



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M**

**DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA DESAGUAMENTO DE ULTRAFINOS  
RICOS DE MINÉRIO DE FERRO  
UMA APLICAÇÃO NA VALE CARAJÁS - PARÁ - BRASIL**

**NOEBER MACIEL ORSINE**

**Porto Alegre  
2014**

**NOEBER MACIEL ORSINE**

**DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA DESAGUAMENTO DE ULTRAFINOS  
RICOS DE MINÉRIO DE FERRO  
UMA APLICAÇÃO NA VALE CARAJÁS - PARÁ - BRASIL**

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Petter**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Produção Mineral.

**Porto Alegre  
2014**

**NOEBER MACIEL ORSINE**

**DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA DESAGUAMENTO DE ULTRAFINOS  
RICOS DE MINÉRIO DE FERRO  
UMA APLICAÇÃO NA VALE CARAJÁS - PARÁ- BRASIL**

Esta Dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Modalidade Profissionalizante, Especialidade Produção Mineral e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

---

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Petter**

---

**Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann**

**Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio – PPGE3M/UFRGS.**

**Prof. Dr. Irineu Schadach de Brum – PPGE3M/UFRGS.**

**Prof. Dr. Marcos Batistella – CNPq/UFSC.**

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus inesquecíveis e incansáveis pais, Noé Orsine de Castro (In memoriam) e Cremildes Maciel Orsine, pela árdua dedicação à família e às pessoas. Ensiram-me a buscar de forma incondicional valores de respeito e harmonia como forma a combater o medo a ignorancia ou a cobiça.

À minha amada esposa Arethusa Lima Orsine e aos meus filhos Anzzaloni Lima Orsine e Vincenzo Lima Orsine cujo apoio, restrições e compreensão foi fundamental para os objetivos aqui alcançados.

Ao meu grande mestre inspirador, guru e “segundo pai” Antonio Eduardo Clark Peres (UFMG), o Toninho. Grande gênio da humanidade que despertou em mim a semente da busca pelo conhecimento e a alegria de exercitar o pensamento logico incansavelmente. Obrigado do Juninho!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o meu orientador, Prof. Dr. Carlos Otávio Petter (UFRGS) pelos ensinamentos, pela orientação acadêmica e pela decisiva perseverança e estímulo.

Ao coordenador de mestrado profissional Dr. Carlos Pérez Bergmann e os demais mestres do convênio do mestrado profissional Vale e UFRGS pelo impulso inicial, demonstração de confiança e apoio à pesquisa científica.

Ao diretor Antonio Padovezi e aos Gerentes Gerais da Vale Herbert Viana e Leonardo Queiroz por terem viabilizado e incentivado essa contribuição para a empresa e para a engenharia de minas.

A toda direção e coordenação acadêmica deste referido curso, representado pela VALER (centro de formação e treinamento da Vale s/a) e em especial ao Gean Oliveira pela luta e apoio constantes aos alunos .

Aos meus colegas e amigos da Vale Ercilio Rangel de Almeida, Wallace Araujo e Antonio Lucas de Medeiros Silva pelo apoio na execução e revisão desse trabalho.

Aos meus colegas de curso que compartilharam ensinamentos, conhecimentos e informações aqui usados.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para essa modesta contribuição científica.

*“Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer para mim dividir um planeta e uma época com você.”*

**Carl Sagan**

## RESUMO

O minério de ferro produzido no complexo de Carajás traz consigo características mineralógicas que conferem um elevadíssimo teor de Fe em todas as suas frações granulométricas. Dessa forma, ao final da cadeia produtiva, tanto os produtos comerciais mais grosseiros quanto os finos contem cerca de 62% de Fe contido na sua composição. Importante destacar que em Carajás as fases no processamento desse minério são apenas para cominuição e classificação por tamanho. Não existem etapas de concentração e os produtos são diferenciados por suas respectivas curvas granulométricas: o “granulado” - mais grosseiro ( $> 13$  mm), o “Sinter-Feed” ( $< 13$  mm e  $> 0,5$  mm) e o “pellet feed” ( $< 0,15$  mm).

