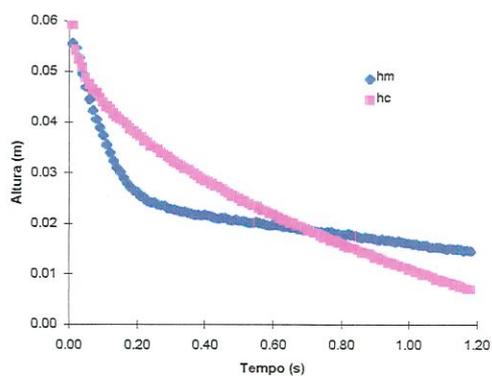
C2P2



C2P3

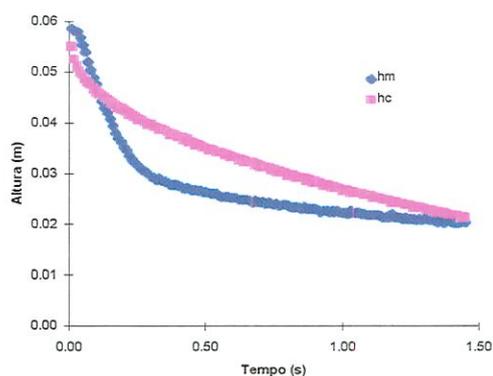


C2P4

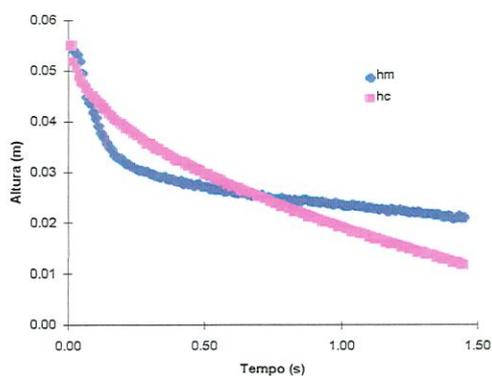


C2P5

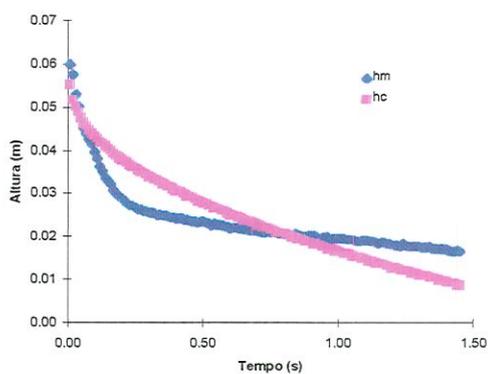
Figura 5.5 - Curvas h em função de t para a altura medida (h_m) e a altura calculada (h_c) pelo modelo, Concentração C2, lodo preparado.



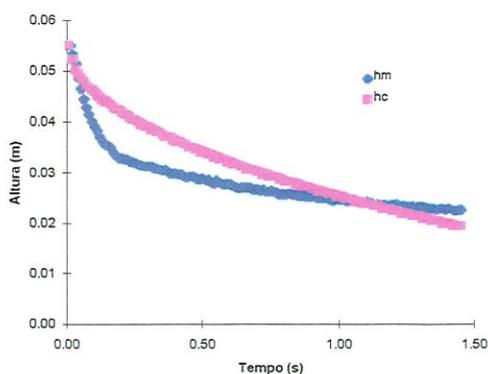
C3P1



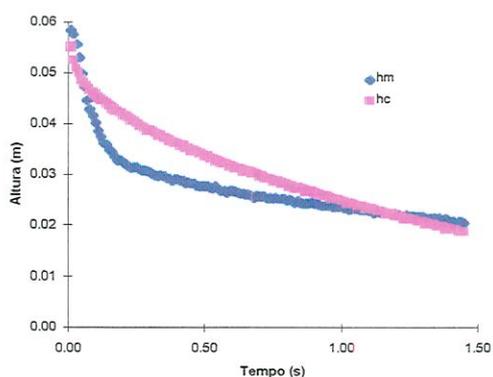
C3P2



C3P3

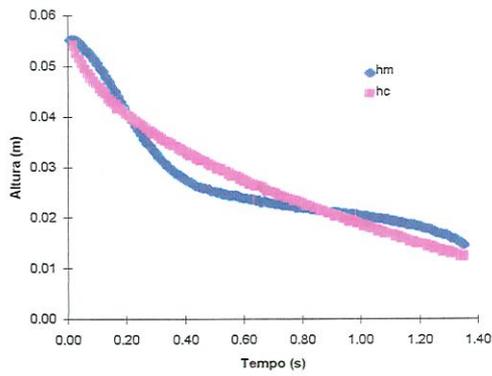


C3P4

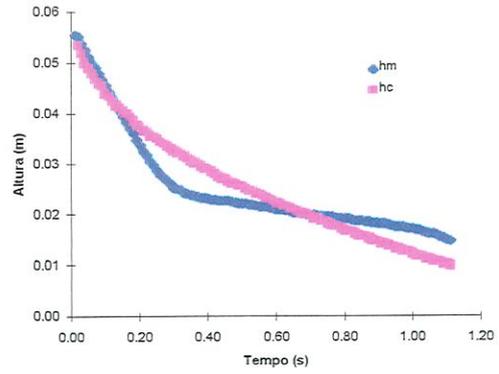


C3P5

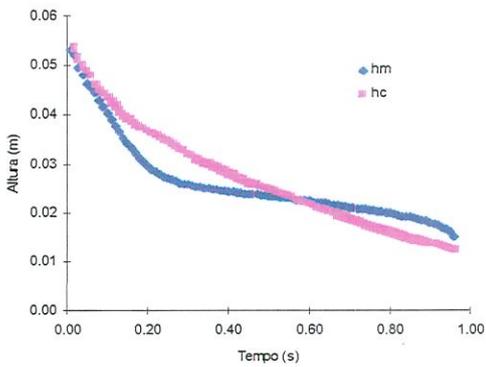
Figura 5.6 - Curvas h em função de t para a altura medida (h_m) e a altura calculada (h_c) pelo modelo, Concentração C3, lodo preparado.



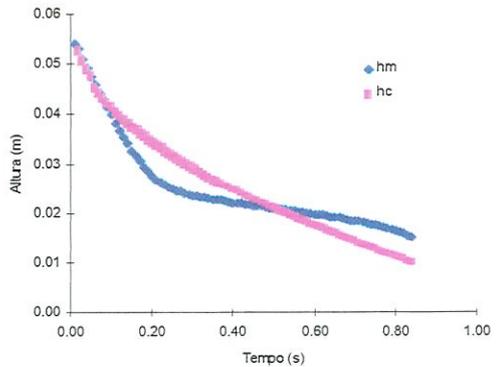
C1P1



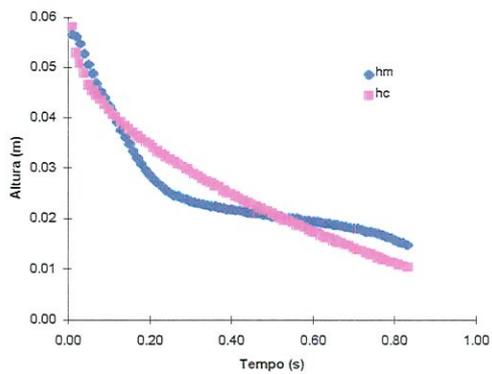
C1P2



C1P3

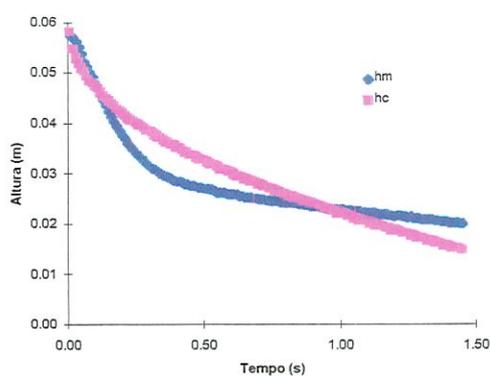


C1P4

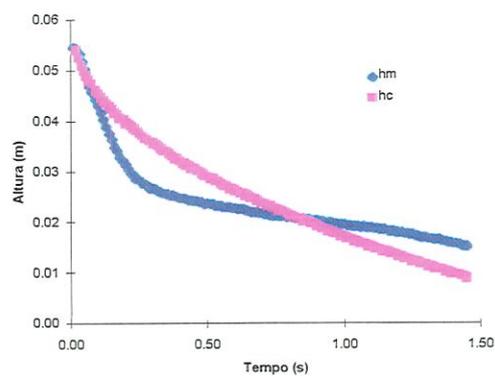


C1P5

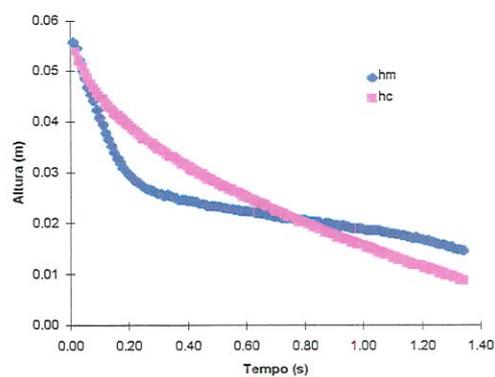
Figura 5.7 - Curvas h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C1, lodo preparado floculado.



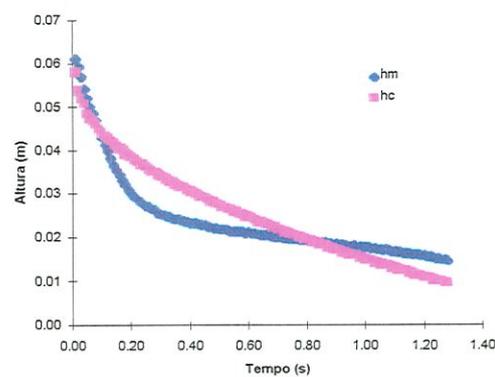
C2P1



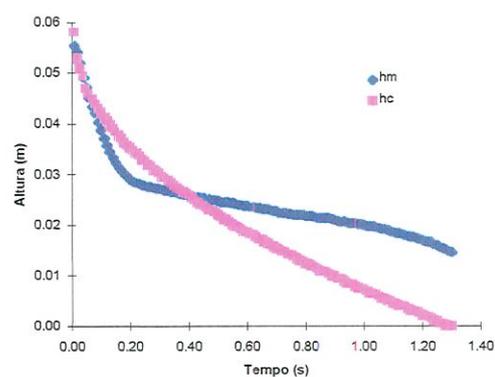
C2P2



C2P3

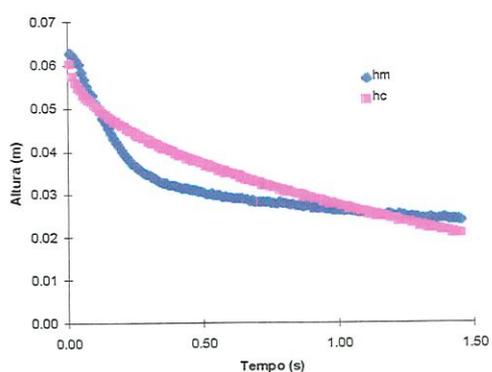


C2P4

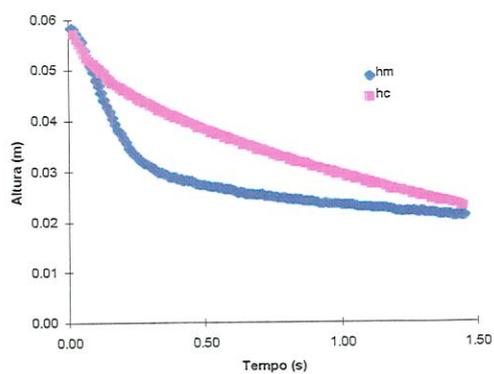


C2P5

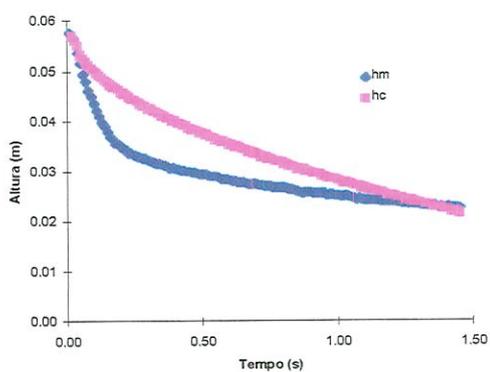
Figura 5.8 - Curvas h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C2, lodo preparado floculado.



