

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner

Autor: Sérgio Coutinho Amarante  
Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão

Março / 2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Sérgio Coutinho Amarante

Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de  
filtragem de laboratório: Testes de Folha e Funil de Büchner

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas  
Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral  
Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2002

**À minha esposa, Andréa, e às  
minhas filhas Paula e Renata.**

**AGRADECIMENTOS:**

O autor agradece a todos aqueles que colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular: Dr. Armando Correa de Araújo, Cássia Cristine de Souza, Ronney Rogério Rodrigues Silva e aos demais colegas do Centro de Pesquisas do Miguelão. Agradece a cuidadosa revisão realizada por Mário Viggiano e Adriana Carneiro Viggiano. Agradecimento especial ao Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão pelos conhecimentos transmitidos e pela paciência na orientação.

À Minerações Brasileiras Reunidas S.A. pela possibilidade de realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

	PÁGINA
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>3.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
3.1 - Minas da MBR: Geologia e Mineralogia - - - - -	5
3.2 - Circuitos de Tratamento de Minérios e Filtragem de PFF na MBR - -	8
3.3 - Filtragem: .....	15
3.3.1 - Teoria Clássica .....	17
3.3.2. Mecanismos de Desaguamento- .....	21
3.3.3 - Equipamentos .....	28
3.3.4- Elementos Filtrantes .....	45
3.3.5 - Auxiliares de Filtragem .....	51
3.3.6 - Testes de Laboratório .....	60
3.3.7 - Filtragem de PFF .....	73
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>77</b>
4.1 - Seleção e Obtenção das Amostras .....	77
4.2 - Preparação das Amostras .....	77
4.3 - Peneiramento .....	79
4-4 - Análise Química .....	79
4.5 - Determinação da Massa Específica dos Sólidos .....	79
4.6 - Determinação da Superfície Específica dos Sólidos: Blaine .....	79
4.7 - Testes de Filtragem de Laboratório .....	80
4.7.1 - Teste de Folha convencional .....	80
4.7.2 - Teste de Folha com alimentação por cima .....	84
4.7.3 - Testes com Funil de Büchner com alimentação por cima - -	85
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>88</b>
5.1 – Caracterização das Amostras .....	89
5.2 – Resultados Gerais das Amostras .....	91
5.3 – Discussão sobre os Tipos de Testes de Filtragem .....	107
5-4 – Discussão Final: Aspectos Gerais da Filtragem .....	108

<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>118</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>119</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>120</b>

## Lista de Figuras

FIGURA	PÁGINA
Figura 1.1 - Mapa do Quadrilátero Ferrífero M.G. ....	1
Figura 3.1 - Fluxograma da ITM/MUT -----	10
Figura 3.2 - Fluxograma da ITM/MAC -----	11
Figura 3.3 - Fluxograma do ITM/PIC -----	12
Figura 3.4 – Fluxograma do Peneiramento a Úmido / TIG -----	13
Figura 3.5 – Diagrama Esquemático da Torta (A, B e C: Tiller, 1980; D:Gale, 1977) -----	16
Figura 3.6 – Estados da Água em Tortas Floculadas e Não-Floculadas Pereira, L.G.; 1999) -----	25
Figura 3.7 - Filtro a Vácuo: Instalações (a) NASH; (b) Mular & Anderson, 1986 -----	30
Figura 3.8 - Filtro a Vácuo de Tambor (a) TAMFELT / LAROX; (b) EIMCO-----	32
Figura 3.9 - Filtro a Vácuo de Discos Verticais: MBR / MAC -----	33
Figura 3.10 - Filtro a Vácuo de Discos Verticais (a); NORDBERB – SCANMEC; (b) EIMCO -----	34
Figura 3.11 - Filtro a Vácuo de Discos Verticais: elementos mecânicos EIMCO -----	35
Figura 3.12 - Filtro Horizontal de Correia: elementos mecânicos (a) DELKOR; (b) TAMFELT -----	37
Figura 3.13 - Filtro Horizontal de Correia: elementos construtivos –EIMCO	38
Figura 3.14 - Filtro Prensa Vertical (a) EIMCO; (b) TAMFELT -----	39
Figura 3.15 - Filtro Prensa Horizontal (a) TAMFELT; (b) LAROX -----	40
Figura 3.16 - Filtro “Belt Press” (a) TAMFELT; (b) EIMCO -----	42
Figura 3.17 - Filtro Cerâmico : OUTOKUMPU -----	43
Figura 3.18 - Elementos Filtrantes - Tipos – TAMFELT -----	46
Figura 3.19 - Elemento Cerâmico - Capilaridade : OUTOKUMPU -----	48
Figura 3.20 - Agregado Formado por Meio de Mecanismo de “Pontes” (Valadão, 1996) -----	53

<b>Figura 3.21 - Diferentes Formas de Adsorção e Interação dos Surfatantes em Meio Aquoso na Presença de Partículas Sólidas (Valadão, 1996) - - - - -</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.22 - Teste de Folha (Leaf Test) convencional e alimentação por cima a) e (b) Dahlstrom &amp; Silverblatt, 1977 - - - - -</b>	<b>61</b>
<b>Figura 3.23 - Teste de Folha e Funil de Büchner (detalhe: medida do filtrado) (a) Coelho, 1980; (b) Gale, 1977 - - - - -</b>	<b>62</b>
<b>Figura 3.24 – “Apparatus” para determinação de filtrabilidade e resistência específica (Gale, 1977) - - - - -</b>	<b>63</b>
<b>Figura 3.25 - Teste de Folha (montagens c/ opções) Svarovsky, 1981 - - - - -</b>	<b>64</b>
<b>Figura 3.26 - Montagens: automática para filtro Ceramec e instrumentada para filtro prensa (a) Mänttäre &amp; Ekberg, 1996; (b) Tarleton, 1999 - - - - -</b>	<b>65</b>
<b>Figura 3.27 - Teste de Folha: Montagem DORR OLIVER - - - - -</b>	<b>66</b>
<b>Figura 3.28 - Teste c/ Funil de Büchner: montagem DORR OLIVER - - - - -</b>	<b>67</b>
<b>Figura 3.29 – Procedimentos de Teste de Filtragem (a) TAMFELT; b) BOKELA) - - - - -</b>	<b>68</b>
<b>Figura 3.30 - Filtro Prensa LAROX: Equipamento Piloto - - - - -</b>	<b>69</b>
<b>Figura 3.31 - Filtro Prensa LAROX: torta e filtrado - - - - -</b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.1 - Fluxograma de Preparação das Amostras - - - - -</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4.2 - Teste de Folha Convencional: MBR / MIG - - - - -</b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.3 - PFF / MBR: Tortas PIC e MAC - - - - -</b>	<b>83</b>
<b>Figura 4.4 - Teste de Folha: Montagem EIMCO - - - - -</b>	<b>86</b>
<b>Figura 4.5 - Funil de Büchner: Montagem com Coluna de Filtrado (alimentação por cima) - - - - -</b>	<b>87</b>
<b>Figura 5.1 – Modelo Geral de um Processo ou Sistema - - - - -</b>	<b>89</b>
<b>Figura 5.2 – Caracterização Física das Amostras 01 a 06 - - - - -</b>	<b>90</b>
<b>Figura 5.3 – Resultados Globais da Taxa Unitária de Filtragem e da Umidade para as Amostras 01 a 06 - - - - -</b>	<b>92</b>
<b>Figura 5.4 – Variação da Umidade e da Taxa Unitária de Filtragem em Função do Índice de Blaine (IBLA) - - - - -</b>	<b>93</b>
<b>Figura 5.5 – Espessura versus Tempo de Formação para cada Amostra - - - - -</b>	<b>104</b>

<b>Figura 5.6 – Espessura versus Tempo de Formação por Elemento Filtrante-</b>	<b>105</b>
<b>Figura 5.7 – Porosidade versus Espessura por Amostra - - - - -</b>	<b>106</b>
<b>Figura 5.8 – Curvas de Desaguamento para Filtros a Vácuo de Discos</b>	
<b>Verticais - - - - -</b>	<b>109</b>
<b>Figura 5.9 – Modificações nas Válvulas de Vácuo dos Filtros a Vácuo de</b>	
<b>Discos Verticais - - - - -</b>	<b>110</b>
<b>Figura 5.10 – Curvas de Desaguamento para Filtros Horizontais de Correia</b>	<b>111</b>
<b>Figura 5.11 – Efeitos da Dosagem de Flocculante e da Espessura da Torta nas</b>	
<b>Curvas de Desaguamento da Amostra 05 - - - - -</b>	<b>112</b>
<b>Figura 5.12 – Curvas de Desaguamento para a Amostra 05 - - - - -</b>	<b>113</b>
<b>Figura 5.13 – Efeitos da Dosagem de Surfatantes para a Redução da</b>	
<b>Umidade da Torta da Amostra 05 após Flocculação- - - - -</b>	<b>114</b>
<b>Figura 5.14 – Efeitos da Sequência e da Dosagem dos Reagentes: a)</b>	
<b>Floculante e Surfatante; b) Surfatante e Floculante – Amostra 6</b>	<b>115</b>

## Lista de Tabelas

<b>TABELA</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabela 3.1 - Filtragem nas Instalações de Tratamento de Minérios da MBR -	14
Tabela 3.2 - Classificação dos Filtros Contínuos a Vácuo (Valadão, 1996) --	29
Tabela 3.3 – Comparação de Custos de Investimento e de Energia para Diferentes Técnicas de Filtragem (Amarante, 2001) - - - - -	44
Tabela 3.4 - Classificação dos Elementos Filtrantes mais Comuns - (DORR OLIVER , 1980) - - - - -	49
Tabela 3.5 - Efeito Relativo do Tecido (“weave”) e do Fio (“yarn”) - (DORR OLIVER, 1980) - - - - -	50
Tabela 3.6 - Principais Reagentes Agregantes Utilizados na Indústria Mineral (Valadão, 1996)- - - - -	55
Tabela 3.7 - Técnicas de Desaguamento de Minério de Ferro “Pellet Feed Fines” (Amarante, 2001) - - - - -	76
Tabela 5.1 – Resultados das Análises Químicas para as Amostras 01 a 06 --	91
Tabela 5.2 – Resultados da Amostra 01 - - - - -	94
Tabela 5.3 – Resultados da Amostra 02- - - - -	95
Tabela 5.4 – Resultados da Amostra 03- - - - -	96
Tabela 5.5 – Resultados da Amostra 04- - - - -	97
Tabela 5.6 – Resultados da Amostra 05- - - - -	98
Tabela 5.7 – Resultados da Amostra 06- - - - -	99
Tabela 5.8 – Resultados das Médias de Umidades e Taxas Unitárias de Filtragem para os Fatores A e B – Amostras 01 a 06 - - - - -	101
Tabela 5.9 – Significância Estatística para os Fatores A e B para as Umidades e para as Taxas Unitárias de Filtragem (intervalo de confiança de 95%) - - - - -	102

## RESUMO

O beneficiamento da maioria dos minérios de ferro requer processamento a úmido, sendo necessária a redução da umidade dos produtos deste processo para a comercialização. Devido a maior superfície específica, o produto mais fino ou *Pellet Feed Fines* apresenta maior dificuldade no desaguamento. Na MBR a filtração é realizada, usualmente, por filtros a vácuo com discos verticais e, mais recentemente, por filtro horizontal de correia. A avaliação do comportamento dos minérios e das variáveis de processo é realizada em laboratório através de testes de folha, cujos resultados são aplicados em melhorias nas instalações de tratamento de minérios existentes e no dimensionamento das operações futuras.

Pretende-se neste trabalho avaliar as metodologias de Teste de Folha e Funil de Büchner modificados, obtendo-se a curva de desaguamento, e não somente um ponto por teste para diferentes condições. A aplicação se contrapõe ao teste tradicional, podendo contribuir para o entendimento do mecanismo do processo de filtração.

## **ABSTRACT**

Once iron ores usually require wet processing methods, it is often necessary to remove most of the water added during the industrial operation. In this case, the finer the product the greater is the difficulty to remove water from filtration cake. These samples represent products of the industrial processing of MBR, the second largest Brazilian iron ore producer, with different size distributions and Blaine indices. The final removal of water from pellet feed fines is usually performed by means of rotary vertical disc filters (RVDF) and, more recently, also by horizontal belt filter at MBR. The filtration tests were performed following two different laboratory procedures. The results indicated significant influence of cake thickness and of the addition of reagents on cake moisture and on unit filtration rate. It was also observed that the industrial operation could be optimised taking into account these laboratory results.

The evaluation of the laboratorial procedures (Leaf Test, Modified Leaf Test and Büchner Test) is the target of this work. The dewatering curves obtained under different cake thickness and considering the addition of flocculants and/or surfactants are discussed in this work.

## 1. INTRODUÇÃO

A Minerações Brasileiras Reunidas S.A. – MBR - tem atualmente cinco minas em atividade no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais. Dentre estas, duas têm previsto processo de exaustão para, aproximadamente, 2002: mina de Águas Claras (MAC) e mina da Mutuca (MUT). Dentro do Plano de Longo Prazo da MBR, elas serão substituídas pelas minas de Tamanduá (TAM) e Capitão do Mato (CMT), ambas em processo de expansão das atividades. Este plano conta ainda com a abertura da mina de Capão Xavier (CPX) e, em uma segunda etapa, a expansão da mina do Pico (PIC), adequando a capacidade de produção para 32 milhões de toneladas por ano de minério de ferro de elevado teor (Figura 1.1).

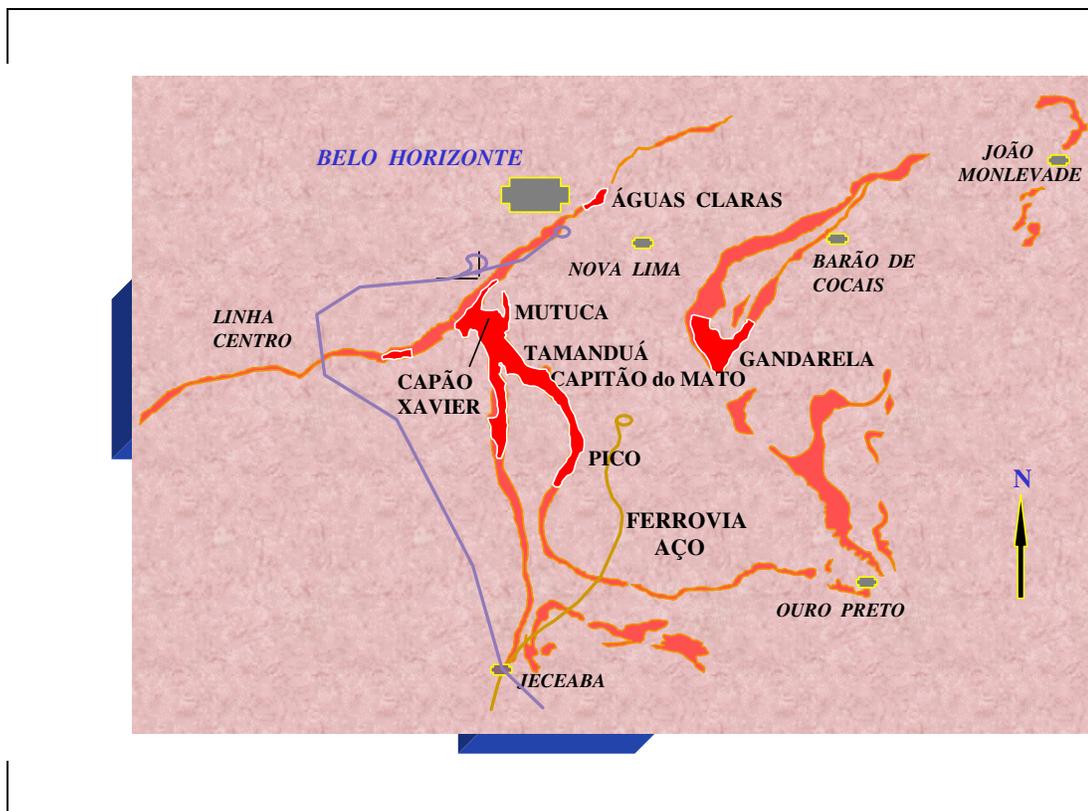


Figura 1.1 - Mapa do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais

A mina de Águas Claras está em fase de exaustão, devendo a lavra e beneficiamento se estender até o ano de 2002. O processo de beneficiamento a úmido deu-se até o ano de 2001, iniciando-se, a partir de então, o beneficiamento a seco do minério remanescente.

Esta mina, devido à localização em relação às demais, será descomissionada, dando espaço a um projeto urbanístico.

A instalação de tratamento de minérios da mina da Mutuca recebia até 2001, além do minério da própria mina, o material procedente da mina de Tamanduá, complementando sua capacidade de beneficiamento. Em 2001, teve início o projeto de separação magnética na Mutuca. A cava, com as operações de lavra paralisadas em 2001, está sendo objeto de estudos de deposição de estéreis de Capão Xavier e rejeitos do tratamento de minérios na própria mina exaurida.

A instalação de tratamento de Vargem Grande iniciou as atividades em maio de 2001, recebendo os minérios britados de Capitão do Mato e de Tamanduá.

Os produtos da MBR estão classificados de acordo com a faixa granulométrica:

"Lump Ore" (LO)	-31,8 a 12,7mm
Hematitinha (Hm)	-12,7 a 6,35mm
"Coarse Sinter Feed (CSF)"	-6,35 a 0,150mm
"Sinter Feed" (SF)	- 6,35 a 0,150mm
"Pellet Feed Fines" (PFF)	- 0,15 a 0,045mm

Observação: O PFF/MBR possui granulometria típica de 55% a 60% passante em 0,045mm.

As minas da MBR, anteriormente reconhecidas pela homogeneidade e pela alta qualidade dos minérios, apresentam hoje circuitos de concentração em praticamente todas as suas instalações de tratamento. O produto de mais nobre destinação é "Lump Ore" para processo de redução direta, sendo procedente, atualmente, das minas de Capitão do Mato e de Tamanduá. Nestas minas, quatro classes distintas de minério podem ser individualizadas: minérios compactos, porosos, brechados e xistosos. Já o produto "Sinter Feed", também de elevado teor metálico, é destinado ao processo de sinterização em diversas usinas siderúrgicas. O "Pellet Feed Fines" segue tanto para a sinterização, participando como aderente aos minérios mais hidratados devido às

características de alto teor em ferro e boas propriedades metalúrgicas, quanto para o processo de pelotização, corrigindo o teor de produtos mais pobres e reduzindo o custo de moagem devido às características de tamanho de grão das partículas minerais (Amarante, 1999).

Cerca de 90% a 95% do minério de ferro comercializado pela MBR segue para o mercado externo, sendo para tanto transportado por via férrea para o Terminal da Ilha Guaíba (TIG), onde é embarcado em navios de até 300.000t de capacidade. Os custos de manuseio e transporte são significativos, sendo objetos de estudos visando à redução. Parte destes estudos é direcionada para a redução da umidade dos produtos, pois a água transportada onera o custo de transporte, não havendo nenhuma contrapartida de receita econômica, já que os contratos de venda são baseados em unidades metálicas contidas (Amarante, 2001).

Assim, surge como grande potencial de redução de despesas operacionais o tópico desaguamento de produtos, sobretudo para o PFF que representa o maior valor de umidade entre eles.

## **2. OBJETIVOS**

Utilizar os resultados de testes de filtração como ferramenta para o estudo de diferentes comportamentos de processo na melhoria contínua de processos industriais de filtração existentes e futuros da MBR.

Estudar a aplicabilidade de novos métodos de laboratório, comparando-os com o atual teste de folha, com o objetivo de compreender mais precisamente o mecanismo de desaguamento dos minérios e a influência de determinados parâmetros de processo e/ou modificadores a serem propostos.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica abordará os aspectos relevantes das operações correntes da MBR: geologia, mineralogia e beneficiamento das diversas minas, visando uma apresentação geral da situação atual e minérios. Detalhará os aspectos relativos à filtragem como operação unitária do processamento mineral, com os equipamentos, métodos e testes em laboratório, bem como os estudos de reagentes para filtragem, entre outros.

#### **3.1. Minas da MBR: Geologia e Mineralogia (Amarante, 1999)**

A necessidade de estudos de tipologia dos minérios mostra-se cada vez mais importante devido à exaustão das grandes jazidas homogêneas do quadrilátero e a um aumento na complexidade geológica das novas jazidas em início de processo de lavra. Para estes minérios mais pobres, cujo beneficiamento requer circuito de concentração, necessita-se que sejam incorporados critérios mineralógicos na classificação dos tipos de minério.

Diversos estudos têm sido realizados pela MBR e por outras mineradoras de ferro, também situadas no Quadrilátero Ferrífero, mostrando uma classificação dos minérios de acordo com a resposta ao processo de beneficiamento e aos processos metalúrgicos a jusante.

#### Geologia

Os depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero (Formação Cauê) constituem um clássico exemplo de formação ferrífera do tipo Lago Superior, correlata tanto em relação ao tempo geológico quanto ao estilo deposicional com outras formações ferríferas nos quatro outros continentes atuais. Estes depósitos do Quadrilátero podem ser individualizados em dois grupos principais: depósitos de minério de ferro de alto teor e depósitos de minério de ferro itabiríticos.

Os minérios de alto teor são homogêneos, basicamente constituídos por hematita, com pequenas concentrações de magnetita e quartzo ou carbonatos. Apresentam concentrações de 66% a 68% de ferro e são subdivididos em minérios compactos e friáveis basicamente pelas proporções de geração de produtos. Minérios compactos são densos e, comumente, apresentam fratura conchoidal e geram menos de 25% de seu volume de partículas inferiores a 12,5mm. Minérios friáveis são porosos, ou pouco compactos, que, ao serem minerados, fragmentam mais de 75% de seu volume em partículas inferiores a 37,5mm.

A gênese dos minérios de ferro de alto teor classificados como “hematita compacta” permaneceu durante anos como motivo de grande controvérsia. Dorr (1964) postulou para estes corpos uma origem metassomática. Diversos autores, no entanto, descreveram evidências de controles sedimentares, baseados na forma lenticular. O consenso atual é de que os corpos de “hematita compacta” foram depositados em ambientes redutores e apresentam a magnetita como principal componente. Quando estas magnetitas foram submetidas a condições de alteração supergênica (oxidação e lixiviação), elas foram martitizadas. Este processo envolve uma redução volumétrica e os cristais residuais apresentam núcleos de kenomagnetita ou maghemita, que são dissolvidos preferencialmente, gerando uma importante porosidade.

Os itabiritos são definidos pela intercalação métrica e centimétrica de camadas ricas em óxidos de ferro e camadas ricas em sílica, carbonatos e silicatos. A concentração primária destes elementos é extremamente variável e intensamente afetada por efeitos secundários supergênicos. Podem ser distinguidos três diferentes tipos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero (Formação Cauê): i) itabiritos normais ou silicosos: intercalam camadas mais e menos ricas em óxidos de ferro e  $\text{SiO}_2$ ; ii) itabiritos dolomíticos: itabiritos anfíbolíticos, compostos por camadas que intercalam maiores e menores concentrações de óxidos de ferro e anfíbolios; iii) itabiritos manganésíferos e filíticos: tipos subordinados são ocasionalmente encontrados nas bordas em contato com carbonatos da seqüência superior (Formação Gandarela) e os filitos da seqüência inferior (Formação Batatal).

## Mineralogia

Em termos das jazidas do Quadrilátero Ferrífero, os principais minerais-minérios são a hematita, goethita e a magnetita. Entre os minerais de ganga têm-se principalmente o quartzo, as goethitas (de baixo teor de Fe) e, subordinadamente, caulinita, gibbsita, dolomita e mica (clorita, sericita, entre elas). Calcitas e apatitas são mais raramente observadas e silicatos de ferro não ocorrem comumente.

A goethita está mais concentrada nos níveis superiores mais afetados pelo intemperismo. Essa mineralogia é encontrada nos itabiritos, sendo que nesta rocha há predomínio relativo do quartzo sobre os outros minerais.

Os minerais goethita, caulinita e gibbsita são os responsáveis pela presença de alumina no minério, podendo ocorrer na forma de partículas livres ou associadas.

A goethita é um hidróxido de ferro, produto de intemperismo dos minerais portadores de ferro, sob condições de oxidação. Pode apresentar conteúdos significativos de alumina e fósforo em sua rede cristalina. O termo limonita não é mais considerado como o nome de um mineral e sim um termo de campo ou para descrever óxidos hidratados de ferro pobremente cristalinos e de identidade desconhecida.

Trabalhos recentes de caracterização mineralógica nas frações granulométricas de granulado (“lump ore” e hematitinha) e “sinter feed” mostraram ter a alumina origem predominante na goethita presente nas amostras. Em algumas regiões da mina de Tamanduá, a gibbsita tem importância significativa como mineral portador de alumínio na forma de hidróxido (Amarante, 1999).

A caulinita é um silicato hidratado de alumínio possuindo cerca de 39,5% de alumina. A gibbsita é por sua vez composta de alumina (65,43%) e água, sendo resultante do processo de dessilicificação de argilas ocasionado por intemperismo.

Outros minerais presentes são Pirolusita ( $MnO_2$ ), Romanechita ( $BaMn^{II}Mn_8O_{16}[OH]_4$ ), além de hidróxidos de ferro. Apatitas são mais raramente encontradas, com ocorrência comprovada nas jazidas da MBR (antiga Mina de Águas Claras). Carbonatos, Dolomita ( $(Mg,Ca)CO_3$ ) e, menos comumente, Calcita ( $CaCO_3$ ), também são encontrados em pequenas proporções.

Observa-se ainda em todas as caracterizações mineralógicas dos minérios da região presença da magnetita relict, remanescente do processo de martitização, que origina a martita. A martita é uma hematita por composição, originada da oxidação da magnetita, conservando a morfologia octaédrica, porém apresentando mesmo em observação na lupa binocular de 50X porosidade elevada relativa à redução volumétrica deste processo de oxidação.

### 3.2. Circuitos de Tratamento de Minérios e Filtragem de PFF na MBR

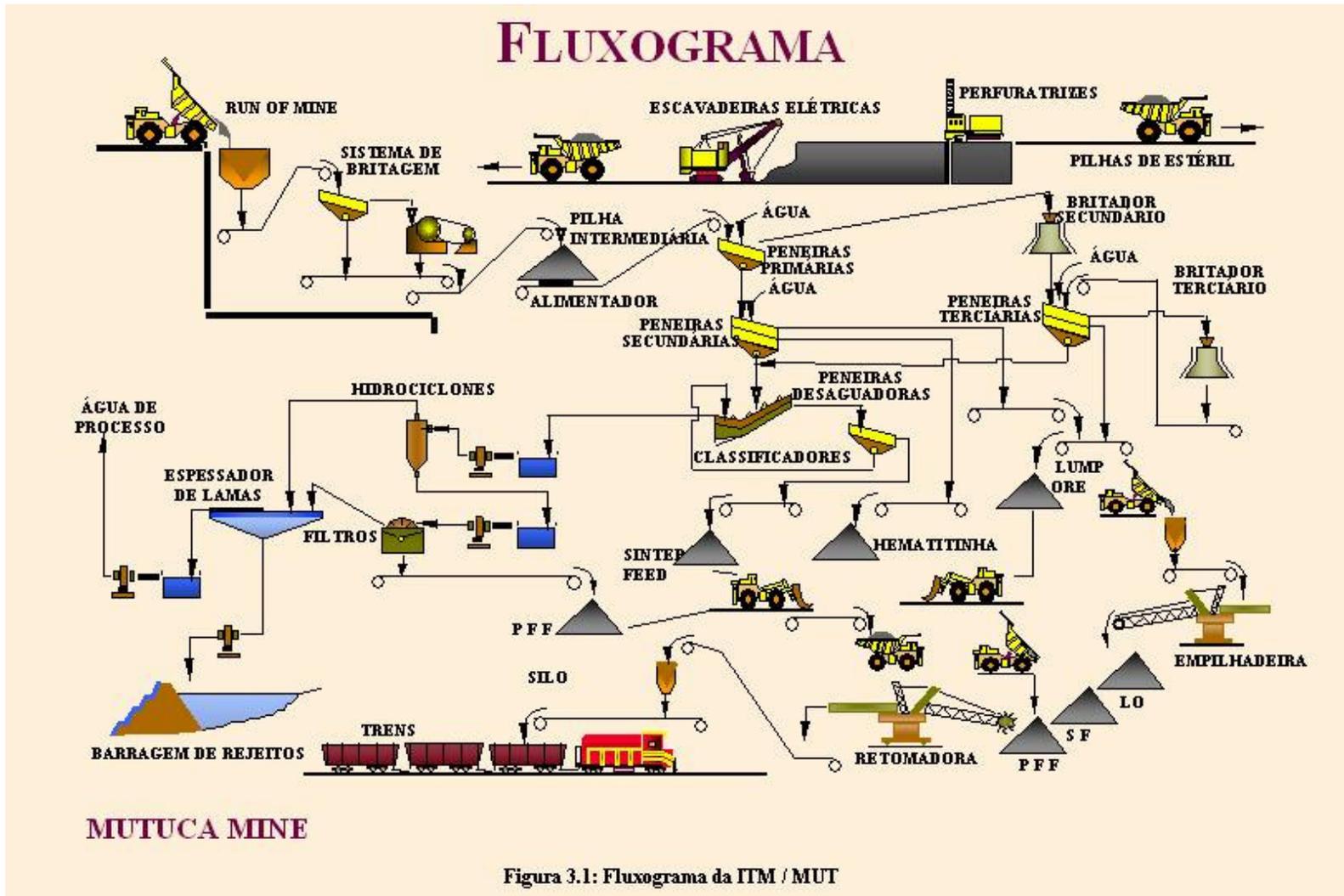
O processo de beneficiamento das instalações de tratamento de minérios da MBR é o característico para minérios hematíticos de elevado teor, podendo ser descrito como: britagem e peneiramento, respondendo pela produção dos granulados “Lump Ore” e Hematitinha, seguido de classificação em classificadores espirais, responsáveis pela produção do “Sinter Feed” ciclonagem, seguida ou não de concentração por flotação em colunas ou separação magnética, e, finalmente, a filtragem produzindo o “Pellet Feed Fines” (PFF).

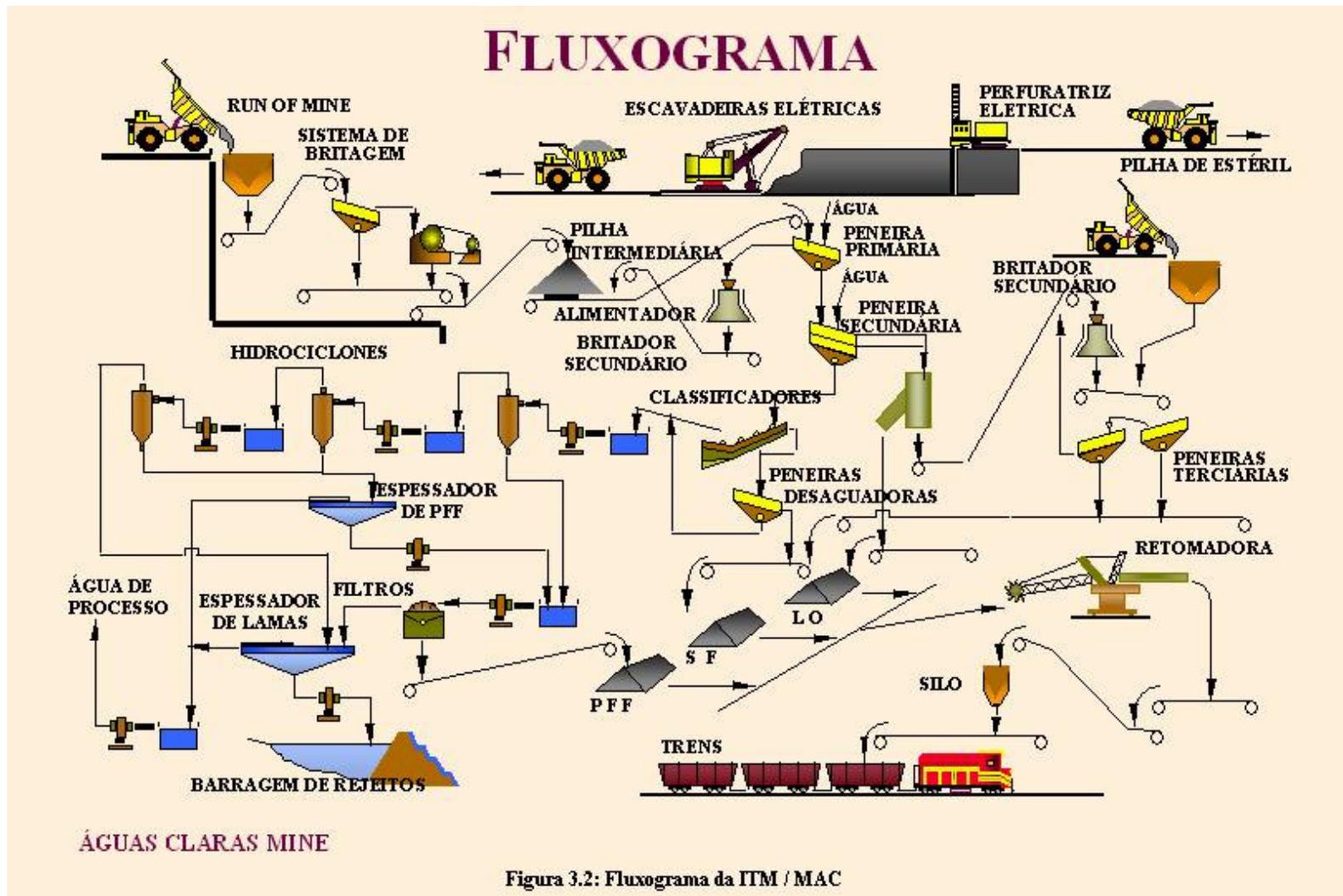
Apresentam-se neste trabalho quatro fontes de PFFs, sendo de três Unidades Operacionais: Águas Claras (MAC), Mutuca (MUT) e Pico (PIC), além de um produto fino de operações de peneiramento a úmido dos granulados no Terminal da Ilha Guaíba (TIG). A amostra procedente da Mutuca (PFF/MUT) corresponde à de um circuito de classificação por ciclonagem com apenas um estágio, como mostrado na Figura 3.1. Já as amostras de Águas Claras (PFF/MAC) representam um circuito de tratamento que maximiza a recuperação, com seus três estágios de ciclonagem e, ainda, um espessamento para os “underflows” do segundo e do terceiro estágios (Figura 3.2). Na

instalação de tratamento da mina do Pico tem-se uma configuração mais complexa devido à etapa de concentração (com seu necessário condicionamento - espessamento, dosagem de reagentes - para flotação em colunas) e etapa posterior de espessamento (Figura 3.3).

No início de 2001, teve início a operação de filtragem de finos do circuito de peneiramento do produto para o processo de redução direta (LORD) no Terminal da Ilha Guaíba (TIG). Devido à elevada superfície específica dos finos gerados a partir deste processo (2700 a 4100 cm<sup>2</sup>/g), foi instalado um filtro de correia nesta Unidade Operacional da MBR. (Figura 3.4).

Os equipamentos atuais e futuros da MBR podem ser vistos na Tabela 3.1.







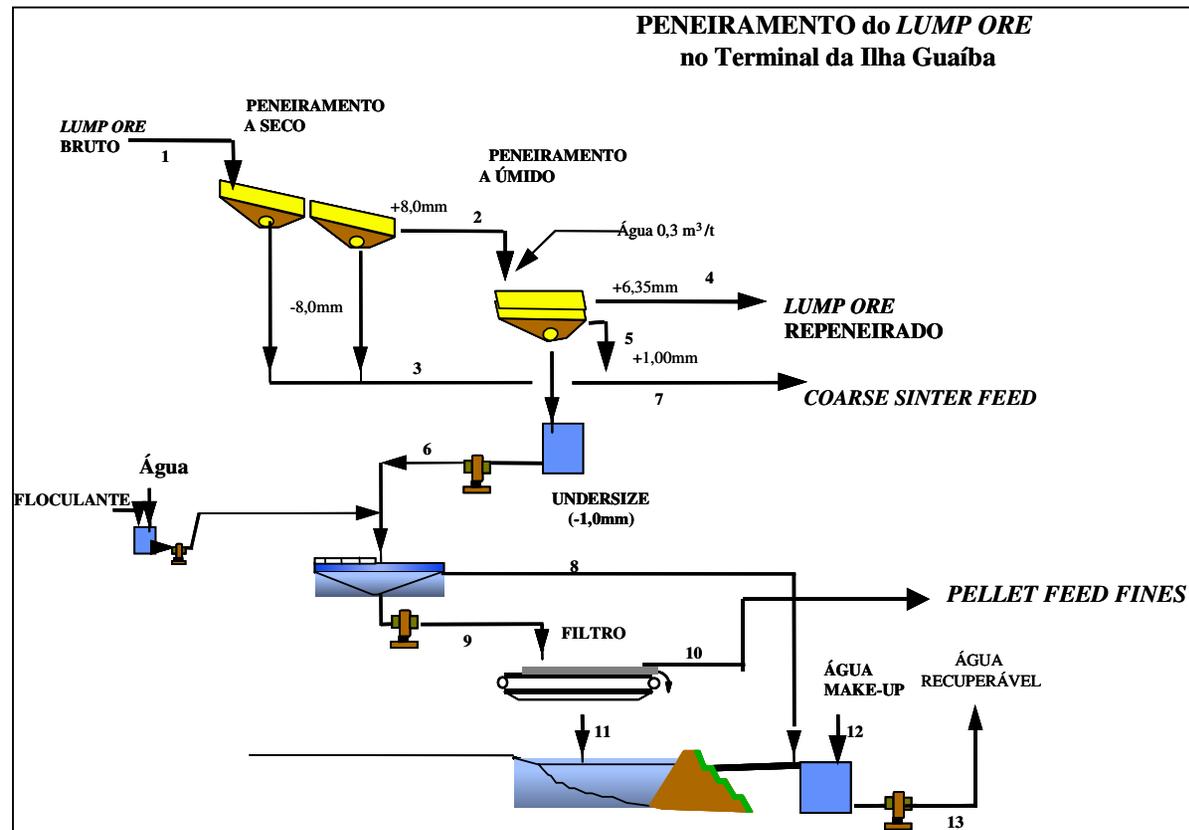


Figura 3.4 - Fluxograma do Peneiramento a Úmido no TIG

**Tabela 3.1 - Filtragem nas Instalações de Tratamento de Minérios da MBR (Amarante, 2001)**

Mina	MAC*	MAC*	MUT	MUT	PIC	TIG**
Fornecedor	Envirotech	Envirotech	Miningtech	Envirotech	Miningtech	-
Tipo	Discos Vertical	Filtro de Correia				
Diâmetro (m)	1,8	1,8	2,7	1,8	2,7	-
Área / Filtro (m <sup>2</sup> )	34	42	110	42	110	45
Nº de Filtros	1	8	1	2	4	1
Área Total (m <sup>2</sup> )	34	336	110	84	440	45
TUF (t/h/m <sup>2</sup> )	1,0	1,0	1,4	1,4	1,8	1,0 a 1,4
Produção (t/h)	34	336	154	117	792	45
Vácuo de Formação (kPa) (pol Hg)	58 a 68 17 - 20	68 20				
Vácuo de Secagem (Pa) (pol Hg)	68 a 75 20 - 22	68 a 75 20 - 22	68 20	68 20	68 a 75 20 - 22	75 22
Rotação (rpm)	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	0,8 - 1,2	-
Índice de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	900 - 1000	900 - 1000	800 - 900	800 - 900	550 - 650	2700 - 4100
Umidade do PFF (%)	10,0	10,0	10,5	10,5	8,0 - 9,0	12,5 - 15

Observações: MAC\*= término da operação a úmido em 2000; TIG\*\* = filtro de correia com início de operação em 2001.