Garantir a correta distribuição granulométrica da matéria prima é uma premissa de mercado. A última etapa da classificação é feita através de hidrociclones e gera um overflow ultrafino de altíssima superfície específica maior que 6.500 Blaine e com 45% até 95%  $< 7$   $\mu$ m. E ainda possui um elevado teor de Fe - cerca de 62%. Dessa forma os objetivos gerais dessa pesquisa buscaram a solução para essa oportunidade de recuperar e vender esses rejeitos. O estudo sugeriu através de ensaios com tecnologias capazes de desaguar os ultrafinos gerados para 9,00% de umidade, que é o valor que permite a movimentação e o manuseio desses rejeitos, além de permitir sua incorporação na blendagem de produtos mais grossos. Desse modo, foram realizados experimentos em diversos laboratórios externos e em escala piloto na Usina de Carajás com amostras dos dois rejeitos ultrafinos das duas fases de hidrociclonagem: o natural e o moído.

Ficou evidente que o equipamento tem de combinar necessariamente e de forma eficiente dois fatores essenciais ao desagramento: elevadíssimas pressões e altas temperatura na operação desses ultrafinos. A produtividade atingida foi da ordem de 50 t/h x m<sup>2</sup> para o rejeito da hidrociclonagem do Sinter Feed e 40 t/h x m<sup>2</sup> para o rejeito dos hidrociclones da Moagem.

**Palavras-Chaves:** Mineração. Minério de Ferro. Rejeitos. Separação sólido-líquido. Ensaios. Filtragem.

## ABSTRACT

The Iron ore that is produced in Carajás mining complex brings mineralogical characteristics that give a very high Fe content in all its size fractions. Thus, at the end of the production chain both coarser and fine contains about 62% Fe contained in its composition. Importantly, in Carajás stages in the processing of this ore are for reduction and classification by size. There is thus no concentration steps and products are differentiated by their respective size distribution curves: the "grain" - coarser ( $> 13$  mm), the "Sinter-Feed" ( $<13$  mm and  $> 0.5$  mm) and the "pellet feed" ( $<0.15$  mm).

Ensure proper particle size distribution of the raw material is a market premise. The last step of classification is made using hydrocyclones and generates an overflow ultrafine high specific surface area greater than 6.500 Blaine and with 45% to 95%  $<7$   $\mu\text{m}$ . And has a high Fe content - about 62%. The overall objectives of this research sought the solution to this opportunity to recover and sell these "tailings". The study suggested by testing with technologies capable of flowing into the ultrathin generated to 9.00% of moisture, which is the value that allows movement and handling these wastes, and allows their incorporation into the blending of thicker products. Thus, experiments were carried out in several external laboratories and pilot-scale plant in the Carajás with samples of both ultrafine "tailings" of the two phases of hydrocycloning: the natural and the ground.

It was evident that the equipment must necessarily match and two efficiently factors essences to dewatering: very high pressure and high temperature operation of these "tailings". The productivity achieved was around 50 t/h x m<sup>2</sup> in reject of the Sinter Feed hydrocycloning and 40 t/h x m<sup>2</sup> to reject of the grinding hydrocyclones.