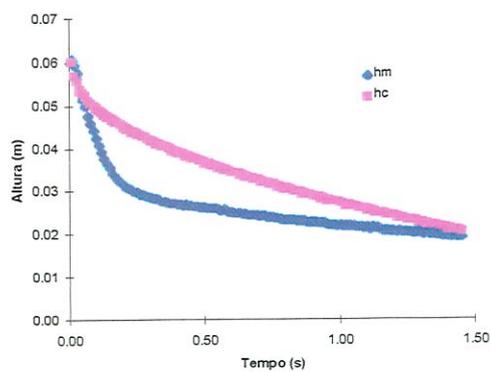
C3P1



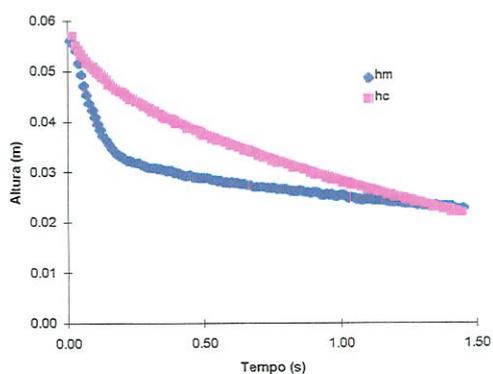
C3P2



C3P3



C3P4



C3P5

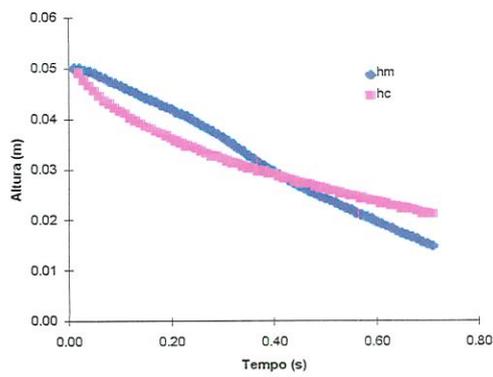
Figura 5.9 - Curvas h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C3, lodo preparado floculado.

Os resultados obtidos para o lodo do curtume, inversamente ao observado para o lodo preparado, mostram que o modelo subestima a curva de h em função de t nos instantes iniciais da filtração e a superestima nos instantes seguintes, conforme pode ser observado nas figuras 5.10 a 5.12.

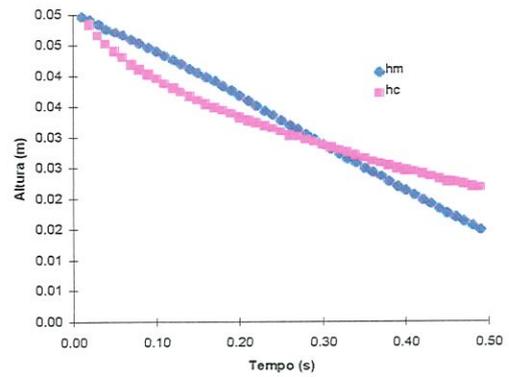
A fotomicroscopia ótica dos lodos permitiu constatar uma presença maior de sólidos finos no lodo do curtume em relação ao lodo preparado. Os sólidos finos provavelmente acentuam o efeito de selamento da torta aumentando consideravelmente a resistência ao espessamento. Esta influência mostra-se tão acentuada a ponto de mudar a concavidade da curva nos instantes iniciais da filtração.

O comportamento citado acima é mais acentuado para concentrações maiores e pressões menores conforme verificado nas figuras 5.10 e 5.11. A ocorrência do selamento da tela apresentou-se tão acentuada que inviabilizou a filtração em alguns casos, como visto na Tabela 5.1, página 58.

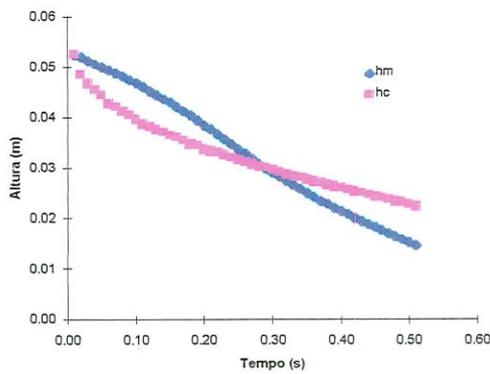
A adição de floculante diminuiu o efeito de selamento e viabilizou a realização de ensaios à pressões menores que não haviam sido realizados (devido ao selamento) nos experimentos com o lodo sem floculante, como por exemplo, os pares C2P2, C3P2 e C3P3.



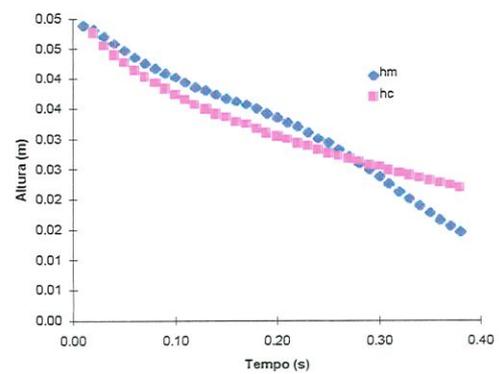
C1P1



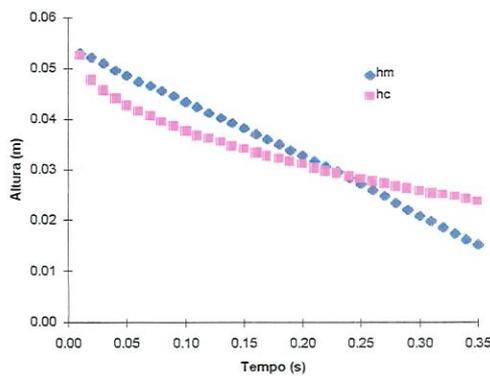
C1P2



C1P3

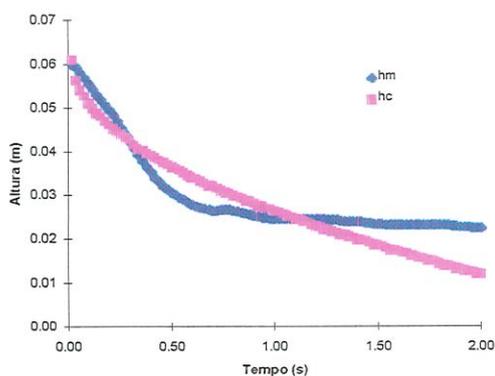


C1P4

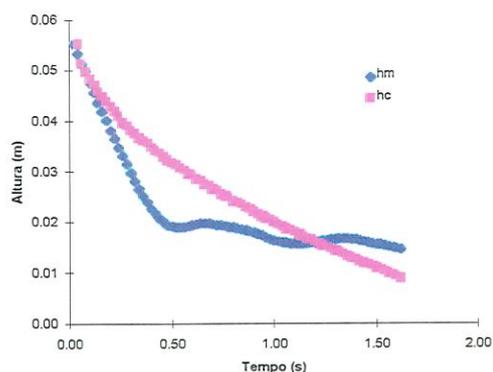


C1P5

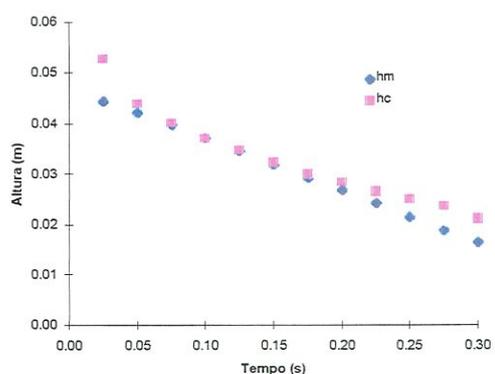
Figura 5.10 - Curva h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C1, lodo do curtume.



C2P3

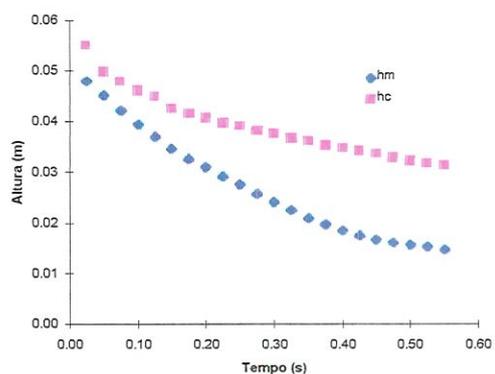


C2P4

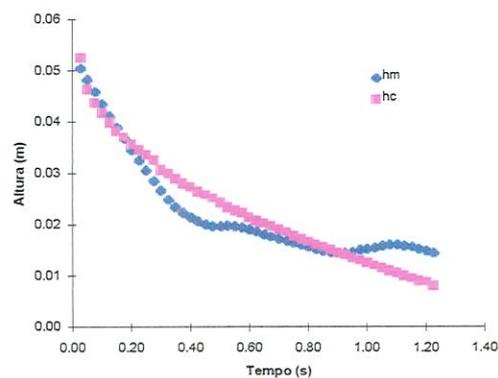


C2P5

Figura 5.11 - Curva h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C2, lodo do curtume.

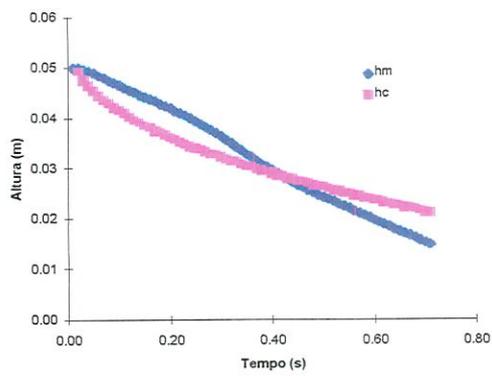


C3P4

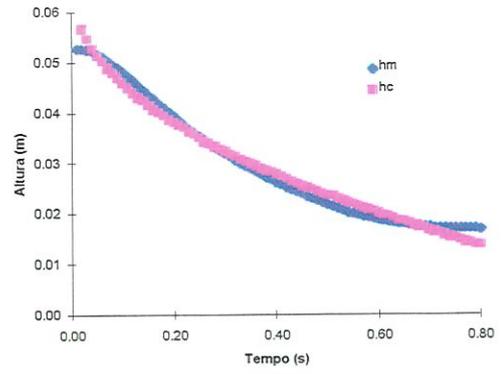


C3P5

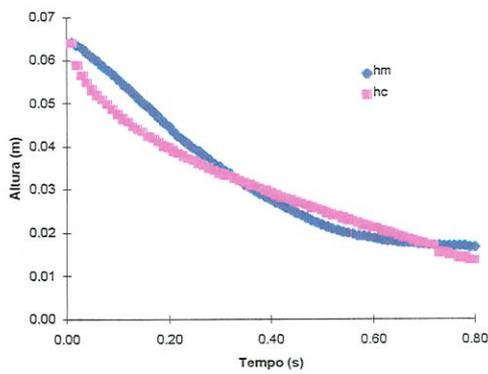
Figura 5.12 - Curva h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C3, lodo do curtume.