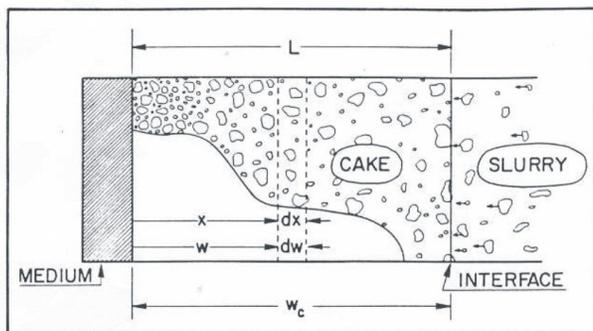
### 3.3. Filtragem

Os minérios requerem usualmente processamento a úmido, sendo, então, necessário que se recupere a maior parte da água adicionada durante a operação industrial. A separação sólido/líquido torna-se, portanto, uma importante etapa no âmbito do processamento mineral. Este processo tem sido bastante estudado devido não só ao aspecto de recuperação da água, recurso cada vez mais escasso e oneroso para a indústria, bem como ao grande consumo energético. Várias técnicas podem ser utilizadas na separação sólido/líquido não só individualmente, mas também como complementares, podendo-se citar: centrifugação, secagem, filtragem e sedimentação por gravidade, sendo estas duas últimas consideradas como de maior importância para a tecnologia mineral (Amarante, 2001).

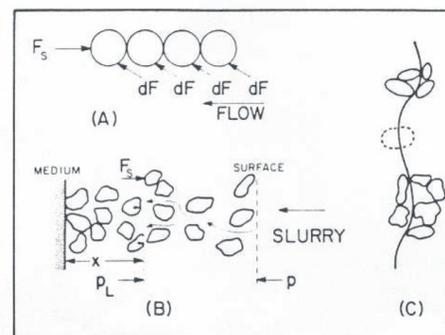
As operações unitárias de filtragem ocorrem em duas situações distintas (Pereira, 1999):

- No tratamento de minérios convencional, que possibilita o desaguamento de concentrados ou de rejeitos, preparando-os para posterior secagem, homogeneização, transporte ou disposição no meio ambiente. Neste caso, têm-se como exemplos a filtragem de carvão, bauxita, caulim, minério de ferro, concentrado de cobre, fosfato, dentre tantos outros;
- Na hidrometalurgia, quando o interesse recai sobre a recuperação da porção líquida da polpa (“licor”) que, em geral, contém os metais, sais ou outros materiais que em operações unitárias consecutivas (precipitação, eletrólise, extração por solvente, troca iônica, adsorção, entre outros) irão se separar. Exemplos relevantes podem ser: processos tradicionais de recuperação de alumínio (processo Bayer), ouro, zinco, cobre, urânio e muitos outros.

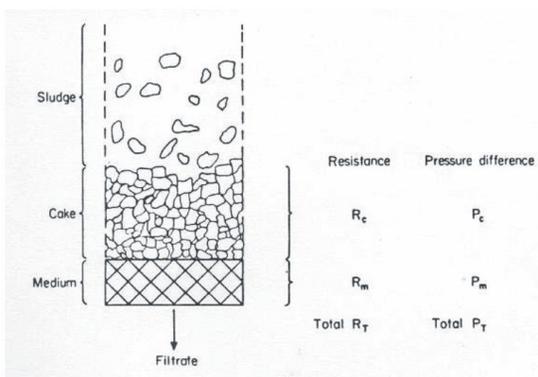
Pretende-se no presente estudo abranger todo o desaguamento, desde o estado inicial da formação da torta, passando pelo ponto de formação e chegando até o limite prático de desaguamento, determinado pelo decréscimo significativo do desaguamento. Para tanto, mostram-se curvas completas de todo o desaguamento, a partir das quais pode-se verificar a influência de auxiliares de filtragem ou mesmo determinar as resistências específicas das tortas e dos meios filtrantes (Figura 3.5) (Gale, 1977; Tiller, 1980).



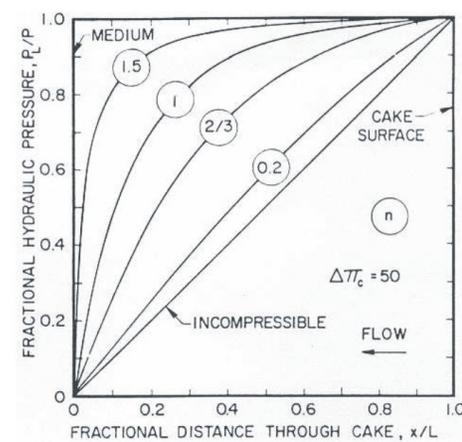
A: Diagrama esquemático da torta



B: Pressões nas partículas



D: Sistema de filtração



C: Compressibilidade das tortas

Figura 3.5 - Diagrama Esquemático da Torta (A,B e C: Tiller, 1980; D: Gale, 1977)

### 3.3.1. Teoria Clássica

As bases para o estudo da filtração se originam dos estudos de mecânica de solos, mais precisamente nos estudos efetuados por Darcy com solos e areias em 1830. O processo de filtração é executado por meio da passagem de um líquido através de um meio poroso. Baseia-se, portanto, em modelos que consideram uma torta não compressível. Pode ser descrito por uma relação empírica conhecida como Lei de Darcy (Valadão, 1996):

$$Q = K \frac{\Delta P * A}{\mu * L} = \frac{\Delta P * A}{\mu * R} \quad < 3.1 >$$

onde:

Q = fluxo do filtrado;

K = permeabilidade do leito (torta);

$\Delta P$  = diferença de pressão;

A = área transversal ao fluxo;

$\mu$  = viscosidade do filtrado;

L = espessura do leito (torta);

R = K/L = resistência oferecida ao fluxo de filtrado.

O valor da resistência R é, na verdade, a soma de duas contribuições: aquela representada pela torta e aquela pelo meio. Ou seja:

onde:

$$R = R_T + R_M \quad < 3.2 >$$

$R_T$  = resistência da torta

$R_M$  = resistência do meio filtrante

Sendo a resistência da torta proporcional à sua massa, e, ainda,  $R_T \gg R_M$ , pode-se escrever:

$$R_T = \alpha * W \quad < 3.3 >$$

onde:

$\alpha$  = resistência específica da torta

$W$  = massa formada por unidade de área

Substituindo-se (3.3) e (3.2) em (3.1) tem-se:

$$Q = \frac{\Delta P^* A}{\mu^* (\alpha^* W + R_M)} \quad < 3.4 >$$

Para tortas compressíveis, onde há uma movimentação de sólidos em direção ao meio filtrante, pode-se considerar a resistência específica com um valor médio ou fazer uma correção na equação de Darcy, conforme mostrado abaixo:

$$q - \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} * r = K \frac{\Delta P^* A}{\mu^* L} = \frac{\Delta P^* A}{\mu^* (\alpha^* W + R_M)} \quad < 3.5 >$$

onde:

$q$  = velocidade superficial do líquido = velocidade superficial do sólido

$\varepsilon$  = porosidade (fração de vazios)

Para as tortas incompressíveis, a massa de torta formada por unidade de área é função do tempo para filtração em batelada e está relacionada ao volume acumulado de filtrado ( $V$ ) relativo ao tempo  $t$ , ou seja:

$$Q = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = K_d \frac{\Delta P}{\mu^* L} \quad < 3.6 >$$

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{\Delta P}{\mu^* (\alpha^* W + R_M)} \quad < 3.7 >$$

onde:

$K_d$  = constante que depende das características do leito e do fluido

Mas sabe-se que:

$$W * A = c * V \quad < 3.8 >$$

onde:

c = concentração de sólidos expressa em massa de sólido/unidade de volume

Considerando-se que a torta não é compressível (3.7) e substituindo-se (3.8) tem-se:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A * \Delta P}{\alpha * \mu * c * \frac{V}{A} + \mu * R_M} \quad < 3.9 >$$

Fazendo-se:

$$\mu * R_M = K_1 \quad < 3.11 >$$

$$\alpha * \mu * c = K_0 \quad < 3.10 >$$

tem-se:

$$\frac{dt}{dV} = K_0 \frac{V}{A^2 * \Delta P} + K_1 \frac{1}{A * \Delta P} \quad < 3.12 >$$

Sendo  $\Delta P$  constante e integrando-se de 0 a V chega-se a:

$$t = K_0 \frac{V^2}{2A^2 * \Delta P} + K_1 \frac{V}{A * \Delta P} \quad < 3.13 >$$

Sendo:

$$K_0' = K_0 \frac{1}{2A^2 * \Delta P} \quad < 3.14 >$$

$$K_1' = K_1 \frac{1}{A * \Delta P} \quad < 3.15 >$$

Tem-se que:

$$\frac{t}{V} = K_0' * V + K_1' \quad < 3.16 >$$

Um gráfico de  $t/V$  em função de  $V$  seria uma reta com inclinação  $K_0'$  e intercepto  $K_1'$ , possibilitando a determinação de  $\alpha$  e  $K$ . O problema surge porque  $\alpha$  e  $R_m$  variam com  $\Delta P$ .

Observa-se, experimentalmente e para líquidos puros, que existe uma variação linear entre o volume acumulado e o tempo.

Koseny estabeleceu, para um regime laminar e torta incompressível, uma equação relacionando a resistência específica da torta, a permeabilidade, a porosidade e a superfície específica da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{K_c * SE^2 * (1 - \epsilon)^2}{\rho_s * \epsilon^3} \quad < 3.17 >$$

ou:

$$K = \frac{\rho_s * \epsilon^3}{K_c * SE^2 * (1 - \epsilon)^2} \quad < 3.18 >$$

onde:

$K_c$  = constante de Koseny que depende da granulometria, forma e porosidade

$SE$  = superfície específica

$\rho_s$  = massa específica do sólido

Substituindo-se (3.18) em (3.1) chega-se à forma mais conhecida da equação:

$$Q = \frac{1}{K_c * SE^2} \frac{\rho_s * \epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \frac{\Delta P * A}{\mu * L} \quad < 3.19 >$$

### 3.3.2. Mecanismos de Desaguamento

Como destacado anteriormente, os mecanismos de desaguamento podem ser melhor entendidos quando estudados via modelos que englobam o fluxo de água através de leitos porosos. Em linhas gerais, a literatura corrente reporta três fatores básicos que influenciam diretamente o fenômeno (Chaves, 1996):

- A porosidade do leito, associada às dimensões das partículas constituintes;
- A diferença de pressão exercida através do leito;
- A capilaridade.

O fluxo de líquido através de um meio poroso foi proposto pela Lei de Darcy (artigo original: Darcy, H.P.G. “Les Fontains Publique de la Ville de Dijon”, Victor Dalmont, Paris, 1856; Coulson & Richardson, 1954; Nicol, 1980; Clement & Bonjer, 1975), podendo esta ser escrita como:

$$u = \frac{B * \Delta P}{\mu * L} \quad < 3.20 >$$

onde :

$B$  = permeabilidade do meio;

$\Delta P$  = variação de pressão;

$\mu$  = viscosidade do fluido;

$L$  = espessura do leito;

No regime laminar, a permeabilidade se relaciona com o índice de vazios do meio e a superfície das partículas, através da equação de Kozeny (artigo original: Kozeny, J. “Uber Kapillare Leiling des Wasser in Boden”, Wein Akad. Wiss. Sitz. Berichte, Vol.136 (IIa), pp.271-306, 1927; Coulson & Richardson, 1978; Nicol, 1980, entre outros autores). Da mesma forma, pode-se escrever a equação de Kozeny como:

$$B = \frac{1}{K} * \frac{\epsilon^3}{S^2 * (1 - \epsilon)^2} \quad <3.21>$$

onde:

$K$  = constante de Kozeny;

$\epsilon$  = porosidade;

$S$  = superfície específica das partículas;

A constante de Kozeny é função da porosidade, da forma e da orientação das partículas, e da distribuição granulométrica dos sólidos (dispersos e/ou agregados).

Substituindo-se <3.21> em <3.20>, tem-se:

$$u = \frac{1}{K * \mu * S^2} * \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} * \frac{\Delta P}{L} \quad <3.22>$$

Na equação <3.22> percebe-se que o fluxo do fluido aumenta com o aumento da pressão e diminui com o aumento do comprimento capilar e a espessura do meio poroso. Assim, se o tamanho das partículas aumentar, permanecendo constantes os demais fatores, a permeabilidade aumentará, conforme a equação <3.21>, elevando o fluxo de filtragem. A porosidade é a fração do volume do leito não ocupada por sólidos e, portanto, depende da forma e distribuição das partículas, e, ainda, do grau de compactação ou arranjo do leito poroso.

De acordo com esse modelo, a cinética do desaguamento é determinada pela diferença de pressão através do leito poroso, pela resistência devido às forças de fricção originadas do fluxo do líquido através da geometria do leito e do meio filtrante.

A validade da equação de Kozeny aplicada à filtragem de um leito composto de partículas abaixo de 0,005mm é afetada pela compressibilidade que sofrem as partículas agregadas, durante a filtragem (Nicol, 1980), aumentando a área de superfície do sistema e diminuindo a porosidade.

Outra maneira de se chegar ao resultado da equação de Kozeny é a partir da equação de Poiseuille (Tiller, 1953):

$$\frac{dP_x}{dx} = -\frac{k * \mu}{R_H^2} * v \quad <3.23>$$

onde:

$$\frac{dP_x}{dx} = \text{variação da pressão numa direção } x;$$

$k$  = constante adimensional;

$v$  = velocidade linear;

$\mu$  = viscosidade;

$R_H^2$  = raio hidráulico;

O raio hidráulico é dado por:

$$R_H = \frac{\text{área do fluxo} * \text{comprimento do caminho}}{\text{perímetro molhado} * \text{comprimento do caminho}} = \frac{\text{volume de vazios}}{\text{superfície dos sólidos}} \quad <3.24>$$

Mas a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos é:

$$\text{volume de vazios} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} * \text{volume de sólidos} \quad <3.25>$$

Substituindo-se <3.25> em <3.24> e sabendo-se que a área superficial dos sólidos dividida pelo volume é a superfície específica (S), tem-se:

$$R_H = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} * \frac{1}{S} \quad <3.26>$$

Levando-se em conta que a verdadeira velocidade (v) nos interstícios do sólido é dada pela velocidade específica (q) dividida pela percentagem de vazios:

$$v = \frac{q}{\varepsilon} \quad <3.27>$$

Substituindo-se <3.26> e <3.27> em <3.23>, tem-se:

$$\frac{dP_x}{dx} = -k * \mu * \frac{(1-\varepsilon)^2 * S^2}{\varepsilon^3} * q \quad <3.28>$$

Reagrupando-se os termos e integrando-se em relação a x de 0 a L, temos:

$$dx * q = -\frac{1}{k * \mu * S^2} * \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} * dP_x$$

$$q * \int_0^L dx = -\frac{1}{k * \mu * S^2} * \int_{P_1}^P \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} * dP_x$$

mas,  $\int_0^L dx = L$ , donde vem:

$$q = -\frac{1}{k * \mu * S^2 * L} * \int_{P_1}^P \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} * dP_x \quad < 3.29 >$$

Veja que L é a espessura do leito que se forma. Portanto, considera-se que a porosidade não é constante, mas varia com a pressão durante a formação do leito.

Na medida em que o processo de separação sólido-líquido se completa, os interstícios do leito permanecem completamente preenchidos de líquido (estado capilar), a menos que a pressão de sucção aplicada exceda a pressão capilar negativa na interface ar/partícula/líquido. Esta pressão capilar negativa é denominada pressão de entrada,  $P_e$  (“entry pressure”), a qual deriva da equação de Young-Laplace (Nicol, 1980):

$$P_e = \gamma * \cos(\theta) * S * \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \quad < 3.30 >$$

onde:

$\gamma$  = tensão superficial;

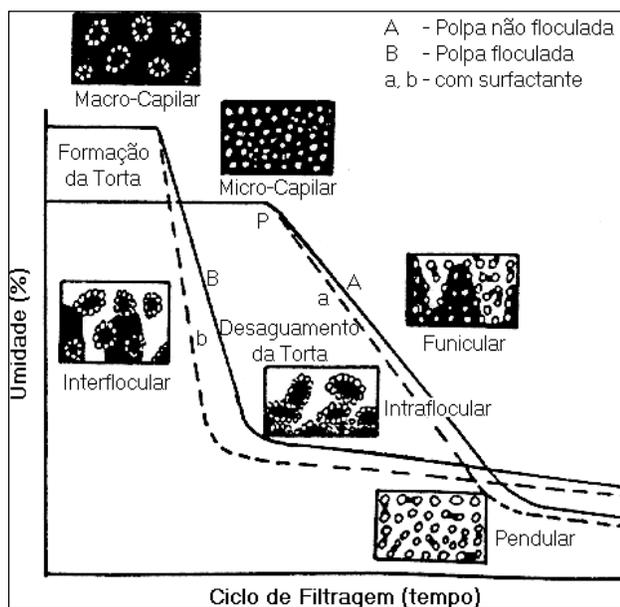
$\theta$  = ângulo de contato;

$S$  = superfície específica do sólido;

$\varepsilon$  = porosidade ou índice de vazios;

O desaguamento continuará desde que a pressão  $P_e$  seja exercida pelo vácuo (ou outro). O modelamento de desaguamento das polpas deve compreender as diversas situações previstas para o estado das suspensões e as forças mais relevantes em atuação. Assim, os leitos saturados são característicos do Estado Capilar, onde a pressão de entrada é a pressão capilar e o tempo de formação é o momento limite deste estado. O Estado Funicular mostra resíduos de água não-conectada, mas ainda livre e cuja remoção é

caracterizada como o limite prático do desaguamento. Já o Estado Pendular é caracterizado pela água adsorvida fisicamente, não sendo, portanto, objeto dos estudos de desaguamento por filtragem, é o limite físico do desaguamento (Figura 3.6) (Pereira, L.G., 1999).



**Figura 3.6 - Estados da Água em Tortas Flocoadas e Não-Flocoadas (Pereira, L.G. 1999)**

O Estado Funicular, correspondendo ao desaguamento após a formação da torta, é o mais estudado para efeitos de modelamento empírico e desenvolvimento da teoria de filtragem. Alguns trabalhos mostram os aspectos de formação, estrutura e permeabilidade das tortas que são determinadas ainda no Estado Capilar da polpa.

Independentemente do tipo de filtro ou da técnica utilizada para melhoria da filtragem, é razoável considerar-se que a microestrutura da torta e sua variação com a profundidade irão controlar todos os aspectos do processo. As chaves para a melhoria do processo são o entendimento e a determinação quantitativa das características da microestrutura da

torta que controlam a permeabilidade e a extensão da desaturação ou desaguamento (Bourgeois, 1997).

As formas de cálculo da porosidade, devido a relevância, são discutidas por diversos autores, dentre eles: Bersa, 2000; Sis & Chander, 2000; Silverblatt, 1974; Bourgeois, 1997. A porosidade, determinada a partir das massas secas e úmidas da torta e apesar da larga aceitação do método, permanece ainda como uma técnica que pode dar apenas um valor aproximado do valor real da porosidade. A ausência da correlação entre esta porosidade e a permeabilidade tem sido relatada, mas quando é tomada uma imagem da microestrutura a uma dada resolução, uma correlação entre a porosidade digital e a permeabilidade pode aparecer (Bourgeois, 1997).

Silverblatt (1974) enfoca a teoria e prática de filtragem, destacando a porosidade e os cálculos da espessura a partir de porosidades conhecidas. Mostra que a pressão varia à medida que a torta é formada, variando, então, a porosidade e não mais sendo válida a relação linear da espessura com a massa depositada.

Tiller (1980) menciona que muitas simplificações têm sido aceitas na teoria de filtragem nos últimos 50 anos. Com efeito, estas simplificações ignoram a variação na porosidade média da torta e na resistência média de filtragem com a variação da pressão/depressão com o tempo. Gráficos desenvolvidos para relações tradicionais, como o do tempo/volume versus volume de filtrado tem curvatura significativa próximo à origem, mas esta curvatura é por vezes ignorada na teoria. A teoria revisada, apresentada no trabalho, permite cálculos de dimensionamento mais precisos, especialmente para tortas compressíveis. A pressão hidráulica, o fluxo interno e a porosidade são descritos em função da distância através da torta, isto é, a partir do elemento filtrante até a superfície da torta. A pressão aplicada e o volume de filtrado são desenvolvidos em função do tempo.

Tarleton (1999) apresentou uma bem controlada montagem (ou “apparatus”) para obtenção de novos dados para uma formação de torta a pressão constante em uma montagem de teste de folha. Estes dados são obtidos através de uma sonda do tipo

eletrodo e, para filtração de tortas moderadamente compressíveis, é postulado que uma avaliação incorreta da porosidade da torta pode, tipicamente, ser responsável por um erro em torno de 12% em cálculos de “scale-up” para filtros a vácuo.

Bourgeois (2000) descreve uma nova sonda de impedância, construída especificamente para uma rápida e dinâmica captura de informações a respeito do processo de filtração. Ela fornece uma alternativa atrativa frente às mais complexas técnicas de medição para situações em que o sistema da polpa pode ser considerado principalmente unidimensional. Variações dinâmicas na permeabilidade da torta são obtidas através da combinação da superfície da torta obtidas pela sonda e a taxa de filtrado obtida a partir dos dados da montagem do teste de folha. Testes de filtração para polpas de minério de ferro e carvão foram conduzidos com o teste de folha com a sonda posicionada vertical e perpendicularmente ao elemento filtrante, dentro do compartimento da polpa e com a alimentação sendo feita por cima. A permeabilidade pode ser calculada continuamente. Fotomicrografias das porções superior e inferior das tortas, após a impregnação por resinas, mostraram uma microestrutura mais fina na porção superior, sugerindo uma segregação no tamanho das partículas. A medida da porosidade instantânea comprovou este resultado.

O estudo da reologia de polpas depende fundamentalmente de um entendimento da química de superfície e das interações a que estão sujeitas. As interações entre partículas são o primeiro passo para o estudo de polpas, principalmente se tratando de colóides. A manutenção dos parâmetros operacionais ligados à reologia são de fundamental importância para controle e otimização dos processos de beneficiamento e/ou posterior utilização industrial (Pettemdorfen, 1998).

Deve-se ressaltar a relevância dos estudos técnicos visando o modelamento mais preciso de todo o processo de filtração, envolvendo desde a polpa e suas características reológicas e físicas até a torta com sua estrutura tipicamente porosa e permeável (Gale, 1977; Tiller, 1987 e 1980; Valadão, 1999).

### 3.3.2. Equipamentos

A classificação dos filtros contínuos pode ser feita de três formas diferentes dependendo da consideração da posição relativa da alimentação / superfície filtrante, forma geométrica e função desempenhada. A Tabela 3.2, a seguir, mostra essa classificação (Valadão, 1996).

Tomando-se como exemplo a indústria de minério de ferro, a remoção da umidade do “Pellet Feed Fines”, importante produto industrial de minério de ferro, é realizada predominantemente através de filtragem a vácuo. Como regra geral, e como esperado, quanto mais fino o produto maior é a dificuldade de remoção da água das tortas.

Na verdade, filtros a vácuo tiveram grande aplicação a partir do início da década de 50 para responder pela alta produção da então crescente indústria. Entre os filtros a vácuo, os filtros rotativos de discos verticais são os com desenho mais compacto, apresentando a mais alta superfície de filtragem, e, portanto, maior produção por área industrial ocupada. Filtros de correia têm sido aplicados para minérios mais finos.

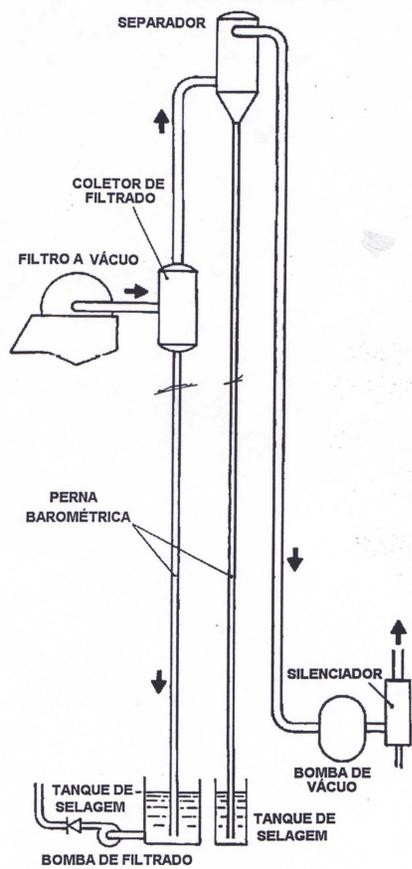
Os filtros de tambor, disco, tabuleiro e horizontal são os mais comumente encontrados nas instalações industriais. Note-se que todos estes equipamentos são contínuos, mas realizam diversas tarefas, dentro de um espaço de tempo (ciclo), como: formação de torta, secagem, lavagem e descarga. O ciclo é controlado em diversos equipamentos (tambor, disco e horizontal de mesa, por exemplo) através de uma válvula estática que se acha conectada a eles (Valadão, 1996).

**Tabela 3.2 - Classificação dos Filtros Contínuos a Vácuo (Valadão, 1996)**

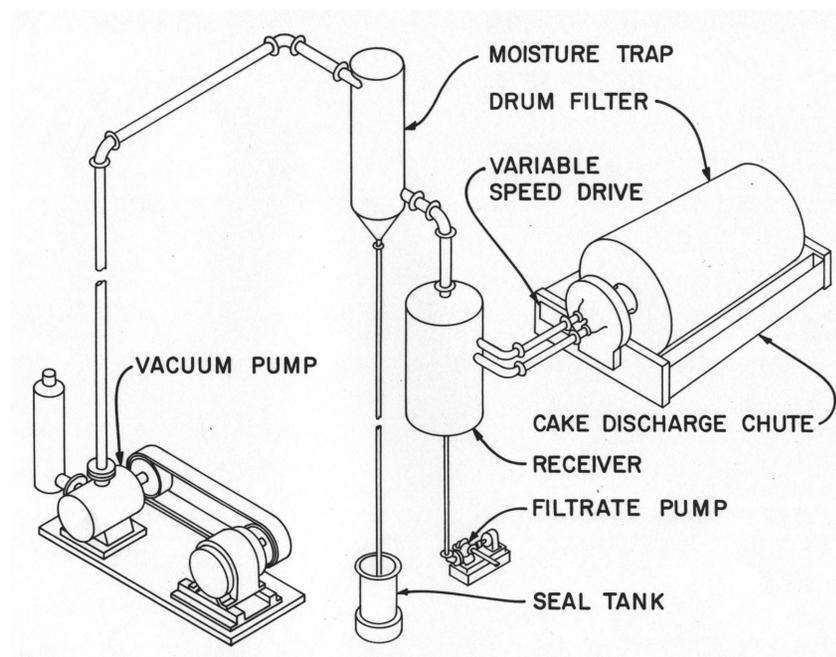
POSIÇÃO RELATIVA	ALIMENTAÇÃO POR CIMA
	ALIMENTAÇÃO POR BAIXO
	TAMBOR
FORMA GERAL	DISCO
	TABULEIRO
	HORIZONTAL
	FILTRAGEM RÁPIDA
FUNÇÃO DESEMPENHADA	DESAGUAMENTO
	LAVAGEM

A filtragem recebe o vácuo do sistema equilibrado ar-água composto por coletor de filtrado e separador / desumidificador e suas respectivas pernas barométricas, podendo ser com ou sem bomba de filtrado. Normalmente, aplica-se o sistema com bomba de filtrado para baixas vazões de vácuo, o que permite uma instalação da filtragem em estrutura mais baixa, representando significativa economia em termos de instalações prediais, quando aplicável (vide Figura 3.7).

O filtro de tambor representa um grande cilindro que gira solidário ao eixo longitudinal, que se acha conectado, desde a periferia a uma válvula automática e cuja alimentação é feita, normalmente, em uma bacia de polpa posicionada de forma que a porção inferior desse cilindro fique submersa. O meio filtrante pode ser um tecido preso ou não à superfície do tambor ou um tecido preso ao tambor acrescido de uma camada de material granular formada sobre esse tecido (filtros pré-cobertos). A descarga pode



(a)



(b)

Figura 3.7 - Filtros a vácuo: Instalações (a) NASH  
(b) Mular & Anderson, 1986.

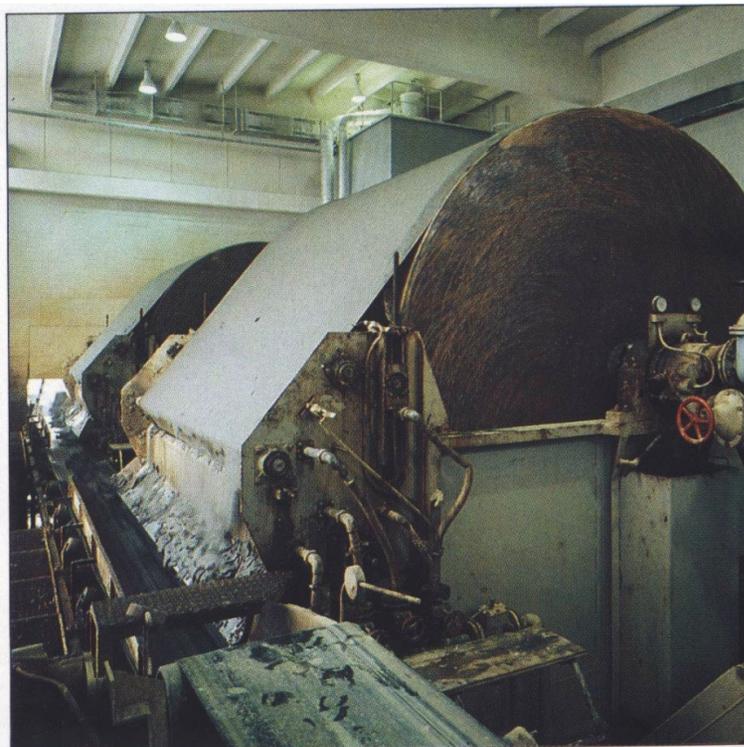
ser efetuada através de diversos dispositivos, entre eles, por raspador, por rolo e por fios (vide Figura 3.8 – Catálogos: TAMFELT, LAROX e EIMCO).

O filtro de disco é composto por uma série de discos espaçados, ligados entre eles por um tubulão central que executa um movimento de rotação e que serve como ligação para uma válvula automática, esta conectada às tubulações de vácuo e de ar comprimido. A formação de torta é realizada em uma bacia de polpa onde há o recobrimento da porção inferior dos discos (até cerca da metade do seu diâmetro). A descarga da torta formada é feita utilizando-se ar comprimido (sopro), sendo o material recolhido em aberturas dispostas em ambos os lados de cada disco (vide Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11 – Catálogos: NORDBERG / SCANMEC e EIMCO).

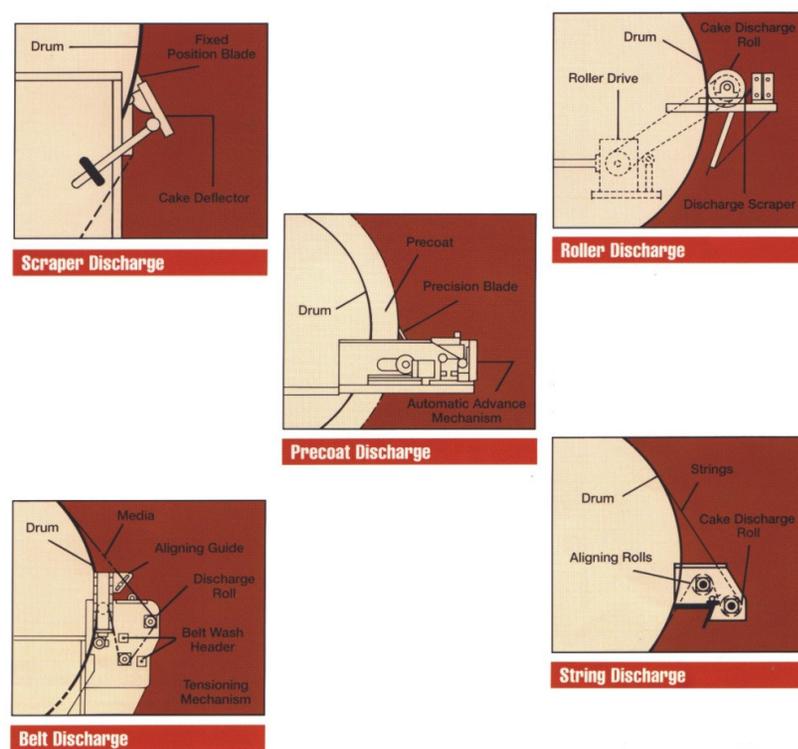
Filtros encapsulados ou hiperbáricos são uma opção de desenvolvimento recente, onde se pode aplicar uma diferença de pressão extra, superior à do vácuo de secagem nos filtros convencionais, de maneira a chegar a limites da ordem de  $AP \cong 10^5$  Pa (29,5” Hg). Verifica-se que, embora haja redução de umidade, há maior dificuldade com relação à descarga da torta formada (BOKELA, catálogos de equipamentos).

Os filtros horizontais podem ser subdivididos em horizontais de mesa, horizontais de correia e de bandeja revolvente.

Os filtros horizontais de mesa são circulares, dispõem de movimento giratório no plano horizontal e a alimentação é feita por cima. O vácuo, efetuado através de bomba, tem o mesmo sentido da força gravitacional e é controlado por válvula concêntrica localizada na parte inferior. A secagem pode ser auxiliada por adição de vapor ou outra forma de calor. A descarga da torta é realizada com auxílio de um parafuso ou lâmina. São filtros mais apropriados a materiais grosseiros (100 a 1000 $\mu$ m).