**Key Words:** Mining. Iron ore. "tailings". Solid-liquid separation. Trials. Filtering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Opções para aproveitamento dos “tailings” .....	22
Figura 2 – Técnicas e equipamentos de desaguamento.....	27
Figura 3 – Formação de interfaces em teste de sedimentação.....	30
Figura 4 – Espessador Deep Cone. ....	32
Figura 5 – Representação esquemática da filtragem.....	33
Figura 6 – Opções para aproveitamento dos “tailings” .....	35
Figura 7 – Esquema do “ <i>Filtration Leaf Test</i> ” .....	38
Figura 8 – Primeira etapa do ensaio “ <i>Leaf Test</i> ”, formação da torta. ....	38
Figura 9 – Segunda etapa do ensaio “ <i>Leaf Test</i> ”, secagem da torta.....	39
Figura 10 – Filtro a tambor, com descarga de correia.....	42
Figura 11 – Filtro de disco convencional. ....	43
Figura 12 – Filtro Ceramec.....	44
Figura 13 – Filtro linear, de correia.....	45
Figura 14 – Filtro linear, etapas do processo. ....	46
Figura 15 – Filtro circular horizontal. ....	47
Figura 16 – Ilustração de um filtro CERAMEC industrial.....	48
Figura 17 – Filtro prensa de placas verticais.....	50
Figura 18 – Ilustração de um filtro ANDRITZ industrial. ....	51
Figura 19 – Filtro Larox Industrial, aplicado na produção de PPL1 – VALE/Carajás.....	52
Figura 20 – Esquema de funcionamento de um Filtro LAROX industrial. ....	53
Figura 21 – Filtro PNEUMAPRESS industrial.....	54
Figura 22 – Filtro PNEUMAPRESS industrial.....	55
Figura 23 – Filtro TUBEPRESS industrial .....	57
Figura 24 – Ciclo operacional filtros TUBEPRESS/METSO.....	58

Figura 25 – Esquema geral do funcionamento de filtro hiperbáricos de discos verticais. ....	59
Figura 26 – Secador rotativo paralelo. ....	61
Figura 27 – Fases de desenvolvimento da pesquisa. ....	64
Figura 28 – Representação dos fluxos da hidrociclonagem em Carajás/VALE.....	67
Figura 29 – Caracterização dos “tailings” – Carajás/VALE. ....	68
Figura 30 – Macro fluxo do beneficiamento em Carajás/VALE. ....	69
Figura 31 – Fluxograma de produção PPL1.....	70
Figura 32 – Esquema de equipamento de bancada – TUBEPRESS. ....	77
Figura 33 – Esquema de equipamento de bancada – VPA.....	78
Figura 34 – Resultados de Teste em bancada – VPA.....	79
Figura 35 – Equipamento piloto de filtração. ....	80
Figura 36 – Equipamento piloto de filtração. ....	80
Figura 37 – Nível de clarificação do filtrado. ....	83
Figura 38 – Torta formada em teste piloto. ....	84
Figura 39 – Torta formada em teste piloto ....	84
Figura 40 – Torta formada em ensaios Inicias em Laboratório da PNEUMAPRESS/EUA. ....	86
Figura 41 – Filtrados e tortas de ensaios Inicias em Laboratório da PNEUMAPRESS/EUA. ....	86
Figura 42 – Influencia da adição de pellet-feed na suspensão alimentada, sobre a produtividade.....	88
Figura 43 – Efeito da adição de pellet-feed natural na polpa alimentada sobre a umidade final.....	89
Figura 44 – Influencia de auxiliares de filtração na umidade contida, com filtração sob pressão de ar.....	90
Figura 45 – Redução da umidade, após período de evaporação.....	90