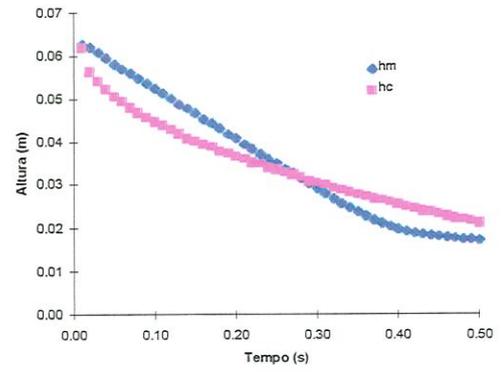
C1P1



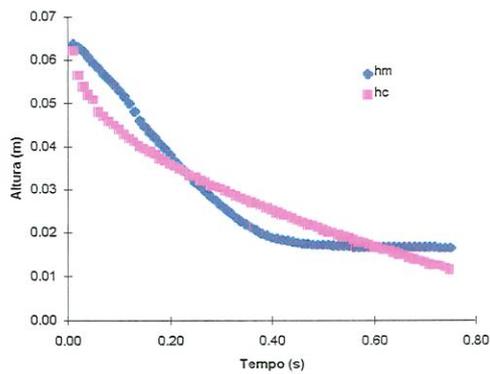
C1P2



C1P3

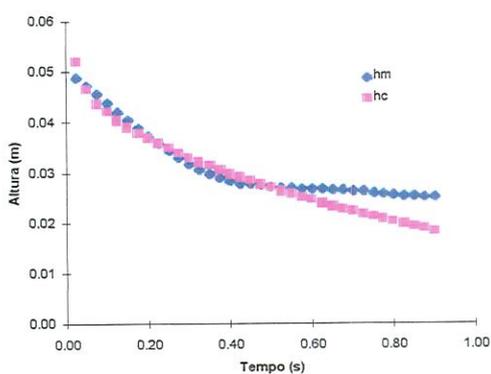


C1P4

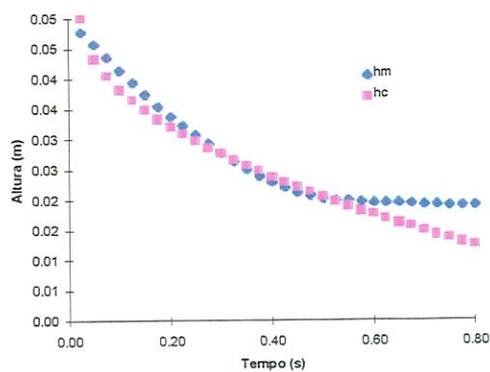


C1P5

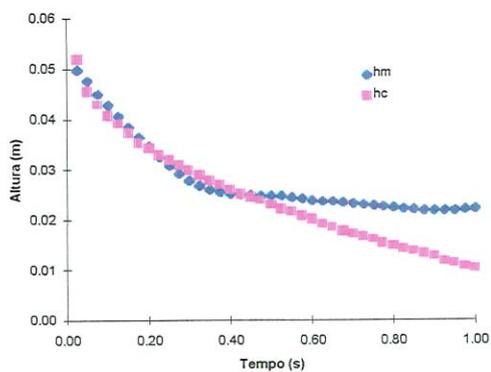
Figura 5.13 - Curva h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C1, lodo do curtume floculado.



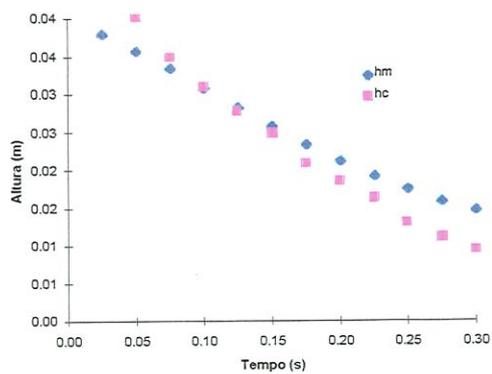
C2P2



C2P3

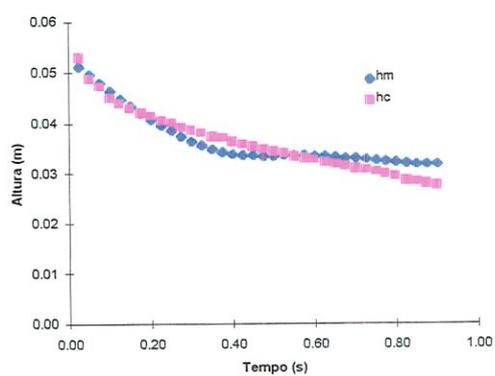


C2P4

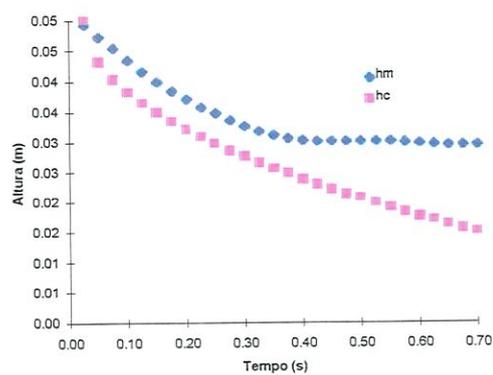


C2P5

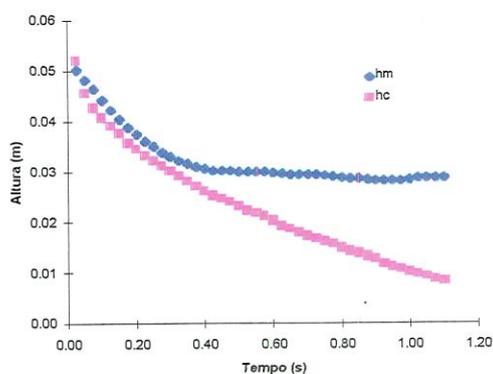
Figura 5.14 - Curva h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C2, lodo do curtume floculado.



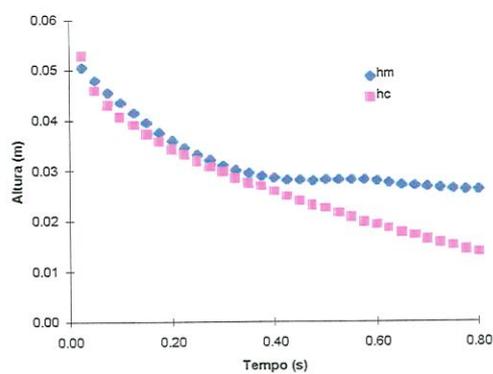
C3P2



C3P3



C3P4



C3P5

Figura 5.15 - Curva h em função de t para a altura medida (h_m) e altura calculada pelo modelo (h_c), Concentração C3, lodo do curtume floculado.

5.4 - Comportamento do coeficiente de resistência R^*

Nesta seção são apresentados na Tabela 5.1 os resultados obtidos para R^* em todos os experimentos além dos valores obtidos para os ensaios com a adição de floculante. A concentração foi variada em três níveis e a pressão em cinco níveis, com réplicas.

Os valores de R^* apresentados são uma média das réplicas de cada ensaio, com unidade s/kg.m, e a análise da influência de cada variável sobre o comportamento do coeficiente de resistência ao espessamento R^* está apresentada nas seções seguintes.

Tabela 5.1 - Resultados experimentais obtidos para $R^*(x10^{-13}s/kg.m)$.

	Lodo Prep.	Lodo Prep. Floc.	Lodo Curt.	Lodo Curt. Floc.
C1P1	1,86	1,39	1,86	1,81
C1P2	1,98	1,46	1,42	0,84
C1P3	1,14	1,51	2,11	0,75
C1P4	1,63	1,26	1,61	0,84
C1P5	1,25	1,06	1,37	0,90
C2P1	1,21	1,19	---	---
C2P2	1,02	1,44	---	1,69
C2P3	1,52	1,49	2,46	1,15
C2P4	1,32	1,56	1,71	1,64
C2P5	1,15	1,31	1,46	1,63
C3P1	2,25	1,16	---	---
C3P2	2,42	2,31	---	3,21
C3P3	1,18	1,91	---	0,81
C3P4	4,21	2,93	3,21	1,19
C3P5	5,01	3,42	1,53	1,02

5.4.1 - Influência da concentração no coeficiente R^*

Os resultados observados de R^* em função da variação da concentração de sólidos em suspensão, para o lodo preparado, apresentaram-se próximos aos obtidos por PIRES (1993), de maneira geral são crescentes com o aumento da concentração apesar do número restrito de pontos (três níveis de concentração), Figura 5.16.

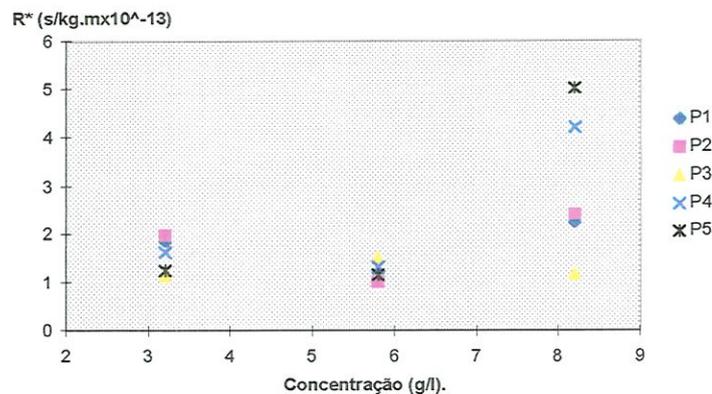


Figura 5.16 - Gráfico de R^* em função da Concentração para o lodo preparado.

Com relação ao lodo do curtume não fica caracterizado o comportamento crescente de R^* com o aumento da concentração uma vez que não se obteve reprodutibilidade dos valores encontrados para R^* (pares C2P, C2P5, C3P4 e C3P5), Figura 5.17, devido à colmatação da tela de filtração.

Os resultados reprodutíveis de R^* obtidos para o lodo do curtume e para o lodo preparado foram bastante próximos apesar de diferentes granulometrias, estados de floculação e curvas de variação de altura com o tempo.

Como no cálculo do coeficiente de resistência através da equação 3.14 se obtém um valor médio ao se adotar a viscosidade e a densidade da suspensão como iguais a da água pode-se ter contribuído para a proximidade dos valores de R^* .