(a)



(b)

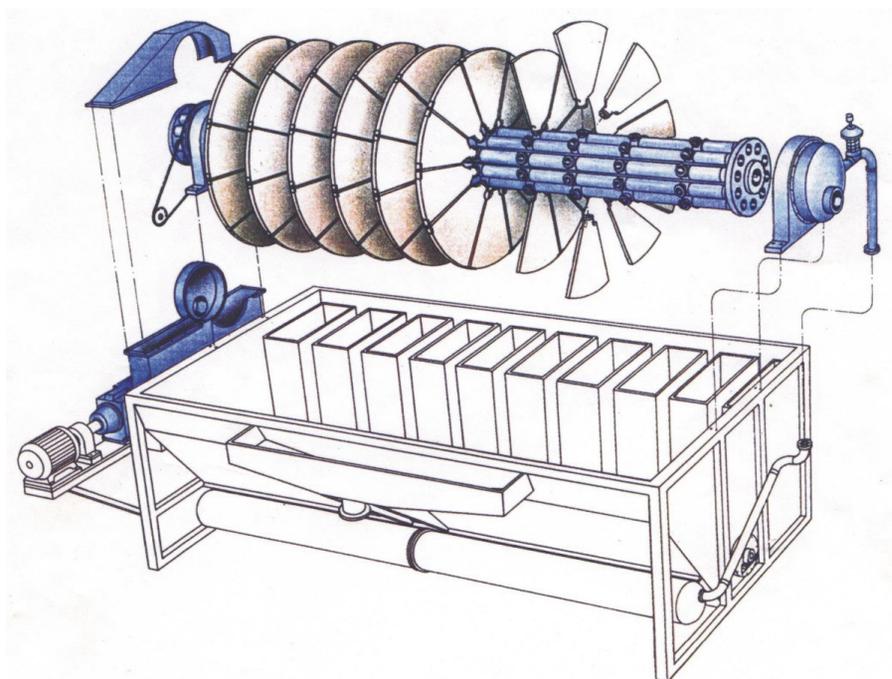
Figura 3.8 - Filtro de Tambor

(a) TAMFELT / LAROX

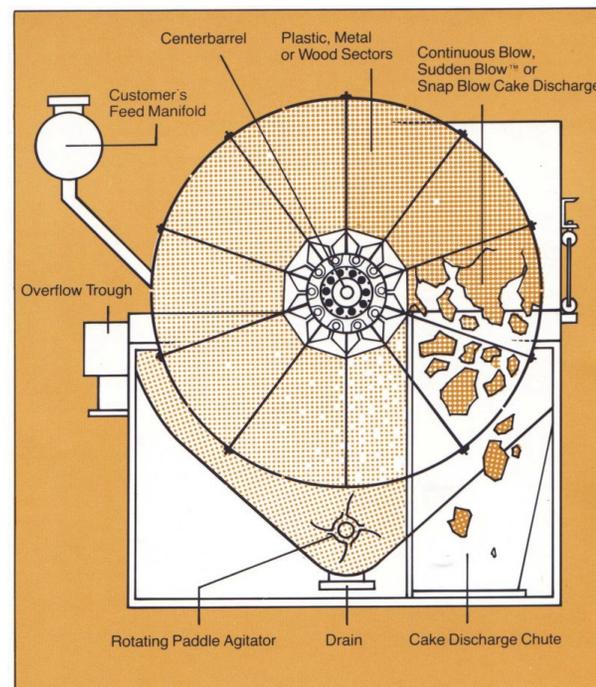
(b) EIMCO



Figura 3.9- Filtro a vácuo de discos verticais: MBR/MAC

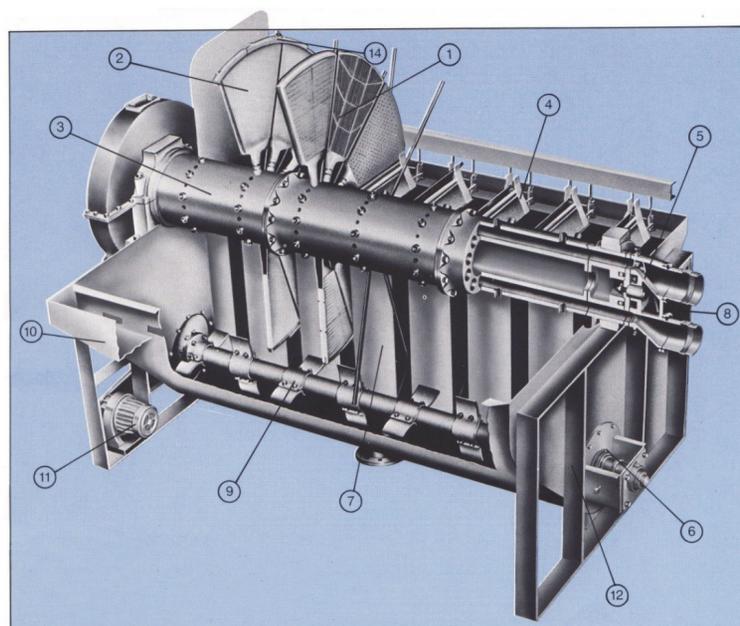


(a)



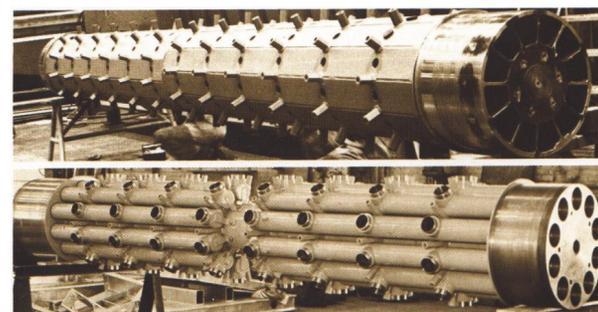
(b)

Figura 3.10 - Filtro a vácuo de discos verticais: (a) NORDBERG - SCANMEC  
(b) EIMCO



(a)

- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| 1- setor               | 8- entrada do ar do sopro     |
| 2- elemento filtrante  | 9- sistema de agitação        |
| 3- barril central      | 10- coleta de overflow        |
| 4- defletor            | 11- motorização do agitador   |
| 5- válvula de vácuo    | 12- tanque: estrutura externa |
| 6- selagem da agitação | 13- alimentação: distribuidor |
| 7- chute de descarga   | 14- tirantes                  |



(b)

Figura 3.11 - Filtros a vácuo de discos verticais: elementos mecânicos.

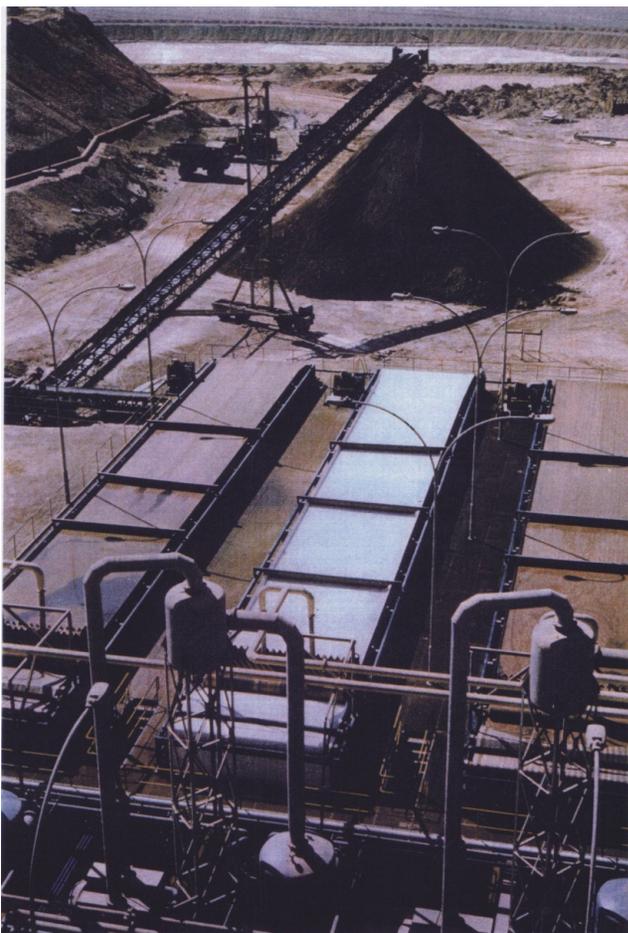
- (a) EIMCO  
(b) EIMCO

Os filtros de correia se caracterizam também por uma alimentação por cima e pelo vácuo aplicado no mesmo sentido da força gravitacional. Têm ampla faixa de aplicação, desde materiais mais grosseiros (100 a 2000 $\mu\text{m}$ ) até materiais finos (10 a 100 $\mu\text{m}$ ). Produzem tortas com baixa umidade e apresentam a possibilidade de lavagem do meio filtrante, que se encontra posicionado sobre uma correia. Existe ainda a possibilidade da utilização de vapor para redução da umidade (vide Figura 3.12 e Figura 3.13 – Catálogos de equipamentos: DELKOR, TAMFELT e EIMCO). Mular & Anderson (1986) destacam que filtros horizontais de correia mostram melhor eficiência na utilização de floculantes devido à possibilidade da polpa floculada ser alimentada em segundos na superfície do filtro. Os efeitos benéficos de melhor condicionamento e menor degradação mostram-se como responsáveis por esta melhor eficiência.

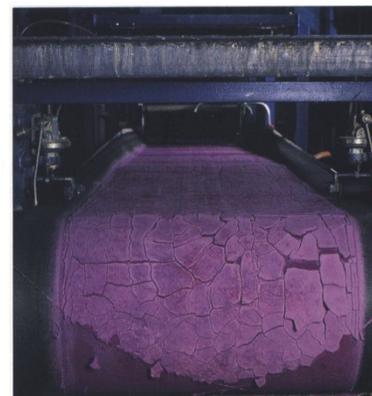
O filtro de bandeja revolvente é caracterizado por uma alimentação feita por cima, pela existência de compartimentos (tabuleiro) e pelo movimento de rotação, no plano horizontal, que permite a realização das diversas tarefas. A descarga da torta é efetuada com auxílio de ar comprimido e com a movimentação do compartimento do filtro.

Filtros-prensa são menos usuais quanto à aplicação em minérios de ferro, mas com aplicações específicas para materiais finos, inclusive para a faixa de 0 a 10 $\mu\text{m}$ . Deve-se destacar o início de operação da filtragem de PFF/Carajás com quatro filtros-prensa horizontais, previsto para maio de 2002. As umidades finais são bastante baixas, situando-se em 7,0%, e taxas de 1,2 a 1,6t/m<sup>2</sup>/h, conforme testes realizados para PFF/MBR. Os ciclos dos filtros automáticos ou semi-automáticos compreendem as etapas de bombeamento de polpa, prensagem e secagem, com abertura, descarga e fechamento correspondendo à porção “improdutiva” do ciclo. Estes filtros podem ser vistos nas Figuras 3.14 e 3.15 (MBR e catálogos: EIMCO, TAMFELT, LAROX).

Alguns tipos de filtro foram baseados em ambas experiências (prática e tecnológica), como é o caso do filtro *Belt Press*. O design é simples e compreende desde a adição de



(a)



(b)

Figura 3.12 - Filtro Horizontal de Correia (a) DELKOR  
(b) TAMFELT

A= alimentação  
B= elemento filtrante  
C=correia de suporte  
D= sistema de lavagem do "cake"  
E= coleta de filtrado  
F= descarga do "cake"  
G= lavagem do elemento  
H= tensionamento da correia e do elemento

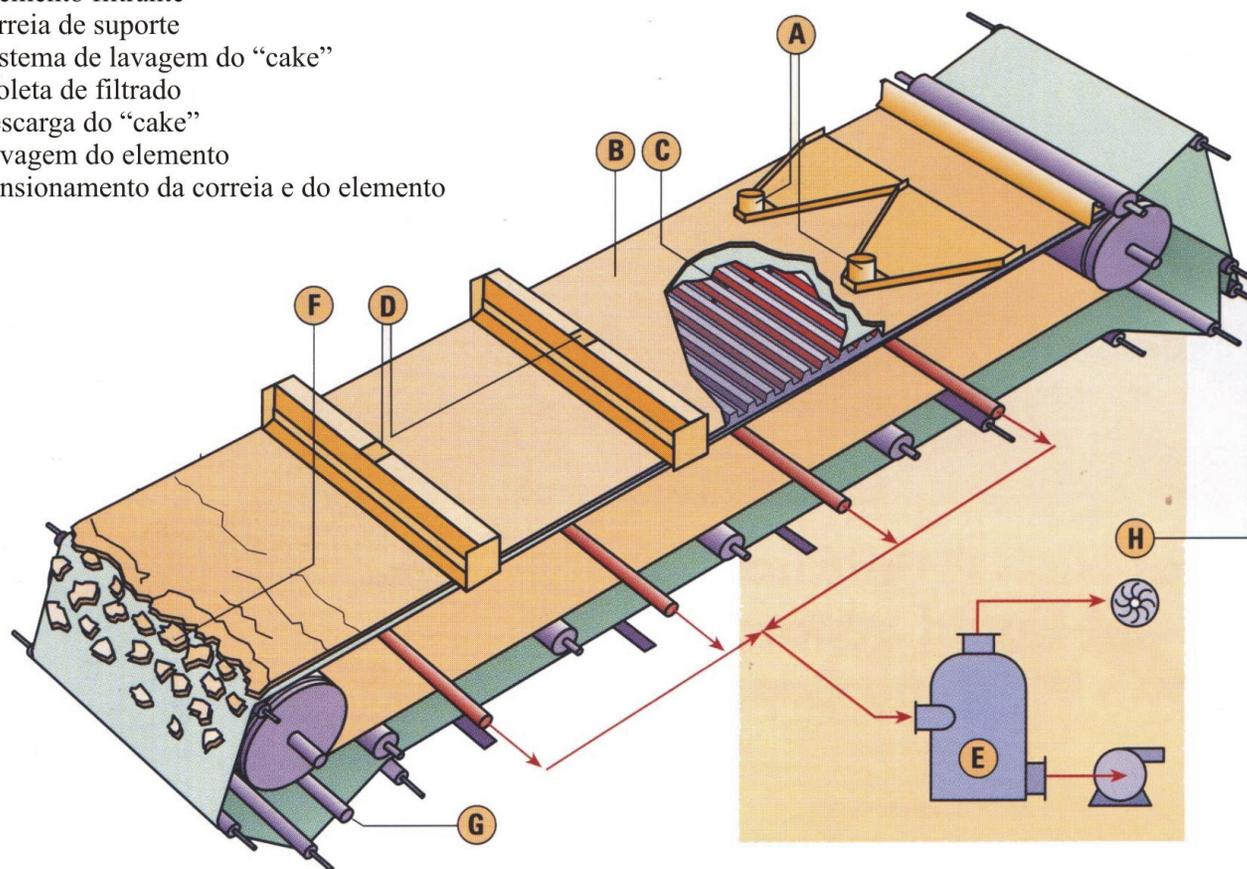
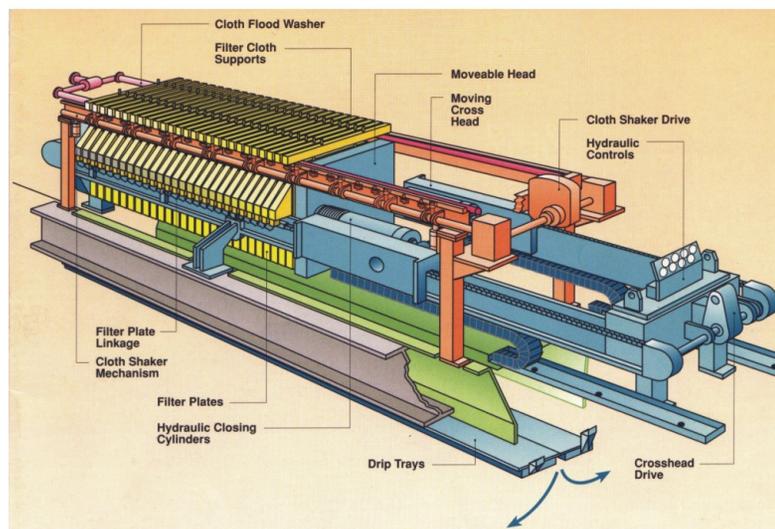
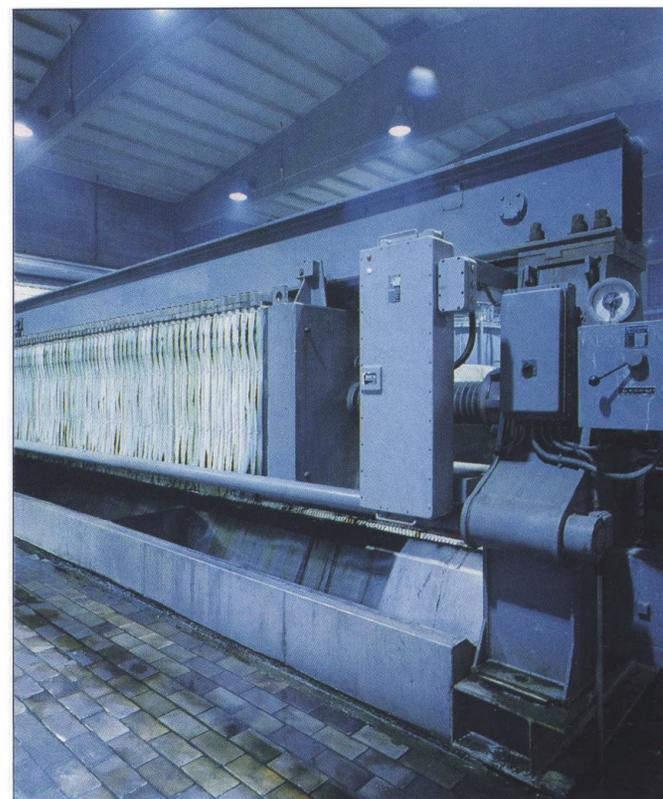


Figura 3.13 - Filtro Horizontal de Correia: elementos construtivos EIMCO

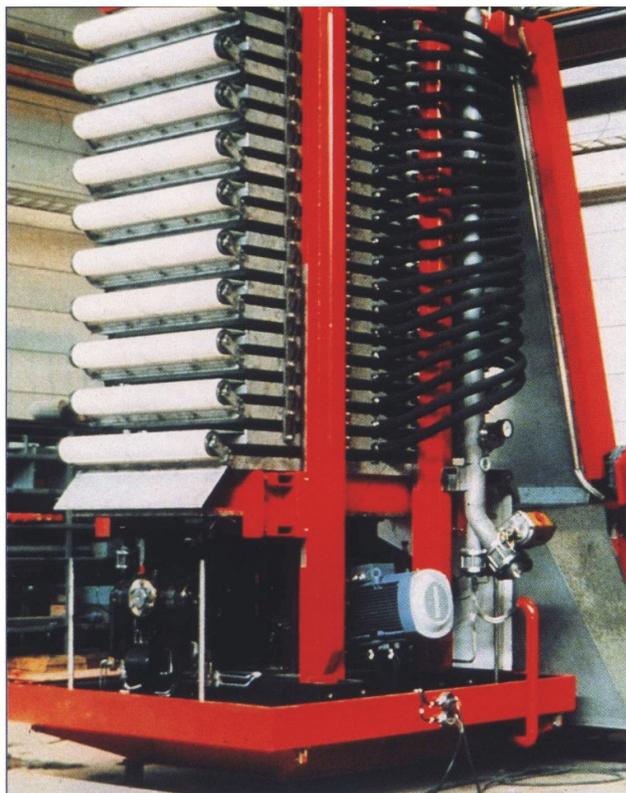


(a)

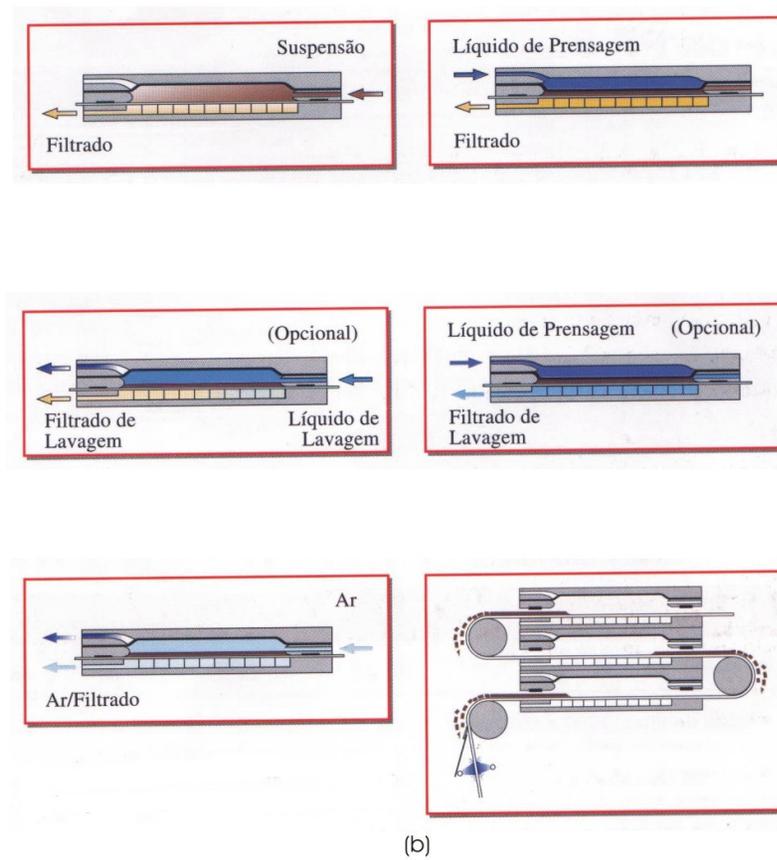


(b)

Figura 3.14 - Filtro Prensa Vertical (a) EIMCO  
(b) TAMFELT



(a)



(b)

Figura 3.15 - Filtro Prensa Horizontal (a) TAMFELT  
(b) LAROX

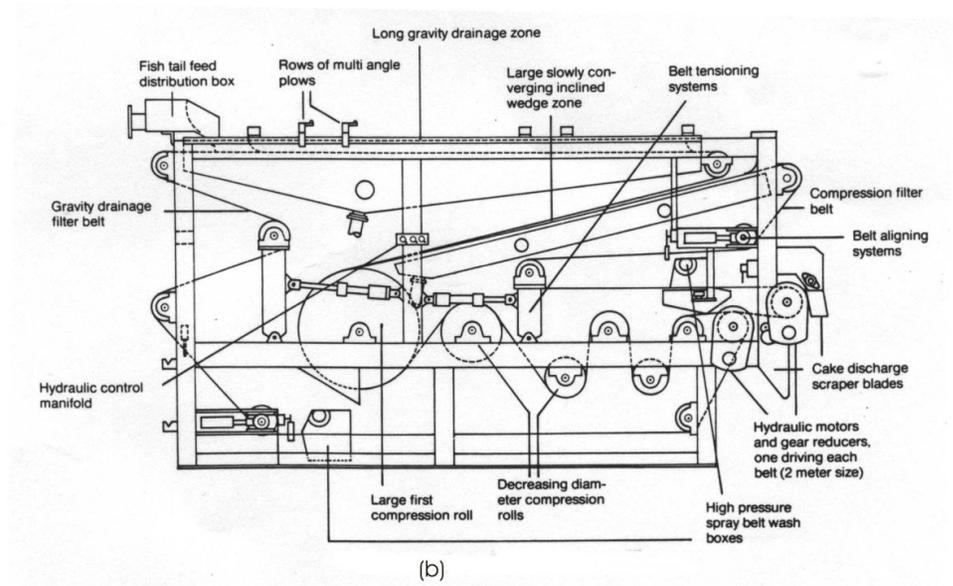
polímeros até a prensagem da polpa residual entre duas correias para a remoção do líquido residual. Este processo minimiza o consumo de energia, característico dos demais métodos de filtração (Figura 3.16 – Catálogos: TAMFELT e EIMCO).

O desenvolvimento recente de filtros cerâmicos apresenta certas particularidades, presentes apenas neste tipo de filtração: a) não são utilizados elementos filtrantes, sendo que a torta é formada diretamente sobre os setores; b) devido às dimensões dos poros destes setores, o fluxo de ar não penetra neles. Como resultado, tem-se uma vazão de vácuo bastante reduzida, minimizando o porte da bomba de vácuo e reduzindo o custo de energia; c) devido à necessidade de limpeza dos setores, evitando-se a colmatagem destes, tem-se a retrolavagem com ácido nítrico a 5% e uso de ultra-som. Isto força a paralisações momentâneas do filtro e a necessidade de aplicação de aços especiais para partes do filtro em contato com a polpa; d) é necessária a reposição de setores após algum tempo de operação. O consumo de energia é o grande atrativo deste sistema, que tende a ser aplicado num futuro próximo em minério de ferro; e) a descarga é realizada através de lâminas raspadoras. A aplicação deste tipo de filtro em concentrado de cobre na mina de Browns Creek and Woodlawn Mines foi paralisada após o encerramento das atividades desta mina. O equipamento (CC-15 com 15m<sup>2</sup>) sendo relocado e reformado para uma aplicação nas Ilhas Fiji (Emperor Gold Mines / Ouro), para filtração de concentrado de pirita (vide Figura 3.17 – Catálogos: OUTOKUMPU).

O projeto da aplicação de filtração na indústria é de elevado investimento de capital, não só pelo custo dos equipamentos, como pelo investimento em instalações e equipamentos acessórios. No minério de ferro tem-se um elevado consumo de vácuo, que leva a grandes dispêndios em bombas de vácuo. Quanto mais permeável o leito, maior é a vazão para se manter o vácuo em níveis desejados. Uma simulação do valor dos equipamentos para uma aplicação hipotética pode ser visto na Tabela 3.3 (Amarante, 2001).



(a)



(b)

Figura 3.16 - Filtro Belt Press (a) TAMFELT  
(b) EIMCO

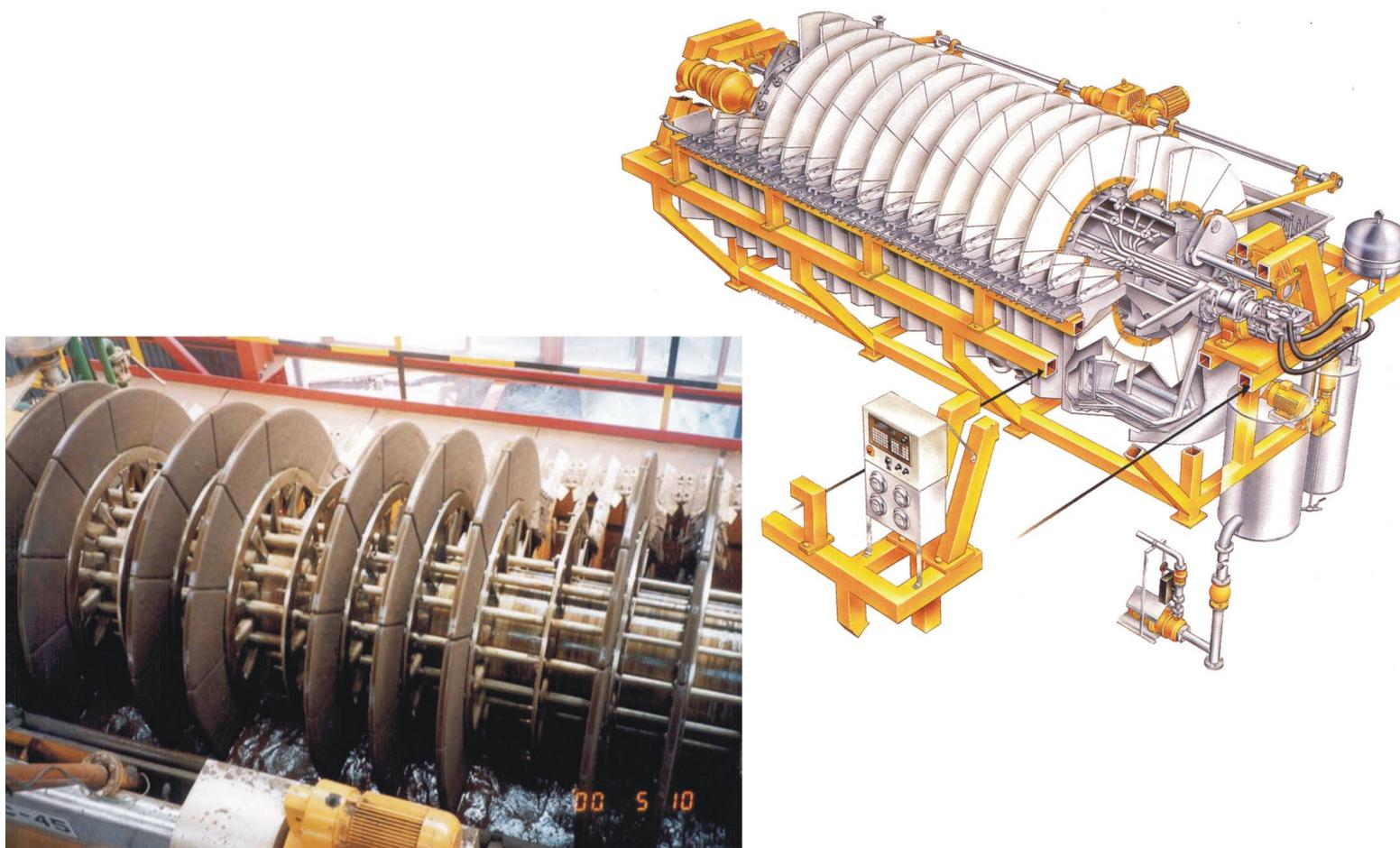


Figura 3.17 - Filtro Cerâmico : OUTOKUMPU

Tabela 3.3 – Comparação de Custos de Investimento e de Energia para Diferentes Tecnologias de Filtragem: (Amarante, 2001)

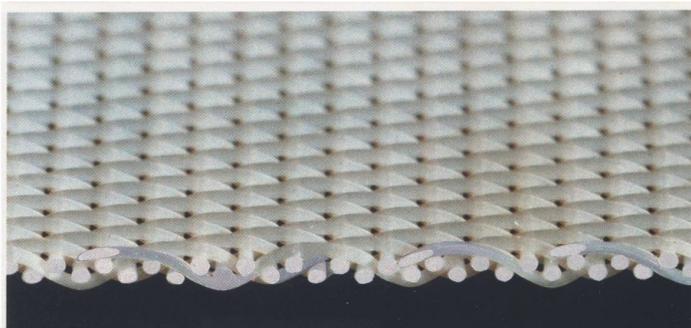
Comparação de Custos de Investimento e de Energia para Diferentes Tecnologias de Filtragem (US\$)						
<b>Objetivo da Filtragem</b>						
Minimização da umidade para uma produção de :		500	t/h			
<b>Estudo de Caso (dados e testes):</b>						
<b>PFF/MBR</b>		IBLA = 978 cm <sup>2</sup> /g				
		massa específica = 5,0 g/cm <sup>3</sup>				
Umidade Final (%)		RVDF	Boozer	Hi-Bar	Filtro Prensa Vertical	Cerâmico
Taxa unitária de filtragem (t/h/m <sup>2</sup> )		9,50%	9,00%	8,50%	7,50%	9,00%
Eficiência máxima (%)		1,75	2,50	5,00	2,50	2,50
		80%	85%	85%	80%	80%
<b>Dimensionamento dos equipamentos:</b>						
Área requerida =		RVDF	Boozer	Hi-Bar	Filtro Prensa Vertical	Cerâmico
Área do equipamento (m <sup>2</sup> /unidade) =		357	235	118	250	250
número de equipamentos =		120	120	120	120	120
Área de filtragem instalada =		4	3	3	3	3
		480	360	360	360	360
<b>Investimento em equipamentos</b>						
custo unitário dos filtros =		250.000	400.000	1.200.000	2.250.000	400.000
custo dos filtros =		1.000.000	1.200.000	3.600.000	6.750.000	1.200.000
bombas de vácuo =		520.000	390.000	0	0	90.000
compressores =		100.000	100.000	300.000	200.000	0
outros equipamentos auxiliares =		10.000	10.000	30.000	400.000	45.000
<b>Total em equipamentos =</b>		<b>1.880.000</b>	<b>2.100.000</b>	<b>5.130.000</b>	<b>9.600.000</b>	<b>1.735.000</b>
Prédios, bombeamento, correias, e outros		4.000.000	4.000.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000
<b>Investimento total =</b>		<b>5.880.000</b>	<b>6.100.000</b>	<b>7.630.000</b>	<b>12.100.000</b>	<b>4.235.000</b>
<b>Consumo de energia</b>						
consumo específico de energia (kwh/st)=		7,5	5	3	2	2
custo total de energia (Mwh @6400 ht/ano) =		26.461	17.641	10.584	7.056	7.056
<b>Custo de energia (@50US\$/Mwh) =</b>		<b>1.323.043</b>	<b>882.029</b>	<b>529.217</b>	<b>352.811</b>	<b>352.811</b>

### 3.3.3. Elementos Filtrantes

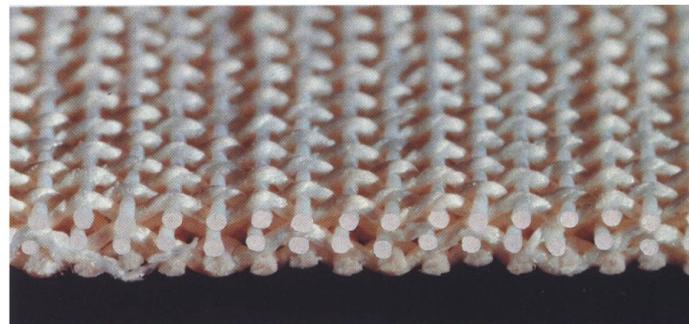
Os meios filtrantes são os elementos responsáveis pela retenção do sólido, ao mesmo tempo em que permitem a passagem do líquido. Esses meios devem satisfazer a duas condições básicas: propiciar baixa concentração de sólidos no filtrado e oferecer mínima resistência ao fluxo, permitindo a obtenção de baixas umidades finais com elevadas taxas unitárias de filtragem. Devem, além disso, não ter tendência ao bloqueio (“clogging”) progressivo, oferecer boas características de descarga, permitir a limpeza por água ou ar e ter boa resistência mecânica, química e biológica. A utilização do meio e o tempo requerido para troca vão depender de uma análise econômica, envolvendo não só os custos dos elementos em si, mas também a avaliação das paralisações dos filtros para a troca destes elementos (Valadão, 1996).

Podem ser classificados, de acordo com a constituição, em três tipos: flexível, material granular (“filteraids”) e poroso. Dentro dos meios flexíveis encontram-se aqueles tipos constituídos por tecidos que possuam uma trama (fios trançados) feita com material metálico, natural ou sintético. Há também aqueles sem a trama como os feltros, por exemplo. Os tecidos têm sido os meios mais utilizados na filtragem industrial dentro do processamento mineral (vide Figura 3.18).

A escolha do tecido vai depender, principalmente, da granulometria, da superfície específica e do estado de dispersão do material sólido, da acidez/basicidade da polpa, da temperatura, da umidade requerida para a torta, da resistência ao bloqueio do meio necessário, da elasticidade/durabilidade do tecido pretendida e da porcentagem especificada de sólidos no filtrado. Os fabricantes apresentam, usualmente, as características do meio como: tipo de tecido, matéria-prima, trama (não apresentada para os feltros), peso específico, espessura, tipo de fibra e permeabilidade ao ar.



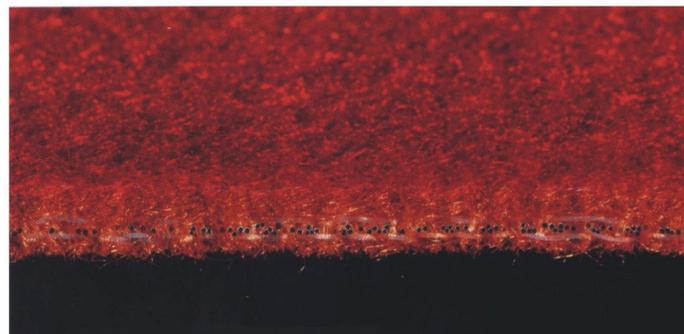
Monofilamento



Multifilamento e monofilamento



Multifilamento



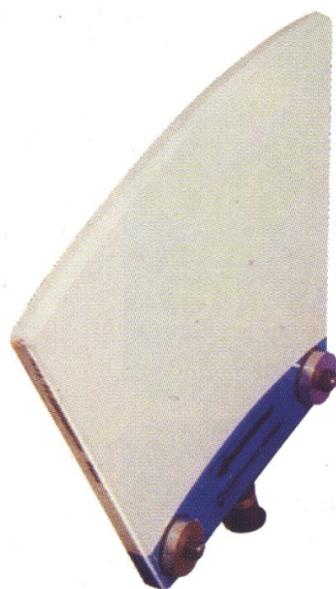
Feltro

Figura 3.18 - Elementos Filtrantes - Tipos (TAMFELT)

A seleção de tecidos para a filtração industrial contínua a vácuo pode ser feita, como primeira aproximação, através de testes de folha conduzidos em laboratório. Testes industriais são, entretanto, necessários para a confirmação das tendências demonstradas e, sobretudo, os aspectos de resistência mecânica, bloqueio e durabilidade do tecido (DORR OLIVER, 1980).

Materiais granulares (“filteraids”) são mais comumente utilizados nos filtros de tambor quando se quer realizar a filtração de materiais de granulometria mais fina. Podem ser utilizados materiais como diatomitos, perlito expandido, carvão, entre outros. O procedimento adotado, nesse caso, é fazer um recobrimento do tecido, que está sendo utilizado como meio filtrante, com material granulado que atua como meio auxiliar e sobre o qual vai se depositar o sólido, evitando assim o bloqueio prematuro das aberturas do tecido. Esse recobrimento é feito com polpas normalmente tendo entre 4% e 8% de sólidos em massa para o caso específico do diatomito (Valadão, 1996).