Figura 46 – Buchner com tela de aço no Silicato de Cálcio de Capstone – MIR sobre vácuo.....	91
Figura 47 – O efeito da espessura de camada sobre a umidade residual nas amostras de minério de ferro de fração (-1,25 + 0,2 mm). As amostras foram irradiadas na mesma saída de potência.....	93
Figura 48 – O efeito da espessura de torta da umidade remanescente após 30 segundos da radiação infravermelha de onda média a níveis máximos de vácuo....	93
Figura 49 – O efeito da espessura de torta da umidade remanescente após 30 segundos da radiação infravermelha de onda média a níveis máximos de vácuo....	98
Figura 50 – Gráfico comparativo entre umidade de torta e equipamento aplicado. ..	99
Figura 51 – Utilidades da planta piloto – vaso de pressão no container superior, e comporta de descarga da torta com correia transportadora no container inferior. ..	101
Figura 52 – Sistema de descarga da torta. ....	101
Figura 53 – Comparativo da umidade contida – VALE x BOKELA.....	102
Figura 54 – Torta seca e quebradiça, produto da planta piloto. ....	103
Figura 55 – Filtro PNEUMAPRESS modelo M1.3-316.....	106
Figura 56 – Filtro PNEUMAPRESS modelo M1.3-316, descarga da torta. ....	106
Figura 57 – Vista frontal do filtro Pneumapress M1.3-316, instalado em Carajás/Vale em plena Operação.....	106
Figura 58 – Vista lateral do filtro PneumapressM1.3-316, instalado em Carajás/Vale. ....	107
Figura 59 – Torta gerada na câmara de filtração do filtro PNEUMAPRESS. ....	108
Figura 60 – Torta gerada na câmara de filtração do filtro PNEUMAPRESS. ....	108
Figura 61 – Torta gerada na câmara de filtração do filtro Pneumapress. ....	108
Figura 62 – Proveta 1000 ml, utilizada em ensaios de sedimentação.....	110
Figura 63 – Concentração de sólidos na alimentação.....	111
Figura 64 – Proveta 1000 ml, utilizada em ensaios de sedimentação.....	112
Figura 65 – Planta piloto do espessador “Deep-Cone”, Dorr-Oliver Eimco. ....	114

Figura 66 – Tempo de Residência x percentual de sólidos no overflow.....	115
Figura 67 – Aspecto do fluxo de underflow em teste piloto com espessador Deep Cone.....	116
Figura 68 – Aspecto do fluxo de underflow em teste piloto com espessador Deep Cone.....	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas das fibras de tecidos filtrantes.....	36
Tabela 2 – Composição das amostras testadas.....	71
Tabela 3 – Caracterização química e física das amostras.....	72
Tabela 4 – Caracterização granulométrica das amostras (g).....	72
Tabela 5 – Testes de bancada realizados.....	73
Tabela 6 – Equipamentos selecionados para teste piloto. ....	74
Tabela 7 – Ensaio Realizados Em Escala De Laboratório .....	76
Tabela 8 – Ensaio Realizados Em Escala De Laboratório .....	77
Tabela 9 – Polpa com polpa de minério de Ferro 100% rejeito.....	81
Tabela 10 – Ensaio Com Polpa Minério De Ferro 75% E 50 % Rejeito. ....	82
Tabela 11 – Parâmetros de processos.....	85
Tabela 12 – Resultados em teste de bancada. ....	86
Tabela 13 – Resultados de teste em bancada. ....	95
Tabela 14 – Parâmetros de Projeto: Características da Polpa.....	100
Tabela 15 – Desempenho do teste com Amostra 1. ....	104
Tabela 16 – Desempenho de filtragem – Amostra nº 2 – Rej. Moagem + PFCJ.....	105
Tabela 17 – Resultados dos testes com filtro Pneumapress.....	109
Tabela 18 – Características do rejeito natural.....	110
Tabela 19 – Resultados com Amostra 01. ....	112
Tabela 20 – Concentração máxima de Sólidos.....	113
Tabela 21 – Teste piloto com espessador “Deep Cone”. ....	114
Tabela 22 – Teste piloto com espessador “Deep Cone” em planta piloto. ....	115
Tabela 23 – Resultados dos testes em planta piloto.....	115
Tabela 24 – Teste piloto com espessador “Deep Cone”. ....	117