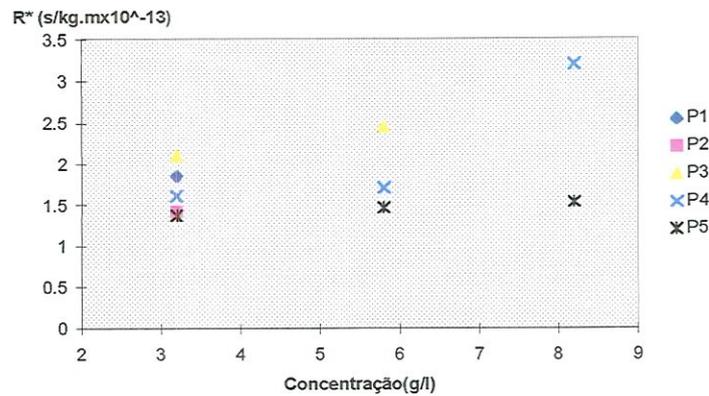


Figura 5.17 - Gráfico de R^* em função da Concentração para o lodo do curtume.

5.4.2 - Influência da pressão no coeficiente R^*

Através dos resultados apresentados nas Figuras 5.18 e 5.19 pode-se observar que a influência da pressão sobre R^* não apresenta nenhum fenômeno característico, ao contrário dos resultados apresentados por COACKLEY & JONES (1956) e PIRES(1993).

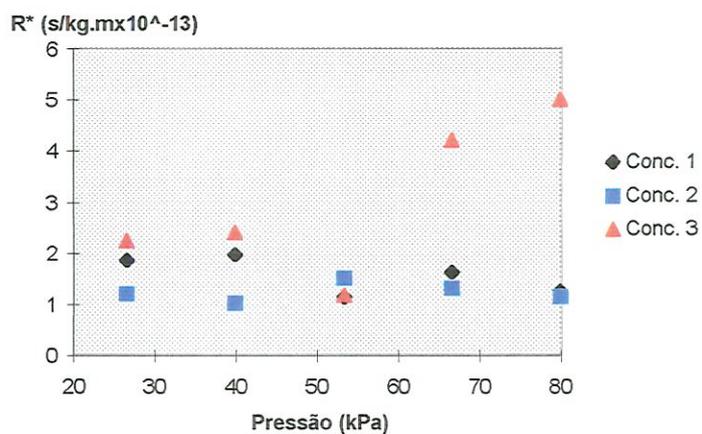


Figura 5.18 - Gráfico de R^* em função da Pressão para o lodo preparado.



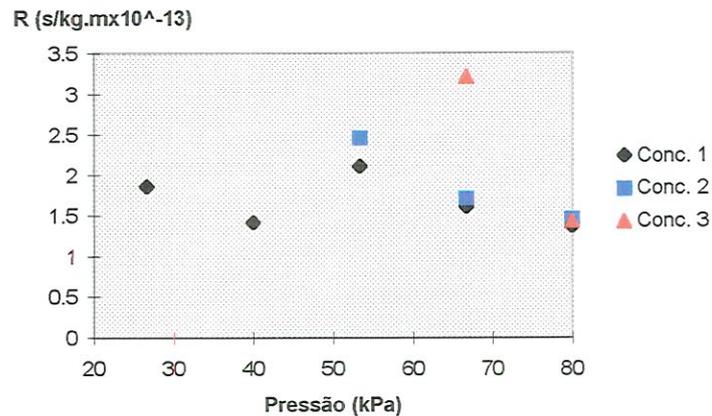


Figura 5.19 - Gráfico de R^* em função da Pressão para o lodo do curtume.

5.4.3- Influência do floculante no coeficiente R^*

Conforme pode ser observado nas Figuras 5.20 e 5.21, a adição de floculante aos lodos provocou a diminuição da resistência ao espessamento, provavelmente devido ao aumento no tamanho dos flocos e conseqüente elevação na porosidade da torta.

Através da adição de floculante ocorre a retirada da água ligada intersticial dos flocos havendo, portanto, uma redução do caráter incompressível da torta que é atribuído em grande parte à água (incompressível). Ocorre então o aumento da compressibilidade da torta que também pode ter influenciado na diminuição de R^* .

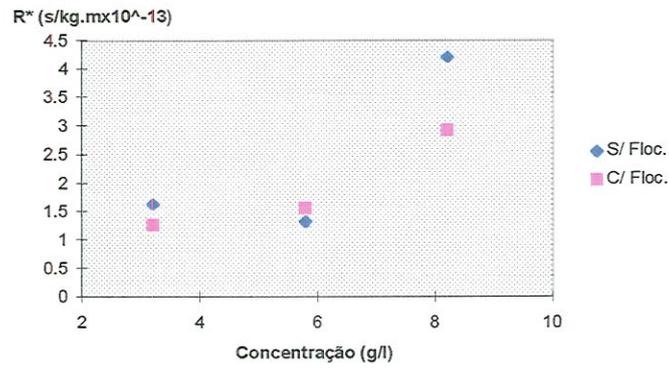


Figura 5.20 - Gráfico da influência da adição de flocoante em R^* , lodo preparado, pressão P4

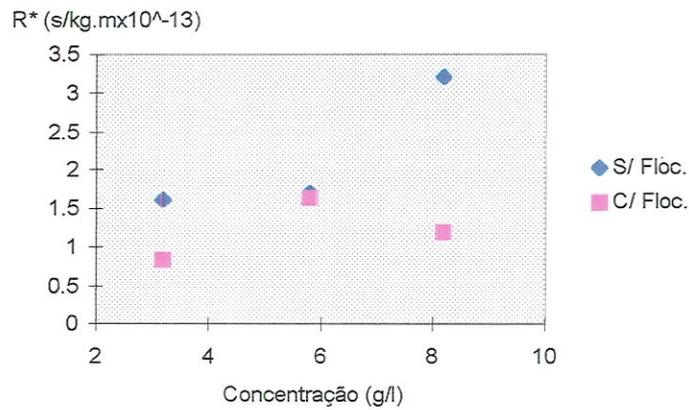


Figura 5.21 - Gráfico da influência da adição de flocoante em R^* , lodo do curtume, pressão P4

6 - Conclusões e Sugestões

- O equipamento utilizado se mostrou adequado para a determinação dos parâmetros característicos da filtração apesar da limitação provocada pelo fenômeno de selamento da tela de filtração.

- A utilização da autoclave como pulmão do sistema possibilitou a realização de filtração a pressão constante, o que era um dos objetivos do trabalho. O valor máximo observado para a variação da pressão foi de 1,47%.

- Para as tortas obtidas na filtração do lodo preparado foi observado que o teor de sólidos na torta aumenta com o aumento da concentração de sólidos em suspensão e com a pressão relativa negativa aplicada. Foram obtidas tortas com teor de sólidos entre 12% e 33,7%.

- A adição de floculante ao lodo preparado aumentou em até 35% o teor de sólidos das tortas em relação ao lodo sem floculante além de diminuir consideravelmente a resistência ao espessamento.

- O modelo utilizado fornece um comportamento característico da curva $h(t)$ para cada tipo de lodo e desvios entre o comportamento da curva $h(t)$ experimental e da curva $h(t)$ calculada foram observados.

- A adoção do coeficiente de compressibilidade n constante e igual a dois não permitiu a obtenção de resultados precisos do modelo em relação aos obtidos experimentalmente.

- A metodologia empregada para a determinação do coeficiente de resistência ao espessamento R^* se mostrou consistente, cujos valores encontrados estão no intervalo de 0,75 a $5,01 \times 10^{13}$ s/kg.m.

Sugere-se para estudos futuros as seguintes considerações:

- Utilização de diferentes tipos de tela para se verificar a influência da abertura da malha no coeficiente de retenção de sólidos e no fenômeno do selamento.
- Considerar a viscosidade e a densidade de cada tipo de lodo na modelagem para determinar seus efeitos na determinação do coeficiente de resistência ao espessamento e no ajuste entre os resultados experimentais e do modelo.
- Modificar o modelo matemático de maneira que o coeficiente de compressibilidade n seja um parâmetro livre e calculado a partir dos resultados obtidos, bem como a usar de empirismo para obtenção de n .
- Comparar o modelo matemático utilizado com outros modelos fornecidos pela literatura.
- Realizar ensaios com um maior número de concentrações para determinar seu efeito no comportamento de R^* .
- Determinar os parâmetros de forma das partículas para melhor caracterizar o lodo.
- Utilizar diferentes tipos de lodo e floculantes na determinação dos parâmetros da filtração e nas características da torta formada como porosidade e espessura.

7 - Referências Bibliográficas

ADIN, A.; ALON, G. (1993). *The role of particle characterization in advanced wastewater treatment*. Water Science and Technology, v. 27, n. 10, p. 131-139.

ARHAN, Y.; ÖZTÜRK, I.; ÇİFTÇİ, T. (1996). *Settling and dewatering characteristics of sludge from Baker's Yeast Production Wastewater Treatment*. Water Science and Technology, v. 34, n. 3-4, p. 459-467.

BERNHARDT, H.; SCHELL, H. (1993). *Effects of energy input during orthokinetic aggregation on the filterability of generated flocs*. Water Science and Technology, v. 27, n. 10, p. 35-65.

CHRISTENSEN, J.R.; SORENSEN, P. B.; CHRISTENSEN, G.L.; HANSEN, J.A. (1993). *Mechanisms for overdosing in sludge conditioning*. Journal of Environmental Engineering, v. 119, n. 01, p. 159-171.

COACKLEY, P.; JONES, B.R.S. (1956). *Interpretation of results by the concept of specific resistance*. Sewage and Industrial Wastes, v. 28, n. 08.

COLIN, F.; GAZBAR, S. (1995). *Distribution of water in sludges in relation to their mechanical dewatering*. Water Research, v. 29, n. 08, p. 2000-2005.

DEMBITZ, A.E. (1978). *Belt filter presses: a new solution to dewatering?*. Water & Wastes Engineering, v.15, n. 02, p. 36-42 e 70.

ERIKSSON, L.; ALM, B. (1993). *Characterization of activated sludge and conditioning with cationic polyelectrolytes*. Water Science and Technology, v. 28, n. 01, p. 203-212.

HARDMAN, E.; (1994). *Some aspects of the design of filter fabrics for use in solid-liquid separation processes*. Filtration & Separation, p. 813-818, Dec.

HARRISON, J.R.; (1979). *Belt filter presses: Varieties to choose from*. Industrial Wastes, v. 25, n. 03, p. 40-44.

HAWORTH, P.J.; ROBERTS, K. (1978). *Development and application of filterbelt presses*. Filtration & Separation, v. 15, n. 06, p. 572-576.

HOWELL, H.O.; (1978). *The use of filterbelt presses for the dewatering of sewage sludges*. Water Pollution Control, p. 66-68.

KARR, P.R.; KEINATH, T.M. (1978). *Influence of particle size on sludge dewaterability*. Journal Water Pollution Control Federation, p. 1911-1930.

KOENDERS, M.A.; WAKEMAN, R.J. (1996). *The initial stages of compact formation from suspensions by filtration*. Chemical Engineering Science, v. 51, n. 16, p. 3897-3908.

LOTITO, V.; MININNI, G.; SPINOSA, L.; LORE, F. (1993). *Developments in laboratory evaluation of sewage sludges dewaterability*. Water Science and Technology, v. 01, p. 103-108.