Filtros cerâmicos não utilizam elementos filtrantes e sim setores de material cerâmico, como os aplicados nos filtros Ceramec/Outokumpu. Estes setores nos filtros de disco permitem uma operação com polpas em condições mais severas e fornecem filtrados mais limpos, mas a operação deve ser interrompida a determinado intervalo de tempo, que pode variar de 10 a 12 horas, para a reversão do fluxo de filtrado, lavagem de setores com solução ácida e com auxílio de ultra-som. Fatores que podem, em princípio, limitar a utilização desse material são: custo e durabilidade do material e custo do sistema de limpeza. O desenvolvimento de novos materiais, mais resistentes e com aberturas da ordem de  $1\mu\text{m}$ , permite a passagem apenas da água devido ao diâmetro mínimo de bolhas de ar, reforçando a importância da capilaridade no processo de desaguentamento (vide Figura 3.19). As tabelas 3.4 e 3.5 mostram a classificação dos tecidos e a influência da trama e do tipo de fio no desempenho do elemento filtrante (DORR OLIVER, 1980)



### **CERAMEC® Filter Section**

*CERAMEC® filter discs are patented sintered alumina membranes with uniform micropores to create unrivaled capillary action.*

### **CERAMEC® Filter Media**

*The microporous filter media allows only liquid to flow through. No air or solids penetrate the filter material.*

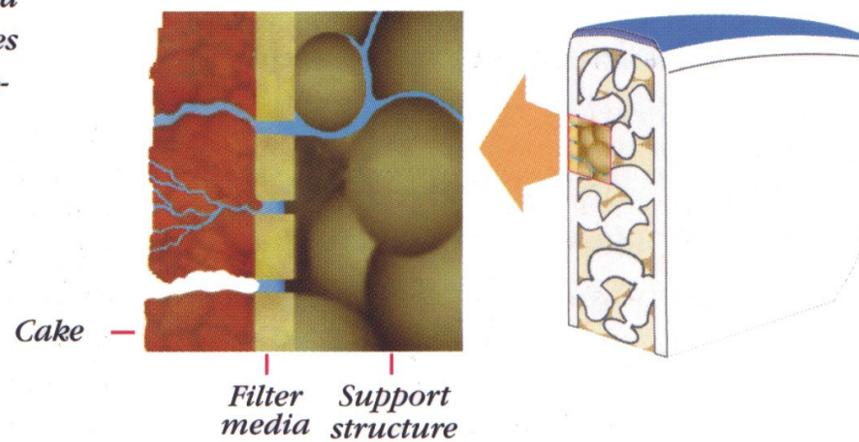


Figura 3.19: Elemento Cerâmico - Capilaridade: OUTOKUMPU

**Tabela 3.4 - Classificação dos Elementos Filtrantes mais Comuns (DORR OLIVER, 1980)**

Material	Temperatura Limite (°C)	Resistência à Tensão	Resistência aos Ácidos	Resistência às Bases	Resistência à Flexibilidade e Abrasão	Descarga da Torta	Tipo do Fio
Polyester	135	Excelente	Muito Boa	Boa	Excelente	Excelente	F-S-M
Dynel	60	Boa	Excelente	Excelente	Boa	Boa	S
Nylon	105	Excelente	Fraca	Excelente	Excelente	Boa	F-S-M
Acrylic	135	Boa	Excelente	Média	Boa	Média	S
Polyethylene	75	Boa	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	F-S-M
Polypropilene	80	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	F-S-M

Observações: F= multifilamento; S= lã ou feltro (“staple”); M= monofilamento

**Tabela 3.5 - Efeito Relativo do Tecido (“weave”) e do Fio (“yarn”) (DORR OLIVER, 1980)**

		Fluxo mais Elevado	Maior Retenção	Melhor Descarga da Torta	Menor Umidade da Torta	Resistência à Obstrução
Como a forma do tecido afeta a Seleção do Elemento	Brim (“Plain”)	3	1	3	3	3
	Sarja (“Twill”)	2	2	2	2	2
	Cetim (“Satin”)	1	3	1	1	1
Como o fio afeta a Seleção do Elemento	Monofilamento	1	3	1	1	1
	Multifilamento	2	2	2	2	2
	Feltro ou Lã (“Staple”)	3	1	3	3	3

Observações: Critério Comparativo Utilizado: 1= melhor; 3= pior.

### 3.3.4. Auxiliares de Filtragem

Mudanças no estado de agregação/dispersão da polpa, na hidrofobicidade da superfície do sólido e na tensão superficial do líquido podem causar grande influência sobre a resposta de filtragem.

A agregação de polpas é quase sempre desejável, ou mesmo essencial, para a filtragem, principalmente para polpas de granulometria fina (sobretudo abaixo de  $45\mu\text{m}$ ) ou que tenham elevadas superfícies específicas (acima de  $1800\text{ cm}^2/\text{g}$  para minério de ferro nesta faixa granulométrica). Esta agregação leva a um melhor fluxo de filtrado, boa formação de torta e reduz os problemas de bloqueio progressivo do meio filtrante. Efeitos indesejáveis devem ser analisados, como por exemplo, a umidade final do produto (Valadão, 1996; Mänttari, 1996; Nicol, 1976; Tiller, 1980).

A coagulação pode ser conceituada como a agregação obtida através da redução da repulsão eletrostática existente entre partículas em suspensão por meio da adição de eletrólitos inorgânicos. Haverá, dessa forma, a formação de pequenos agregados visíveis numa simples observação. Os coagulantes mais usados são eletrólitos solúveis em água, com baixo peso molecular, sendo representados principalmente por ácidos, bases, sais contendo cátions ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), silicatos, polifosfatos e fluoretos.

Verifica-se que a coagulação é influenciada pela frequência/eficiência de colisões. A existência de colisões é importante, ou mesmo fundamental, para que se obtenha agregação das partículas sólidas. A movimentação dos sólidos (ação externa e movimento Browniano) e sua distribuição granulométrica, juntamente com a concentração relativa de sólidos (em massa ou volume) e a temperatura da polpa, são alguns fatores que podem atuar sobre o número de colisões entre partículas e sua eficiência.

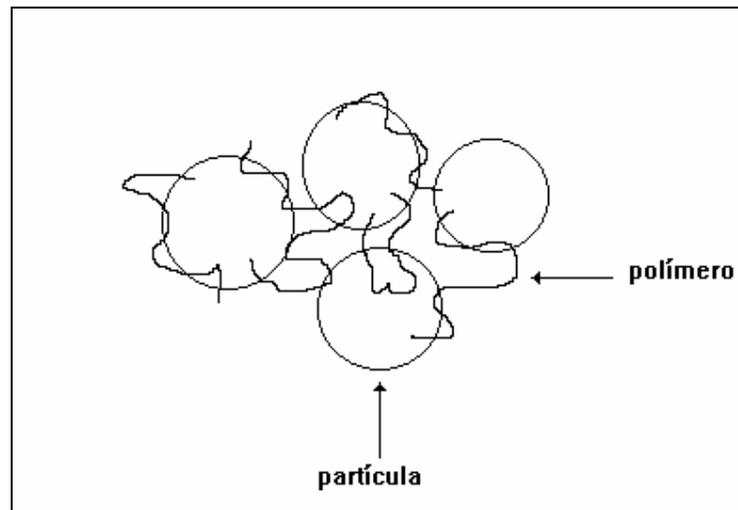
A floculação é a agregação obtida por intermédio de polímeros orgânicos que possuem normalmente elevado peso molecular (da ordem de  $10^7$  quando considerados para filtração) e que realizam a ligação entre as partículas servindo como pontes e originando agregados chamados flóculos ou flocos. Os polímeros utilizados na indústria mineral podem ser naturais (amidos, por exemplo) ou sintéticos (poliacrilamidas, por exemplo). Os floculantes naturais são, em geral, menos efetivos que os sintéticos considerando-se dosagens semelhantes. Os polímeros podem conter sítios de carga positiva (catiônicos), negativa (aniônicos), ou sem carga (não-iônicos). Essa densidade de carga pode ser alta ou baixa dependendo da estrutura do polímero.

As poliacrilamidas representam a classe de floculantes mais usada na indústria mineral, tendo sido feita sua introdução na década de 60. A maior parte desses floculantes apresenta entre 0 e 45 % de substituição dos grupos amida (Valadão, 1996).

O mecanismo principal, relacionado com a formação dos agregados (flóculos), é reconhecido como a formação de “pontes”. Isto acontece quando o polímero adsorve-se na superfície da partícula deixando segmentos da sua cadeia voltados, mais, ou menos, estendidos, para a solução, chegando-se a estruturas de agregados parecidas com a mostrada na Figura 3.20, onde certa quantidade de líquido é aprisionada. Alguns fatores podem afetar o desempenho dos floculantes, entre eles: diluição e preparo, dosagem, peso molecular, agitação, pH, força iônica da solução e concentração de sólidos na polpa (Valadão, 1996).

A utilização de floculantes na indústria é feita normalmente após preparação prévia da solução, quase sempre bastante diluída (entre 0,05% e 0,1%), em um tanque sob agitação, que pode variar bastante de capacidade em função da aplicação requerida.

A agitação deve garantir, nesse caso, uma boa diluição e evitar a “quebra” por cisalhamento do reagente.



**Figura 3.20 - Agregado Formado por Meio de Mecanismo de “Pontes” (Valadão, 1996)**

O peso molecular pode ser fator importante se for considerado que em baixos valores a floculação pode ficar prejudicada pela falta de capacidade do polímero em formar pontes. Se o peso for alto, pode significar problemas na solubilidade e alto custo do reagente.

A agitação deve propiciar o contato polímero/partícula. Sendo a agitação insuficiente, o floculante não será distribuído de forma homogênea e, sendo excessiva, pode causar a quebra dos agregados já formados ou da própria molécula. Os floculantes ideais para a filtragem devem ser capazes de formar agregados menores e mais resistentes ao cisalhamento, de forma a impedir também a migração de partículas superfina para o meio filtrante (Valadão, 1996; Hogg, 2000; Mular, 1986; Carleton, 1984; Singh, 1997).

O pH afeta a agregação, quer seja pela influência no potencial de superfície das partículas ou pela influência na química do polímero. O valor e sinal do potencial de superfície da partícula podem influenciar a ação do polímero. Isso facilita, por exemplo, quando polímero e partícula possuem sinais diferentes e dificultando no caso de sinais iguais. O próprio polieletrólito (iônico) terá configurações estruturais diferenciadas em função do pH: forma convoluta quando houver pouca repulsão entre os sítios carregados e forma distendida quando houver repulsão mais acentuada. Essa última configuração é mais favorável ao mecanismo de “pontes” (Valadão, 1996; Silva, R.V.G. et alii; Bersa, 2000; Mular, 1966).

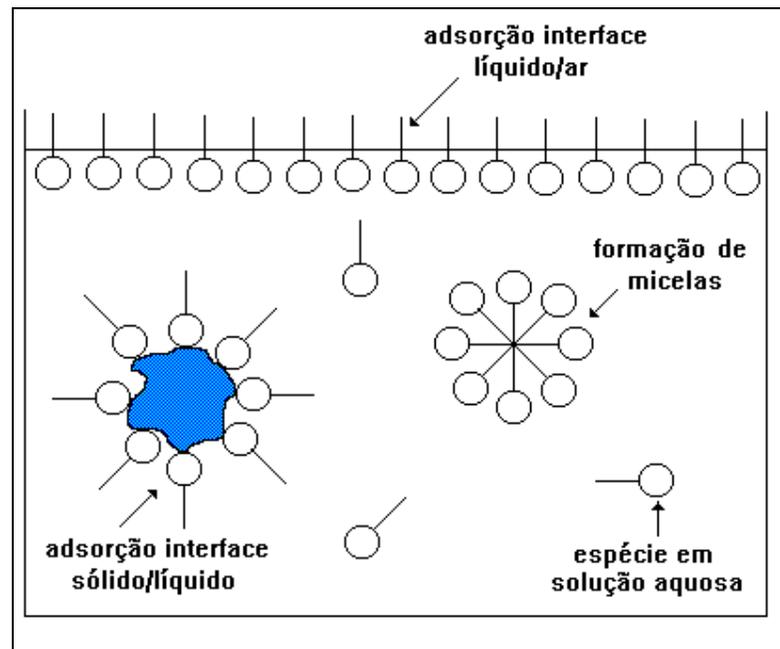
A força iônica do sistema pode interferir também sobre as partículas e o polímero. Apresentando maiores valores, causa tanto maior compactação da dupla camada elétrica, existente na interface partícula/líquido, quanto diminuição da solubilidade do floculante, dificultando o esticamento da estrutura polimérica.

A Tabela 3.6 mostra os principais reagentes agregantes utilizados na indústria mineral.

Surfactantes são substâncias orgânicas constituídas por moléculas de duplo caráter: polar e apolar. O grupo polar apresenta momento dipolar permanente e representa a parte hidrofílica da molécula. O grupo apolar não tem momento dipolar e constitui-se na parte hidrofóbica da molécula. Os surfactantes tendem a se concentrar nas interfaces (região limite entre duas fases). A figura 3.21 mostra diferentes configurações de surfactantes, em meio aquoso, em presença de partículas sólidas.

Tabela 3.6 - Principais Reagentes Agregantes Utilizados na Indústria Mineral (Valadão, 1996)

TIPO DO AGREGANTE	CARACTERÍSTICA	REAGENTE
COAGULANTES	ÁCIDOS	CLORÍDRICO
		SULFÚRICO
		CO <sub>2</sub>
	SAIS	CLORETO DE ALUMÍNIO
		SULFATO DE ALUMÍNIO
		CLORETO DE CÁLCIO
		ÓXIDO DE CÁLCIO
		CLORETO FERROSO
		CLORETO FÉRRICO
		SULFATO FERROSO
		SULFATO FÉRRICO
ALUMINATO DE SÓDIO		
FLOCULANTES	SINTÉTICOS	POLIACRILAMIDA ANIÔNICA
		POLIACRILAMIDA CATIÔNICA
		POLIACRILAMIDA NÃO- IÔNICA
		ÓXIDO DE POLIETILENO
		POLIAMIDA
	NATURAIS	DERIVADOS DO AMIDO



**Figura 3.21 - Diferentes Formas de Adsorção e Interação dos Surfactantes em Meio Aquoso na Presença de Partículas Sólidas (Valadão, 1996)**

Diversos grupos de reagentes surfatantes têm sido utilizados na indústria mineral, principalmente como reagentes de flotação. Destacam-se os xantatos, as aminas, os sulfonatos, os sulfossuccinatos, os sulfossuccinamatos, os sulfatos e os carboxilatos. Reagentes comerciais, conhecidos como auxiliares de filtração, têm como elemento ativo um ou mais surfatantes. A atuação desses reagentes pode permitir (Chaves, 1996):

- Melhor desaguamento da torta devido à redução de forças capilares;
- Diminuição de custos com a secagem ou processos subsequentes;
- Melhor recuperação de filtrado em processos hidrometalúrgicos;
- Possibilidade de extensão da faixa granulométrica de atuação da filtração contínua.

Os fabricantes não fornecem, normalmente, muitas informações sobre os reagentes surfatantes, a composição, estrutura química mais provável e grau de pureza. Essas

informações poderiam ser bastante úteis no estudo dos mecanismos envolvidos com a agregação.

A atuação dos agregantes e/ou surfatantes pode ter influência decisiva sobre a resposta de filtragem. No caso dos agregantes, a atuação parece auxiliar na formação de torta, mas contribui, na maioria das vezes, para o aumento de umidade. Estudos da combinação dos efeitos de agregantes e surfatantes foram desenvolvidos de forma a minimizar o efeito de umidades mais elevadas com ganhos em taxas unitárias de filtragem muito significativas (Valadão, 1996).

Silverblatt & Dahlstrom (1954) apresentaram um dos primeiros trabalhos que se tem notícia a respeito do uso de reagentes químicos no auxílio à redução de umidade de finos de carvão. Eles estudaram os parâmetros: viscosidade e tensão superficial no filtrado, e a umidade da torta de carvão. A viscosidade foi observada como o fator mais importante (Chaves, 1996).

Nicol (1976) estudou também o efeito de floculantes e surfatantes no desaguamento de finos de carvão. Os efeitos na taxa unitária de filtragem e na tensão superficial do filtrado foram observados. Sugeriu-se que parte do surfatante adicionado adsorvia-se ao carvão.

Clement & Bonjer (1975) realizaram estudos para melhorar a cinética do desaguamento, através de floculantes, para finos de caulim, barita e galena (em ordem crescente de hidrofobicidade). O fator mais relevante, observado nas análises em microscópio eletrônico, foi ao volume de vazios, o qual é influenciado tanto pelo tamanho das partículas quanto pelos flóculos. Estes vazios retêm água, com maiores efeitos observados para as amostras de caulim. Os polímeros conduzem a uma maior porosidade da torta e a uma distribuição mais uniforme destes poros.

Stroh & Stahl (1991) estudaram os mecanismos de ação dos surfatantes no processo de desaguamento e como estes contribuem para uma menor umidade das tortas de filtração submetidas à diferença de pressão.

Mwaba (1991) investigou o efeito de surfatantes no desaguamento das suspensões minerais de grafita e de hematita, em termos dos fenômenos da físico-química de superfície e dos processos físicos envolvidos. O autor concluiu que o SD2EHS (sódio di-(2 etilexil) sulfossuccinato) melhora o desaguamento das suspensões de hematita e de grafita, não só pela medida da tensão superficial do filtrado, como também devido aos fenômenos interfaciais das partículas minerais.

Malito et alii (1996) mostraram que a elevada resistência inicial das tortas de bauxita pode ser melhorada com a utilização de auxiliares de filtração, elevando-se a taxa unitária de filtração.

Singh & Bersa (1997) avaliaram a utilização de floculantes para finos de minério de ferro. A combinação de dois tipos de floculantes de alto peso molecular mostrou ser adequada para o caso estudo, aumentando a resistência do flóculo. O autor destaca o potencial do estudo para o aumento de produtividade dos equipamentos, não só melhorando o desempenho dos atuais, como também reduzindo o tamanho dos equipamentos futuros.

Pereira (1999) estudou auxiliares de filtração, floculantes e surfatantes, para reduzir a umidade e elevar a taxa de filtração tanto da torta quanto do filtrado para diversas polpas minerais. Concluiu que os surfatantes não só reduzem a umidade da torta, abaixando a tensão superficial e reduzindo a pressão capilar, bem como são capazes de adsorver na interface sólido-líquido, modificando o ângulo de contato. Concluiu, ainda,

que os agregantes (floculantes e coagulantes) aumentam a taxa de filtração porque reduzem a resistência específica da torta, agindo sobre a cinética do desaguamento.

Bersa & Sengupta (2000) analisaram o efeito da propriedade das partículas e da dispersão na filtração para amostras minerais de caulim, calcita e quartzo. Determinaram a influência de floculantes e da carga de superfície dos sólidos, concluindo que todas as três suspensões dos minerais mostraram melhoras na floculação e no desaguamento próximo aos respectivos valores de pontos de carga nula.

Hogg (2000) estudou a filtração sob pressão com uso de floculante, analisando o tamanho do flóculo, a resistência específica e porosidade. Concluiu que o processo de desaguamento é profundamente afetado pela floculação, resultando ainda na prevenção que partículas finas percorrem através da torta, acumulando-se sobre o meio filtrante.

Ramos et alii (1996) mostram a influência da adição de agregantes (PAM – poliácridamida aniônica) e surfatantes (acetato de éter-amina a 0, 100, 300 e 600g/t, e um surfatante industrial) como auxiliares para filtração de minério de ferro. Ressalta-se ainda o efeito da superfície específica e da percentagem de sólidos da polpa no estudo de testes de folha e testes industriais. Os floculantes tiveram efeito na elevação da taxa unitária de filtração; já para os surfatantes, a redução não foi significativa.

Masini, E.A. realizou testes para minério de ferro com bons resultados para os surfatantes (20 a 25% de redução da umidade residual), bem como elevação da taxa unitária de filtração. Mostrou também o efeito dos agentes aglomerantes na presença de surfatantes, com uma elevação na umidade bem como da taxa de filtração.

### 3.3.5. Testes de Laboratório

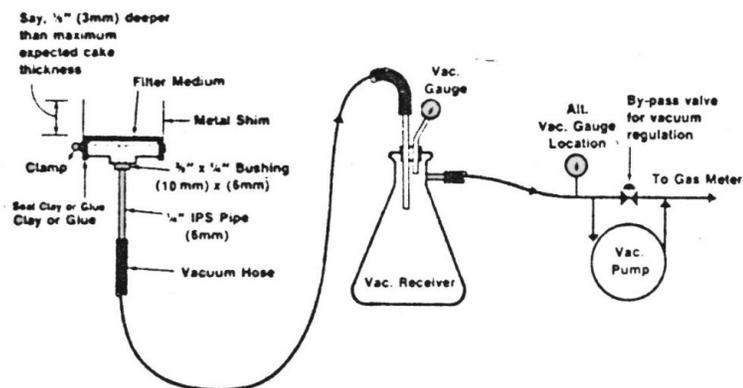
Diferentes procedimentos para testes de laboratório (Teste de Folha ou Funil de Büchner, ou outro) têm sido propostos para a determinação da filtrabilidade dos diversos materiais objeto dos estudos. Pesquisadores, fabricantes de equipamentos e fornecedores de elementos filtrantes ou auxiliares de filtração, além de produtores e centros de pesquisa desenvolvem os próprios métodos baseados na vasta experiência adquirida durante todo este prazo desde o advento da filtração a vácuo (Bourgeois, 1998 e 2000; Tiller, 1974 a 1987; Carleton, 1984; Dahlstrom & Silverblatt, 1977; Gomes, 1997 e 1999; Yoon, 2002; BOKELA, DELKOR, DORR OLIVER, EIMCO, LAROX, TAMFELT, entre eles).

Assim, foram estudados e desenvolvidos testes padronizados, que podem variar entre estes, principalmente, os aspectos de forma de alimentação, presença ou não de agitação (mecânica ou manual), métodos para medição dos fluxos e das massas obtidas. Apresentam-se, nas Figuras 3.22 a 3.31, algumas das montagens propostas para a realização destes testes.

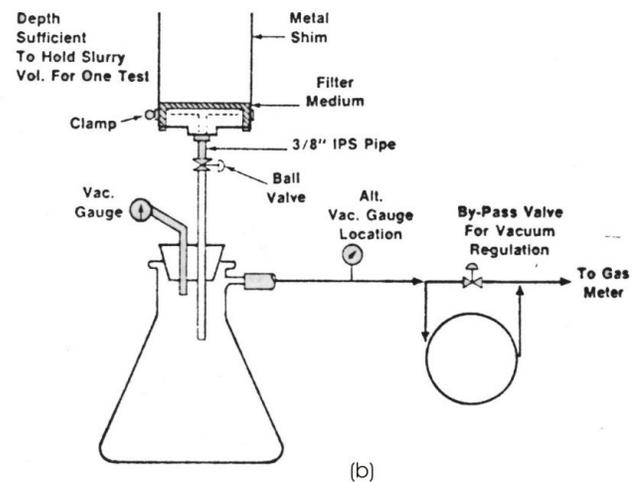
Tiller (1974) descreve o desenvolvimento do CSA (*Capillary-Suction Apparatus* – Gale & Baskerville), utilizado inicialmente na Inglaterra. Critica a utilização do Funil de Büchner que, embora largamente utilizado para o dimensionamento da filtração, mostra muitas dificuldades no fornecimento de dados nos testes. Considera que este tipo de teste deve ser evitado, à exceção de objetivos qualitativos.

Dahlstrom (1977) descreve os métodos e as montagens típicas para testes de folha e testes de folha com a alimentação por cima. Mostra o dimensionamento de filtros industriais e os gráficos de correlação para taxa de formação versus tempo e umidade da torta versus tempo/espessura, entre outras relações.

Carleton (1984) menciona que os testes de folha são largamente utilizados para otimizar o dimensionamento de filtros a vácuo, sendo simples de realizar e, portanto, podendo serem estudadas diversas variáveis. Menciona que pouco é sabido sobre os fatores de



(a)



(b)

Figura 3.22 - Teste de Folha (Leaf Test): convencional e alimentação por cima (a) e (b) Dahlstrom & Silverblatt, 1977.

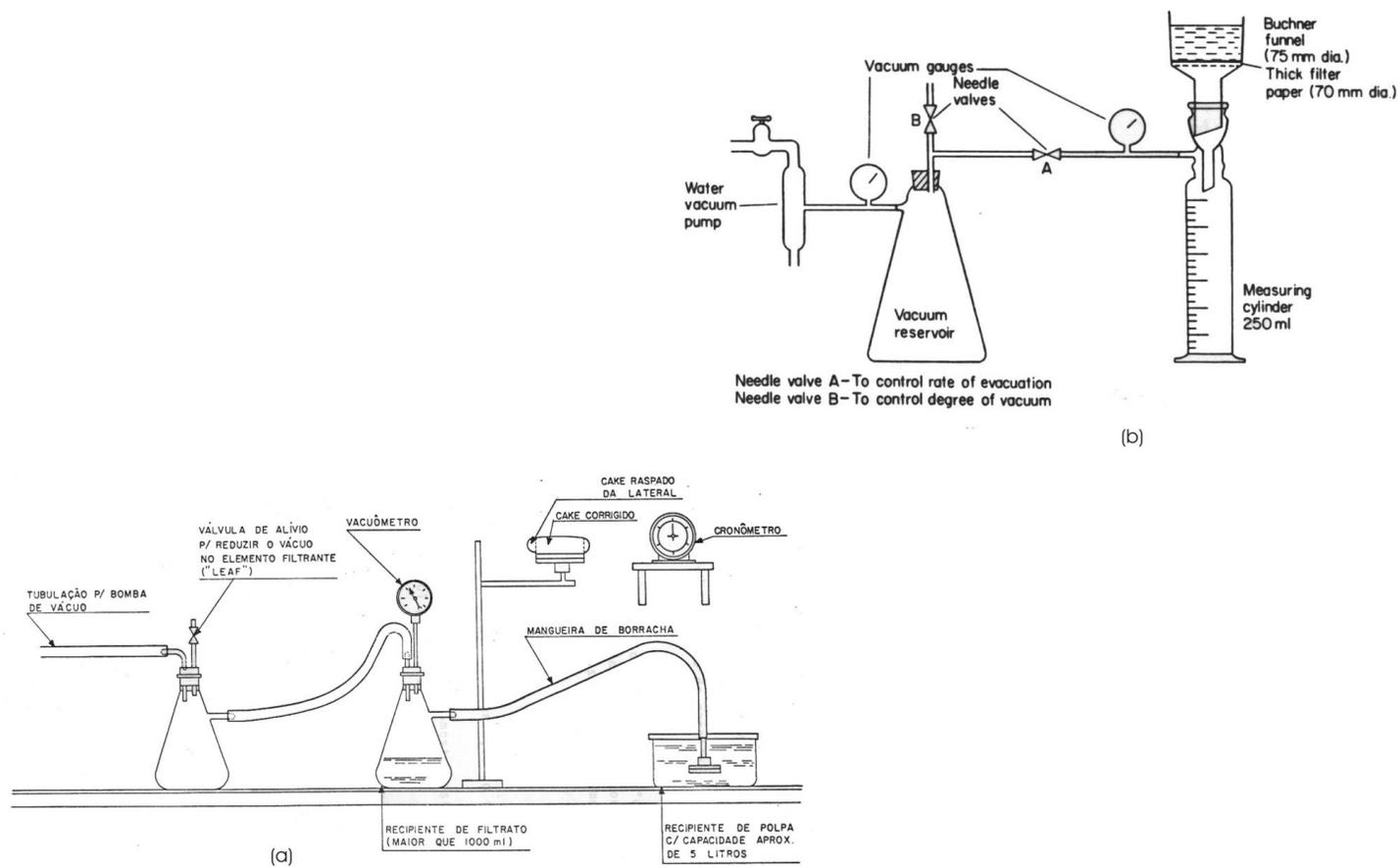
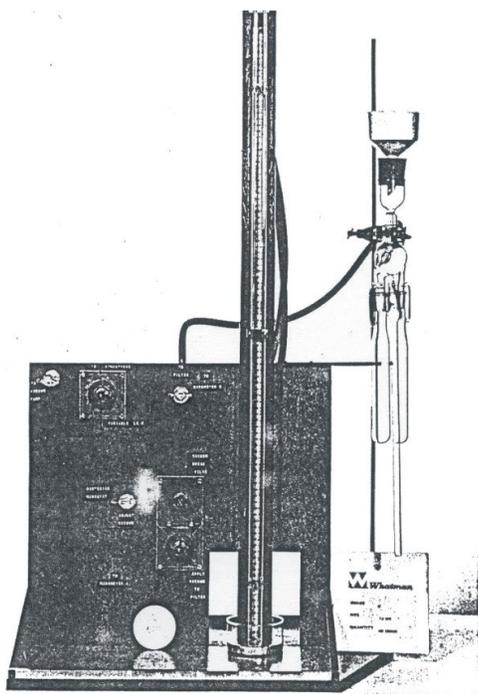
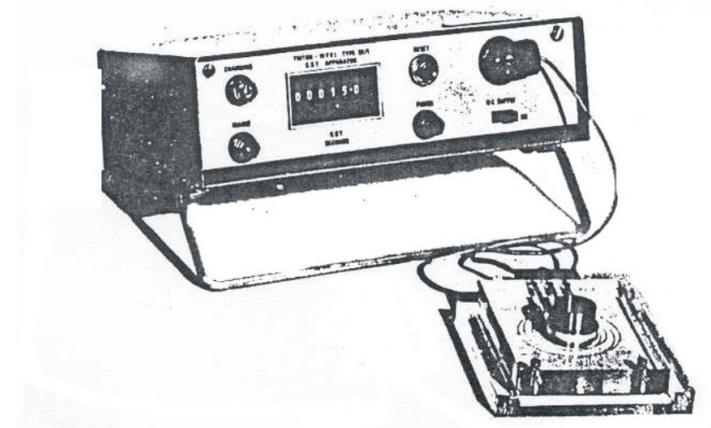


Figura 3.23 - Teste de Folha e Funil de Büchner (detalhe: medida do filtrado)  
(a) Coelho, 1980; Gale, 1977.



“Apparatus” para determinação da resistência específica



CST “Apparatus” para determinação da filtrabilidade.

Figura 3.24 - “Apparatus” para determinação de filtrabilidade e resistência específica (Gale, 1977)

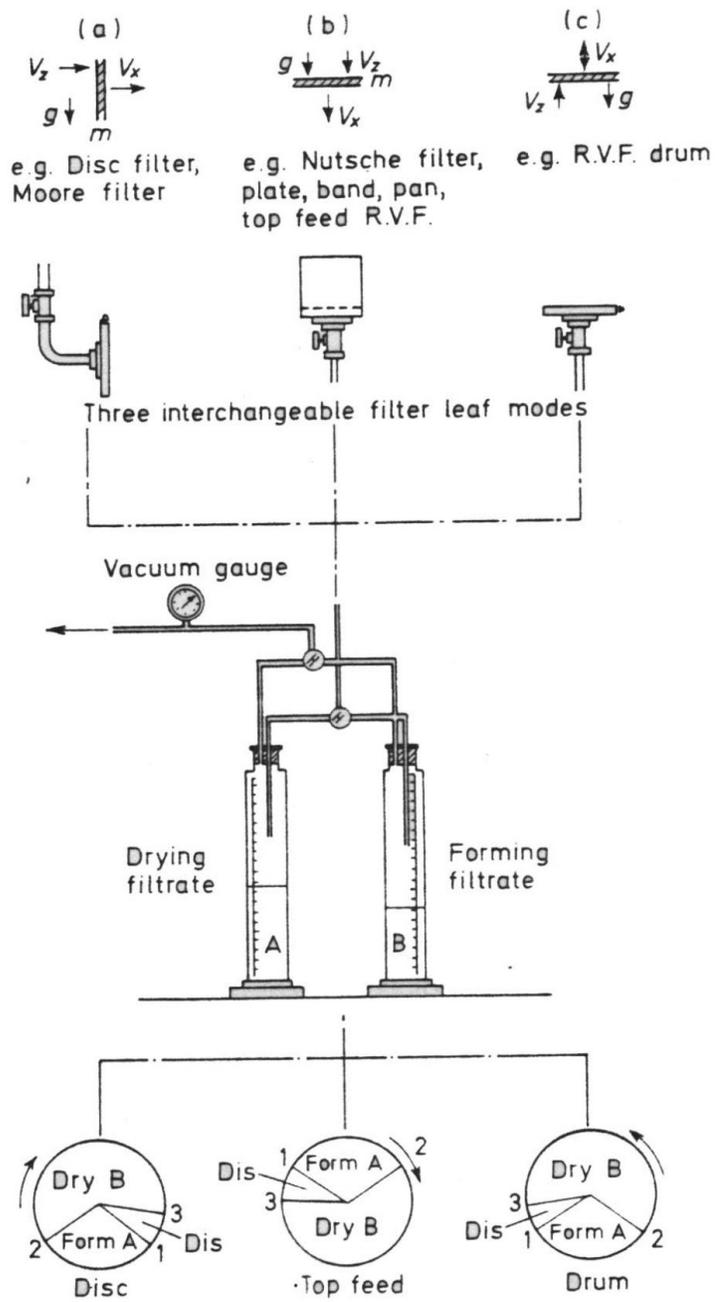
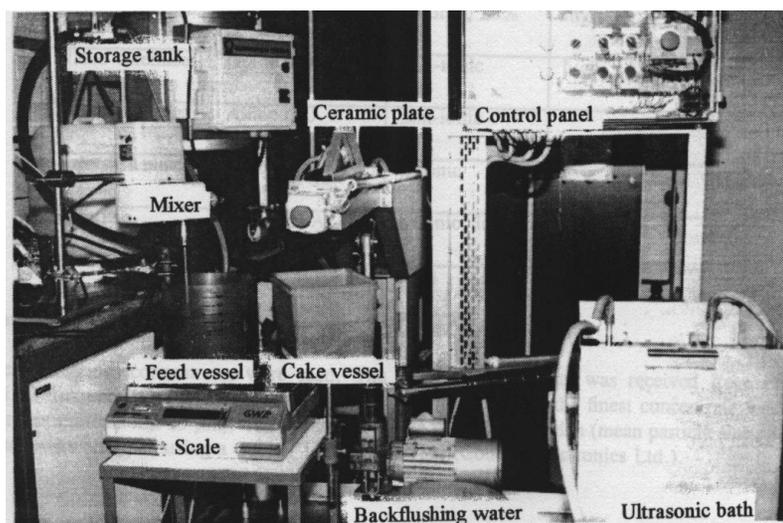
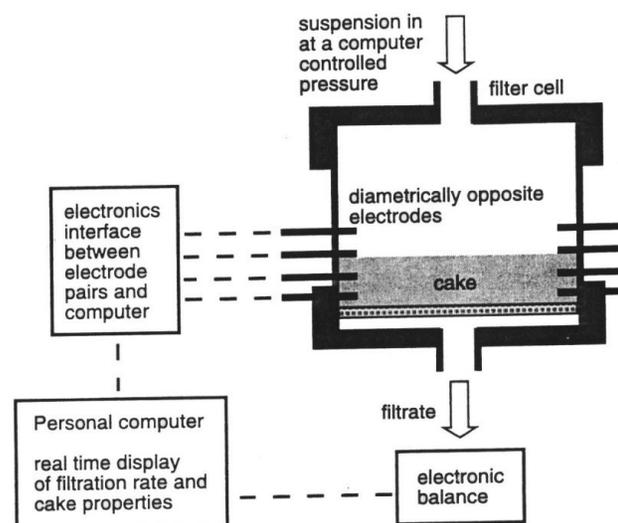


Figura 3.25 - Teste de Folha (montagem c/ opções) Svarovsky, 1981.



(a)



(b)

Figura 3.26 - Montagens: automática para filtro Ceramec e instrumentada para Filtro Prensa  
 (a) Mänttari & Ekberg, 1996; (b) Tarleton, 1999.