## LISTA DE SIGLAS

SFCK	Sinter-feed de Carajás
PFCJ	Pellet-feed de Carajás
PPL1	Pellet-feed obtido a partir da moagem do SFCK
PPC	Perda por calcinação
S.E	Superfície específica
PLC	<i>“Programmable Logic Controller”</i> – Controlador Lógico Programado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$	Mícron/Micra
$\text{cm}^2/\text{g}$	Centímetro quadrado por grama, unidade de área específica.
$\text{m}^2/\text{kg}$	Metro quadrado por quilograma, unidade de área específica.
mm	Milímetro
$\varnothing_M$	Diâmetro médio
g/den	Indica a resistência à tração do fio de um tecido, em gramas por denier.
bar	Unidade de pressão e equivale a exatamente 1.00.000 Pa ( $10^5$ Pa)
cm	Centímetro
m/s	Unidade que expressa velocidade, metros por segundo
°C	Graus centígrados
m	Metro
cm/s	Unidade que expressa velocidade, centímetros por segundo
$\text{g}/\text{cm}^3$	Unidade de concentração, gramas por centímetro cúbico
wt%	Unidade de concentração de sólidos, base peso
g/t	Unidade de concentração, gramas por tonelada
kg/l	Unidade de concentração, quilograma por litro
ml	Mililitro
$\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$	Unidade de produtividade em função da área disponível, quilograma por hora por metro quadrado
l/tbs	Unidade de concentração, litros por tonelada base seca

$\text{kW/m}^2/\text{h}$	Unidade de consumo energético em função da área disponível, quilowatt consumido por metro quadrado por hora
$\text{kW}$	Quilowatt
$\text{kg/tbs}$	Unidade de concentração, quilograma por tonelada base seca
$\text{l/tbs}$	Unidade de concentração, litro por tonelada base seca
$\text{g/tbs}$	Unidade de concentração, grama por tonelada base seca
$\text{m}^3/\text{tbs}$	Unidade de concentração, metro cúbico por tonelada base seca
$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$	Unidade de consumo em função da área disponível, metro cúbico por metro quadrado por hora
$\text{kWh/t}$	Unidade de consumo específico de energia, quilowatt hora por tonelada
$\text{t/h} \times \text{m}^2$	Tonelada por hora para cada metro quadrado de meio filtrante

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Caracterização do problema	19
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivos gerais	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.2.3 Possibilidades de aproveitamento do “ <i>tailing</i> ”	22
1.3 Estruturação do assunto	23
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>24</b>
2.1 Terminologia do desaguamento	24
2.2 Porosidade	25
2.3 Dispersão e agregação	25
2.4 Mecanismos de desaguamento	26
2.4.1 Drenagem estacionária	27
2.4.2 Deslamagem convencional	28
2.4.3 Centrifugação	29
2.4.4 Cone desaguador	29
2.4.5 Espessamento	30
2.4.6 Filtragem	32
2.4.6.1 Meios filtrantes	34
2.4.6.2 Teste de filtração (filter leaf test)	37
2.4.6.3 Tipos de filtro	39
2.4.6.3.1 Filtros a vácuo	40
2.4.6.3.1.1 Filtro de tambor a vácuo	42
2.4.6.3.1.2 Filtro a vácuo de discos	42
2.4.6.3.1.3 Filtros a vácuo de correia	45
2.4.6.3.1.4 Filtro a vácuo horizontal ou de mesa	46
2.4.6.3.1.5 Filtros a Vácuo – Ceramec	47
2.4.6.3.2 Filtros tipo prensa	49
2.4.6.3.2.1 Pneumapress	54
2.4.6.3.2.2 Tube Press ®	56