MACKIE, R.I.; BAI, R. (1993). *The role of particle size distribution in the performance and modelling of filtration*. Water Science and Technology, v. 27, n. 10, p. 19-34.

OLBOTER, L.; VOGELPOHL, A. (1993). *Influence of particle size distribution on the dewatering of organic sludges*. Water Science and Technology, v. 28, n. 01, p. 149-158.

PIRES, E.C. (1993). *Modelo de desaguamento de lodos em filtros-de-correia à vácuo e análise dos coeficientes característicos*. Tese de Livre Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

PRINSSSEN,A.A.J.A. (1979). *Vacuum belt filters*. Filtration & Separation, v. 16, n. 02, p. 176-180.

PRINSSSEN,A.A.J.A. (1982). *Enclosed belt filters and the Pannevis pressbelt device*. Filtration & Separation, v. 19, n. 05, p. 396-414.

SENTHILNATHAN, P.R.; SIGLER, R.G. (1993). *Improved sludge dewatering by dual polymer conditioning*. Water Science and Tecnology, v. 28, n. 01, p. 53-57.

SEVERIN, B.F; GRETHLEIN, H.E. (1996). *Laboratory simulation of belt presses dewatering: Application of the Darcy equation to gravity drainage*. Water Environmental Research, v. 68, n. 03, p. 359-369.

SCHONSTEIN,P.J. (1991). *Horizontal vacuum belt filters in the mining and chemical industries*. Filtration & Separation, v.28, n. 02, p. 121-122.

SINGH,B.P. (1997). *The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal*. Filtration & Separation, p. 159-163, Mar.

SORENSEN, P.B.; HANSEN, J.A. (1993). *Extreme solid compressibility in biological sludge dewatering*. Water Science and Technology, v. 28, n. 01, p.133-143.

TSANG, K.R.; VESILIND,P.A. (1990). *Moisture distribution in sludges*. Water Science and Tecnology, v. 22, n. 12, p. 135-142.

VESILIND, P.A. (1994). *Role of water in sludge dewatering*. Water Environment Research, v. 66, n. 01, p. 4-11.

WAKEMAN, R.J.; TARLETON, E.S. (1990). *Modelling, simulation and process design of the filter cycle*. Filtration & Separation, v. 27, n. 06, p. 412-419.

WONNACOTT, R.J. (1994). *Economia*, 2ª edição, Makron Books, São Paulo.

WOODARD, S.E.; WUKASCH, R.F. (1994). *A hidrólisis/thickening/filtration process for the treatment of waste activated sludge*. Water Science and Technology, v. 30, n. 03, p. 29-38.

ANEXO A

```
program INICIAL;

uses crt;

var A : string[100];
    Auxiliar : array [1..2] of real;
    ArqEntr : text;
    ArqSai : text;
    Delta_t : real;
    i : integer;
    T, Amp, P, Pa, Alt, Lixo, coef1, coef2 : real;

begin

    ClrScr;

    writeln('Entre com o nome do arquivo desejado');
    write('Arquivo de entrada : ');
    read(A);

    assign(ArqEntr,A);
    reset(ArqEntr);

    writeln('Entre com o coeficiente 1');
    read(coef1);

    writeln('Entre com o coeficiente 2');
    read(coef2);

    assign(ArqSai,'c:\DADOS\clplr1');
    rewrite(ArqSai);

    writeln(ArqSai,'c:\DADOS\C1P1R1');
    writeln(ArqSai,'Tempo (s) , ', 'Pressao (Pa) , ', 'Altura (mm)
');

    for i:=1 to 18 do
        begin
            Readln(ArqEntr);
        end;

    for i:=1 to 2 do
        begin
            Readln(ArqEntr, Auxiliar[i]);
        end;

    Delta_t:=Auxiliar[2]-Auxiliar[1];
    write('delta = ',delta_t:5:5);

    for i:=1 to 980 do
```

```
begin
  read(ArqEntr,T);
  T:=T-20*Delta_t;
  read(ArqEntr,Amp);
  Alt:=(coef1*Amp-coef2)*10;
  read(ArqEntr,P);
  Pa:=P*133.16;
  readLn(ArqEntr,Lixo);

  write(ArqSai,T:5:4);
  write(ArqSai,'      , ');
  write(ArqSai,Pa:5:6);
  write(ArqSai,'      , ');
  writeLn(ArqSai,Alt:5:6);

end;

end.
```

ANEXO B

```

program derivada;

uses crt;

var Nome_Arquivo1, Nome_Arquivo2 : String;
    lodo, is, js, ks : String;
    h, i, j, k, l, m : Integer;
    Delta_T, Deriv_Segunda, lixo : real;
    F1, F2 : Text;
    Tempo, Altura, Deriv, Tempo_Deriv : array [1..990] of real;
    key, auxiliar : char;

begin
  for h:=1 to 4 do
    begin
      clrscr;
      writeln('Entre com o lodo utilizado...');
      readln(lodo);
      for i:=1 to 3 do
        begin
          Str(i,is);
          for j:=1 to 5 do
            begin
              Str(j,js);
              for k:=1 to 3 do
                begin
                  Str(k,ks);

                  Nome_Arquivo1:='c:\Dados\'+lodo+'\'+'c'+is+'p'+js+'r'+ks+'
.dat';

                  assign(F1, Nome_Arquivo1);
                  reset(F1);

                  for l:=1 to 2 do
                    readln(F1);

                    read(F1, Tempo[1]);
                    read(F1, Auxiliar);
                    read(F1, lixo);
                    read(F1, Auxiliar);
                    read(F1, Auxiliar);
                    read(F1, Auxiliar);
                    read(F1, Auxiliar);

```

```

read(F1, Auxiliar);
read(F1, Auxiliar);
read(F1, Auxiliar);
readln(F1, Altura[1]);

Nome_Arquivo2:='c:\dados\'+'lodo'+c'+is+'p'+js+'r'+ks+'.sai
';
assign(F2, Nome_Arquivo2);
rewrite(F2);

for m:=2 to 900 do
begin
  read(F1, Tempo[m]);
  read(F1, Auxiliar);
  read(F1, lixo);
  read(F1, Auxiliar);
  read(F1, Auxiliar);
  read(F1, Auxiliar);
  read(F1, Auxiliar);
  read(F1, Auxiliar);
  read(F1, Auxiliar);
  readln(F1, Altura[m]);
  if (Altura[m-1]-Altura[m])>0.001
  then
  begin
    Delta_T:=Tempo[m]-Tempo[m-1];
    Deriv[m-1]:=(Altura[m]-Altura[m-1])/(Tempo[m]-Tempo[m-
1]);
    Tempo_Deriv[m-1]:=Tempo[m-1]+Delta_T/2;
    write(F2, Tempo_Deriv[m-1]:5:3);
    writeln(F2, ' ', Deriv[m-1]:5:3);
  end;
end;
close(F2);
close(F1);
end;
end;
end;
end;
end.

```

ANEXO C

```
program Estimativa;

uses Crt;

var Cs   : Real;
    D2   : Real;
    D1   : Real;
    Ho   : Real;
    h    : Real;
    Dp   : Real;
    ni   : Real;
    R    : Real;
    Key  : Char;

const mi = 0.001;
      ro = 1000;
      g  = 9.81;

begin
  ClrScr;
  TextBackGround(blue);
  ClrScr;
  GotoXY(10,3);
  TextColor(white);
  writeln('Entre com o Valor da Concentra#Eo de Ensaio (Cs) em [kg/
m3] ...');
  GotoXY(11,4);
  read(Cs);
  GotoXY(10,6);
  TextColor(Yellow);
  writeln('Entre com o Valor da Segunda Derivada (dV/dt) ...');
  GotoXY(11,7);
  read(D2);
  GotoXY(10,9);
  TextColor(white);
  writeln('Entre com o Valor da Primeira Derivada (V) ...');
  GotoXY(11,10);
  read(D1);
  GotoXY(10,12);
  TextColor(yellow);
  writeln('Entre com o Valor da Altura Inicial (Ho) ...');
  GotoXY(11,13);
  read(Ho);
  GotoXY(10,15);
  TextColor(white);
  writeln('Entre com o Valor da Altura no Instante t ...');
  GotoXY(11,16);
  read(h);
  GotoXY(10,18);
  TextColor(yellow);
```

```
writeln('Entre com o valor da Diferença de Pressão (Dp) ...');
GotoXY(11,19);
read(Dp);
GotoXY(10,21);
TextColor(white);
writeln('Entre com o Valor do coeficiente de retencao de solidos
...');
GotoXY(11,22);
read(ni);
GotoXY(16,24);
TextColor(red);
writeln('Pressione qualquer tecla para continuar ...');
GotoXY(60,24);
Key:=ReadKey;

R:=(D2+Dp+(ro*g*h))/((mi*ni*Cs*Sqr(D1))*(Sqr(Ho-h)));
ClrScr;
GotoXY(25,10);
TextColor(white);
writeln('Valor de R = ',R);
GotoXY(22,15);
TextColor(Red);
writeln('Pressione qualquer tecla para continuar ... ');
GotoXY(70,15);
Key:=ReadKey;

end.
```

ANEXO D

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>

/*****/

/*      Protótipos das Funções chamada pelo programa principal e outras funções      */
/*      (em ordem de chamada pelo programa principal)                                */

void SeriesData(int *j, double *Dp, double *P, double A[], double B[],
                double C[], double *Ho);

void FileName(char Exp_File[], char Res_File[], int i, int j, int k);

void ReadData(char Exp_File[], int Lsup, char Exp_id[], double T[],
              double Dpm[], double hm[]);

int LastPoint(double limit, int Lsup, double hm[]);

void SerieFibonacci(double P, int *N, int Fb[]);

void Fibonacci(double A, double B, int Fb[], int N, int N_points, double Dp,
               double hm[], double hc[], double Vc[], double Ho, double Vo,
               double Interval_t, double *Pmin, int *Conv_Flag,
               int *Points_Calc);

double Sigmaf(int N_points, double hm[], double hc[]);

void RungeKutta(double Interval_t, double Dp, double R, int N_points,
                double Ho, double Vo, double hc[], double Vc[],
                int *Conv_Flag, int *Points_Calc);

double fh(double Rf, double Dpm, double Ho, double hv, double Vv);

void SaveSolution(char Exp_id[], char Res_File[], int N_points, double Dp,
                  double Cen, double Rf, double SFR, double Sigma, double T[],
                  double Dpm[], double hm[], double hc[], double Vc[],
                  int Conv_Flag);

void SolutionLog(char Exp_id[]);

/*****/

double   g = 9.81,           /*      Aceleração da gravidade [m/s]           */
         Ro = 1000.0,        /*      Massa específica da água [kg/m^3]       */
         mi = 1.0e-03;      /*      Viscosidade absoluta da água [Pa.s]     */

void main()
{

double A[4],               /*      Vetor contendo valores inferiores do intervalo [A,B] */
        /*      do coeficiente Rf */
        B[4],             /*      Vetor contendo valores superiores do intervalo [A,B] */
        /*      do coeficiente Rf */
        C[4],            /*      Vetor contendo os valores das concentrações de polpa */
        Rf,              /*      Coeficiente de resistência á filtração (global) */
        SFR,             /*      Coeficiente de resistência á filtração (específico) */

```