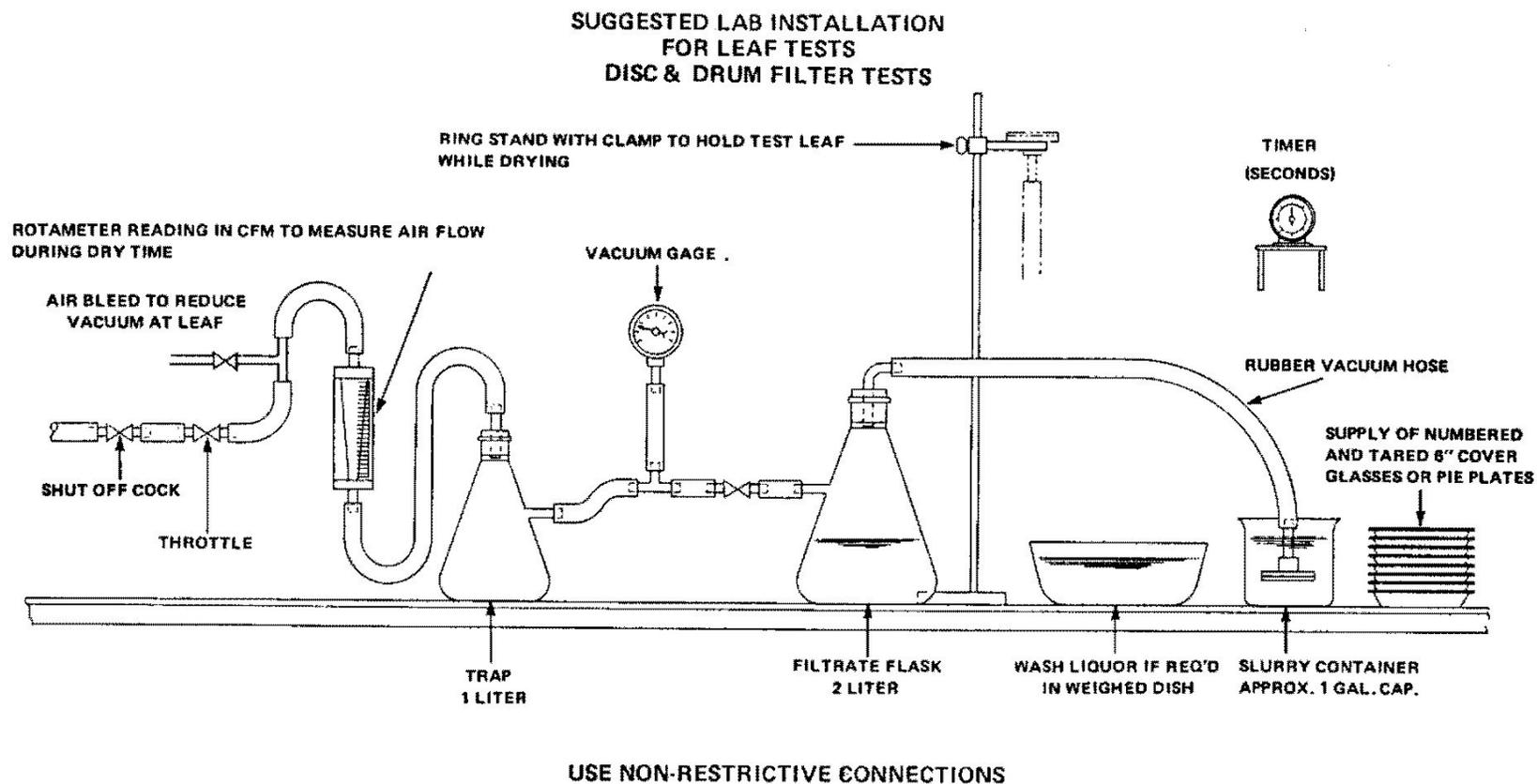


Figura 3.27 - Teste de Folha: Montagem DORR OLIVER

SUGGESTED LAB INSTALLATION  
FOR LEAF TESTS  
HOR & DORR CO FILTER TESTS

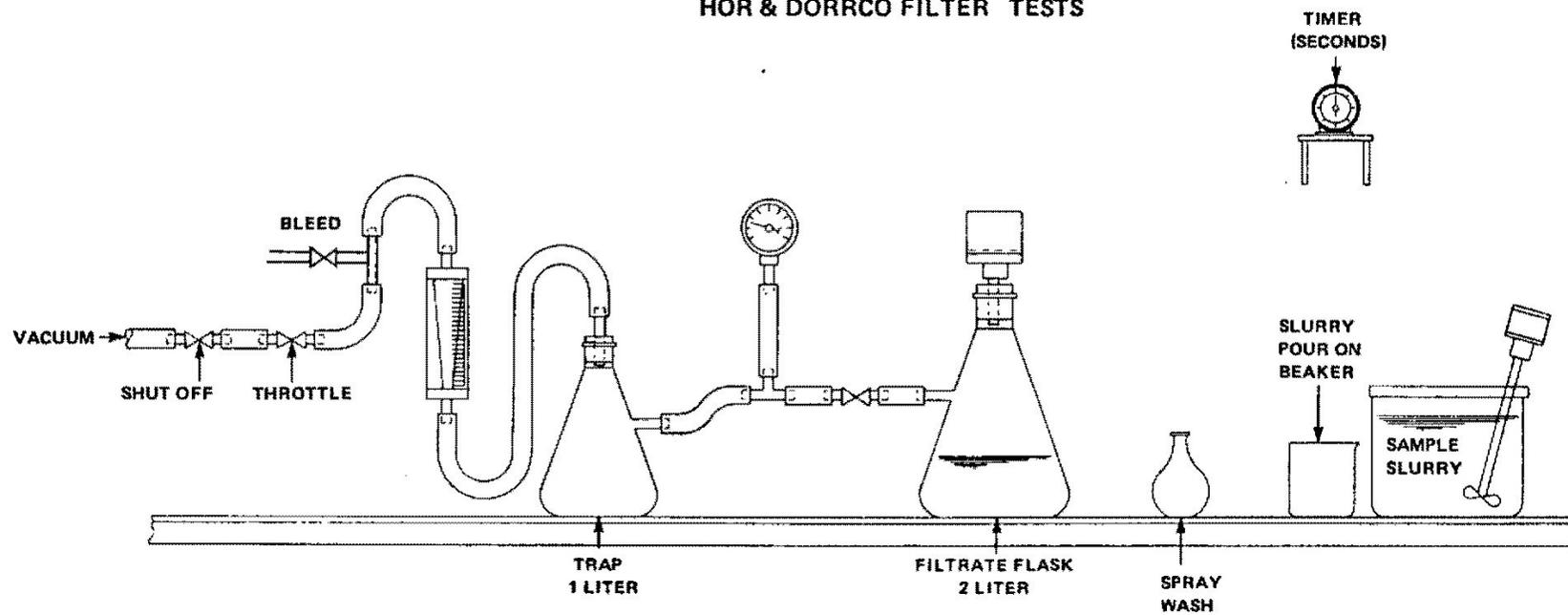
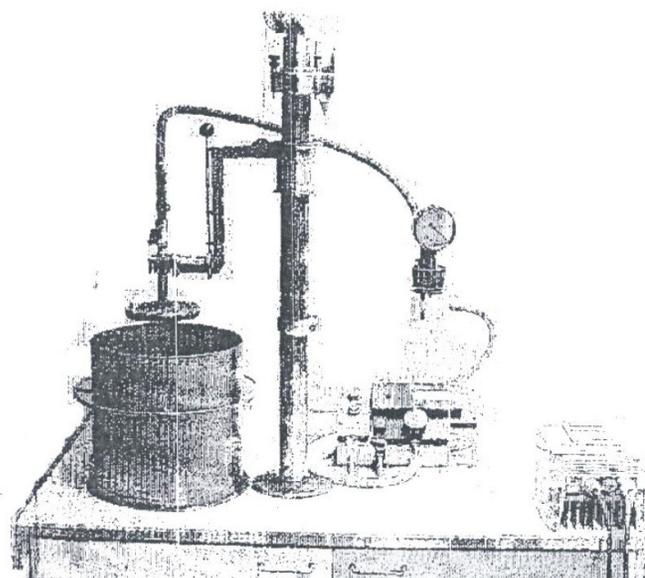
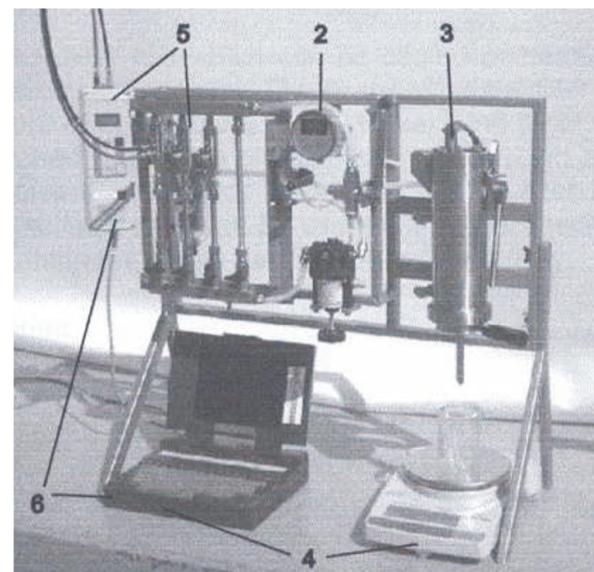


Figura 3.28 - Teste c/ Funil de Büchner: montagem DORR OLIVER



a) Teste de Folha: Procedimento TAMFELT



b) 2: Medidor de Pressão; 3: Sistema de Luz para a Célula; 4: Balança; 5: Fluxômetro; 6: Registro de Dados.

Figura 3.29 - Procedimentos de Teste de Filtragem (a: TAMFELT; b: BOKELA)

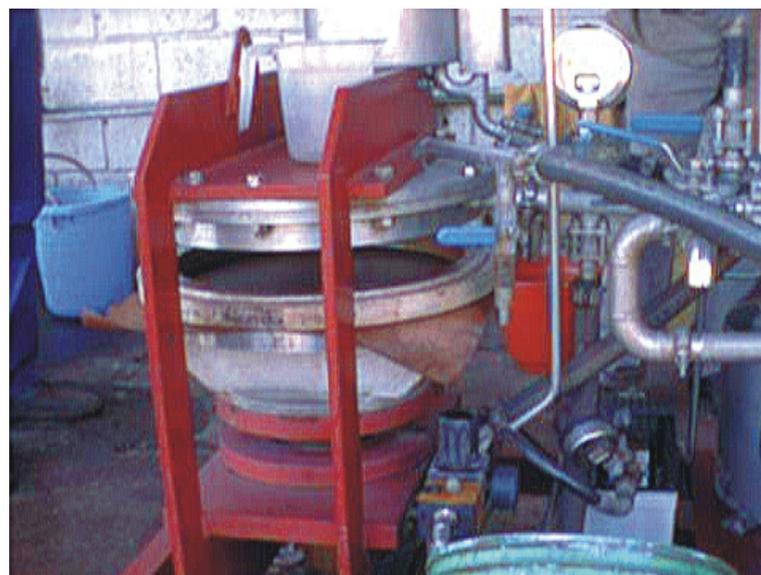


Figura 3.30 - Filtro Prensa LAROX: equipamento piloto

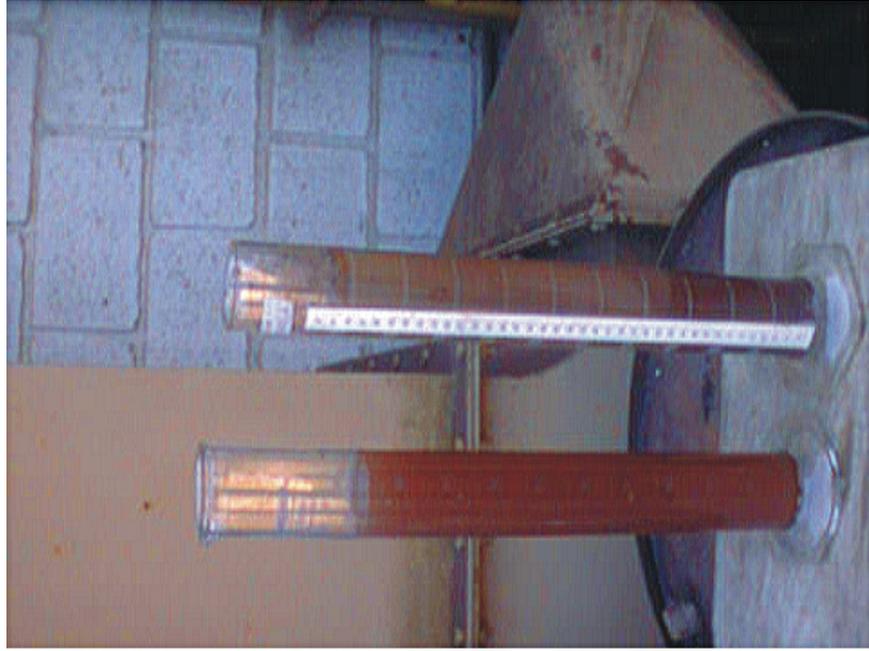


Figura 3.31 - Filtro Prensa LAROX: torta e filtrado

“scale-up” até a escala industrial, quando, então, fatores de segurança são utilizados arbitrariamente. São discutidas as variáveis experimentais: formação da torta, agitação, condições do tecido, envelhecimento da amostra, desaguamento da torta (com sua umidade final, porosidade e compressibilidade), entre outros. Conclui que o teste de folha tem uma tendência para sobre-estimação da filtrabilidade, sendo aplicado um fator de segurança. Considera que, para a utilização de agregantes, a quebra dos flóculos em condições severas de agitação deva ser considerada.

Gomes (1997) mostra ensaios de filtragem com minério de ferro e discute o método de agitação da polpa, se mecânico ou manual, descontínuo ou contínuo. Conclui que o erro percentual para a taxa de filtragem é sempre maior que o erro para a umidade, considerando-se o método de agitação empregado e para as duas amostras estudadas.

Bourgeois (1998) considera que a caracterização da microestrutura da torta baseia-se em duas principais ferramentas: um confiável procedimento de filtragem e em uma técnica acurada para a quantificação da microestrutura das tortas de filtragem. O teste de folha utilizado no seu estudo foi o SLFT (Bourgeois, et alii – A New Benchmark Single Leaf Test for Fine Coal Dewatering, IN: PROCEEDINGS OF SEVENTH AUSTRALIAN COAL PREPARATION CONFERENCE, 1995; APUD Bourgeois, 1988), tendo sido desenvolvido para o estudo de finos de carvão na Austrália. O procedimento de “alimentação por baixo” foi preferido frente ao de “alimentação por cima” devido ao último introduzir uma forte anisotropia nas tortas de filtragem, citando como fonte Binkley (Binkley et alii, Effect of Surfactant Washing on Enhanced Dewatering of Fine Coal. Particulate and Multifase Process, 3 – Hemisphere Publishing Co., NY, 1987). O autor reconhece que taxas de desaguamento muito elevadas não levam necessariamente a uma baixa umidade final. Acredita que uma torta com alta permeabilidade pode experimentar uma passagem de ar muito cedo através dos canais, que poderia interromper qualquer remoção adicional de umidade. A técnica de NMR (“Nuclear Magnetic Resonance”) foi utilizada para investigar as propriedades da água associada aos finos de carvão. O artigo conclui que a microestrutura da torta domina a cinética de ambos: a formação da torta e o seu desaguamento.

O modelamento do desaguamento tem sido alvo de estudos recentes, como a investigação da estrutura da torta, a possibilidade de estruturação da torta (dupla alimentação com diferentes granulometria e, portanto, permeabilidades distintas), monitoramento da vazão de filtrado, com e sem compressão, entre outros. Desenvolvimentos recentes permitem o monitoramento não só do volume de filtrado, mas também da formação da torta, aspecto cada vez mais importante no modelamento do desaguamento (Bourgeois, 2000; Lu & Tung, 1998; Yoon, 2002).

Alguns dos fatores que devem ser levados em conta para uma aplicação específica e, portanto, durante a execução dos testes de filtração, são:

1. Granulometria (tamanho das partículas e sua distribuição);
2. Presença ou não de auxiliares de filtração (agregantes, surfatantes e outros);
3. Concentração de sólidos da polpa;
4. Espessura da torta;
5. pH da polpa;
6. Estado de dispersão da polpa (coagulação, floculação e seu condicionamento);
7. Idade da polpa (sobretudo para polpa com reagentes com degradação acelerada, como os amidos);
8. Viscosidade do líquido;
9. Temperatura da polpa e da torta;
10. Agitação ou não e sua atuação (velocidade do agitador);
11. Tipo de elemento filtrante e sua condição;
12. Vácuo ou pressão aplicada para formação e secagem;
13. Tempo de ciclo: formação, secagem e total;
14. Presença ou não de forças de compressão;
15. Superfície específica, forma e características das superfícies das partículas.

Os resultados dos testes prestam-se a diferentes objetivos e, portanto, também os tratamentos dos dados podem ser: dimensionamento de equipamento de filtração, avaliação de elementos filtrantes, avaliação de efeito dos agregantes e/ou surfatantes, entre outros.

### 3.3.6. Filtragem de PFF

A remoção da umidade do “Pellet Feed Fines” é realizada através de filtragem a vácuo, cujo processo pode ser brevemente descrito como uma técnica de separação sólido-líquido ou desaguamento baseada em forçar a retirada da água contida num volume poroso de minério (torta ou “cake”) atravessando uma superfície de filtragem (elemento filtrante) pela aplicação de um diferencial de pressão. Eles são aplicáveis para produtos “Pellet Feed Fines” desde um índice de Blaine, ou superfície específica, de 500 cm<sup>2</sup>/g até 2000 cm<sup>2</sup>/g, representando um produto com granulometria, aproximadamente, entre 55% e 95% passante em 0,045mm (Valadão, 1996).

A umidade final é o objetivo principal e a função a ser maximizada é a produtividade a um custo adequado. Este sistema depende de uma série de parâmetros e variáveis operacionais, com os mais significativos sendo (Araújo, 1987; Pereira, C.E., 1981):

i) Aquelas relacionadas com a polpa:

- Taxa alimentação da polpa;
- Percentagem de sólidos da alimentação;
- Adição de reagentes auxiliares de filtragem;
- Temperatura da polpa;
- Viscosidade da polpa;
- Concentração de material valioso dissolvido (quando aplicável);
- Distribuição granulométrica e tamanho das partículas;
- Forma das partículas;
- Propriedades de superfície das partículas da polpa (por exemplo: grau de dispersão, grau de hidrofobicidade – concentrado de flotação, entre outras);

ii) Aquelas relacionadas com a torta e o filtrado:

- Porosidade da torta;
- Espessura e outras características da torta;
- Tempo de formação da torta;
- Tempo de desaguamento (secagem) da torta;

- Tempo de lavagem (se aplicável);
  - Fluxo de água de lavagem (se aplicável);
  - Resistência da torta;
  - Concentração de material dissolvido na torta e no filtrado;
  - Fluxo de filtrado;
  - Concentração de sólidos no filtrado;
- iii) Aquelas relacionadas ao equipamento:
- Submersão;
  - Gradiente de pressão;
  - Resistência do meio filtrante;
  - Tipo do meio filtrante (e vida-útil deste);
  - Fatores geométricos do filtro;
  - Válvula de vácuo para os filtros a vácuo de discos verticais;
  - Número de segmentos;
  - Área superficial do filtro;
  - Velocidade de agitação;
  - Velocidade de rotação;
  - Fricção interna na tubulação;
  - Eficiência de lavagem.

Estes fatores são classificados em mensuráveis e não-mensuráveis, controláveis e não-controláveis, calculados ou medidos.

Circuitos distintos apresentam particularidades quanto ao desempenho da filtração de PFF. Ciclonagens com um ou dois estágios, com ou sem espessamento na alimentação, seguidos ou não de estágios de concentração, mostram a relevância do estudo das diversas variáveis influentes neste processo.

Para filtros a vácuo de discos verticais, a umidade final da torta de PFF varia desde valores tão baixos como 7%, para PFFs mais grosseiros (50 a 55% passante em 45 $\mu$ m e Índice de Blaine de 550 a 600cm<sup>2</sup>/g), a 11 - 12%, para minérios mais finos (90 a 95% passante em 45 $\mu$ m e 1800 a 2000 cm<sup>2</sup>/g). Uma faixa de operação industrial da MBR

está entre 8,0% e 12%. Em usinas de pelotização, a umidade final da torta é mais comumente determinada pelo processo aglomeração a frio ou pelotamento, operação seguinte à filtragem. Nestas instalações, tratando minério de ferro hematítico no Brasil, a umidade ótima de pelotamento está entre 9,5 e 9,8%, variando para cada minério em particular (CVRD, 1999).

Outros métodos menos convencionais são também empregados para o desaguamento de PFF. Dependendo das taxas de produção e da granulometria dos produtos, PFFs são também desaguados por gravidade, embora menos eficientemente. Nestes casos, um PFF mais grosseiro, com um índice de Blaine abaixo de  $400 \text{ cm}^2/\text{g}$ , é mantido em “bacias” ou tanques de desaguamento por longos períodos de tempo, geralmente após uma etapa anterior de espessamento ou ciclonagem (ciclones desaguadores). A umidade final do produto para esta configuração encontra-se, geralmente, superior a 12%.

A Tabela 3.7 apresenta diversas técnicas de desaguamento para “Pellet Feed Fines” e o estágio em que se encontra a aplicação (Amarante, 2001).

Embora poucos estudos estejam disponíveis sobre o efeito da mineralogia no desempenho da filtragem, é reconhecido que a forma da partícula e a mineralogia em si podem afetar a umidade final das tortas de “Pellet Feed Fines”. Neste contexto, concentrados de minérios magnetíticos (taconitos no EUA) tendem a desaguar mais facilmente do que concentrados de minérios hematíticos. Partículas de magnetita apresentam-se normalmente com menores superfícies específicas, bem como rugosidade, mais baixas, oferecendo menor dificuldade na remoção da umidade residual. A carga de superfície é também afetada pela mineralogia e, portanto, a interação das partículas com a água (molhabilidade) e mesmo a fisico-química desta (íons determinadores de potencial, viscosidade, entre outros). Este último é um parâmetro que pode afetar o desempenho da filtragem em termos de umidade final, sendo fortemente controlado pelo pH da polpa (MBR, diversos; Valadão, 1997).

**Tabela 3.7 - Técnicas de Desaguamento de Minério de Ferro: “PELLET FEED FINES” (Amarante, 2001)**

TÉCNICA	FAIXA DE UMIDADE (%)	MAIORES VANTAGENS	MAIORES DESVANTAGENS	APLICAÇÕES EM MINÉRIO DE FERRO
Decantação por Gravidade	10 a 14	Baixo custo de capital;	Umidade final elevada. Aplicável apenas para PFF mais grosseiro. Alto custo de operação; Perdas elevadas de material	Utilizado em casos específicos
<b>Filtragem a Vácuo Discos Verticais</b>	<b>7 a 11</b>	Elevada área de filtragem por área de instalação; Médio custo de investimento; Elevada flexibilidade operacional; Alta produtividade;	Custo de energia de médio a elevado; Necessidade de constante monitoramento e controle dos parâmetros operacionais; Umidade final afetada pelas condições da alimentação. Alto custo operacional;	Largamente utilizada no mundo, com a maioria das instalações mais recentes (pelotizações e trat. de minérios)
Filtragem a Vácuo com Filtros Rotativos de Tambor	7 a 12	Elevada flexibilidade operacional; Fácil descarga da torta (sem problemas).	Baixa a muito baixa área de filtragem por área de instalação; Alto custo de investimento; Elemento filtrante caro; Flexibilidade de operação limitada;	Atualmente pouco utilizada;
Filtragem por Pressão (automática)	7 a 9	Baixa umidade; Fácil descarga da torta; Umidade final afetada pelas condições da alimentação; Baixo custo de operação;	Alto (muito alto) custo de revestimento; Elementos filtrantes caros;	Utilizado: CVRD (implantação.) LKAB
Filtragem Hiperbárica	6,5 a 9	Baixa umidade; Alta produtividade;	Elevado custo de investimento; Elevado custo de operacional; Poucas aplicações; Descarga da torta: cuidados especiais;	Pesquisa para aplicações em minério de ferro.
Filtragem Capilar	8,0 a 9,0	Produtividade comparável a filtragem a vácuo – discos verticais; Expectativa: baixo custo operacional	Custo elevado dos setores (reposição); Elevado custo de investimento.	Aplicação industrial: LKAB, CVRD (projeto)
Filtro de Correia Horizontal	9,0 a 13	Simplicidade de operação, menor dependência da %sólidos da alimentação; Investimento intermediário; Umidade adequada para faixa 2 a 0,045mm; Possibilidade de maior controle do filtrado	Umidade final mais elevada para PFF mais fino; Custo do elemento filtrante elevado;	CVRD (Carajás/FRD); MBR (TIG);

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Seleção e Obtenção das Amostras

Os produtos “Pellet Feed Fines”, objeto deste estudo, foram obtidos diretamente das produções das instalações de tratamento através de amostrador automático com corte regulado em uma hora (alíquota) e coleta a cada turno (amostra do turno de produção). Estas amostras foram enviadas para o departamento de laboratório da MBR quarteadas e as alíquotas reservas foram arquivadas. Estas amostras reservas, representando para cada Instalação de Tratamento de Minérios (ITM) a produção de um mês, foram homogeneizadas e destinadas aos estudos de caracterização e testes de filtrabilidade no laboratório do Centro de Pesquisas do Miguelão.

### 4.2. Preparação das Amostras

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma adotado de preparação das amostras para os estudos subseqüentes. Deve-se destacar o cuidado para não serem alteradas as umidades das amostras durante a preparação.

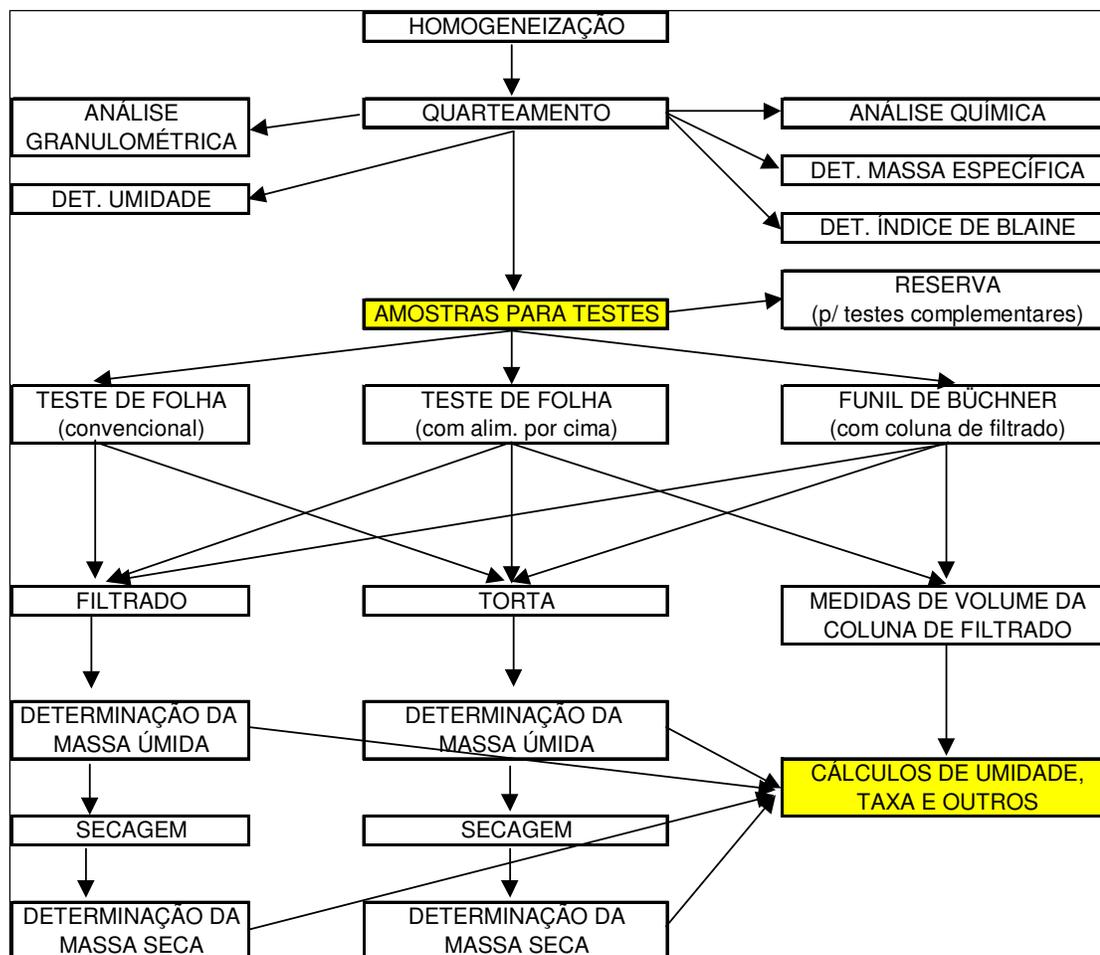
Cada uma das amostras é inicialmente homogeneizada formando-se alternadamente cones e círculos em três etapas, pelo método das pilhas alongadas modificado.

A amostra passa, então, por nova etapa de homogeneização e quarteamento utilizando-se divisor do tipo Jones.

Parte da amostra é utilizada para a determinação da distribuição granulométrica através de peneiramento a úmido seguido de subpeneiramento em “cyclosizer”.

Outra porção da amostra é utilizada para uma análise química da amostra integral.

Com duas outras porções da amostra realiza-se determinação da massa específica dos sólidos pelo método do picnômetro e determinação do índice de Blaine, através do permeabilímetro de Blaine.



**Figura 4.1 - Fluxograma da Preparação das Amostras**

#### 4.3 -Peneiramento

O peneiramento da amostra é realizado a úmido, empregando-se peneiradores de marca Manupen 500 x 500mm até uma abertura de 0,038 mm. O tempo de peneiramento é padronizado em 5 minutos. O “undersize” (<0,038 mm) é homogeneizado e quarteado em divisor de polpas, fornecendo massa de 50 gramas para os testes de subpeneiramento utilizando-se um “cyclosizer” (fabricante: Warman) para se determinar a granulometria do material abaixo deste tamanho.

#### 4-4 - Análise Química

Uma alíquota é pulverizada em moinho de disco e de anéis antes de ser enviada para análise química.

Todas as análises químicas são realizadas no laboratório químico da MBR por via úmida (dicromatometria) para determinação do ferro total, espectrometria de emissão a plasma (ICP) para silício, alumínio e manganês.

#### 4.5 - Determinação da Massa Específica dos Sólidos

Este procedimento é realizado com massa de minério de aproximadamente 50g em picnômetros de 100ml. Pesagens sucessivas do picnômetro vazio e seco, picnômetro com água, picnômetro com sólidos e picnômetro com água e sólidos determinam o volume ocupado dos sólidos e, tendo-se a massa, determina-se a massa específica dos sólidos. Este procedimento é padronizado no laboratório da MBR.

#### 4.6 - Determinação da Superfície Específica dos Sólidos: Índice de Blaine

Este método consiste em fazer passar uma quantidade determinada de ar através de uma camada preparada de amostra mineral de porosidade definida. A amostra seca a ter a superfície específica determinada é desagregada em peneira de 0,150mm (padrão), utilizando-se álcool etílico para se evitar aglomerações e umidade residual. Cada massa

a ser ensaiada, amostrada pelo método de incrementos aleatórios, é colocada sobre um disco de papel de filtro em uma célula de permeabilidade de volume conhecido. Ajusta-se através de leve pressão sobre o disco superior de papel de filtro, de modo que se obtenha uma camada compacta de amostra. Acopla-se esta célula de permeabilidade no tubo manométrico e, eliminando o ar contido no ramo do tubo até que seja atingida a marca superior, é cronometrado o tempo de movimentação do líquido incompressível entre os dois pontos delimitados no tubo manométrico. Este procedimento é repetido por três vezes e para três alíquotas da amostra ensaiada, sendo padronizado no laboratório da MBR. Calcula-se, através de tabelas, a superfície específica dos sólidos.

#### 4.7. Testes de Filtragem de Laboratório

Os testes a serem realizados podem ser subdivididos em três montagens distintas:

- Teste de Folha convencional (ou com submersão do teste de folha);
- Teste de Folha com alimentação por cima (modificado devido a uma adaptação com coluna de filtrado);
- Testes com Funil de Büchner com alimentação por cima (modificado devido à coluna de filtrado).

Passa-se a descrever cada um destes testes.

##### 4.7.1. Teste de Folha convencional

As condições de vácuo de formação e secagem devem ser previamente reguladas e conferidas a cada teste. A montagem da folha de teste deve ser inspecionada antes do início de cada série de testes (perdas de vácuo, acúmulo de material e/ou danos no elemento filtrante devem ser verificados).

A massa homogênea de minério entre 2,5 e 4,0kg, previamente reservada do processamento das amostras e com umidade recentemente determinada, é desagregada manualmente e a úmido em um recipiente de aproximadamente 20 litros.

A porcentagem de sólidos e a temperatura da polpa são ajustadas para cada condição do teste. Mede-se o pH natural da polpa. Caso seja necessário, o ajuste do pH é realizado através de adição medida de NaOH ou HCl.

Com o sistema de vácuo estabilizado, inicia-se a agitação da polpa. Mantendo-se a agitação manual, a folha de teste é imersa na polpa pelo tempo determinado do teste e sob a atuação do vácuo de formação.

Após o tempo de formação, altera-se o vácuo atuante para o vácuo de secagem ao mesmo tempo em que é retirada a folha de teste da polpa. A folha de teste é, então, elevada de forma a permitir o fluxo completo de filtrado para o reservatório de coleta deste. Ao final do tempo adicional de secagem, o vácuo do sistema é desligado e a folha de teste é desacoplada da montagem para a análise da torta.

Retira-se a massa em excesso lateralmente à folha de teste, reservando-a para determinação de sua massa. Para a torta, determina-se através de paquímetro a espessura em três pontos. Mede-se a massa úmida, seca-se a amostra em estufa a aproximadamente 105° C, medindo-se a massa seca e determinando-se a umidade da torta.

Para o filtrado, determina-se a massa e o volume da polpa. Ela é seca completamente, determinando-se, então, o percentual de sólidos do filtrado (Figuras 4.2 e 4.3).



Figura 4.2 - Teste de Folha Convencional MIG/MBR



(a)



(b)

Figura 4.3 - PFF/MBR: tortas (a) PIC (b)MAC

#### 4.7.2. Teste de Folha com alimentação por cima (modificado devido a uma adaptação com coluna de filtrado)

Da mesma forma que no teste de folha convencional, deve-se regular e conferir as condições de vácuo de formação e secagem, bem como a montagem da folha de teste com a característica extensão lateral.

A massa de minério entre 1,5 e 2,0kg, previamente reservada do processamento das amostras e com umidade recentemente determinada, é desagregada manualmente em um recipiente de aproximadamente 5 litros.

Como na descrição do teste anterior, o percentual de sólidos, a temperatura e o pH são ajustados para as condições do teste. Mantida uma agitação mecânica contínua e de baixa intensidade, deve-se tomar maior precaução com polpas com aditivos (agregantes ou surfatantes). Toma-se um volume determinado de polpa calculado de forma a se obter uma espessura final determinada. Esta espessura é determinada a partir da porcentagem de sólidos da polpa, porosidade (determinar valor com teste preliminar, caso não se tenha esta), densidade do sólido e área do teste de folha ( $0,1\text{pé}^2$  ou  $0,00929\text{m}^2$  foi tomada como padrão).

Com o sistema de vácuo estabilizado, agita-se a polpa, transferindo-a para o teste de folha. A folha de teste é elevada em relação ao sistema de coleta de filtrado, quando, então, o vácuo de formação é acionado. Durante todo o tempo determinado do teste é monitorado o volume de filtrado para a confecção da curva de desaguamento. O tempo de formação é determinado quando termina o excesso de água sobre a torta formada. Este tempo é importante para o cálculo expedito da porosidade. Caso o vácuo de secagem seja distinto do de formação, deve-se alterar o nível de vácuo no exato momento do tempo de formação determinado.

O tempo final do teste é determinado previamente, sendo aquele próximo a uma umidade final de desaguamento, quando o fluxo de filtrado é insignificante ou muito próximo de nulo. Quando necessário, deve-se realizar um teste preliminar.

A torta é retirada parcialmente através de espátula e determina-se a espessura, através de paquímetro, em três pontos no mínimo. Mede-se a massa úmida total da torta e seca-se a amostra em estufa a aproximadamente 105° C, medindo-se a massa seca e determinando-se a umidade da torta.

Para o filtrado determina-se a massa e o volume total da polpa. Esta é seca completamente, determinando-se, então, a porcentagem de sólidos do filtrado (vide Figura 4.4).

#### 4.7.3. Testes com Funil de Büchner com alimentação por cima (modificado devido a coluna de filtrado)

Da mesma forma que no teste de folha com alimentação por cima, deve-se regular e conferir as condições de vácuo de formação e secagem, bem como a montagem do elemento filtrante no Funil de Büchner.

A preparação da polpa (ajustes de percentuais sólidos, de temperatura e de pH) é idêntica à do teste de folha com alimentação por cima. Toma-se um volume determinado de polpa calculado de forma a se obter uma espessura final determinada. Esta espessura é determinada a partir da porcentagem de sólidos da polpa, porosidade (determinar valor com teste preliminar, caso não se tenha esta), densidade do sólido e área do Funil de Büchner (diâmetro de 0,165m, portanto 0,02138m<sup>2</sup>).

Com o sistema de vácuo atuando e estabilizado, agita-se a polpa, transferindo-a para o Funil de Büchner, posicionado em sua montagem sobre o sistema de coleta do filtrado, quando é iniciado o teste. Monitora-se o volume de filtrado, anotando-se tempo de formação e altera-se, ou não, o vácuo de formação.

O tempo final do teste, a medição e retirada da torta, as medidas das espessuras, umidade da torta, volume e porcentagem de sólidos do filtrado são realizados da mesma forma que para o teste de folha com alimentação por cima (vide Figura 4.5).

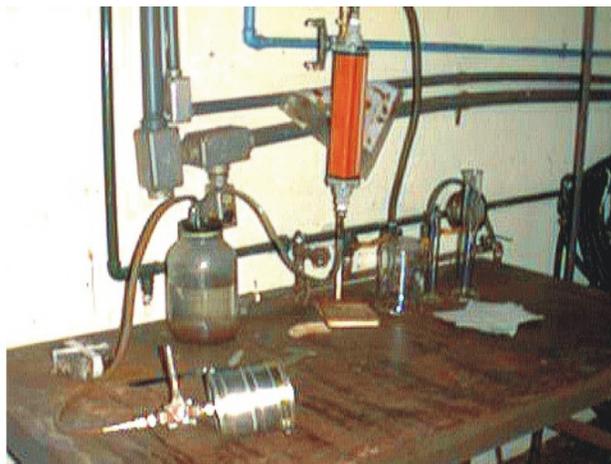


Figura 4.4 - Teste de Folha Montagem EIMCO

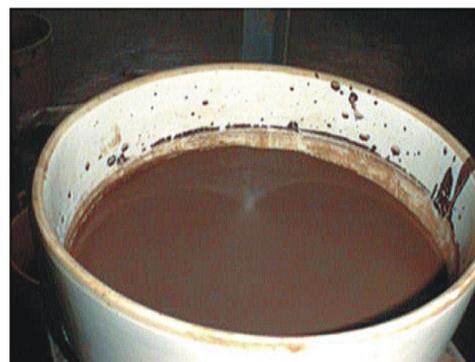
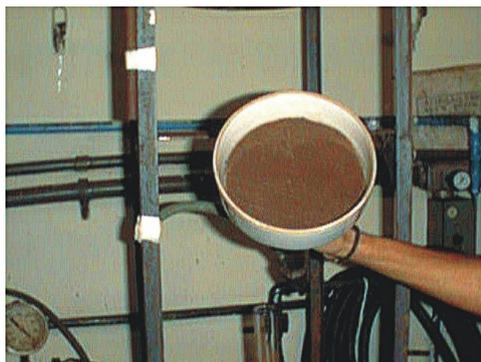


Figura 4.5 - Funil de Büchner: Montagem com Coluna de Filtrado ( alimentação por cima)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

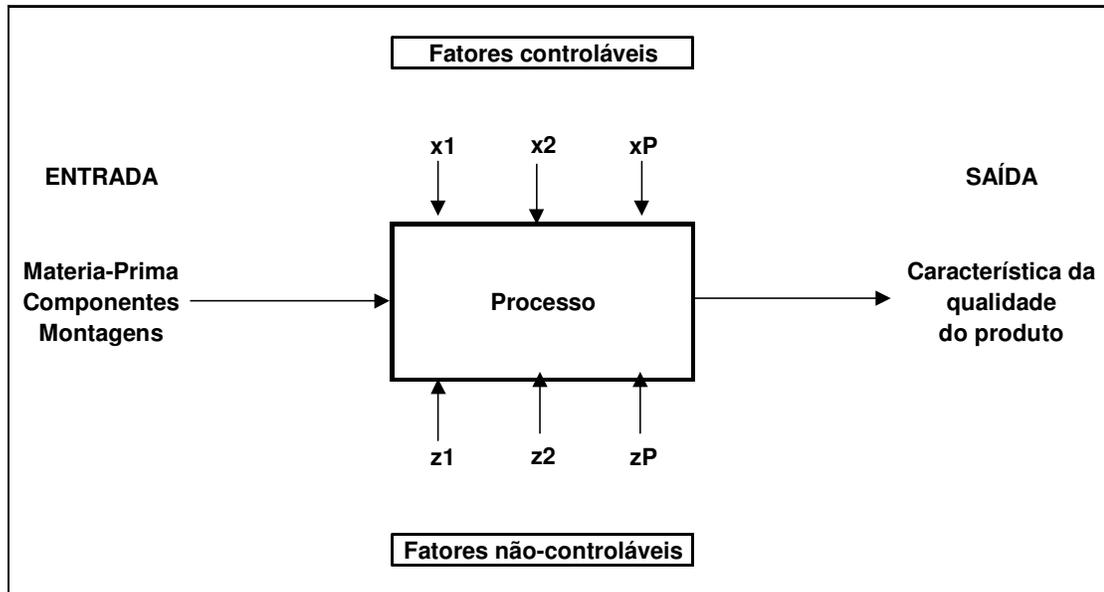
Os objetivos dos testes de filtração foram buscar diferenças significativas nos aspectos de formação e de desaguamento das tortas de filtração em função das metodologias de realização destes testes. Assim, analisou-se inicialmente a formação da torta e posteriormente a curva de desaguamento obtida a partir dos testes modificados.