2.4.6.3.2.3 Filtro hiperbárico tipo Bokela	59
2.4.7 Secagem	60
2.4.7.1 Steel belt dryer – Secador linear	61
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>63</b>
3.1 Descrições das fases dos ensaios – bancadas (laboratório) e piloto	63
3.2 Definição dos rejeitos e caracterização das amostras testadas	67
3.2.1 Amostras de tailing natural usadas nos testes de bancada	71
3.2.2 Amostras dos testes piloto	72
3.3 Tecnologias pesquisadas – ensaios de bancada e piloto	73
3.3.1 Empresas/equipamentos selecionados para ensaios de bancada – diversos laboratórios	73
3.3.2 Empresas e equipamentos selecionados para ensaios em escala piloto na planta de Carajás/VALE	74
3.3.3 Base de dados	74
<b>4 RESULTADOS DOS TESTES</b>	<b>75</b>
4.1 Resultados dos testes de bancada	75
4.1.1 Metso Tubepress	76
4.1.2 Metso VPA	78
4.1.3 Andritz filtro prensa	89
4.1.3.1. Resultados dos testes com filtro Andritz	81
4.1.4 Pneumapress	85
4.1.5 Bokela hiperbárico	87
4.1.5.1. Influência da adição de pellet-feed natural à suspensão de tailing	87
4.1.5.2. Influência da adição de auxiliar de filtragem no teor de umidade	89
4.1.6 Steel belt dryer – Secador linear	91
4.1.7 Comparativo de resultados com teste de bancada	98
4.2 Resultados dos ensaios piloto	100
4.2.1 Filtro hiperbárico bokela	100
4.2.2 Pneumapress	105
4.2.3 Resultados de teste piloto com espessador deep cone Dorr Oliver Eimco	109
4.2.3.1 Ensaio de sedimentação	109
4.2.3.1.1 Seleção de polímero/floculante	111

4.2.3.1.2 Resultados obtidos	112
<b>5 . CONCLUSÃO</b>	<b>118</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>120</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>121</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Caracterização do problema

A presente dissertação refere-se ao desafio de reduzir as perdas envolvidas no descarte de rejeitos ultrafinos de plantas de beneficiamento de minério de ferro. É de conhecimento da indústria de mineração os vários apelos da atual sociedade para o aproveitamento mais sustentável dos recursos naturais não renováveis, em especial aqueles provenientes do setor mineral e mais agudamente aqueles que envolvem algum impacto ambiental, seja esse relevante ou não.

Processos diversos são executados em específicas plantas de beneficiamento e amplamente utilizados na indústria da mineração. Esses mecanismos são correntemente ajustados de forma a maximizar o aproveitamento da jazida e elevar os ganhos que tragam o maior retorno financeiro ao capital investido. Entretanto, o tratamento de minérios, por suas características intrínsecas, na sua grande maioria, gera rejeitos, que são descartados por não possuírem especificações físicas e/ou químicas adequadas.

No caso específico da Vale Carajás, o teor de ferro contido no minério, de cerca de 66,00%, permite seu aproveitamento econômico sem necessidade de etapas de concentração. Somente as etapas de cominuição e classificação por tamanho apropriam esse minério para a comercialização e aplicação em diversas rotas siderúrgicas. Após as etapas de britagens, faz-se necessário apenas o uso do peneiramento e / ou deslamagem para gerar os principais produtos da Usina. Não existem assim etapas de concentração e os produtos são diferenciados por suas respectivas curvas granulométricas: o “granulado” - mais grosseiro ( $> 13$  mm), o “*Sinter-Feed*” ( $< 13$  mm e  $> 0,5$  mm) e o “*pellet feed*” ( $< 0,15$  mm).

A última etapa de beneficiamento do minério fino de Carajás, o “*Pellet-Feed*”, é também de desaguamento, e é feita via hidrociclonação. Essa etapa também elimina parte das lamas indesejáveis e adequa assim, tanto química quanto fisicamente, o “*pellet feed*” às especificações de produto final. Essa adequação prepara ainda esse produto para a operação subsequente – de filtração, com as

características físicas para possibilitar ser filtrado e estar posteriormente pronto para o manuseio no pátio e silos de carregamento e o seu transporte via ferroviária.