```

Dp,          /* Diferença de pressão aplicada na série j [Pa]          */
P,           /* Precisão requerida na determinação do coeficiente de   */
             /* resistência á filtração                                 */
T[990],      /* Vetor dos instantes de coleta de Dpm e hm [s]          */
Dpm[990],    /* Vetor das pressões aplicadas sob a tela[Pa]          */
hm[990],     /* Vetor das alturas medidas da massa em filtração [m]   */
             /* (armazenado em mm no arquivo de dados originais) */
hc[990],     /* Vetor das alturas calculadas da massa em filtração [m]*/
Vc[990],     /* Vetor contendo os valores calculados Vc [m/s]         */
Ho,         /* Altura inicial da massa no vaso de filtração [m]      */
Vo,         /* Velocidade inicial da massa em filtração [m/s]       */
limit,      /* Limite inferior de hm [m]                             */
Pmin,       /* Valor do ponto de mônimo, coeficiente Rf, da função   */
             /* no intervalo [A, B]                                   */
Sigma,      /* Desvio padrão entre hc[] e hm[] [m]                  */
             /* */
D,          /* Distância entre pontos extremos e interiores do      */
             /* intervalo [A,B] no algoritmo de Fibonacci             */
L,          /* Ponto interno a esquerda (Left) do centro            */
R,          /* Ponto interno a direita (Right) do centro            */
FA,         /* Valor da função pesquisada para o ponto A            */
FB,         /* Valor da função pesquisada para o ponto B            */
FL,         /* Valor da função pesquisada para o ponto L            */
FR,         /* Valor da função pesquisada para o ponto R            */
Interval_t; /* Intervalo entre medidas consecutivas de Dpm e hm no */
             /* experimento                                           */

int n,      /* Contador genérico                                   */
i,         /* Índice referente á concentração                     */
j,         /* Índice referente ao número da série experimental    */
k,         /* Índice referente ao número da corrida               */
Lsup,     /* Limite superior do ôndice referente ao número de   */
             /* pontos que devem ser recuperados do arquivo        */
             /* de armazenamento (Lsup = número de pontos medidos */
             /* menos um)                                          */
N_points, /* Número de pontos aproveitáveis da série experimental */

Fb[100],  /* Vetor com a série de Fibonacci                     */
N,        /* Índice superior do vetor da série de Fibonacci     */
             /* (igual ao número de termos menos um)              */
Conv_Flag, /* Indicador de convergência na função RungeKutta    */
Points_Calc; /* Número de pontos calculados pela função RungeKutta */

char Exp_File[7], /* Vetor nome do arquivo de dados                    */
Res_File[13],    /* Vetor nome do arquivo de resultados                */
Exp_id[30];      /* Vetor contendo a identificação do experimento     */
                 /* lida no arquivo de armazenamento de dados        */

/* Inicialização das variáveis */
A[0] = 0.0;
B[0] = 0.0;
C[0] = 0.0;
Lsup = 990;
N_points = 0;
Points_Calc = 0;
Conv_Flag = 1;
limit = 14.5;
Ho = 0.0968;

```



```
Vo = 0.0;
```

```
SeriesData(&j, &Dp, &P, A, B, C, &Ho);
printf("Numero da serie: %d \n", j);
printf("Pressao: %f \n", Dp);
printf("Precisao: %f \n", P);
for (n = 1; n <= 3; ++n)
    {
        printf("A[%1d] = %10.3e B[%1d] = %10.3e ", n, A[n], n, B[n]);
        printf("C[%1d] = %10.3e \n", n, C[n]);
    }

SerieFibonacci(P, &N, Fb);

for(i = 1; i <= 3; ++i)
    {
        for(k = 1; k <= 3; ++k)
            {
                printf("\n\n");
                printf("Operando Serie: %1d Concentracao: %1d Corrida: %1d\n", j, i, k);
                FileName(Exp_File, Res_File, i, j, k);
                printf("Arquivo de entrada: %s \t", Exp_File);
                printf("Arquivo de saida: %s \n", Res_File);
                ReadData(Exp_File, Lsup, Exp_id, T, Dpm, hm);
                printf("Terminada leitura do arquivo de dados \n");
                printf("Exp id: %s \n", Exp_id);
                N_points = LastPoint(limit, Lsup, hm);
                printf("Numero de pontos aproveitaveis: %3d \n", N_points);
                Interval_t = T[1] - T[0];
                printf("Intervalo entre medidas: %14.7e \n", Interval_t);
                for(n = 0; n <= N_points - 1; hm[n] = hm[n]/1000.0, ++n);
                printf("Leitura e conversao de dados finalizada \n");
                Fibonacci(A[i], B[i], Fb, N, N_points, Dp, hm, hc, Vc, Ho, Vo,
                    Interval_t, &Pmin, &Conv_Flag, &Points_Calc );
                if (Conv_Flag < 0)
                    {
                        Sigma = Sigmaf(Points_Calc, hm, hc);
                        Rf = Pmin;
                        SFR = (Rf * Ro)/(mi * C[i]);
                        SaveSolution(Exp_id, Res_File, N_points, Dp, C[i], Rf, SFR, Sigma, T,
                            Dpm, hm, hc, Vc, Conv_Flag);
                        SolutionLog(Exp_id);
                        goto Next_Point;
                    }
                Rf = Pmin;
                printf("Chamando RungeKutta para a ultima operacao \n");
                RungeKutta(Interval_t, Dp, Rf, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                    &Conv_Flag, &Points_Calc);
                printf("Realizada ultima operacao em RungeKutta \n");
                Sigma = Sigmaf(N_points, hm, hc);
                SFR = (Rf * Ro)/(mi * C[i]);
                SaveSolution(Exp_id, Res_File, N_points, Dp, C[i], Rf, SFR, Sigma, T,
                    Dpm, hm, hc, Vc, Conv_Flag);
            }
        Next_Point:
            printf("Solucao armazenada \n");
    }
    printf(" PROCESSAMENTO DA SERIE %1d TERMINADA COM SUCESSO \n", j);
}
```

```

void SeriesData(int *j, double *Dp, double *P, double A[], double B[],
               double C[], double *Ho)
{
    /*      Definição das variáveis internas da Função Series_Data()      */

    char    ExpName[30], /*      Vetor contendo o nome do arquivo de armazenamento dos */
            /*      dados gerais da série experimental (interno)      */
            /*      */
            Trash[50]; /*      Vetor contendo lixo do arquivo de armazenamento      */
    int     n; /*      Contador genérico      */

    FILE *File_Pointer; /* Apontador do arquivo de dados */
    printf("Forneca o valor da altura da suspensão: \n");
    scanf("%lf", Ho);
    printf("Forneca o nome do arquivo de dados da serie incluindo a estensao \n");
    printf("Nome do arquivo?: ");
    scanf("%s", ExpName);
    printf("\nNome fornecido: %s \n", ExpName);

    File_Pointer = fopen(ExpName, "r"); /* Abre apenas para leitura */
    fscanf(File_Pointer, "%s %d", Trash, j);
    fscanf(File_Pointer, "%s %lf", Trash, Dp);
    fscanf(File_Pointer, "%s %lf", Trash, P);
    /*      OBS: Dependendo do sistema gerador dos arquivos de armazenamento */
    /*      poderá ser necessário alterar o número de "Trash" que são */
    /*      lidos e desprezados, os valores normais podem ser 6, 7 ou 8 */
    for (n = 1; n <= 6; fscanf(File_Pointer, "%s", Trash), ++n);
    for (n = 1; n <= 3; ++n)
        fscanf(File_Pointer, "%s %le %le %lf", Trash, &A[n], &B[n], &C[n]);
    fclose(File_Pointer);
}
/*****/

/*****/
| PROJETO: DESAGUA.P                               Data de início: 13/11/92 |
|-----|
| Nome do Arquivo: Fibonacci.c                      |
| Nome da Função: SerieFibonacci                    Tipo: void      |
| Última Alteração: 16/11/92 Versão: V1             Status: finalizada |
|-----|
| Programado por: Eduardo Cleto Pires                |
|-----|
| OBJETIVO: Esta Função gera uma série de Fibonacci dada a precisão dese- |
|           jada para o valor do ponto de mínimo no intervalo [A,B]      |
|-----|
| PARAMETROS:                                        |
| Entrada: P: precisão desejada para o ponto de mínimo[%]                |
|-----|
| Saída: N: número de termos menos um da série(maior índice do vetor)   |
|       Fb[i]; Fb[]: vetor contendo os N+1 termos da série de |
|       Fibonacci                                                  |
|-----|
| FUNCÕES CHAMADAS: nenhuma                                               |
|-----|
| OBSERVAÇÕES: Esta Função é chamada pelo programa principal              |
|-----|
/*****/

```

```

void SerieFibonacci(double P, int *N, int Fb[])
{
/*      Definição das variáveis internas da Função SerieFibonacci      */

int      n;          /*      Contador genérico
                        */

double   Fmax;      /*      Máximo valor necessário para o último elemento da série */
                        /*      de Fibonacci em Função da precisão requerida */

Fmax = 100.0/P;
Fb[0] = 1;
Fb[1] = 1;
n = 2;
while (Fb[n - 1] <= Fmax)
    {
        *N = n;
        Fb[n] = Fb[n - 1] + Fb[n - 2];
        ++n;
    }
}
/*****/

/*****/
| PROJETO: DESAGUA.P                               Data de início: 05/11/92 |
|-----|
| Nome do Arquivo: FileName.c                       |
| Nome da Função: FileName                          Tipo: void      |
| Última Alteração: 05/11/92   Versão: V1           Status: finalizada |
|-----|
| Programado por: Eduardo Cleto Pires                |
|-----|
| OBJETIVO:     Esta Função cria dois vetores, um contendo o nome do arquivo |
|                de entrada dos dados experimentais e o outro o nome do arquivo |
|                de armazenamento dos resultados da simulação matemática      |
| PARAMETROS:   Entrada: i - índice da concentração, j - índice da pressão de ensaio |
|                (coincide com a série experimental) e k - índice da corrida  |
|                Saída: Exp_File[] - nome do arquivo de entrada dos dados      |
|                Res_File[] - nome do arquivo de armazenamento dos resultados  |
|-----|
| FUNCÕES CHAMADAS: nenhuma
|
| OBSERVAÇÕES: Esta Função é chamada pelo programa principal
|-----|
/*****/

void FileName(char Exp_File[], char Res_File[], int i, int j, int k)
{
/*      Atribui valores constantes para as posições determinadas pelos índices      */

Exp_File[0] = Res_File[0] = 'C';
Exp_File[2] = Res_File[2] = 'P';
Exp_File[4] = Res_File[4] = 'R';
Exp_File[6] = Res_File[12] = '\0';
}

```

```

Res_File[6] = 'S';
Res_File[7] = 'L';
Res_File[8] = '.';
Res_File[9] = 'P';
Res_File[10] = 'R';
Res_File[11] = 'N';

```

```

/*      Atribui valores para posição referente ao índice da concentração (i),  */
/*      pressão (j) e corrida (k) */

```

```

switch (i)
{
case 1: Exp_File[1] = Res_File[1] = '1';
break;
case 2: Exp_File[1] = Res_File[1] = '2';
break;
default: Exp_File[1] = Res_File[1] = '3';
break;
/*case 4: Exp_File[1] = Res_File[1] = '4';
break;
case 5: Exp_File[1] = Res_File[1] = '5';
break;
default: Exp_File[1] = Res_File[1] = '6';
break; */
}

```