De acordo com Werkema (1996), “um experimento é um procedimento no qual alterações são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta” (Figura 5.1).

As características do processo de filtração analisadas foram: a umidade do produto e a taxa unitária de filtração. Os testes de filtração foram realizados mantendo-se em níveis estáveis: as percentagens de sólidos para cada amostra, os vácuo de formação em 64,4kPa (19” Hg) e de secagem em 74,5kPa (22” Hg). Elementos filtrantes distintos e adição ou não de auxiliares de filtração - agregantes e/ou surfatantes – foram as principais variáveis ou fatores estudados para as três metodologias de filtração.

Utilizou-se a metodologia de experimentos fatoriais com dois ou mais fatores para auxiliar na interpretação dos resultados (Werkema, 1996).

Os resultados de espessura da torta em função do tempo de formação foram estudados para diferentes elementos filtrantes.



**Figura 5.1 : Modelo Geral de um Processo ou Sistema**

Investigou-se, ainda, o efeito da porosidade, calculada a partir das massas úmidas e secas das tortas e suas respectivas espessuras, para os três tipos de testes de filtragem.

A dosagem de agregantes foi avaliada, sobretudo para as amostras mais finas, como a amostra 05. As curvas de desaguamento foram traçadas e buscou-se reduzir a umidade final através da utilização de reagentes surfatantes.

### 5.1 – Caracterização das Amostras

Os resultados das caracterizações físicas das amostras, obtidas cada uma como amostras compostas médias mensais para cada unidade industrial, podem ser vistos a seguir, na Figura 5.2.

Caracterização das Amostras					
Amostra	Oversize (>0,150mm)	Undersize (<0,045mm)	Fração (<0,009mm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	IBLA
Am-01	3,12%	55,53%	2,89%	5,12	676
Am-02	5,79%	55,88%	5,04%	5,02	889
Am-03	9,27%	53,14%	6,32%	5,12	1.045
Am-04	9,18%	54,84%	6,96%	5,13	1.293
Am-05	14,06	66,49	22,31%	4,92	2.982
Am-06	4,89%	56,46%	4,40%	5,13	970

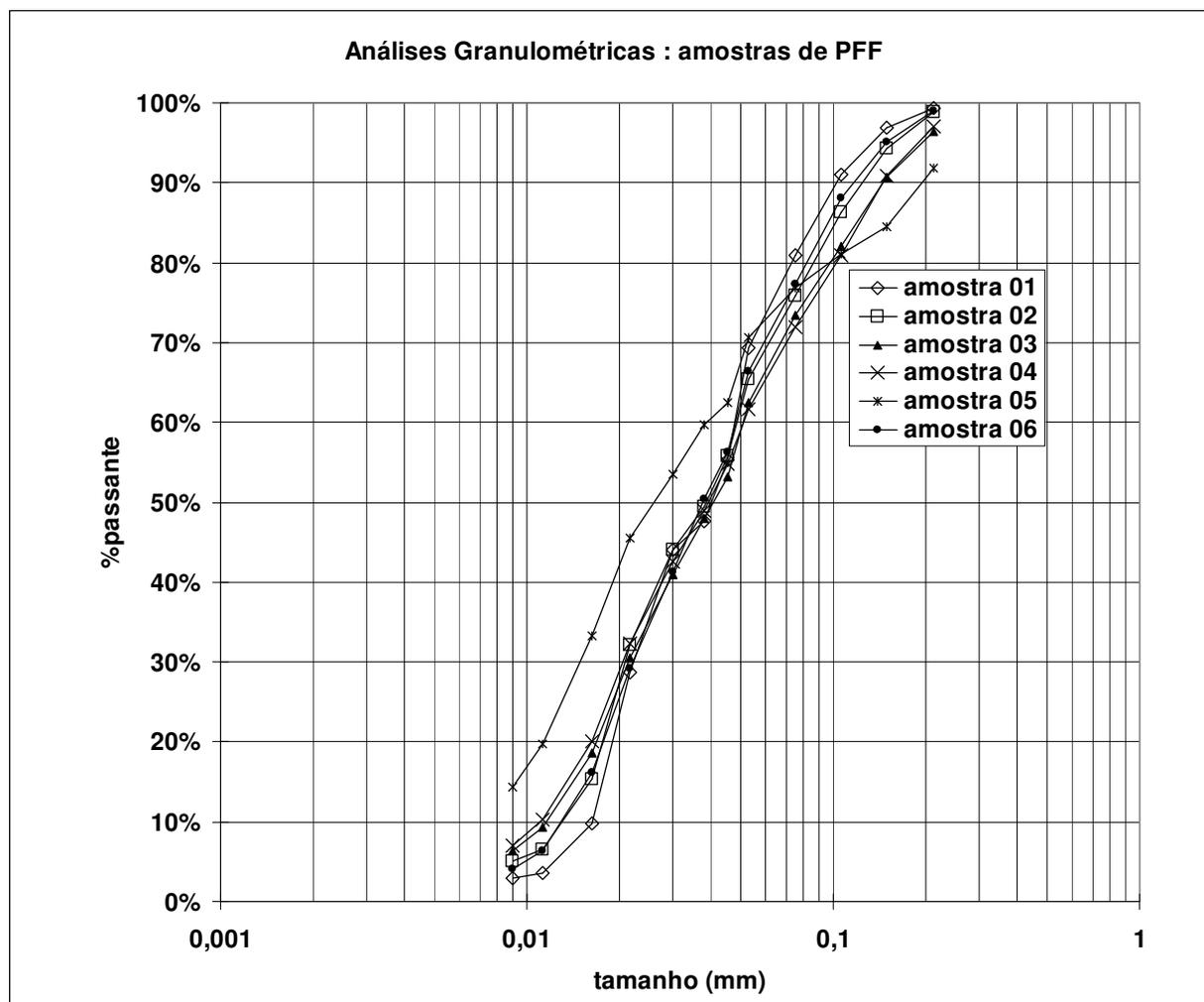


Figura 5.2 - Caracterização Física das Amostras 01 a 06

Os resultados das análises químicas realizadas foram:

**Tabela 5.1 : Resultados das Análises Químicas para as Amostras 01 a 06:**

<b>Caracterização das Amostras</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Análise Química</b>				
	<b>%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>%Fe</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%SiO<sub>2</sub></b>
<b>Am-01</b>	0,51	67,90	0,066	0,024	1,54
<b>Am-02</b>	1,02	67,10	0,242	0,039	1,41
<b>Am-03</b>	0,34	67,65	0,400	0,066	1,17
<b>Am-04</b>	0,58	67,30	0,443	0,050	1,35
<b>Am-05</b>	2,38	64,68	0,335	0,074	2,12
<b>Am-06</b>	0,42	67,50	0,420	0,055	1,25

## 5.2 – Resultados Gerais das Amostras

A Figura 5.3 mostra as médias globais para cada amostra para as umidades e para as taxas unitárias de filtragem, mostrando significativas diferenças de resposta frente ao processo de filtragem para as amostras analisadas. Ressalta-se que as amostras 03, 04 e 06 têm a mesma origem.

A Figura 5.4 mostra a variação da Umidade e da Taxa Unitária de Filtragem em função do Índice de Blaine (IBLA).

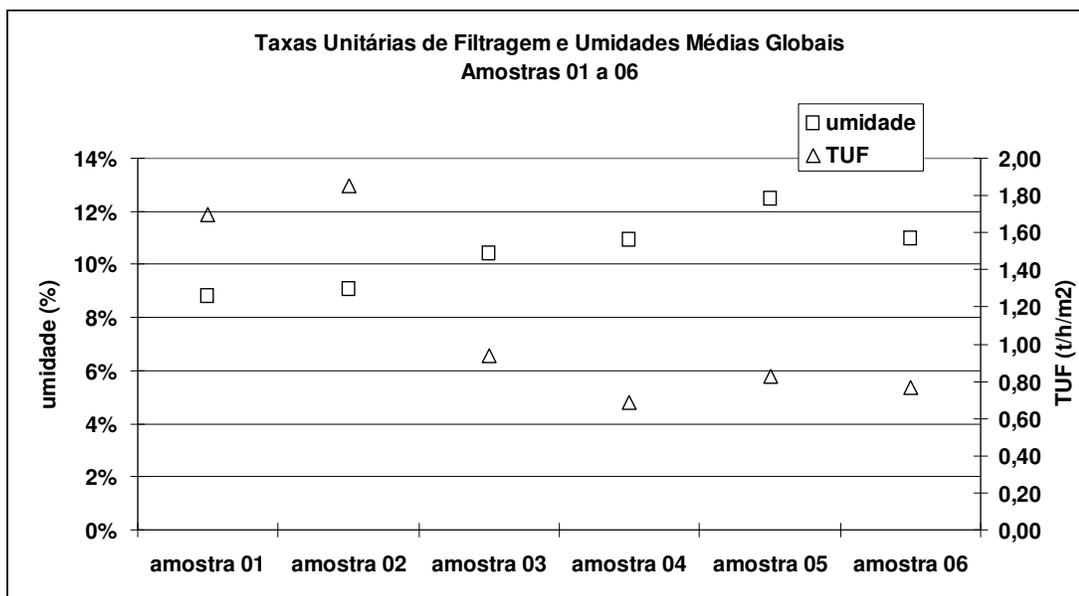
Os testes realizados são mostrados nas Tabelas 5.2 a 5.7. Ressalta-se o tipo de teste (teste de folha, teste de folha modificado ou “top feeding” e Funil de Büchner), tempos de formação e elementos filtrantes utilizados, com as respostas em umidades e taxas unitárias de filtragem.

**Resumo de Todos os Testes de Filtragem  
Amostras 01 a 06**

Médias Globais para as Amostras

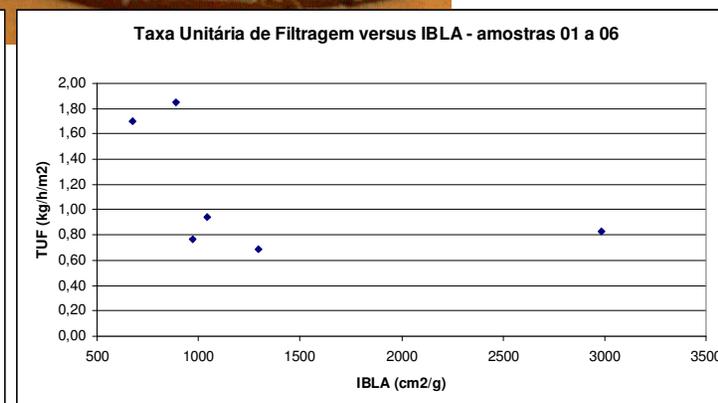
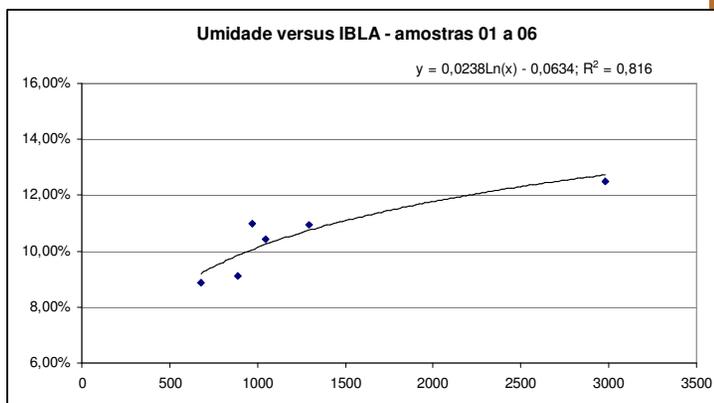
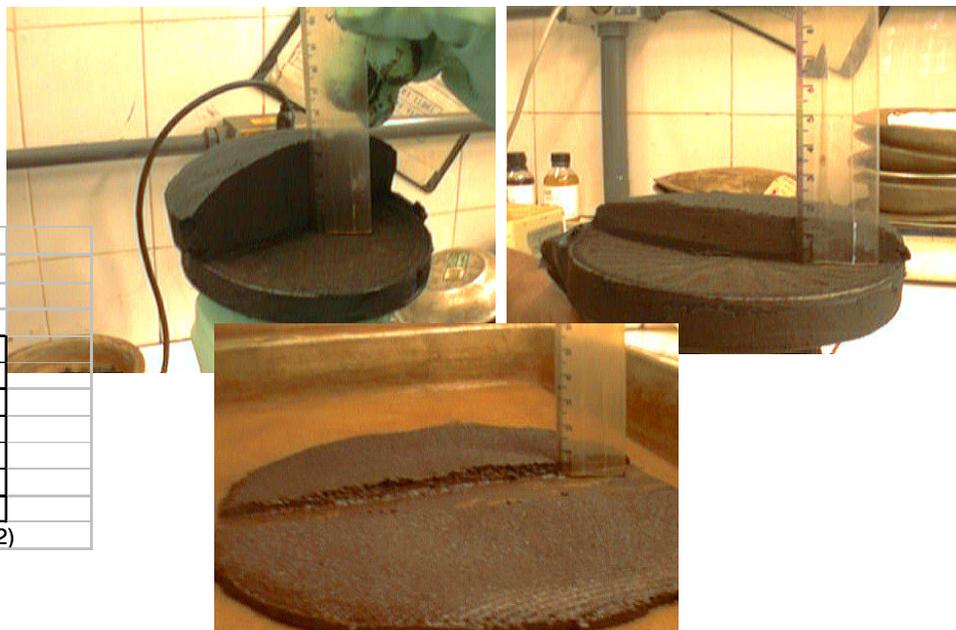
amostra	umidade	TUF
amostra 01	8,85%	1,70
amostra 02	9,10%	1,85
amostra 03	10,42%	0,94
amostra 04	10,93%	0,69
amostra 05	12,50%	0,83
amostra 06	10,99%	0,77

Observação: TUF= taxa unitária de filtragem (t/h/m<sup>2</sup>)



**Figura 5.3: Resultados Globais da Taxa Unitária de Filtragem e da Umidade para as Amostras 01 a 06**

Resumo de Todos os Testes de Filtragem Amostras 01 a 06			
Médias Globais para as Amostras			
amostra	IBLA	umidade	TUF
amostra 01	676	8,85%	1,70
amostra 02	889	9,10%	1,85
amostra 03	1045	10,42%	0,94
amostra 04	1293	10,93%	0,69
amostra 05	2982	12,50%	0,83
amostra 06	970	10,99%	0,77
Observação: TUF= taxa unitária de filtragem (t/h/m <sup>2</sup> )			



**Figura 5.4: Variação da Umidade e da Taxa Unitária de Filtragem em Função do Índice de Blaine (IBLA)**

Tabela 5.2: Resultados da Amostra 01

## Resumo dos Testes de Filtragem: Taxa Unitária de Filtragem, Umidade e outros - Amostra 01

Tipo de Teste	No. Teste	Tempo Formação (s)	Espessura (mm)	%sólidos	%sólidos	Teste Total			Umidade da torta %H <sub>2</sub> O	Elemento Filtrante
				Alimentação (real)	Filtrado	Massa seca (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)		
Teste de Folha	34	8	21	70,0%	2,48	429,4	100	1,7	9,01%	tecido 01
Teste de Folha	35	10	22	70,0%	2,65	424,1	100	1,6	9,41%	tecido 01
Teste de Folha	36	12	23	70,0%	2,39	441,8	100	1,7	9,50%	tecido 01
Funil de Büchner	37	9,8	19	69,23%	0,75	892,20	65,33	2,3	8,38%	tecido 01
Funil de Büchner	38	10,14	19	69,18%	0,81	891,70	67,60	2,2	8,83%	tecido 01
Funil de Büchner	39	13,06	21	69,22%	0,65	986,50	87,07	1,9	8,16%	tecido 01
Funil de Büchner	40	13,43	21	69,27%	0,66	993,00	89,53	1,9	8,44%	tecido 01
Funil de Büchner	41	17,26	25	69,39%	0,65	1178,00	115,07	1,7	8,32%	tecido 01
Funil de Büchner	42	17,11	25	68,98%	0,58	1178,00	114,07	1,7	8,31%	tecido 01
Teste de Folha top	43	10,63	18	68,92%	0,77	389,30	70,87	2,1	9,32%	tecido 01
Teste de Folha top	45	13,32	20	68,21%	0,71	439,72	88,80	1,9	8,62%	tecido 01
Teste de Folha top	46	13,49	20	68,09%	0,73	439,05	89,93	1,9	8,80%	tecido 01
Teste de Folha top	47	15,36	24	69,88%	0,72	524,61	102,40	2,0	8,49%	tecido 01
Teste de Folha top	48	15,28	24	69,14%	0,70	525,35	101,87	2,0	8,54%	tecido 01
Teste de Folha	49	8	20	70,0%	2,39	414,08	100,00	1,6	9,14%	tecido 03
Teste de Folha	50	10	22	70,0%	3,50	429,66	100,00	1,7	9,23%	tecido 03
Teste de Folha	51	12	24	70,0%	3,46	456,05	100,00	1,8	9,29%	tecido 03
Teste de Folha	52	8	20	70,0%	2,57	374,06	100,00	1,5	8,99%	tecido 02
Teste de Folha	53	10	21	70,0%	2,61	407,31	100,00	1,6	9,30%	tecido 02
Teste de Folha	54	12	22	70,0%	3,03	4417,92	100,00	1,6	9,38%	tecido 02
Funil de Büchner	55	12,29	19	69,46%	7,75	872,20	100,00	1,8	8,30%	tecido 02
Funil de Büchner	56	11,97	19	70,44%	5,50	882,80	100,00	1,9	8,47%	tecido 02
Funil de Büchner	57	15,38	21	69,81%	3,29	982,80	100,00	1,6	8,22%	tecido 02
Funil de Büchner	58	15,6	21	69,50%	3,42	981,90	100,00	1,6	8,58%	tecido 02
Funil de Büchner	59	18,67	24	69,07%	3,89	1159,30	100,00	1,6	8,85%	tecido 02
Funil de Büchner	60	18,58	24	69,31%	3,24	1166,50	100,00	1,6	8,38%	tecido 02
Teste de Folha top	61	12,42	18	72,00%	2,05	394,64	82,80	1,8	9,28%	tecido 02
Teste de Folha top	62	12,59	18	70,29%	1,96	395,96	83,93	1,8	9,26%	tecido 02
Teste de Folha top	63	20,68	20	69,41%	1,81	437,53	137,87	1,2	9,51%	tecido 02
Teste de Folha top	64	20,97	20	69,42%	1,73	439,00	139,80	1,2	9,59%	tecido 02
Teste de Folha top	65	27,69	24	70,36%	1,45	524,31	184,60	1,1	9,32%	tecido 02
Teste de Folha top	66	27,21	24	69,76%	1,71	522,65	181,40	1,1	9,02%	tecido 02
Teste de Folha top	67	14,33	18	69,59%	3,38	393,13	95,53	1,6	8,35%	tecido 03
Teste de Folha top	68	14,14	18	70,44%	2,95	395,69	94,27	1,6	9,12%	tecido 03
Teste de Folha top	69	16,21	20	68,90%	3,02	434,84	108,07	1,6	8,90%	tecido 03
Teste de Folha top	70	16,48	20	68,72%	2,83	436,63	109,87	1,5	8,56%	tecido 03
Teste de Folha top	71	17,8	24	69,95%	3,01	521,78	118,67	1,7	8,50%	tecido 03
Teste de Folha top	72	17,66	24	69,81%	2,72	523,47	117,73	1,7	8,48%	tecido 03

Tabela 5.3: Resultados da Amostra 02

## Resumo dos Testes de Filtragem: Taxa Unitária de Filtragem, Umidade e outros - Amostra 02

Tipo de Teste	No. Teste	Tempo Formação (s)	Espessura (mm)	%sólidos	%sólidos	Teste Total			Umidade da torta %H <sub>2</sub> O	Elemento Filtrante
				Alimentação (real)	Filtrado	Massa seca (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)		
Teste de Folha	1	8	19	<b>70,0%</b>	<b>2,89</b>	372,7	100	1,4	10,04%	tecido 01
Teste de Folha	2	10	19	<b>70,0%</b>	<b>2,86</b>	376,7	100	1,5	10,27%	tecido 01
Teste de Folha	3	12	21	<b>70,0%</b>	<b>2,93</b>	405,6	100	1,6	10,38%	tecido 01
Funil de Büchner	4	6,29	15,5	66,91%	0,46	782,10	62,90	2,1	7,96%	tecido 01
Funil de Büchner	5	6,18	15,5	67,14%	0,42	781,00	61,80	2,1	7,89%	tecido 01
Funil de Büchner	6	7,45	20	69,04%	0,73	992,60	74,50	2,2	8,01%	tecido 01
Funil de Büchner	7	8,09	20	68,65%	0,79	980,40	80,90	2,0	7,98%	tecido 01
Funil de Büchner	8	10,09	23	69,04%	0,64	1100,10	100,90	1,8	8,21%	tecido 01
Funil de Büchner	9	10,04	23	69,34%	0,64	1098,00	100,40	1,8	8,39%	tecido 01
Teste de Folha top	10	5,53	15	67,89%	0,88	345,20	55,30	2,4	8,44%	tecido 01
Teste de Folha top	11	5,2	15	69,25%	0,88	345,32	52,00	2,6	8,43%	tecido 01
Teste de Folha top	12	8,1	19	68,72%	0,73	438,28	81,00	2,1	8,75%	tecido 01
Teste de Folha top	13	8,19	19	69,40%	0,79	438,30	81,90	2,1	8,32%	tecido 01
Teste de Folha top	14	10,22	21	68,37%	0,65	486,08	102,20	1,8	8,89%	tecido 01
Teste de Folha top	15	10,03	21	68,91%	0,68	486,52	100,30	1,9	8,65%	tecido 01
Teste de Folha	17	8	19	<b>70,0%</b>	<b>3,61</b>	375,95	100,00	1,5	9,51%	tecido 03
Teste de Folha	18	10	21	<b>70,0%</b>	<b>3,21</b>	395,17	100,00	1,5	9,58%	tecido 03
Teste de Folha	19	12	23	<b>70,0%</b>	<b>3,42</b>	418,36	100,00	1,6	9,88%	tecido 03
Teste de Folha	20	8	18	<b>70,0%</b>	<b>3,87</b>	350,58	100,00	1,4	9,73%	tecido 03
Teste de Folha	21	10	19	<b>70,0%</b>	<b>3,16</b>	353,29	100,00	1,4	9,76%	tecido 03
Teste de Folha	22	12	21	<b>70,0%</b>	<b>2,80</b>	388,42	100,00	1,5	9,98%	tecido 03
Funil de Büchner	23	6,49	15	66,59%	9,03	751,10	64,90	1,9	8,14%	tecido 02
Funil de Büchner	24	6,23	15	66,72%	5,79	763,60	62,30	2,1	8,23%	tecido 02
Funil de Büchner	25	7,97	19	68,76%	2,54	983,80	79,70	2,1	8,32%	tecido 02
Funil de Büchner	26	8,21	19	69,05%	2,96	982,60	82,10	2,0	8,32%	tecido 02
Funil de Büchner	27	9,28	22	68,94%	5,88	1076,90	92,80	2,0	8,36%	tecido 02
Funil de Büchner	28	9,37	22	68,82%	6,52	1072,00	93,70	1,9	8,38%	tecido 02
Teste de Folha top	29	7,92	15	67,04%	2,21	342,78	79,20	1,7	11,81%	tecido 02
Teste de Folha top	30	7,43	15	69,29%	2,19	343,63	74,30	1,8	9,82%	tecido 02
Teste de Folha top	31	10,33	19	69,70%	1,61	437,86	103,30	1,6	9,76%	tecido 02
Teste de Folha top	32	10,03	19	69,66%	1,87	436,04	100,30	1,7	9,76%	tecido 02
Teste de Folha top	33	13,47	21	69,34%	1,35	484,98	134,70	1,4	10,57%	tecido 02
Teste de Folha top	34	13,76	21	68,91%	1,76	483,55	137,60	1,4	10,30%	tecido 02
Teste de Folha top	35	6,01	15	69,12%	4,41	341,68	60,10	2,2	8,84%	tecido 03
Teste de Folha top	36	5,94	15	69,11%	4,38	341,66	59,40	2,2	8,85%	tecido 03
Teste de Folha top	37	8,37	19	68,87%	3,36	434,85	83,70	2,0	9,00%	tecido 03
Teste de Folha top	38	8,53	19	69,02%	3,08	436,15	85,30	2,0	9,15%	tecido 03
Teste de Folha top	39	8,7	21	68,81%	3,12	481,95	87,00	2,1	9,20%	tecido 03
Teste de Folha top	40	10,06	21	69,07%	3,07	482,42	100,60	1,9	9,15%	tecido 03

Tabela 5.4: Resultados da Amostra 03

## Resumo dos Testes de Filtragem: Taxa Unitária de Filtragem, Umidade e outros - Amostra 03

Tipo de Teste	No. Teste	Tempo Formação (s)	Espessura (mm)	%sólidos		Teste Total			Umidade da torta %H <sub>2</sub> O	Elemento Filtrante
				Alimentação (real)	Filtrado	Massa seca (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)		
Funil de Büchner	13	5,31	10,5	69,09%	0,83	518,00	66,38	1,31	9,95%	tecido 01
Funil de Büchner	14	5,09	10,5	67,85%	0,90	518,10	63,63	1,37	9,85%	tecido 01
Funil de Büchner	15	8,31	14	69,62%	0,75	678,30	103,88	1,10	9,94%	tecido 01
Funil de Büchner	16	8,43	14	69,27%	0,76	679,80	105,38	1,09	9,80%	tecido 01
Funil de Büchner	17	12,14	16	69,00%	0,62	783,90	151,75	0,87	10,00%	tecido 01
Funil de Büchner	18	12,48	16	69,29%	0,66	784,70	156,00	0,85	10,01%	tecido 01
Teste de Folha top	25	5,29	10	68,27%	0,99	231,38	66,13	1,36	9,37%	tecido 01
Teste de Folha top	26	5,23	10	69,07%	0,95	231,77	65,38	1,37	9,43%	tecido 01
Teste de Folha top	27	8,32	13	69,60%	0,71	301,51	104,00	1,12	9,59%	tecido 01
Teste de Folha top	28	8,41	13	70,13%	0,83	302,09	105,13	1,11	9,31%	tecido 01
Teste de Folha top	29	10,73	15	68,35%	0,63	347,73	134,13	1,00	9,70%	tecido 01
Teste de Folha top	30	10,91	15	68,72%	0,63	349,16	136,38	0,99	9,64%	tecido 01
Teste de Folha	37	8	12	<b>70,00%</b>	<b>3,31</b>	225,68	100,00	0,87	10,43%	tecido 02
Teste de Folha	38	10	12	<b>70,00%</b>	<b>3,34</b>	231,19	100,00	0,90	10,93%	tecido 02
Teste de Folha	39	12	14	<b>70,00%</b>	<b>2,81</b>	255,07	100,00	0,99	11,04%	tecido 02
Teste de Folha	40	8	10	<b>70,00%</b>	<b>3,55</b>	171,97	100,00	0,67	11,89%	tecido 02
Teste de Folha	41	10	10	<b>70,00%</b>	<b>3,62</b>	177,26	100,00	0,69	12,03%	tecido 02
Teste de Folha	42	12	10	<b>70,00%</b>	<b>3,29</b>	182,76	100,00	0,71	12,40%	tecido 02
Funil de Büchner	44	5,63	10	68,54%	3,23	515,74	70,38	1,23	9,00%	tecido 02
Funil de Büchner	45	9,18	14	68,90%	2,83	671,00	114,75	0,98	8,97%	tecido 02
Funil de Büchner	46	9,02	14	68,90%	2,67	670,40	112,75	1,00	8,88%	tecido 02
Funil de Büchner	47	12,51	16	68,90%	2,46	774,70	156,38	0,83	9,01%	tecido 02
Funil de Büchner	48	12,97	16	68,90%	2,14	775,90	162,13	0,81	9,02%	tecido 02
Teste de Folha top	55	10,22	10	70,04%	1,23	231,03	127,75	0,70	12,55%	tecido 02
Teste de Folha top	56	9,87	10	69,97%	1,36	230,30	123,38	0,72	11,94%	tecido 02
Teste de Folha top	57	15,97	13	69,75%	1,08	299,23	199,63	0,58	12,35%	tecido 02
Teste de Folha top	58	15,23	13	69,35%	1,04	298,60	190,38	0,61	12,44%	tecido 02
Teste de Folha top	59	20,77	15	69,97%	0,98	345,74	259,63	0,52	13,68%	tecido 02
Teste de Folha top	60	21,81	15	69,40%	0,94	344,96	272,63	0,49	13,64%	tecido 02
Teste de Folha top	67	6,06	10	69,68%	2,05	229,92	75,75	1,18	9,70%	tecido 03
Teste de Folha top	68	5,86	10	69,02%	2,24	229,81	73,25	1,22	9,43%	tecido 03
Teste de Folha top	69	9,83	13	68,53%	1,70	299,09	122,88	0,94	9,70%	tecido 03
Teste de Folha top	70	9,96	13	68,64%	2,08	298,00	124,50	0,93	9,47%	tecido 03
Teste de Folha top	71	11,64	15	68,28%	2,25	343,27	145,50	0,91	9,68%	tecido 03
Teste de Folha top	72	12,02	15	68,35%	1,39	344,79	150,25	0,89	10,04%	tecido 03

Tabela 5.5: Resultados da Amostra 04

## Resumo dos Testes de Filtragem: Taxa Unitária de Filtragem, Umidade e outros - Amostra 04

Tipo de Teste	No. Teste	Tempo Formação (s)	Espessura (mm)	%sólidos Alimentação (real)	%sólidos Filtrado	Teste Total			Umidade da torta %H <sub>2</sub> O	Elemento Filtrante
						Massa seca (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)		
Teste de Folha	1	8	10	70,0%	4,10	180,27	100	0,70	12,83%	tecido 01
Teste de Folha	2	10	9	70,0%	1,85	167,32	100	0,65	13,66%	tecido 01
Teste de Folha	3	12	11	70,0%	2,09	191,48	100	0,74	13,47%	tecido 01
Teste de Folha	4	8	12	70,0%	3,05	220,72	100	0,86	11,36%	tecido 01
Teste de Folha	5	10	13	70,0%	2,40	234,66	100	0,91	11,78%	tecido 01
Teste de Folha	6	12	13	70,0%	2,56	228,40	100	0,89	11,92%	tecido 01
Funil de Büchner	7	8,26	10	68,5%	0,87	519,5	103,25	0,8	9,95%	tecido 01
Funil de Büchner	8	8,4	10	69,9%	0,78	528	105	0,8	9,85%	tecido 01
Funil de Büchner	9	14,87	14	68,4%	0,72	675,7	185,875	0,6	9,94%	tecido 01
Funil de Büchner	10	14,02	14	69,05%	0,72	674,90	175,25	0,6	9,80%	tecido 01
Funil de Büchner	11	18,81	16	68,85%	0,65	777,20	235,13	0,6	10,00%	tecido 01
Funil de Büchner	12	18,88	16	68,18%	0,66	779,50	236,00	0,6	10,01%	tecido 01
Teste de Folha top	19	6,77	10	68,16%	0,90	229,01	84,63	1,0	9,94%	tecido 01
Teste de Folha top	20	6,92	10	67,49%	0,78	230,86	86,50	1,0	9,96%	tecido 01
Teste de Folha top	21	13,06	13	68,08%	0,72	300,39	163,25	0,7	10,49%	tecido 01
Teste de Folha top	22	12,63	13	68,81%	0,76	301,03	157,88	0,7	10,35%	tecido 01
Teste de Folha top	23	17,96	15	68,03%	0,60	346,36	224,50	0,6	10,62%	tecido 01
Teste de Folha top	24	17,49	15	67,98%	0,53	346,57	218,63	0,6	10,70%	tecido 01
Teste de Folha	31	8	9	70,0%	5,23	182,18	100,00	0,71	11,57%	tecido 03
Teste de Folha	32	8	9	70,0%	3,05	172,94	100,00	0,67	12,17%	tecido 03
Teste de Folha	33	10	10	70,0%	3,04	183,60	100,00	0,71	12,22%	tecido 03
Teste de Folha	34	10	11	70,0%	2,92	231,18	100,00	0,90	10,60%	tecido 03
Teste de Folha	35	12	13	70,0%	3,47	241,27	100,00	0,93	10,84%	tecido 03
Teste de Folha	36	12	14	70,0%	4,25	255,22	100,00	0,99	11,10%	tecido 03
Funil de Büchner	49	9,18	10	68,88%	2,81	515,87	114,75	0,8	9,38%	tecido 02
Funil de Büchner	50	9,37	10	68,53%	2,65	516,15	117,13	0,7	9,37%	tecido 02
Funil de Büchner	51	14,94	13	68,90%	2,36	673,80	186,75	0,6	9,50%	tecido 02
Funil de Büchner	52	15,02	13	68,78%	2,47	671,80	187,75	0,6	9,63%	tecido 02
Funil de Büchner	53	20,31	15	68,46%	2,04	777,50	253,88	0,5	9,62%	tecido 02
Funil de Büchner	54	20,71	15	68,69%	1,78	778,90	258,88	0,5	9,66%	tecido 02
Teste de Folha top	61	13,45	10	70,37%	1,40	229,86	168,13	0,5	11,94%	tecido 02
Teste de Folha top	62	14,11	10	71,33%	1,48	231,51	176,38	0,5	11,95%	tecido 02
Teste de Folha top	63	21,13	13	69,82%	1,00	299,13	264,13	0,4	12,74%	tecido 02
Teste de Folha top	64	20,77	13	70,23%	1,22	298,56	259,63	0,4	11,55%	tecido 02
Teste de Folha top	65	26,14	15	69,78%	0,88	345,29	326,75	0,4	13,50%	tecido 02
Teste de Folha top	66	26,36	15	69,89%	0,85	345,77	329,50	0,4	12,93%	tecido 02
Teste de Folha top	73	8,03	10	70,00%	1,91	230,84	100,38	0,9	9,97%	tecido 03
Teste de Folha top	74	8,31	10	69,52%	1,88	231,94	103,88	0,9	10,19%	tecido 03
Teste de Folha top	75	14,57	13	70,18%	1,84	300,93	182,13	0,6	10,31%	tecido 03
Teste de Folha top	76	14,03	13	69,76%	1,42	301,09	175,38	0,7	10,44%	tecido 03
Teste de Folha top	77	19,53	15	68,62%	1,96	344,80	244,13	0,5	10,57%	tecido 03
Teste de Folha top	78	19,33	15	69,42%	1,60	346,65	241,63	0,6	10,70%	tecido 03

Tabela 5.6: Resultados da Amostra 05

## Resumo dos Testes de Filtragem: Taxa Unitária de Filtragem, Umidade e outros - Amostra 05

Tipo de Teste	No. Teste	Tempo	Espessura	%sólidos	%sólidos	Teste Total			Umidade	Elemento
Funil de Büchner	1	130	14	62,1%	1,33	746,1	160	0,8	12,64%	tecido 04
Funil de Büchner	2	135	14	62,2%	2,38	745,4	165	0,8	12,78%	tecido 04
Funil de Büchner	3	71	14	62,7%	0,25	763,8	101	1,3	14,56%	tecido 04
Funil de Büchner	4	56	14	63,05%	0,14	765,40	86,00	1,5	16,29%	tecido 04
Funil de Büchner	5	46	9	59,72%	15,04	442,03	76,00	1,0	12,37%	tecido 04
Funil de Büchner	6	50	9	61,77%	4,13	485,44	80,00	1,0	12,38%	tecido 04
Funil de Büchner	7	31	10	62,27%	0,39	504,55	61,00	1,4	14,31%	tecido 04
Funil de Büchner	8	27	10	62,83%	0,46	505,28	57,00	1,5	15,88%	tecido 04
Funil de Büchner	9	136	14	63,22%	0,05	765,10	166,00	0,8	12,69%	tecido 05
Funil de Büchner	10	139	14	62,33%	0,03	769,50	169,00	0,8	12,63%	tecido 05
Funil de Büchner	11	44	15	64,11%	0,05	765,10	74,00	1,7	15,88%	tecido 05
Funil de Büchner	12	42	15	64,16%	0,08	768,80	72,00	1,8	16,28%	tecido 05
Funil de Büchner	13	64	9	62,70%	0,18	508,62	94,00	0,9	12,52%	tecido 05
Funil de Büchner	14	66	9	63,88%	0,08	510,16	96,00	0,9	12,38%	tecido 05
Funil de Büchner	15	22	10	63,73%	0,08	511,76	52,00	1,7	15,70%	tecido 05
Funil de Büchner	16	20	10	63,56%	0,15	509,96	50,00	1,7	15,64%	tecido 05
Funil de Büchner	17	152	14	64,24%	0,43	766,50	182,00	0,7	12,69%	tecido 06
Funil de Büchner	18	147	14	64,33%	0,31	767,90	177,00	0,7	12,56%	tecido 06
Funil de Büchner	19	44	15	64,63%	0,11	769,70	74,00	1,7	15,70%	tecido 06
Funil de Büchner	20	45	15	64,65%	0,09	770,70	75,00	1,7	15,70%	tecido 06
Funil de Büchner	21	67	9	64,20%	0,25	510,07	97,00	0,9	12,17%	tecido 06
Funil de Büchner	22	69	9	64,24%	0,12	511,66	99,00	0,9	12,17%	tecido 06
Funil de Büchner	23	21	10	64,41%	0,14	512,44	51,00	1,7	15,41%	tecido 06
Funil de Büchner	24	21	10	64,47%	0,13	512,70	51,00	1,7	15,31%	tecido 06
Funil de Büchner	25	137	14	63,05%	0,56	744,30	167,00	0,7	12,60%	tecido 07
Funil de Büchner	26	145	14	63,38%	0,24	746,50	175,00	0,7	12,61%	tecido 07
Funil de Büchner	27	48	15	64,32%	0,14	768,60	78,00	1,7	15,83%	tecido 07
Funil de Büchner	28	46	15	64,44%	0,15	765,90	76,00	1,7	16,09%	tecido 07
Funil de Büchner	29	64	9	62,47%	0,28	483,52	94,00	0,9	12,16%	tecido 07
Funil de Büchner	30	61	9	62,62%	0,43	485,01	91,00	0,9	12,31%	tecido 07
Funil de Büchner	31	20	10	63,86%	0,16	508,12	50,00	1,7	15,86%	tecido 07
Funil de Büchner	32	21	10	63,93%	0,17	509,40	51,00	1,7	15,80%	tecido 07
Funil de Büchner	33	153	14	63,91%	0,10	765,80	183,00	0,7	12,82%	tecido 08
Funil de Büchner	34	147	14	64,40%	0,43	765,90	177,00	0,7	12,77%	tecido 08
Funil de Büchner	35	44	15	64,86%	0,06	768,50	74,00	1,7	15,83%	tecido 08
Funil de Büchner	36	41	15	64,81%	0,05	769,20	71,00	1,8	15,93%	tecido 08
Funil de Büchner	37	68	9	64,54%	0,75	507,05	98,00	0,9	12,35%	tecido 08
Funil de Büchner	38	64	9	64,38%	0,23	508,28	94,00	0,9	12,34%	tecido 08
Funil de Büchner	39	19	10	64,46%	0,07	511,72	49,00	1,8	15,54%	tecido 08
Funil de Büchner	40	20	10	64,63%	0,08	511,20	50,00	1,7	15,80%	tecido 08

Tabela 5.7: Resultados da Amostra 06

## Resumo dos Testes de Filtragem: Taxa Unitária de Filtragem, Umidade e outros - Amostra 06

Tipo de Teste	No. Teste	Tempo Formação (s)	Espessura (mm)	%sólidos	%sólidos	Teste Total			Umidade da torta %H <sub>2</sub> O	tecido
				Alimentação (real)	Filtrado	Massa seca (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)		
Teste de Folha top	59	20,46	20	<b>69,7%</b>	<b>0,65</b>	479,46	255,75	0,7	12,55%	tecido 01
Teste de Folha top	60	26	20	<b>69,9%</b>	<b>0,30</b>	480,26	325	0,6	11,20%	tecido 01
Teste de Folha top	61	16,9	20	<b>69,8%</b>	<b>0,13</b>	482,65	211,25	0,9	9,85%	tecido 02
Teste de Folha top	62	23,7	20	70,02%	3,65	476,78	296,25	0,6	13,79%	tecido 02
Teste de Folha top	63	16,28	20	69,97%	0,18	479,82	203,50	0,9	10,13%	tecido 02
Teste de Folha top	64	24,12	20	70,44%	0,18	479,82	301,50	0,6	10,13%	tecido 02
Teste de Folha top	65	21,86	20	70,13%	1,82	479,25	273,25	0,7	12,62%	tecido 03
Teste de Folha top	66	17,65	20	70,20%	0,28	483,17	220,63	0,8	9,60%	tecido 03
Teste de Folha top	67	21,89	20	71,08%	1,67	481,53	273,63	0,7	12,18%	tecido 03
Teste de Folha top	68	21,67	20	70,89%	0,30	486,56	270,88	0,7	12,25%	tecido 03
Teste de Folha top	69	20,58	20	70,60%	0,09	485,21	257,25	0,7	10,70%	tecido 03
Teste de Folha top	70	20,43	20	70,31%	0,44	482,46	255,38	0,7	11,07%	tecido 03
Teste de Folha top	71	17,92	20	70,92%	0,33	488,37	224,00	0,8	11,97%	tecido 01
Teste de Folha top	72	17,88	20	70,52%	0,72	486,10	223,50	0,8	10,60%	tecido 01
Teste de Folha top	73	15,03	20	<b>71,38%</b>	<b>0,03</b>	490,77	187,88	1,0	9,05%	tecido 09
Teste de Folha top	74	15,29	20	<b>71,89%</b>	<b>0,56</b>	487,99	191,13	1,0	9,15%	tecido 09
Teste de Folha top	75	20,14	20	<b>71,87%</b>	<b>0,04</b>	492,14	251,75	0,8	10,00%	tecido 09

De acordo com Werkema (1996), a análise a seguir baseia-se na técnica de experimentos fatoriais com dois ou mais fatores. Analisa-se a significância estatística para os fatores:

- Fator A: tipo de tecido ou elemento filtrante (amostras 01 a 05);
- Fator B: tipo de teste de filtração (amostras 01, 02, 03, 04) ou dosagem de floculante (amostra 05).

**A amostra 06 foi analisada apenas para o fator elemento filtrante, não se executando, portanto, o estudo estatístico para esta amostra.**

A Tabela 5.8, a seguir, mostra as médias obtidas para os resultados de umidades e taxas unitárias de filtração, com a influência dos fatores A e B.

A Tabela 5.9 mostra os resultados das análises de significância estatística para os fatores A e B.

Destacam-se, principalmente:

- Fator B para a amostra 05: dosagem de reagentes tanto para a taxa unitária de filtração e para a umidade;
- Fator B para amostra 02: tipo de teste para a amostra B na umidade, e, subordinadamente, na taxa unitária de filtração.

Em segundo plano temos, ainda, os fatores relevantes:

- Fator B: tipo de teste para umidade final nos testes das amostras 03, 04 e 05;
- Fator B: tipo de teste para a taxa unitária de filtração para a amostra 02;
- Fator A: elemento filtrante para a umidade da amostra 02;
- Interação A/B: para a umidade da amostra 03.

Para a amostra 01 nenhum dos fatores se mostrou significativo.

Tabela 5.08: Resultados das Médias de Umidades e Taxas Unitárias de Filtragem para os Fatores A e B – Amostras 01 a 06

Resultados para Amostra 01						
variável = umidade						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha	9,31%	9,22%	9,22%			9,25%
Teste de Folha Modificado	8,75%	9,33%	8,65%			8,92%
Funil de Büchner	8,41%	8,47%				8,44%
<b>Média</b>	<b>8,72%</b>	<b>8,96%</b>	<b>8,84%</b>			<b>8,85%</b>
variável = taxa unitária de filtragem						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha	1,7	1,6	1,7			1,63
Teste de Folha Modificado	2,0	1,4	1,6			1,65
Funil de Büchner	2,0	1,7				1,81
<b>Média</b>	<b>1,91</b>	<b>1,53</b>	<b>1,64</b>			<b>1,70</b>

Resultados para Amostra 02						
variável = umidade						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha	10,23%		9,74%			9,90%
Teste de Folha Modificado	8,58%	10,34%	9,03%			9,32%
Funil de Büchner	8,07%	8,29%				8,18%
<b>Média</b>	<b>8,71%</b>	<b>9,31%</b>	<b>9,39%</b>			<b>9,10%</b>
variável = taxa unitária de filtragem						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha	1,5		1,5			1,48
Teste de Folha Modificado	2,1	1,6	2,1			1,94
Funil de Büchner	2,0	2,0				2,01
<b>Média</b>	<b>1,97</b>	<b>1,79</b>	<b>1,77</b>			<b>1,85</b>

Resultados para Amostra 03						
variável = umidade						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha		11,45%				11,45%
Teste de Folha Modificado	9,51%	12,77%	9,67%			10,65%
Funil de Büchner	9,93%	8,97%				9,49%
<b>Média</b>	<b>9,72%</b>	<b>11,19%</b>	<b>9,67%</b>			<b>10,42%</b>
variável = taxa unitária de filtragem						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha		0,8				0,77
Teste de Folha Modificado	1,2	0,6	1,0			0,92
Funil de Büchner	1,1	1,0				1,04
<b>Média</b>	<b>1,13</b>	<b>0,77</b>	<b>1,01</b>			<b>0,94</b>

Resultados para Amostra 04						
variável = umidade						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha	12,50%		11,42%			11,96%
Teste de Folha Modificado	10,34%	12,44%	10,36%			11,05%
Funil de Büchner	9,93%	9,53%				9,73%
<b>Média</b>	<b>10,92%</b>	<b>10,98%</b>	<b>10,89%</b>			<b>10,93%</b>
variável = taxa unitária de filtragem						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03			
Teste de Folha	0,8		0,8			0,81
Teste de Folha Modificado	0,8	0,5	0,7			0,65
Funil de Büchner	0,7	0,6				0,65
<b>Média</b>	<b>0,75</b>	<b>0,54</b>	<b>0,76</b>			<b>0,69</b>

Resultados para Amostra 05						
variável = umidade						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 04	Tecido 05	Tecido 06	Tecido 07	Tecido 08	
Dosagem Branco	12,54%	12,55%	12,40%	12,42%	12,57%	12,50%
Dosagem 60g/t	15,26%	15,88%	15,53%	15,90%	15,77%	15,67%
<b>Média</b>	<b>13,90%</b>	<b>14,21%</b>	<b>13,96%</b>	<b>14,16%</b>	<b>14,17%</b>	<b>14,08%</b>
variável = taxa unitária de filtragem						
Fator B	Fator A					Média
	Tecido 04	Tecido 05	Tecido 06	Tecido 07	Tecido 08	
Dosagem Branco	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,83
Dosagem 60g/t	1,4	1,7	1,7	1,7	1,8	1,66
<b>Média</b>	<b>1,15</b>	<b>1,28</b>	<b>1,26</b>	<b>1,25</b>	<b>1,28</b>	<b>1,24</b>

Resultados para Amostra 06							
variável = umidade							
Fator B	Fator A						Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03	Tecido 09			
Teste de Folha	10,97%	11,40%	9,40%	10,99%		10,99%	
Teste de Folha Modificado							
Funil de Büchner							
<b>Média</b>	<b>11,58%</b>	<b>10,97%</b>	<b>11,40%</b>	<b>9,40%</b>		<b>10,99%</b>	
variável = taxa unitária de filtragem							
Fator B	Fator A						Média
	Tecido 01	Tecido 02	Tecido 03	Tecido 09			
Teste de Folha	0,8	0,7	0,9	0,8		0,77	
Teste de Folha Modificado							
Funil de Büchner							
<b>Média</b>	<b>0,75</b>	<b>0,76</b>	<b>0,73</b>	<b>0,92</b>		<b>0,77</b>	

**Tabela 5.09: Significância Estatística para os Fatores A e B para as Umidades e para as Taxas Unitárias de Filtragem (intervalo de confiança de 95%)**

amostras \ fatores		Umidade			Taxa Unitária de Filtragem		
		Fator B	Fator A	Interação	Fator B	Fator A	Interação
amostra 01	F <sub>O</sub>	1,20	0,63	0,66	0,89	1,02	0,22
	F <sub>5%</sub>	3,49	3,49	2,87	3,49	3,49	2,87
amostra 02	F <sub>O</sub>	<b>73,97</b>	<b>11,38</b>	<b>7,58</b>	<b>30,59</b>	<b>4,07</b>	<b>3,75</b>
	F <sub>5%</sub>	<b>3,49</b>	<b>3,49</b>	<b>2,87</b>	<b>3,49</b>	<b>3,49</b>	<b>2,87</b>
amostra 03	F <sub>O</sub>	<b>36,34</b>	<b>8,81</b>	<b>14,31</b>	<b>5,25</b>	2,10	1,21
	F <sub>5%</sub>	<b>3,49</b>	<b>3,49</b>	<b>2,87</b>	<b>3,49</b>	3,49	2,87
amostra 04	F <sub>O</sub>	<b>36,48</b>	<b>6,55</b>	<b>4,16</b>	3,95	2,12	1,42
	F <sub>5%</sub>	<b>3,49</b>	<b>3,49</b>	<b>2,87</b>	3,49	3,49	2,87
amostra 05	F <sub>O</sub>	<b>74,17</b>	1,82	0,48	<b>102,81</b>	<b>5,66</b>	3,60
	F <sub>5%</sub>	<b>3,26</b>	4,75	3,26	<b>3,26</b>	<b>4,75</b>	3,26

Observações: Fator A: elemento filtrante para todas as amostras;  
Fator B: tipo de teste para amostras 01 a 04;  
dosagem de reagente para amostra 05;

As umidades, em geral, foram mais afetadas do que as taxas unitárias de filtragem pelos fatores analisados, a menos da dosagem de reagentes para a amostra 05, como destacado acima.

Verificou-se que o elemento filtrante, Fator A, tem menor influência do que o tipo de testes ou, sobretudo, a utilização de reagentes. Pode-se inferir maior influência das características das tortas frente aos meios filtrantes. No entanto, industrialmente e para as aplicações em questão, os elementos filtrantes mostram-se importantes nos aspectos de claridade e, portanto, percentagem de sólidos no filtrado. Podem causar sérios danos aos equipamentos, caso esta % sólidos se eleve acima determinados níveis (usualmente 0,5%). Verificou-se, em testes executados posteriormente, a influência da dosagem de floculantes na qualidade deste filtrado, reduzindo significativamente a porcentagem de sólidos, mesmo em baixas dosagens (5g/t) (Amarante, 2000).

Nota-se uma tendência no desenvolvimento de testes de laboratório com maior atenção às características da torta, e, mesmo, modelos bastante robustos têm sido desenvolvidos, inclusive com análise estrutural da torta, bem como o uso da Mecatrônica. (Bokela, 2000; Bourgeois, 1997 e 1998; Tarleton, 2001; Valadão, 1999; Yoon, 2002).

A Figura 5.05 mostra a variação da espessura em função do tempo de formação para as amostras de 01 a 04 e por método de teste de filtração. Nesta figura pode-se ressaltar que os métodos apresentam maiores variações nos resultados para a amostra 01. Isto se deve, possivelmente, à distribuição granulométrica desta amostra ter menor proporção de finos, especialmente abaixo de 0,020mm. Pode ter ocorrido certa segregação granulométrica na torta dos testes de filtração para a amostra 01. Nota-se, ainda, a maior inclinação das curvas para a amostra 02, mostrando uma formação mais rápida desta amostra. Já para as amostras 03 e 04 esta inclinação é mais suave.

A Figura 5.06 apresenta a grande dispersão para os resultados classificados pelos elementos filtrantes. Isto denota uma diferença de comportamento entre as amostras, fator de maior influência que o tipo de elemento filtrante.

A avaliação da porosidade das amostras em função das espessuras e dos tipos de teste de filtração é apresentada na Figura 5.07. Pode-se observar uma porosidade mais baixa para os testes de Funil de Büchner para as amostras 01 a 04. Na amostra 05 esta porosidade é avaliada em função da dosagem de agregante, mostrando uma forte dependência para esta variável, responsável pela maior permeabilidade das tortas ao se utilizar este auxiliar de filtração. Já os testes realizados com a amostra 06 mostram a boa reprodutibilidade da porosidade, mesmo que se tenha utilizado neste caso diferentes elementos filtrantes.

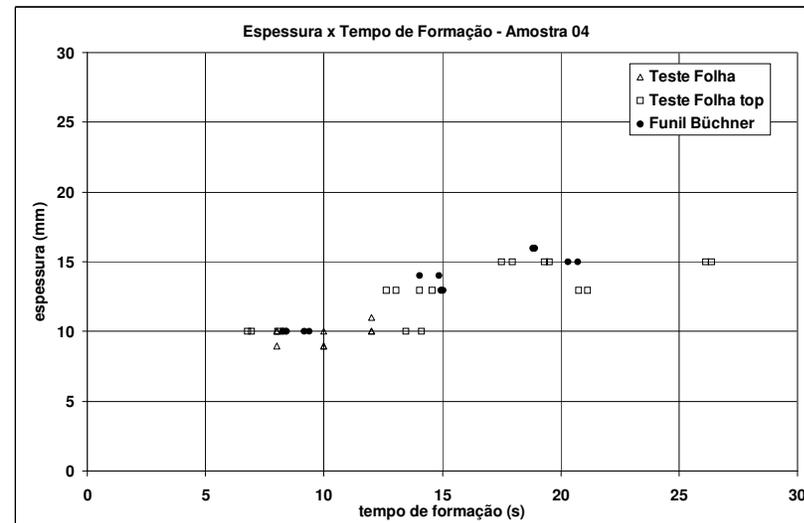
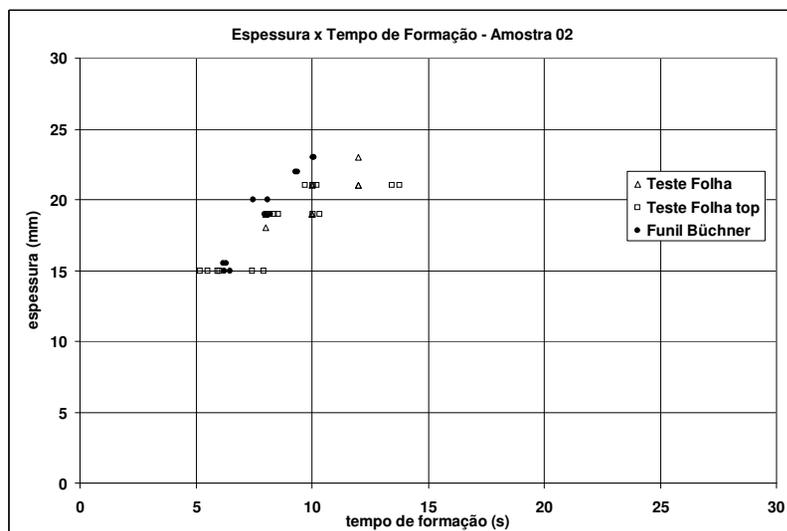
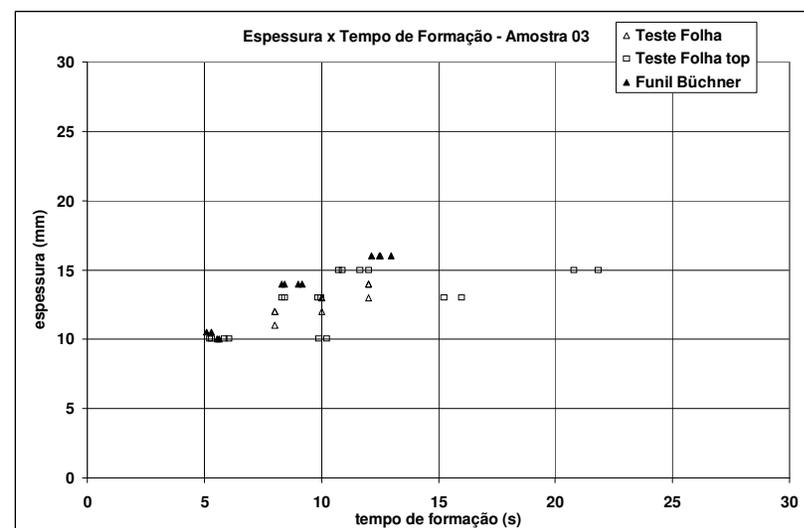
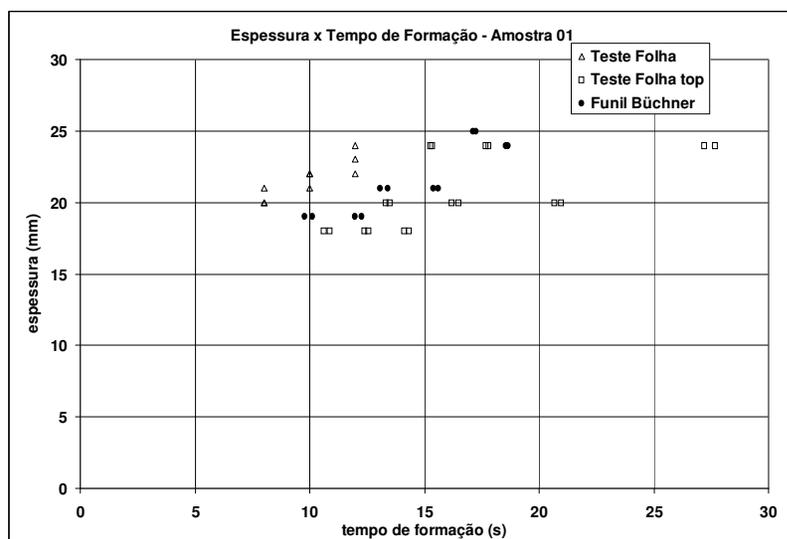
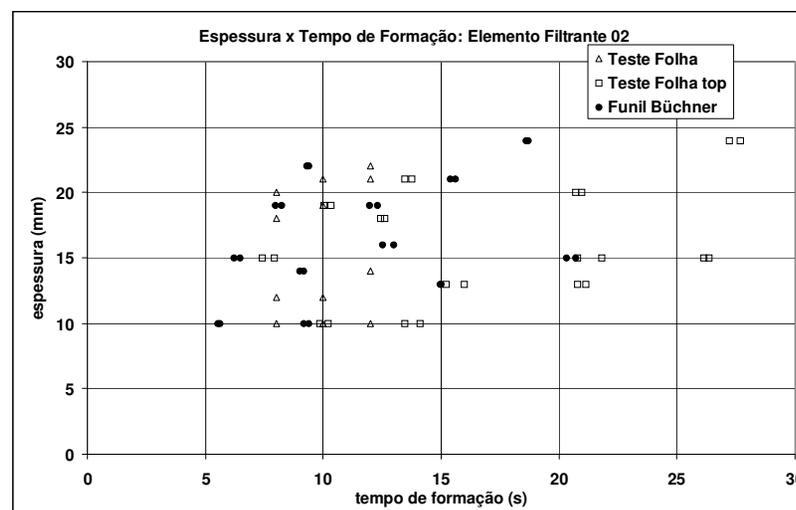
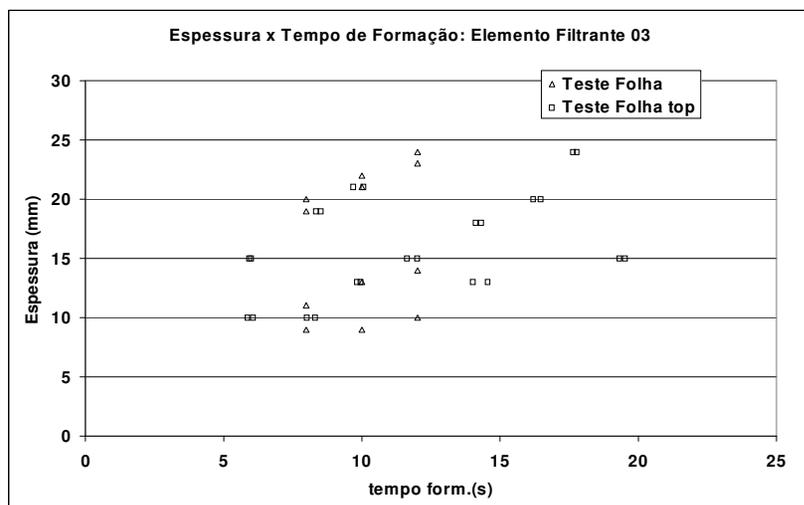
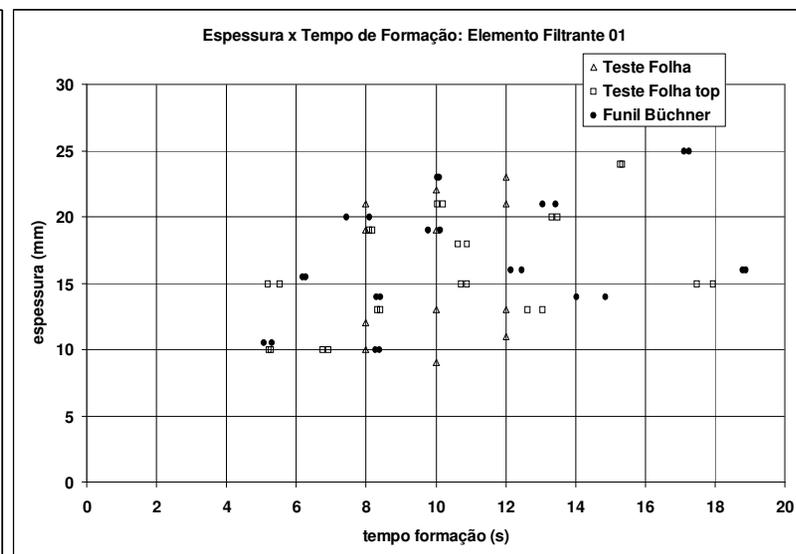
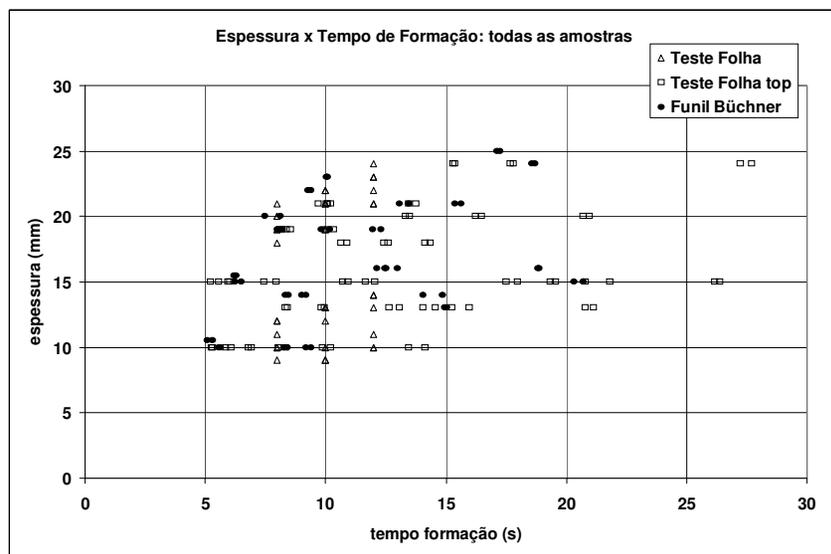


Figura 5.05: Espeçura versus Tempo de Formaço para cada Amostra



**Figura 5.06.: Espeçura versus Tempo de Formaço por Elemento Filtrante**

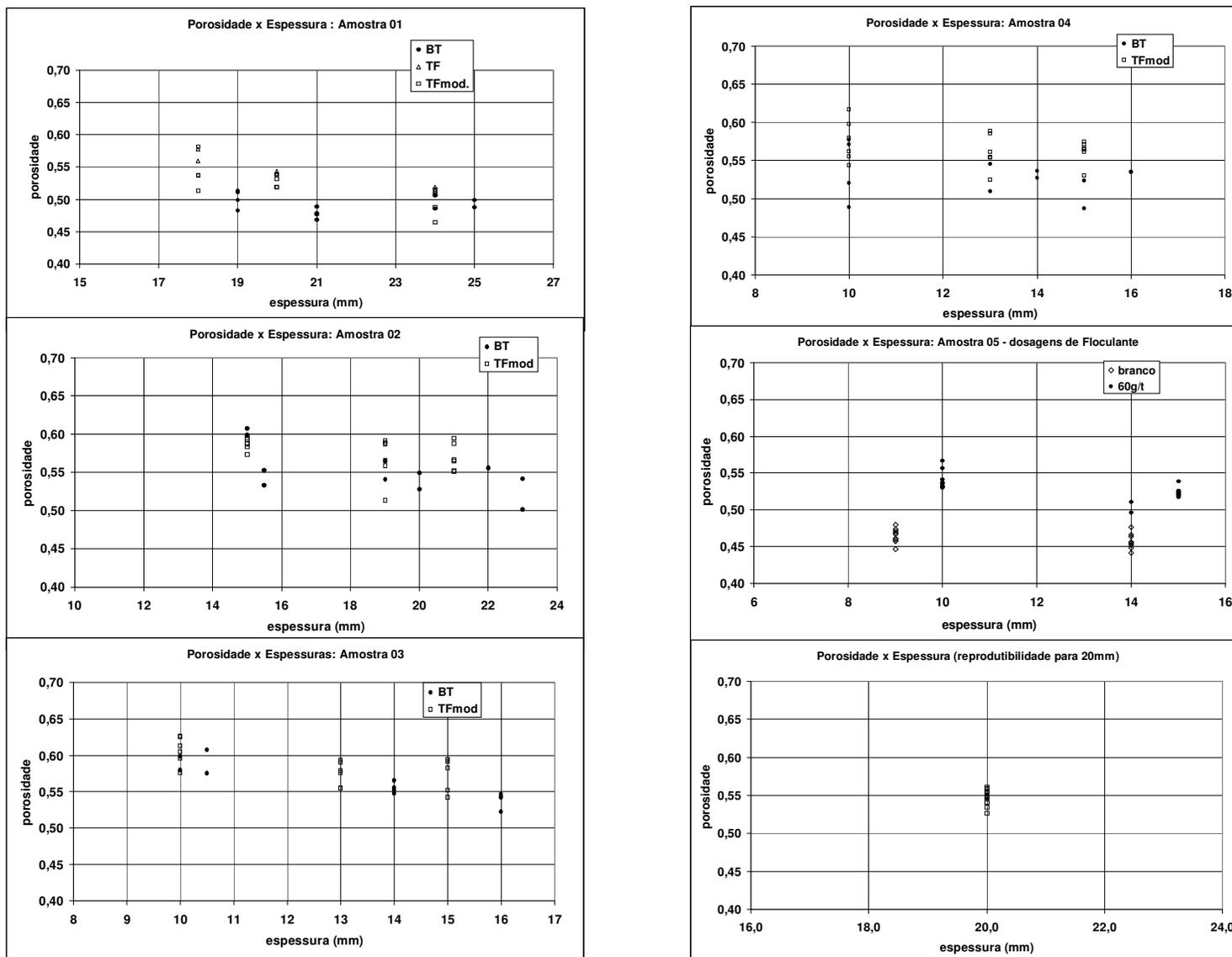


Figura 5.07: Porosidade versus Espessura por Amostra

### 5.3 – Discussão sobre os tipos de testes de filtração

O tipo de teste com monitoramento da coluna de filtração é ainda pouco difundido como prática de laboratório para os fornecedores de equipamentos, de elementos filtrantes, de reagentes auxiliares e demais pesquisadores.

Para teste de folha convencional deve-se medir o excesso de torta, descontar-se o volume proporcional de filtrado e, então, recalcular-se a percentagem de sólidos original dos testes, como recomendado por DORR OLIVER (1980). Esta não é uma prática plenamente difundida nos procedimentos pesquisados.

Aspectos devem ser considerados sobre os tipos de testes de laboratório, dentre eles pode-se relacionar:

- Reprodutibilidade dos testes com as curvas: as curvas de desaguamento mostram-se na maioria das vezes sobrepostas. Nos testes de folha convencionais têm-se apenas um ponto por teste;
- Ajustes matemáticos dos dados obtidos ou crítica estatística para as curvas de desaguamento;
- Estudo da cinética de desaguamento (fonte de dados contínuos ou realização de diversos testes);
- Cálculo das resistências específicas da torta e do meio filtrante a partir de pontos ou de curvas de desaguamento;
- Controle da percentagem de sólidos dos testes;
- Condições da agitação: mecânica ou manual, descontínua ou contínua (Gomes, 1997 e 1999) versus alimentação superior da polpa preparada;
- Porosidade experimental calculada versus medida (Coulson, 1978; Bourgeois, 1997 e 1998; Tiller, 1980; Tarleton, 1999);
- Condicionamento de reagentes (Bourgeois, 1997; Singh, 1997; Hogg, 2000);
- Monitoramento da variação de pressão e fluxos de filtrado;
- Existência ou não de excessos de torta fora da área unitária do teste, com necessidade de remover tanto o excesso quanto o seu filtrado correspondente (DORR OLIVER, 1980);

- Existência de caminhos preferenciais ou trincas nas tortas, para cada metodologia;
- Medição da vazão de vácuo;
- Avaliação de elementos filtrantes: melhor após instalação do monitoramento da variação da pressão e fluxos de ar e de filtrado versus monitoramento apenas da percentagem de sólidos no filtrado;
- Possibilidade de incorporar as técnicas desenvolvidas nos testes de espessamento.

#### 5.4 – Discussão final: aspectos gerais da filtração

Os resultados dos testes devem ser tomados criteriosamente, apesar dos fatores de projeto envolvidos (da ordem de 20%), melhor controle nos testes deve ser buscado com medições contínuas e integradas da pressão, vazão de ar e vazão de filtrado.

Os testes de folha com coluna de filtrado são reproduzíveis, como se pode ver nas curvas de desaguamento apresentadas a seguir. Os resultados estão mostrados a partir das otimizações possíveis com o deslocamento do “ponto de operação” sobre a curva de desaguamento (Figura 5.08), no dimensionamento dos tempos e mudança na válvula de vácuo (ou “bridge plate”) para filtros a vácuo de discos verticais (Figura 5.09), e nas avaliações dos efeitos espessura da torta e tempo de ciclo para os filtros horizontais de correia (Figura 5.10). São ainda mais claros os efeitos da variável dosagem de auxiliares de filtração, alterando-se a cinética do desaguamento, mostrada exatamente pela curva de filtrado e para duas espessuras de torta distintas (Figuras 5.11 e 5.12), bem como a possibilidade de se estudar com mais detalhe os efeitos dos surfatantes (Figura 5.13) e a seqüência de dosagem (floculante após surfatante ou surfatante após floculante) e o efeito das dosagens individualmente (Figura 5.14).