```

switch (j)
{
case 1: Exp_File[3] = Res_File[3] = '1';
break;
case 2: Exp_File[3] = Res_File[3] = '2';
break;
case 3: Exp_File[3] = Res_File[3] = '3';
break;
case 4: Exp_File[3] = Res_File[3] = '4';
break;
default: Exp_File[3] = Res_File[3] = '5';
break;
}

```

```

switch (k)
{
case 1: Exp_File[5] = Res_File[5] = '1';
break;
case 2: Exp_File[5] = Res_File[5] = '2';
break;
default: Exp_File[5] = Res_File[5] = '3';
break;
}

```

```

}
/*****

```

```

*****/

```

```

| PROJETO: DESAGUA.P
09/11/92 |

```

Data de início:

```

| Nome do Arquivo: ReadData.c |

```

Nome da Função: ReadData	Tipo: void	Status: finalizada
Última Alteração: 20/11/92	Versão: V1	
Programado por: Eduardo Cleto Pires		
<p>OBJETIVO: Esta Função lê os pontos experimentais no arquivo de dados e os transfere para o programa principal. O nome do arquivo é um dos parâmetros de entrada, sendo criado pela Função FileName, chamada pelo programa principal.</p> <p>PARAMETROS:</p> <p>Entrada: Exp_File[] - nome do arquivo de dados, Lsup - número de pontos experimentais que serão lidos</p> <p>Saída: Exp_id - identificação do experimento, T[] - tempo, Dpm[] - pressão medida, hm[] - altura medida</p> <p>FUNÇÕES CHAMADAS: nenhuma</p> <p>OBSERVAÇÕES: A Função é chamada pelo programa principal</p>		

```

void ReadData(char Exp_File[],int Lsup, char Exp_id[], double T[], double Dpm[],
              double hm[])
{
/*      Definição das variáveis internas da Função ReadData()      */
char   Trash[15];          /*      Vetor contendo lixo do arquivo de armazenamento      */
int    n;                  /*      Contador genérico      */
FILE *File_Pointer; /*      Apontador do arquivo de dados      */

File_Pointer = fopen(Exp_File, "r"); /*      Abre apenas para leitura      */
fscanf(File_Pointer, "%s", Exp_id);
Exp_id[12] = '\0'; /*      Garante terminação da cadeia      */

/*      OBS: Dependendo do sistema gerador dos arquivos de armazenamento      */
/*      poderá ser necessário alterar o número de "Trash" que são      */
/*      lidos e desprezados, os valores normais podem ser 6, 7 ou 8      */
for(n = 1; n <= 8; ++n)
    fscanf(File_Pointer, "%s", Trash);
for(n = 0; n <= Lsup; ++n){
    fscanf(File_Pointer, "%le , %le , %le", &T[n], &Dpm[n], &hm[n]);
    // printf("%le, %le, %le\n", T[n], Dpm[n], hm[n]); getchar();
}
fclose(File_Pointer);
}

```

```

/*****
| PROJETO: DESAGUA.P
05/11/92 |

```

Data de início:

Nome do Arquivo: LastPoint.c	Tipo: int
Nome da Função: LastPoint	

```

Ultima Alteração: 10/11/92                Versão: V1                Status: finalizada
-----
Programado por: Eduardo Cleto Pires

OBJETIVO:      Esta Função encontra o último ponto aproveitável da série de
                medidas, admitindo-se que hm é monotônica decrescente. O menor
                valor para hm é dado de entrada, valendo em geral 0.015m

PARAMETROS:
Entrada: limit - valor limite inferior para hm (0.015m),
        Lsup - número de pontos experimentais recuperados,
        hm[] - vetor das alturas medidas
Saída: N_points - número de pontos experimentais aproveitáveis

FUNCÕES CHAMADAS: nenhuma

OBSERVAÇÕES: A saída se dá na forma de retorno de um único valor, N_points
-----

```

```

int LastPoint(double limit, int Lsup, double hm[])
{
/*      Definição das variáveis internas da Função LastPoint()      */

int n,                /*      Contador genérico      */
    N_points; /*      número de pontos experimentais aproveitáveis      */

for(n = 0; hm[n] >= limit && n <= Lsup; ++n);
return N_points = n;
}
-----

```

```

-----
| PROJETO: DESAGUA.P                                                    Data de início:
| 16/11/92 |
-----
Nome do Arquivo: Fibonacci.c
Nome da Função: Fibonacci                Tipo: void
Ultima Alteração: 25/11/92                Versão: V2                Status: finalizada
-----
Programado por: Eduardo Cleto Pires

OBJETIVO:      Esta Função realiza a procura do ponto de mínima Função
                Sigma f no intervalo [A,B].

PARAMETROS:
Entrada: A                - extremo inferior do intervalo de busca (m—vel)
        B                - extremo superior do intervalo de busca (m—vel)
        Fb[]             - vetor contendo a série de Fibonacci
        N                - número de termos menos um da série de Fibonacci
        N_points         - número de pontos em cada vetor hm[] e hc[]
        hm[]             - vetor contendo as alturas medidas
        hc[]             - vetor contendo as alturas calculadas

Saída: Pmin - ponto de mínima Função pesquisada em [A,B]
-----

```

```

Conv_Flag - indicador da convergência em RungeKutta
1 - ocorre convergência
-1 - não ocorre convergência
Points_Calc - número de pontos calculados até ocorrer a
divergência da solução
Nota: Conv_Flag e Points_Calc são determinadas pela
Função RungeKutta

FUNCÕES CHAMADAS: Sigmaf (Função pesquisada) e RungeKutta

OBSERVAÇÕES: Esta Função é chamada pelo programa principal

```

```

*****/

void Fibonacci(double A, double B, int Fb[], int N, int N_points, double Dp,
double hm[], double hc[], double Vc[], double Ho, double Vo,
double Interval_t, double *Pmin, int *Conv_Flag,
int *Points_Calc)
{
/* Definição das variáveis internas da Função Fibonacci */

double D, /* Distância entre pontos extremos e interiores */
L, /* Ponto interno a esquerda (Left) do centro */
R, /* Ponto interno a direita (Right) do centro */
FA, /* Valor da Função para o ponto A */
FB, /* Valor da Função para o ponto B */
FL, /* Valor da Função para o ponto L */
FR; /* Valor da Função para o ponto R */

int n; /* Contador genérico */

printf("\n CICLO DE BUSCA DO PONTO DE MINIMO: FUNCAO FIBONACCI \n\n");

/* Calcula a distância entre os pontos internos e seus valores */
D = (B - A) * Fb[N-2]/Fb[N];
L = A + D;
R = B - D;

/* Inicia a operacao de busca */

printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", 1, L);
RungeKutta(Interval_t, Dp, L, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
Conv_Flag, Points_Calc);

Rf = L
printf("e terminada \n");
if(*Conv_Flag < 0)
{
printf(" Não ocorre convergencia: busca finalizada \n");
*Pmin = L;
return;
}
}

```

```

    }
    FL = Sigmaf(N_points, hm, hc);
    printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", 2, R);
        RungeKutta(Interval_t, Dp, R, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                    Conv_Flag, Points_Calc);
    Rf = R
    printf("e terminada \n");
    if(*Conv_Flag < 0)
    {
        printf(" Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
        *Pmin = R;
        return;
    }
    FR = Sigmaf(N_points, hm, hc);

/*      Verifica qual dos valores extremos da Função é necessário e o calcula.      */
/*      Este bloco é utilizado para diminuir o tempo de processamento                */

if (FL > FR)
{
    printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", 3, B);
        RungeKutta(Interval_t, Dp, B, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                    Conv_Flag, Points_Calc);
    Rf = B
    printf("e terminada \n");
    if(*Conv_Flag < 0)
    {
        printf(" Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
        *Pmin = (L + B)/2.0;
        return;
    }
    FB = Sigmaf(N_points, hm, hc);
}
else if (FL < FR)
{
    printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", 3, A);
        RungeKutta(Interval_t, Dp, A, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                    Conv_Flag, Points_Calc);
    Rf = A
    printf("e terminada \n");
    if(*Conv_Flag < 0)
    {
        printf(" Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
        *Pmin = (A + R)/2.0;
        return;
    }
    FA = Sigmaf(N_points, hm, hc);
}

/*      Ciclo de busca do ponto de mōnimoda Função      */
/*

for (n = N - 1; n >= 2; --n)
{
    if (FL > FR)
    {
        A = L;
        L = R;

```

```

FA = FL;
FL = FR;
D = (B - A) * Fb[n-2]/Fb[n];
R = B - D;
printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", N-n+3, R);
    RungeKutta(Interval_t, Dp, R, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                Conv_Flag, Points_Calc);
/* Rf = R */

printf("e terminada \n");
if(*Conv_Flag < 0)
    {
    printf("  Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
    *Pmin = (L + R)/2.0;
    return;
    }
FR = Sigmaf(N_points, hm, hc);
}
else if (FL < FR)
    {
    B = R;
    R = L;
    FB = FR;
    FR = FL;
    D = (B - A) * Fb[n-2]/Fb[n];
    L = A + D;
    printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", N-n+3, L);
        RungeKutta(Interval_t, Dp, L, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                    Conv_Flag, Points_Calc);
/* Rf = L */

    printf("e terminada \n");
    if(*Conv_Flag < 0)
        {
        printf("  Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
        *Pmin = (L + R)/2.0;
        return;
        }
    FL = Sigmaf(N_points, hm, hc);
    }
else /* FL = FR */
    {
    A = L;
    B = R;
    FA = FL;
    FB = FR;
    D = (B - A) * Fb[n-2]/Fb[n];
    L = A + D;
    R = B - D;
    printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", N-n+3, L);
        RungeKutta(Interval_t, Dp, L, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,
                    Conv_Flag, Points_Calc);
/* Rf = L */

    printf("e terminada \n");
    if(*Conv_Flag < 0)
        {
        printf("  Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
        *Pmin = (L + R)/2.0;
        return;
        }
    FL = Sigmaf(N_points, hm, hc);
    printf("Operacao %2d em RungeKutta, Rf = %14.7e, iniciada ", N-n+4, R);
        RungeKutta(Interval_t, Dp, R, N_points, Ho, Vo, hc, Vc,

```

```

Conv_Flag, Points_Calc);                                     /* Rf = R */
printf("e terminada \n");
if(*Conv_Flag < 0)
{
    printf(" Nao ocorre convergencia: busca finalizada \n");
    *Pmin = (L + R)/2.0;
    return;
}
FR = Sigmaf(N_points, hm, hc);
}
}
}
*Pmin = (L + R)/2.0;
printf("Terminada a operacao em Fibonacci \n");
return;
}

```

```

/*****/

```

```

/*****/

```

```

| PROJETO: DESAGUA.P
| 10/11/92 |

```

Data de início:

Nome do Arquivo: Sigma.c	
Nome da Função: Sigmaf	Tipo: double
Ultima Alteração: 10/11/92	Versão: V1 Status: finalizada
Programado por: Eduardo Cleto Pires	

OBJETIVO: Calcular o desvio padro entre dois resultados fornecidos na forma de vetores

PARAMETROS:

Entrada: N_points - número de pontos contidos em cada vetor, hm[] e hc[] - vetores com os resultados a ser comparados
Saõda: sigma - desvio padro entre os dois vetores

FUNCõES CHAMADAS: sqrt() da biblioteca ANSI

OBSERVACõES: requer #include <math.h>