### Taxa Unitária de Filtragem versus Espessura da Torta Amostra 3 - alguns Testes de Folha

Teste No.	Tempo de Formação	Espessura (mm)	Condições %sólidos (real)	Qualidade Filtrado (%sólidos)	Teste total			Umidade final da torta %H <sub>2</sub> O
					Massa (seca) (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)	
67	6,06	10	69,68%	2,05	229,92	75,75	1,2	9,70%
68	5,86	10	69,02%	2,24	229,81	73,25	1,2	9,43%
69	9,83	13	68,53%	1,70	299,09	122,88	0,9	9,70%
70	9,96	13	68,64%	2,08	298,00	124,50	0,9	9,47%
71	11,64	15	68,28%	2,25	343,27	145,50	0,9	9,68%
72	12,02	15	68,35%	1,39	344,79	150,25	0,9	10,04%

Baseado na válvula de vácuo existente

#### Válvula de Vácuo no Filtro Industrial



Tempo/Área de Secagem

Tempo/Área de Formação

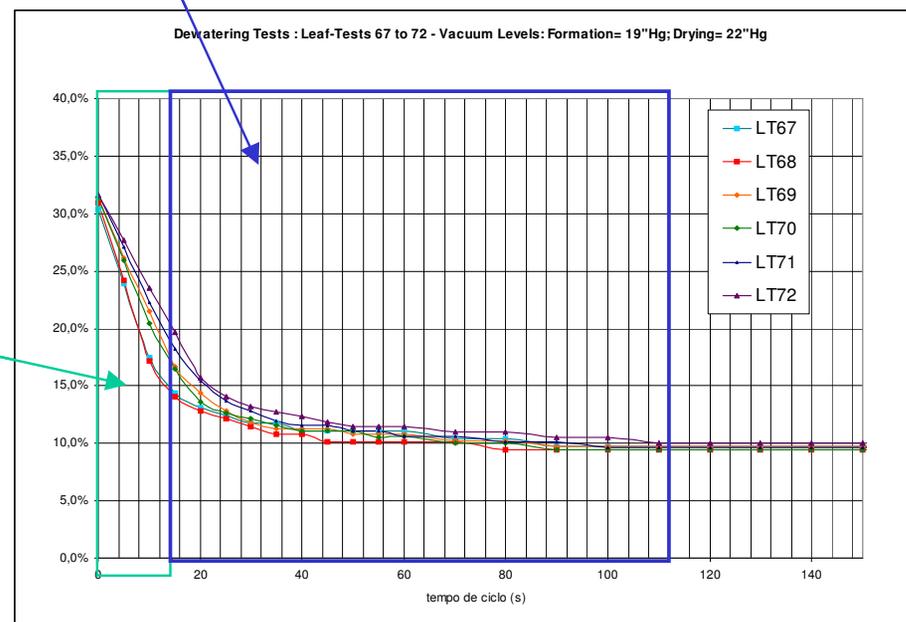


Figura 5.08: Curvas de Desaguamento para Filtros a Vácuo de Discos Verticais



(a) Válvula de Vácuo da MUT

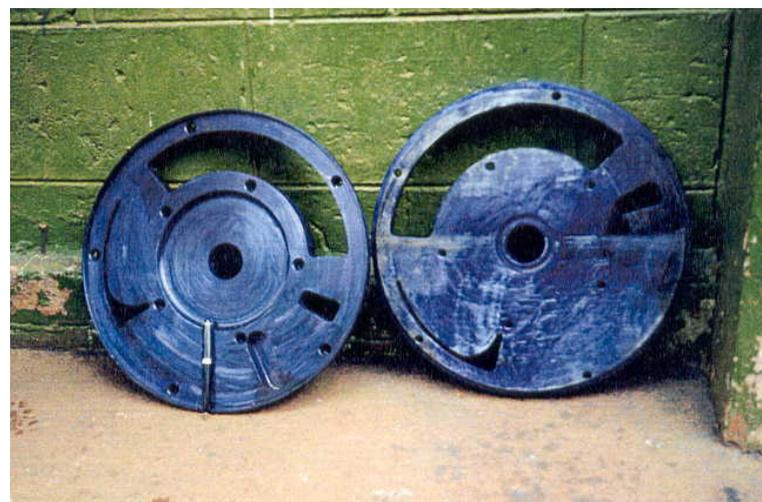
Válvulas de Vácuo ("Bridge Plates") das Filtragens MBR						
Unidade Operacional	ângulos dos setores					
	Anterior			Atual		
	Formação	Secagem	Sopro	Formação	Secagem	Sopro
MAC	35°	125°	8°	25°	115°	9°
PIC	<b>70°</b>	135°	11°	30°	130°	10°
MUT	35°	130°	10°	27°	139°	12°

Unidade Operacional	percentual do ciclo					
	Anterior			Atual		
	Formação	Secagem	Sopro	Formação	Secagem	Sopro
MAC	9,7%	34,7%	2,2%	6,9%	31,9%	2,5%
PIC	<b>19,4%</b>	37,5%	3,1%	<b>8,3%</b>	36,1%	2,8%
MUT	9,7%	36,1%	2,8%	7,5%	38,6%	3,3%



(b) Troca das Válvulas de Vácuo da MAC



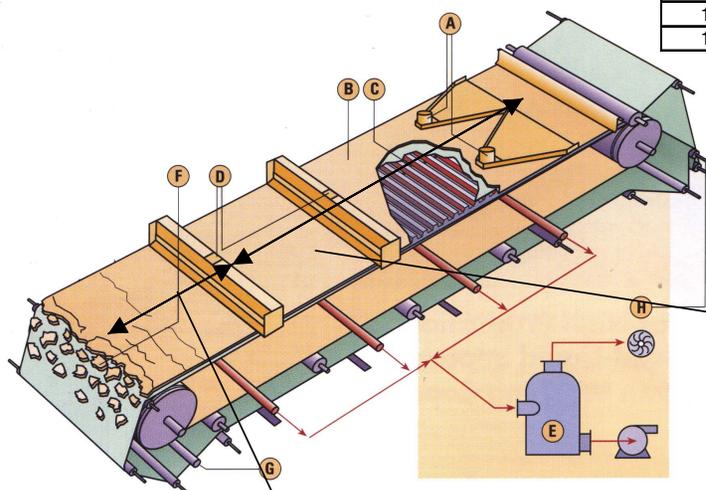
(c) Válvula de Vácuo em Estudo na CVRD

Figura 5.09: Modificações nas Válvulas de Vácuo dos Filtros a Vácuo de Discos Verticais

### Taxa Unitária de Filtragem versus Espessura & Dosagem de Floculante - Amostra 05

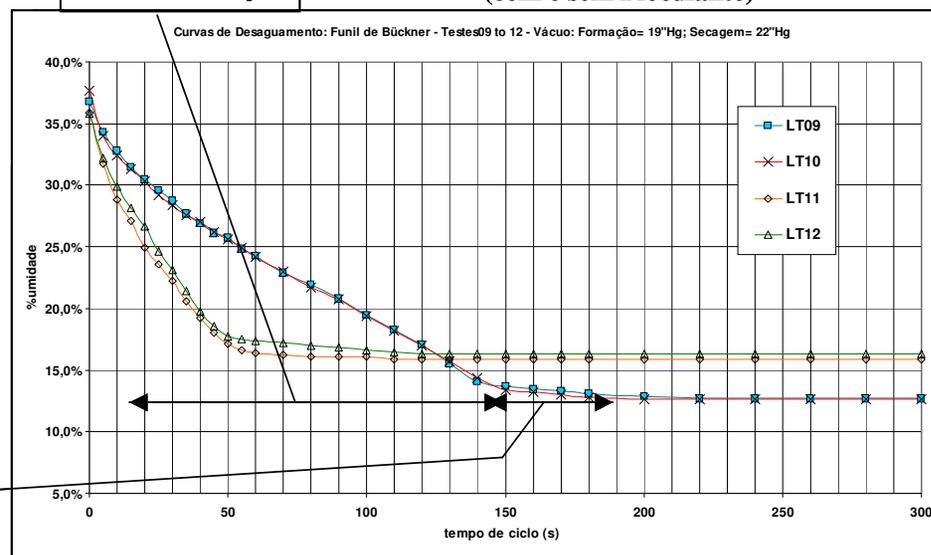
Teste	Tempo Formação	Espessura (mm)	Condições % sólidos (real)	Qualidade Filtrado (% sólidos)	Resultado do Teste			Umidade Final % Umidade
					massa seca (g)	tempo ciclo (s) <sup>&lt;1&gt;</sup>	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)	
9	136	14	63,22%	0,05	765,10	166	0,8	12,69%
10	139	14	62,33%	0,03	769,50	169	0,8	12,63%
11	44	15	64,11%	0,05	765,10	74	1,7	15,88%
12	42	15	64,16%	0,08	768,80	72	1,8	16,28%

Tempo de Ciclo = Tempo de Formação + 30 segundos de Secagem



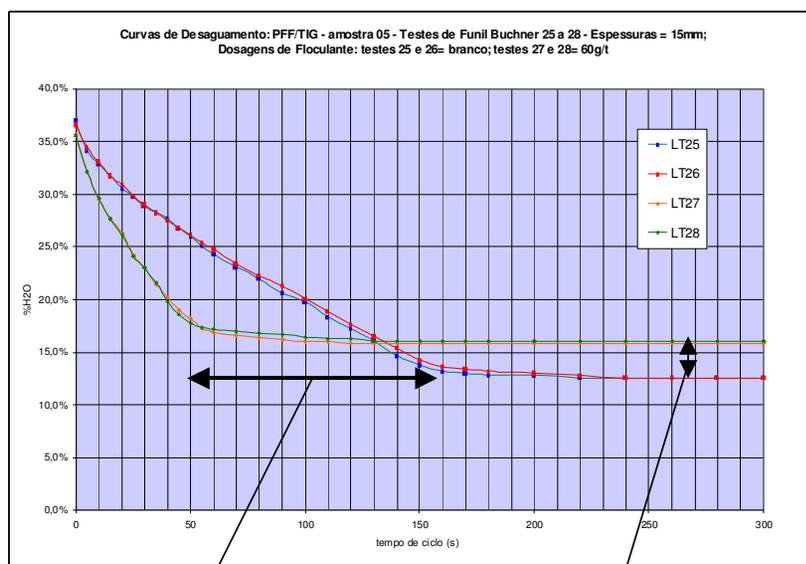
Área de Formação

### Algumas Curvas de Desgamento para a Amostra 05 (com e sem Floculante)



Área de Secagem

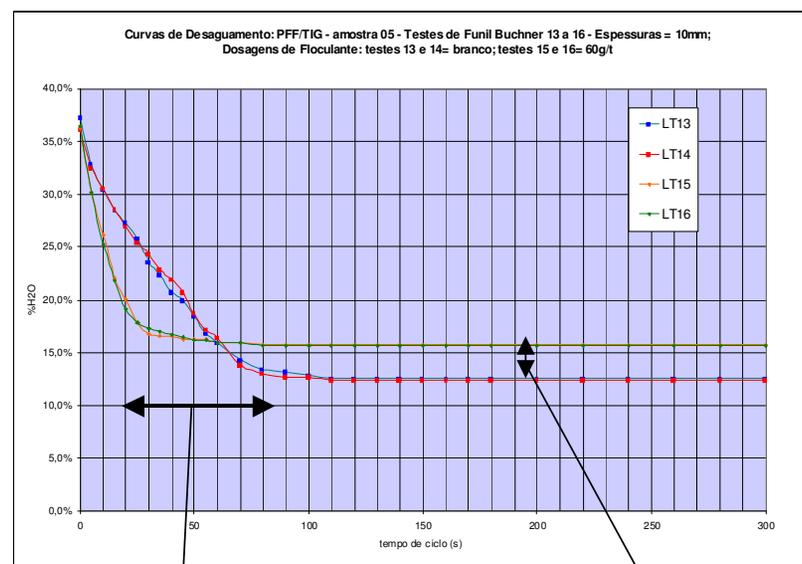
Figura 5.10: Curvas de Desgamento para Filtros Horizontais de Correia



(a) espessura = 15mm

variação do tempo de formação

variação da umidade

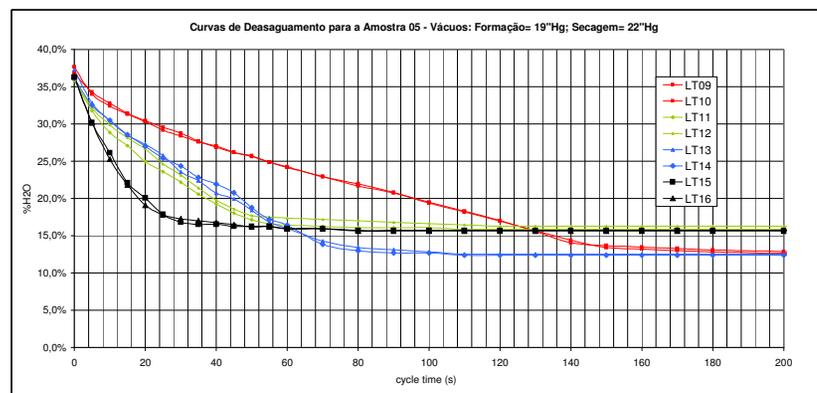


(b) espessura = 10mm

variação do tempo de formação

variação da umidade

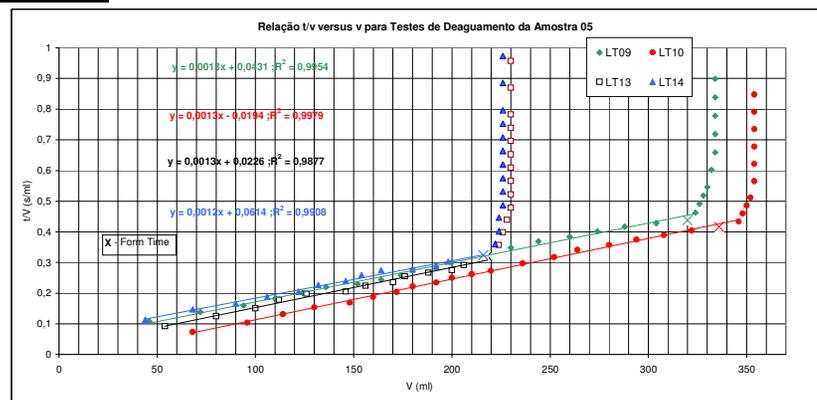
**Figura 5.11: Efeitos da Dosagem de Floculante e da Espessura da Torta nas Curvas de Desaguamento da Amostra 05**



Taxa Unitária de Filtragem versus Espessura e Dosagem de Reagente - Amostra 05

Teste	tempo Formação (s0)	Espessura (mm)	Porcentagem sólidos (real)	Dosagem Floculante (g/t)	Qualidade Filtrado (%sol)	massa seca (g)	tempo ciclo (s)	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)	% Umidade Final da torta
9	136	14	63,22%	-	0,05	765,10	166	0,8	12,69%
10	139	14	62,33%	-	0,03	769,50	169	0,8	12,63%
11	44	15	64,11%	60	0,05	765,10	74	1,7	15,88%
12	42	15	64,16%	60	0,08	768,80	72	1,8	16,28%
13	64	9	62,70%	-	0,18	508,62	94	0,9	12,52%
14	66	9	63,88%	-	0,08	510,16	96	0,9	12,38%
15	22	10	63,73%	60	0,08	511,76	52	1,7	15,70%
16	20	10	63,56%	60	0,15	509,96	50	1,7	15,64%

(a) Destaque para o Efeito da Espessura e do Floculante

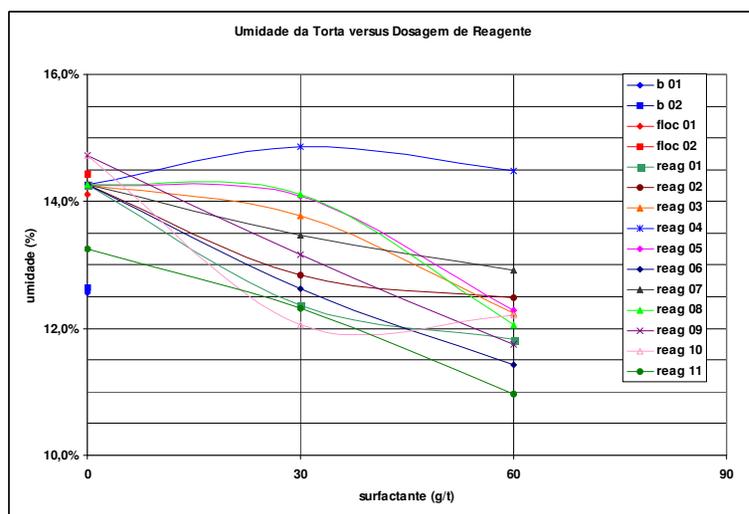


(b) Relação: t/V versus V - Testes de Desaguamento da Amostra 05

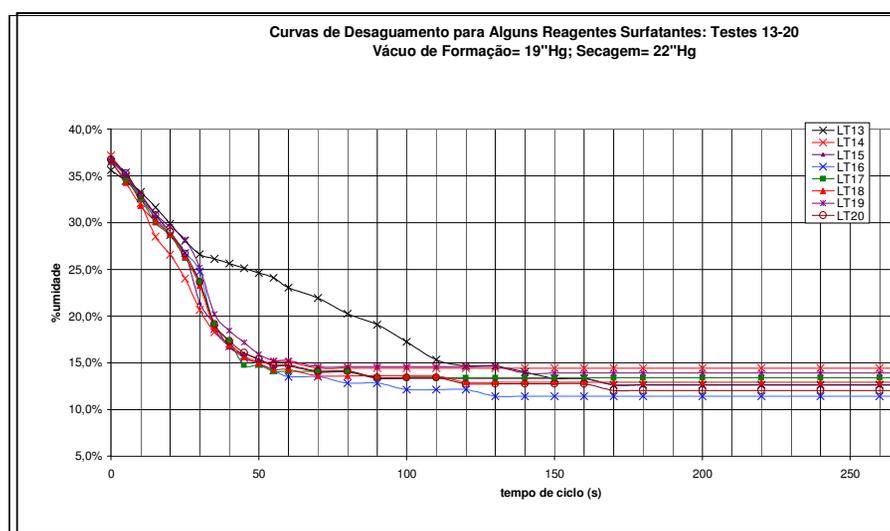
Figura 5.12: Curvas de Desaguamento para a Amostra 05

## Taxa Unitária de Filtragem versus Dosagem de Reagentes - Amostra 05

Teste	tempo Formação	Espessura (mm)	Porcentagem sólidos (real)	Qualidade Filtrado (%sol)	Total Test			% Umidade Final da torta
					massa seca (g)	tempo ciclo (s)	TUF (kg/m <sup>2</sup> /h)	
13	64	9	65,00%	0,21	217,51	800	0,80	13,66
14	28	9	65,00%	0,14	213,71	350	1,28	15,76
15	30	9	65,00%	0,15	219,49	375	1,27	11,95
16	31	9,5	65,00%	0,15	219,19	388	1,24	11,72
17	30	9,5	65,00%	0,15	217,49	375	1,25	14,24
18	31	9,5	65,00%	0,19	220,75	388	1,25	12,52
19	33	9	65,00%	0,17	216,81	413	1,19	13,90
20	29	9,5	65,00%	0,16	220,49	363	1,29	12,05

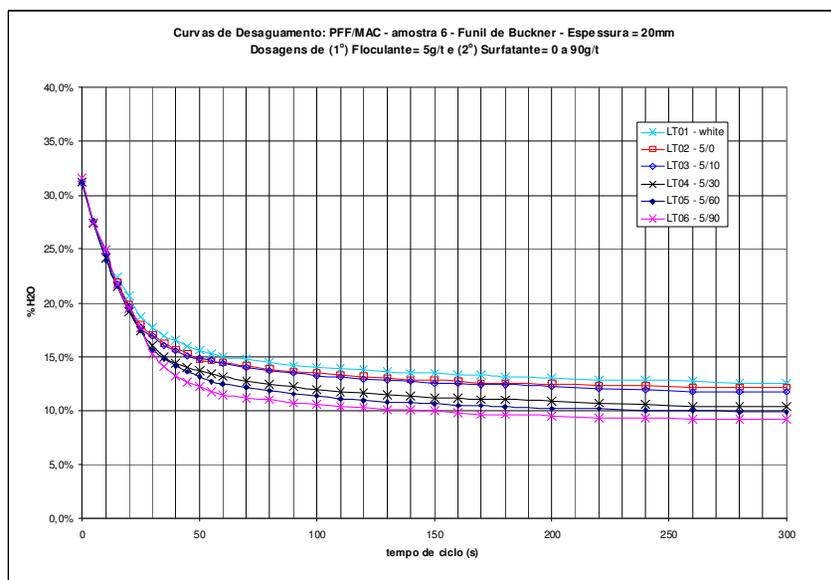


(a) Efeito de Diversos Surfatantes após Floculação

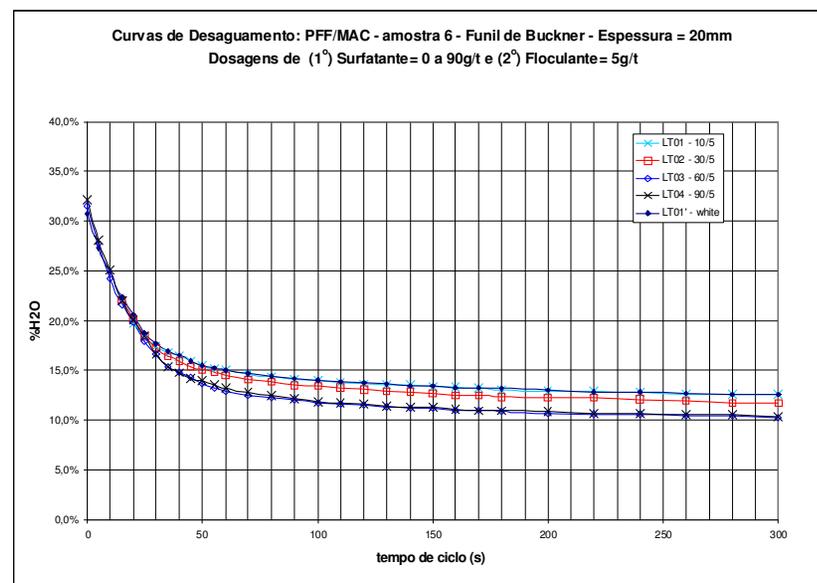


(b) Curvas de Desaguamento p/ Surfatante Testado após Floculação

Figura 5.13: Efeito da Dosagem de Surfatantes para a Redução da Umidade da Torta da Amostra 05 após Floculação



(a) Floculante (5g/t) e Surfatante (0 a 90g/t)



(b) Surfatante (0 a 90g/t) e Floculante (5g/t)

**Figura 5.14: Efeito da Sequência e da Dosagem dos Reagentes para a Amostra 06**

Quanto aos aspectos de resistência específica da torta e resistência do meio filtrante, podemos citar os autores:

- “A única aproximação rigorosamente correta para a teoria de filtração é através da utilização de pontos de resistência específica de torta dentro da própria torta e estes podem ser obtidos apenas a partir de estudos de fluxos e porosidades em tortas experimentais” (Svarovsky, 1981);
- “A habilidade em gerar dados experimentais confiáveis é um pré-requisito para o entendimento do processo de filtração. Com o advento da tecnologia mecatrônica tem-se agora a oportunidade de ambos: examinar o processo de filtração em uma nova e mais acurada forma e remover a forma heurística do dimensionamento e especificação da filtração” (Tarleton, 1998).

Pelo menos duas fases da otimização da filtração industrial deverão ser consideradas:

- i) A otimização no dimensionamento, cuja função objetivo pode ser: minimização do investimento, restrito ao atendimento da produção e da umidade especificada;
- ii) Otimização da operação existente, cuja função benefício pode ser descrita como: minimização da umidade do produto, restrita a capacidade de produção e custos operacionais.

Estudos dos tempos de formação e secagem, estudos da espessura e da dosagem de reagentes, como exemplo, podem complementar ambas as fases de estudo, com significativas economias para as empresas.

As curvas de desaguamento auxiliaram grandemente o entendimento da cinética do desaguamento, mesmo tendo ainda algum parâmetro que ser monitorado mais de perto. Assim, o efeito dos floculantes foi previsto e proporcionou sensível economia no dimensionamento da filtração no Terminal da Ilha Guaíba, com economia da ordem de 1 milhão de dólares (2,4 milhões de reais) em equipamentos. Para a mesma aplicação busca-se hoje a redução da umidade residual, tendo-se selecionado previamente dois entre cerca de vinte surfatantes testados e com boas perspectivas de utilização.

Para as demais amostras, o conhecimento proporcionado pelas curvas de desaguamento permitiu a mudança nas válvulas de vácuo e o acompanhamento da maior ou menor filtrabilidade, podendo-se propor mais facilmente novas soluções. Estudos diversos têm

sido realizados pela MBR para verificar a sensibilidade do processo de filtração com relação às variáveis operacionais, nomeadamente: percentual de sólidos, pH, tipologias e índices de Blaine dos minérios, elementos filtrantes, tipos de defletores e setores de filtro, entre outros. Estudos recentes mostraram resultados significativos, superiores a 1.500.000 US\$/ano ou 3.600.000 R\$/ano, devido a um maior controle da umidade do PFF nas instalações de tratamento de minério da empresa (MBR, relatórios diversos; Amarante, 1999 a 2001; Castro et alii, 1999; Ramos, 1996; Silva, 1996).

Novos desenvolvimentos devem ser incorporados aos testes de filtração, com a medição dos fluxos integrada a sistemas de monitoramento, e, em uma etapa mais avançada, com a medição direta da formação da torta (Bourgeois, 2000; Yoon, 2002); a partir de então, não só a cinética de desaguamento estará descrita, bem como a resistência da torta e problemas de “colmatação” provocados por finos (lamas ou espumas), poderão ser melhor estudados e explicados com a correlação com a medição da estrutura física da torta (Bourgeois, 1997, 1998 e 2000; Svarovsky, 1981; Tiller, 1981; Tarleton, 1999).

A importância dos estudos de simulação das tortas passa a ser cada vez mais significativa com a melhor calibração dos modelos a partir dos resultados experimentais mais acurados (Valadão, 1996 e 2001; Wakeman, 1994).

O potencial destes estudos de microestrutura e cinética de desaguamento torna-se marcante, não só na otimização dos equipamentos existentes, bem como no dimensionamento de novos equipamentos. Aplicações para filtração prensa e a vácuo, filtração de rejeitos e materiais cada vez mais finos, bem como a utilização de reagentes auxiliares de filtração, passam a ter maior relevância atualmente devido, sobretudo, aos limites cada vez mais restritivos das variáveis operacionais e suas potencialidades em termos de ganhos econômico-financeiros.

## 6. CONCLUSÕES

Os principais pontos observados no trabalho foram:

- Os tipos de testes apresentaram diferenças significativas nos resultados, com os testes de Funil de Büchner apresentando menores porosidades das tortas, com menores taxas unitárias de filtragem e maiores umidades, em geral, como previamente relatado por Tiller (1974);
- A utilização de reagentes agregantes e/ou surfatantes mostrou grandes reflexos nas taxas e umidades finais, respectivamente, com grande potencial de redução dos custos de investimento em equipamentos na etapa de dimensionamento e custo operacional devido à redução das “massas inertes” no transporte e no embarque;
- Os testes com o monitoramento da coluna de filtrado são altamente reprodutíveis e este acompanhamento é imprescindível para o ajuste do modelo da cinética da filtragem, eliminando-se o ajuste matemático para diversos dados, como consta em toda a literatura básica. Esta prática não está plenamente incorporada por todos os fabricantes de equipamentos e de elementos filtrantes;
- As curvas de desaguamento auxiliaram grandemente o entendimento da cinética do desaguamento orientando o dimensionamento de equipamentos e avaliando o efeito de reagentes auxiliares. Foi realizada uma economia de investimento em equipamentos no valor de 1 milhão de dólares (2,4 milhões de reais);
- Os ganhos potenciais para a indústria mostram-se expressivos, devendo-se estender a análise destes custos não só aos ganhos internos com transporte e maiores unidades metálicas embarcadas, mas também aos custos dos clientes, com redução nos fretes transoceânicos, aumentos de produtividade e, ainda, nos processos pirometalúrgicos posteriores (como na pelotização), apenas para citar alguns exemplos.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Novos desenvolvimentos têm sido verificados na metodologia de testes de filtração, objeto deste estudo, com o monitoramento não só de todas as vazões (filtrado e ar), como também da formação da torta e, portanto, obtendo dados para os cálculos corretos dos parâmetros resistência da torta e do meio filtrante em função do tempo, bem como da porosidade, contribuindo para um mais completo entendimento do modelo do desaguamento.

Futuros desenvolvimentos na metodologia, bem como estudos mais detalhados da ação dos reagentes agregantes e surfatantes e a compreensão da estrutura da torta, podem proporcionar ainda maiores avanços na filtração de minérios de ferro.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AMARANTE, S.C. – **Filtragem na Indústria Mineral** – Metalurgia & Materiais, VOL.57, No. 515, pp. 647-648. Nov.2001. ABM, São Paulo.
- (2) AMARANTE, S.C. – **Redução da Umidade dos Produtos Transportados como Vantagem Competitiva** - Belo Horizonte, IETEC - Julho/2001. (Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Processos);
- (3) AMARANTE, S.C.; ARAUJO, A.C.; PERES, A.C.; VALADÃO, G.E.S. – **Dewatering Curves of Some Iron Ore Industrial Products**; IN: MINERALS ENGINEERING 2000; Cape Town, South Africa; Nov/2000;
- (4) AMARANTE; S.C. – ROCHA; R.O. - **Caracterização Mineralógica de um PFF** - Monografia / UFMG - Belo Horizonte, 1º. Semestre/1999
- (5) ARAUJO, A.C. – **Alguns Aspectos da Filtragem a Vácuo Aplicada ao Processamento Mineral** –IN: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM TRATAMENTO DE MINÉRIOS FCO/DEPTO. ENGENHARIA DE MINAS. EE/UFMG - Out/1987.
- (6) BESRA, L.; SENGUPTA, D.K.; ROY, S.K. - **Particle Characteristics and their Influence on Dewatering of Kaolin, Calcite and Quartz Suspensions** - *International Journal of Mineral Processing*, 59 (2000) 89-112;
- (7) BOKELA – **The Transportable Filtration System for laboratory and On-Site Tests – FILTRATEST** – Procedimentos Internos, 2000.
- (8) BOURGEOIS, F.S.; BARTON, W.A. - **Advances in the Fundamentals of Fine Coal Filtration** - *Coal Preparation*, vol.19, 1998;
- (9) BOURGEOIS, F.S.; HAQUE, M.T.; WU, D.W. – **A novel Probe for Investigation of Slurry Filtration** – IN: SME ANNUAL MEETING, Feb. 28 – Mar 01, Salt Lake City, Utah/USA, 2000.
- (10) BOURGEOIS, F.S.; LYMAN, G.J. - **Morphological Analysis and Modelling of Fine Coal Filter Cake Microstructure** - *Chemical Engineering*, Vol.52, No.7, 1997.
- (11) CARLETON, A.J.; METHA, K.B. - **Leaf Test Predictions and Full-Scale Performance of Vacuum Filters** - *Filtration & Separation*, January/February, 1984;
- (12) CASTRO, E.B.; BORGES, A.A.M.; SOUZA, C.C.; AMARANTE, S.C. - **A Evolução do Processo de Filtragem na Mina do PICO MBR** - In.: II SIMPÓSIO

- BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO, Ouro Preto, MG. 1999. pps. 160-171.
- (13) CHAVES, A. P.; PERES, A.E.C. – **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem.** Signus Editora, 1996.
- (14) COELHO, E.M.; PERES, A.E.C.; ARAUJO, A.C. – **Flotação, espessamento, filtragem e floculação seletiva.** In: *Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco (ed.). Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, in Memoriam Prof. Paulo Abib Andery.* Recife, 1988. p.205-286.
- (15) COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. – **Chemical Engineering** – England: Pergamon Press, 3<sup>rd</sup>. Ed. 1978.
- (16) DAHLSTROM, D.A. – **Fundamentals of Solid-Liquid Separation; Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits;** SME - Littleton, Colorado, 1986;
- (17) DAHLSTROM, D.A. – **How to Select and Size Filters – Mineral Processing and Plant Design – SME/AIME.**
- (18) DAHLSTROM, D.A.; SILVERBALTT, C.E. - **Continuous Vacuum and Pressure Filtration.** In: *Solid/Liquid separation equipment and scale-up.* PURCHAS, D.B. (ed). Croydon. Uplands Press. 1977. pp. 445-491.
- (19) DELKOR – **Filtration Test Standard Procedure – Determination of Filtration Area** – Procedimentos Internos (DELKOR – South Africa) – 1998;
- (20) DORR OLIVER - **Selecting and Sizing Dorr-Oliver Filters - Filtration Leaf Test Procedures** - Procedimentos Internos; 1980.
- (21) EIMCO – **EIMCO Filter Test – Leaf Kit – Introduction Booklet (rev. 6/75)** – 1987;
- (22) GALE, R.S. - **Optimizing the Use of Pretreatment Chemicals.** In: *Solid/Liquid separation equipment and scale-up.* PURCHAS, D.B (ed). Croydon. Uplands Press. 1977. pp. 39-80.
- (23) GOMES, M.V.N. - **Teste de folha em Filtragem: uma reavaliação** - Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- (24) GOMES, M.V.N.; VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C.; SILVA, R.V.G. – **Teste de Folha: uma Reavaliação** – In: I Seminário de Química de Colóides Aplicada à Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, Novembro, 1997;

- (25) GOULART, C.L.; VALADÃO, G.E.S. - **Otimização das Operações Unitárias de Espessamento e Filtragem da Samarco Mineração S.A. através da Metodologia de Superfície de Resposta.** In.: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA E I SEMINÁRIO DE QUÍMICA DE COLÓIDES APLICADAS À TECNOLOGIA MINERAL, Águas de São Pedro, SP. 1998. pps. 271-292.
- (26) HOGG, R. – **Flocculation and Dewatering** - *International Journal of Mineral Processing*, 58 (2000), 223-236. Elsevier.
- (27) KELLY, E.G. – **Introduction to Mineral Processing** – USA, 1982
- (28) MALITO, J.T. **Improving The Operation of Red Mud Pressure Filters** - *Light Metals*, 1996, pgs.81-86;
- (29) MÄNTTÄRI, A.; NYSTROM, M.; EKBERG, B. - **Influence of Flocculants on the Filtration of Copper Concentrates with a Ceramic Capillary Filter.** *Minerals Engineering*, vol.9, No.4, pp. 419-428, 1996. Elsevier Science Ltd.
- (30) MASINI, E.A. – **Auxiliares de Filtragem na Polpa de Concentrado de Minério de Ferro da Companhia Vale do Rio Doce** – In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO, BENEFICIAMENTO E PELOTIZAÇÃO – Ouro Preto.
- (31) MAYER, E. – **Cake Filtration Theory and Practice** – *Chemical Engineering Journal* 80 (2000), pps. 233-236.
- (32) MBR - **Relatório Anual 2000** – Minerações Brasileiras Reunidas S.A. – Relatório Interno.
- (33) MBR – Relatório Interno: **Considerações sobre o Controle da Umidade do Concentrado – PFF/MAC – 1982;**
- (34) MBR – **Relatórios Internos** – Diversos Estudos Realizados na Gerência de Tecnologia Mineral da MBR. 1996 a 2001.
- (35) MULAR, A. L.; ROBERTS, R. B. – **A Simplified Method to Determine Isoelectric Points of Oxides**, *Transactions*, Vol. LXIX, 1966, pp.438-439.
- (36) MULAR, A.L.; Anderson, M.A. (Eds) – **Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits**; SME, 1986.
- (37) NICOL, S.K. – **The Effect of Surfactants on the Dewatering of Fine Coal** – IN: *Australas. Inst. Min. Metall.* No. 260, December, 1976;
- (38) **PELLETIZING AT CVRD - Pelletizing & Metallics Business Unit**, Vitória, ES -Relatório Interno da Diretoria de Pelotização da CVRD, 1999.

- (39) PEREIRA, C.E. – **Relatório sobre Filtração de Concentrado** – Relatório Interno - Carafba Metais; 1981;
- (40) PEREIRA, L.G. **Aplicação de Aditivos Químicos à Filtragem de Polpas Minerai**s. São Paulo: Universidade de São paulo – USP, SP, 1999. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral);
- (41) PETTEMDORFEN, E.; TOREM, M.L. - **Aspectos Fundamentais da Reologia de Polpas Aplicados à Tecnologia Mineral** - In: XVII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA E I SEMINÁRIO DE QUÍMICA DE COLÓIDES APLICADAS À TECNOLOGIA MINERAL. Águas de São Pedro / SP. 23 a 26 de Agosto de 1998.
- (42) PURCHAS, D.B. - **Proposal for Unifying Cake Filtration Tests**. In: *Solid/Liquid separation equipment and scale-up*. PURCHAS, D.B (ed). Croydon. Uplands Press. 1977. pp. 39-80. pp. 561-577.
- (43) RAMOS, L.T.S; SANTANA, A.N.; VALADÃO, G.E.S.; PAVEZ, O. – **A Influência de Reagentes Auxiliares de Filtragem de “Pellet Feed Fines”** – IN: *Tecnologia Mineral* – SALUM, M.J.G; CIMINELLI, V.S.T. (Eds.) – ABTM.
- (44) SILVA, R.V.G.; ARAUJO, A.C.; CASTRO, E.B.; AMARANTE, S.C.; VALADÃO, G.E.S. - **Seleção de Reagentes Auxiliares para a Filtragem de Finos de Minérios de Ferro**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIO E HIDROMETALURGIA, 16, Rio de Janeiro. 1995. Anais. Rio de Janeiro. Dutra, A.J. et alii (ed). 1995, p.138-147.
- (45) SILVERBLATT, C.E.; DAHLSTROM, D.A. **Moisture content of a fine-coal filter cake: effect of viscosity and surface tension**. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.46, n.6, p.1201-7, June 1954.
- (46) SILVERBLATT, C.E.; RISBUD, H.; TILLER, F.M. - **Batch, Continuous Process for Cake Filtration** - *Chemical Engineering*/April 29, 1974;
- (47) SINGH, B.P.; BESRA, L. - **The Effect of Flocculant and Surfactant on the Filtration Dewatering of Iron Ore Fines** - *Separation Science and Technology*, 32(13), 1997;
- (48) SIS, H.; CHANDER, S. - **Pressure Filtration of Dispersed and Flocculated Alumina Slurries** - *Minerals & Metallurgical Processing*, Feb/2000. vol.17.No.1;
- (49) STOCKHAUSEN – **Laboratory Test with Praestol Brands** – 2001;

- (50) SVAROVSKY, L. - **SOLID-LIQUID SEPARATION** - 2nd. ed.- Butter Worth&Co.(Publishers) Ltd. 1981;
- (51) TAMFELT – **Leaf Test Procedures of TAMFELT Elasta Fabrics** – Procedimentos Internos, 2000.
- (52) TARLETON, E.S. - **A New Approach to Variable Pressure Cake Filtration** - *Minerals Engineering*, Vol.11, No.1, 1998;
- (53) TARLETON, E.S. – **The use of Electrode Probes in Determinations of Filter Cake Formation and Batch Filter Scale-Up** – *Mineral Engineering*, Vol.12, No. 10, pp. 1263 – 1274, 1999;
- (54) TILLER, F.M.; et ali. - **A Revised Approach to the Theory of Cake Filtration** - In: FINE PARTICLES PROCESSING - Edited by P. SOMASUNDARAN - AIME publishing, 1980;
- (55) TILLER, F.M.; FARREL, P.J. – **Pretreatment of Slurries** – *Chemical Engineering*; April, 1974;
- (56) TRACZYK, F.P. – **Characteristics Of Non-Sedimentation-Based Equipment** – *Design and Installation Of Concentration and Dewatering Circuits* – SME/AIME; Colorado, 1986.
- (57) VALADÃO, G.E.S. **Desenvolvimento de modelo matemático empírico para a simulação da filtração de “pellet feed” de minério de ferro**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1996. (Dissertação de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 155p.).
- (58) VALADAO, G.E.S.; MILLER, J.D. - **Filter Cake Structure as Revealed By 3D Simulation Using the Monte Carlo Method** – IN: SME ANNUAL MEETING, Denver CO, 1999;
- (59) VALADÃO, G.E.S.; PAVEZ, O.; ARAÚJO, A.C. - **Influência da Adição de Reagentes Auxiliares de Filtração na Umidade de Tortas de “Pellet Feed Fines”**. Relatório Interno MBR.
- (60) VALADÃO, G.E.S.; PERES, A.E.C.; SILVA, R.V.G. - **Development of empirical models for the filtration of pellet feed** – IN: XX IMPC – Aachen, Germany – Sept., 1997;
- (61) VALADÃO, G.E.S.; SILVA, J.C.F.; AMARANTE, S.C. – **Tortas de Filtração Simuladas em 3D**; IN: IV SHMMT / XVII ENTMMME – Rio de Janeiro, 2001.

- (62) WAKEMAN, R.J.; TARLETON, E.S. – **A Framework Methodology for Simulation and Sizing fo Diaphragm Filter Presses** – *Minerals Engineering*, Vol.7, No. 11, pp. 1411-1425, 1994.
- (63) WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. – **Planejamento e Análise de Experimentos: como Identificar as Principais Variáveis Influentes em um Processo**. UFMG – FCO, 1996. Belo Horizonte.
- (64) YOON, R.H.; ASMATULU, R.; BASIM, B.; LUTRRELL, G.H.; WALTERS, A.D. – **Pilot-Scale Testing of Novel Dewatering Aids** – IN: XIV INTERNATIONAL COAL PREPARATION CONGRESS AND EXHIBITION. SAIMM, Sandtown, S.A., 2002.