```

/*****/

```

```

double Sigmaf(int N_points, double hm[], double hc[])
{
/* Definiko das variáveis internas da Função Sigmaf()
*/

int n; /* Contador genérico
*/

double sum, /* Somatório dos desvios ao quadrado
*/
sigma; /* Desvio padro
*/

sum = 0.0;

```

```

for(n = 0; n <= N_points - 1; ++n)
    sum += (hm[n] - hc[n]) * (hm[n] - hc[n]);
return sigma = sqrt(sum/(N_points - 1));
}
/*****

```

```

/*****

```

```

| PROJETO: DESAGUA.P
| 10/11/92 |

```

Data de início:

```

|-----|
| Nome do Arquivo: RungeKuttaf                               |
| Nome da Função: RungeKutta                               Tipo: void |
| Última Alteração: 25/11/92                               Versão: V2   Status: finalizada |
|-----|
| Programado por: Eduardo Cleto Pires                       |
|-----|

```

```

| OBJETIVO:          Calcular os valores da altura e velocidade da massa durante |
|                   a filtração armazenando-os nos vetores hc[] e Vc[]          |
|-----|

```

```

| PARAMETROS:

```

```

|   Entrada: Interval_t - intervalo entre duas medidas consecutivas,          |
|             N_points  - números de elementos de hc[] e Vc[],                |
|             Dp         - diferença de pressão aplicada durante a filtração,  |
|             R          - coeficiente de resistência à filtração (global),    |
|             Ho         - valor inicial da altura da massa,                    |
|             Vo         - valor inicial da velocidade da massa;               |
|   Saída: hc[] - vetor com os resultados calculados da altura,                |
|            Vc[] - vetor com os resultados calculados da velocidade;          |
|            Conv_Flag - indicador de ocorrência ou não de convergência       |
|                      1 - ocorre convergência                               |
|                      -1 - não ocorre convergência                           |
|            Points_Calc - número de pontos calculados até ocorrer a          |
|                        divergência da solução                               |
|-----|

```

```

| CHAMADAS: fh

```

FUNCÕES

```

| OBSERVAÇÕES: chamada pela Função Fibonacci e pelo programa principal ao
|               finalizar para cálculo de hc e Vc definitivos
|-----|

```

```

void RungeKutta(double Interval_t, double Dp, double R, int N_points,
                double Ho, double Vo, double hc[], double Vc[],
                int *Conv_Flag, int *Points_Calc)
{

```

```

/* Definição das variáveis internas da Função RungeKutta()

```

```

double Dt,          /* Intervalo para diferenciação [s] */
        Teste_K, /* Variável do teste de convergência */
        t,         /* Instante correspondente à medida i [s] */
        Dpm;      /* Dp/Ro [Pa m³/kg] */

double Vn,          /* Velocidade nova - variável auxiliar */
        Vv,        /* Velocidade velha - variável auxiliar */

```

```

        hn,          /* Altura nova - variável auxiliar
        */
        hv;         /* Altura velha - variável auxiliar
        */
double  K1,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        K2,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        K3,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        K4,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        L1,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        L2,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        L3,        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */
        L4;        /* Coeficiente da fórmula de Runge-Kutta
        */

int     n;         /* Contador - número de pontos experimentais
        */

double  m,        /* Contador usado para verificação da convergência */
        Conv;     /* Controla a convergência do loop */

/* Inicialização das variáveis e cálculos preliminares */

Dpm = Dp/Ro;
Vn = 0;
hn = 0;
Vv = Vo;
hv = Ho;
Vc[0] = Vo;
hc[0] = Ho;
*Conv_Flag = 1;

/* Loop do método de Runge Kutta
        */

    for (n = 1; n <= N_points - 1; ++n)
    {
        Conv = 100.0;
        Dt = Interval_t/Conv;

        Calcula_h:

            for (m = 1; m <= Conv; ++m)
            {
                K1 = Dt*(fh(R, Dpm, Ho, hv, Vv));
                L1 = Dt*Vv;

                K2 = Dt*(fh(R, Dpm, Ho, hv+L1/2.0, Vv));
                L2 = Dt*(Vv + K1/2.0);

                K3 = Dt*(fh(R, Dpm, Ho, hv+L2/2.0, Vv));
                L3 = Dt*(Vv + K2/2.0);
            }
    }

```

```

K4 = Dt*(fh(R, Dpm, Ho, hv+L3, Vv));
L4 = Dt*(Vv + K3);

if(K1 != K2)
    Teste_K = fabs((K2 - K3)/(K1 - K2));

if (Teste_K > 0.01)
    {
        Dt = Dt/2.0;
        Conv = Conv * 2.0;
        if(Conv >= 17e06) /* Verifica se a convergência nro ocorre */
            {
                *Conv_Flag = -1; /* Muda estado da flag de convergência */
                *Points_Calc = n - 1;
                return;
            }
        goto Calcula_h; /* Reinicia o ciclo de cálculo */
    }

Vn = Vv + (K1 + 2.0*K2 + 2.0*K3 + K4)/6.0;
hn = hv + (L1 + 2.0*L2 + 2.0*L3 + L4)/6.0;
Vv = Vn;
hv = hn;
    }
    hc[n] = hn;
    Vc[n] = Vn;
    }
}
/*****/

/*****/
| PROJETO: DESAGUA.P                               Data de início:
| 10/11/92 |
|-----|
| Nome do Arquivo: RungeKuttaf                      |
| Nome da Função: fh                                Tipo: double |
| Última Alteração: 17/11/92                        Versão: V1          Status: finalizada |
|-----|
| Programado por: Eduardo Cleto Pires                |
|-----|
| OBJETIVO:      Função auxiliar da RungeKutta, calculando o valor da Função |
|                f(tempo, velocidade, altura) para os parâmetros de entrada |
|                Nota: o tempo não é explícito nesta Função                    |
|-----|
| PARAMETROS:   Entrada: Dpm - Dp/Ro,                |
|                R      - coeficiente de resistência ^ filtração (global),    |
|                Ho     - valor inicial da altura da massa                    |
|                V      - velocidade da massa                                  |
| Saída: fhr - valor da Função f(t,v,h) |
| FUNCÕES CHAMADAS: nenhuma |
| OBSERVACÕES: chamada pela Função RungeKutta |
|-----|
/*****/

```

```
double fh(double R, double Dpm, double Ho, double h, double V)
```

```
{
/*      Definição das variáveis internas da Função fh()
*/
```

```
double fhr = 0;      /*      Valor numérico da Função fh retornado ^ Função RungeKutta */
```

```
    fhr = R*V*V*(Ho-h)*(Ho-h)/h + Dpm/h - g;
    return fhr;
```

```
}
/*****/
```

```
/*****/
```

```
PROJETO: DESAGUA.P
```

```
Data de início: 05/11/92 |
```

```
Nome do Arquivo: SaveSolution.c
```

```
Nome da Função: SaveSolution
```

```
Tipo: void
```

```
Última Alteração: 10/11/92
```

```
Versão: V1
```

```
Status: finalizada |
```

```
Programado por: Eduardo Cleto Pires
```

```
OBJETIVO:      Armazenar os resultados em um arquivo texto para ser aberto |
                por uma planilha para uso posterior
```

```
PARAMETROS:
```

```
Entrada: Exp_id[] - vetor identificativo do experimento,
```

```
Res_File[] - vetor nome do arquivo de armazenamento,
```

```
N_points - número de pontos que serão armazenados,
```

```
Dp - pressão de ensaio,
```

```
Cen - concentração de ensaio,
```

```
R - resistência à filtração (global),
```

```
SFR - resistência específica à filtração,
```

```
Sigma - desvio padrão entre o resultado calculado e medido, |
```

```
T[] - vetor dos tempos,
```

```
DPm[] - vetor das pressões,
```

```
hm[] - vetor das alturas medidas,
```

```
hc[] - vetor das alturas calculadas,
```

```
Vc[] - vetor das velocidades calculadas
```

```
ConvFlag - indicador de convergência da solução
```

```
Saída: nenhuma
```

```
FUNCÇÕES CHAMADAS: nenhuma
```

```
OBSERVAÇÕES: Esta Função é chamada pelo programa principal, gravando os |
                resultados no mesmo diretório do programa de chamada
```

```
/*****/
```

```
void SaveSolution(char Exp_id[], char Res_File[], int N_points, double Dp,
                 double Cen, double Rf, double SFR, double Sigma, double T[],
                 double Dpm[], double hm[], double hc[], double Vc[],
                 int Conv_Flag)
```

```
{
/*      Definição das variáveis internas da Função SaveSolution()
*/
```

```
*/
```

```

int      n;                /*      Contador genérico
                        */
FILE     *File_Pointer;   /*      Apontador de arquivo
                        */

File_Pointer = fopen(Res_File, "w"); /*      Abre apenas para gravação      */
fprintf(File_Pointer, "Identificacao do experimento: %s\n", Exp_id);
if(Conv_Flag < 0)
    fprintf(File_Pointer, "NAO OCORREU CONVERGENCIA EM RungeKutta\n");
fprintf(File_Pointer, "Pressao de ensaio: %14.7e\n", Dp);
fprintf(File_Pointer, "Concentracao: %14.7e\n", Cen);
fprintf(File_Pointer, "R = %14.7e %14.7e SFR = %14.7e\n", Rf, SFR);
fprintf(File_Pointer, "Sigma (m) = %14.7e\n", Sigma);
fprintf(File_Pointer, "Tempo (s) %14.7e Pressao (Pa) %14.7e hm (m) %14.7e\n");
fprintf(File_Pointer, "hc (m) %14.7e Vc (m/s) %14.7e\n");
for(n = 0; n <= N_points - 1; ++n)
    fprintf(File_Pointer, "%14.7e %14.7e %14.7e %14.7e %14.7e\n",
            T[n], Dpm[n], hm[n], hc[n], Vc[n]);

fclose(File_Pointer);
}
/*****/

/*****/
| PROJETO: DESAGUA.P                                     Data de início:
| 05/11/92 |
|-----|
| Nome do Arquivo: Desaguad.c                             |
| Nome da Função: SolutionLog                             Tipo: void |
| Última Alteração: 25/11/92                             Versão: V1      Status: finalizada |
|-----|
| Programado por: Eduardo Cleto Pires                    |
|-----|
| OBJETIVO:      Armazenar identificações de experimentos que não convergiram |
|                em um arquivo texto                                         |
|
| PARAMETROS:
| Entrada: Exp_id[] - vetor identificação do experimento, |
| Saída: nenhuma                                         |
|
| FUNCÕES CHAMADAS: nenhuma
|
| OBSERVAÇÕES: Esta Função é chamada pelo programa principal, gravando os |
|                resultados no mesmo diretório do programa de chamada
|-----|
Void SolutionLog(char Exp_id[])
{
/*      Definição das variáveis internas da Função SolutionLog      */

char    Log_File[12];          /*      Nome do arquivo de armazenamento das Exp_id's */
FILE     *File_Pointer;      /*      Apontador de arquivo
                        */

Log_File[0] = 'R';
Log_File[1] = 'K';
Log_File[2] = 'L';
Log_File[3] = 'O';
Log_File[4] = 'G';

```

```
Log_File[5] = '\0';  
  
File_Pointer = fopen(Log_File, "a");  
fprintf(File_Pointer, "%s \n", Exp_id);  
fclose(File_Pointer);  
}  
/*****/
```