Contudo, todas as operações de desaguamento de minério de ferro em hidrociclones geram perdas no *overflow* do hidrociclone de partículas sólidas, ultrafinas e ricas em ferro, que são normalmente direcionados para barragem de rejeitos. Entretanto, como em todos os produtos principais dessa usina, os rejeitos gerados no beneficiamento dessa jazida possuem elevado teor de ferro contido, tornando-se um elemento de alta atratividade para elevação da recuperação da usina e do seu melhor aproveitamento econômico. São finos e ultrafinos ainda riquíssimos, com aproximadamente 62% em ferro contido. Adicionalmente, os baixos teores de contaminantes - como os teores de alumina, fósforo, manganês, silicatos e óxidos secundários contidos nesses rejeitos, fazem desses materiais alvo de estudos para aproveitamento na indústria siderúrgica, em vias convencionais de sinterização - tal qual os produtos principais - ou na incorporação destes às misturas especiais para rotas alternativas.

Considerando assim, toda a importância econômica da mineração na sociedade brasileira e ainda buscando a mitigação de impactos ambientais com barragens mesmo com as melhorias implantadas pela Vale em aproveitar esta fração fina do minério, cerca de 17 milhões de toneladas de rejeitos ainda são descartados anualmente da Usina Principal.

Dada à elevadíssima superfície específica desses rejeitos gerados (> 6.500 Blaine), que é função do elevado percentual de partículas ultrafinas contidas (de 45% até 95 % < 7  $\mu\text{m}$ ), tecnologias especiais de desaguamento são requeridas para se atingir a umidade residual que viabilize tanto o manuseio destes rejeitos quanto a sua aplicação posterior na indústria siderúrgica.

O método Blaine é geralmente aplicado na determinação da finura de cimentos, entretanto era o único método disponível na área industrial e foi aplicado nos testes. Seus resultados são expressos em  $\text{cm}^2/\text{g}$  e são determinados em função da permeabilidade do ar em uma camada do material, em um espaço de tempo.

Conceitos novos, mais arrojados, que conciliam filtragem / secagem são sistematicamente utilizados em equipamentos modernos de desaguamento, com destaque para aqueles que incluem sistemas compostos de elevadas pressões e também elevadas temperaturas atuando de forma isolada ou mesmo aplicadas simultaneamente. Assim, diversas foram as tecnologias pesquisadas nessa linha de

pesquisa, dentre elas: Filtros a vácuo de Discos e Ceramec, Filtros tipo prensa atmosféricos, Filtros tipo prensa alta pressão, Filtros pneumáticos, Secador de Esteira e Espessadores tipo “*Deep Cone*”.

O que se propõe nessa dissertação, portanto, é a definição de qual tecnologia pode ser aplicada no desaguamento de rejeitos ricos de minério de ferro ultrafino e torná-los de interesse para a indústria de transformação do aço.

Os resultados deste estudo ressaltam a importância de continuar a pesquisar alternativas tecnológicas de desaguamento para o aproveitamento de materiais ultrafinos, em especial os ricos, como os rejeitos do minério de ferro de Carajás, que é estrategicamente aplicado para viabilizar diversas minas e operações em todo mundo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos gerais**

Os objetivos gerais dessa pesquisa buscaram a solução para o problema do desaguamento de rejeitos ultrafinos de minério de ferro. Ou seja, a identificação e adequação de tecnologias e equipamentos convencionais e outros ainda inéditos de adensamento, filtragem e secagem para recuperar esses “rejeitos ricos” para posterior aplicação, com a expectativa de impactos diretos na produtividade da usina de tratamento de minério, assim como na redução dos seus custos operacionais, melhorando o retorno econômico da reserva.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

O estudo busca obter importantes informações para especificar, através de métodos experimentais de laboratório e também em escala piloto, tecnologias capazes de desaguar o enorme fluxo de rejeitos ultrafinos gerados no *overflow* das etapas de hidrociclonagem da Usina de Ferro Carajás para 9,00 % de umidade

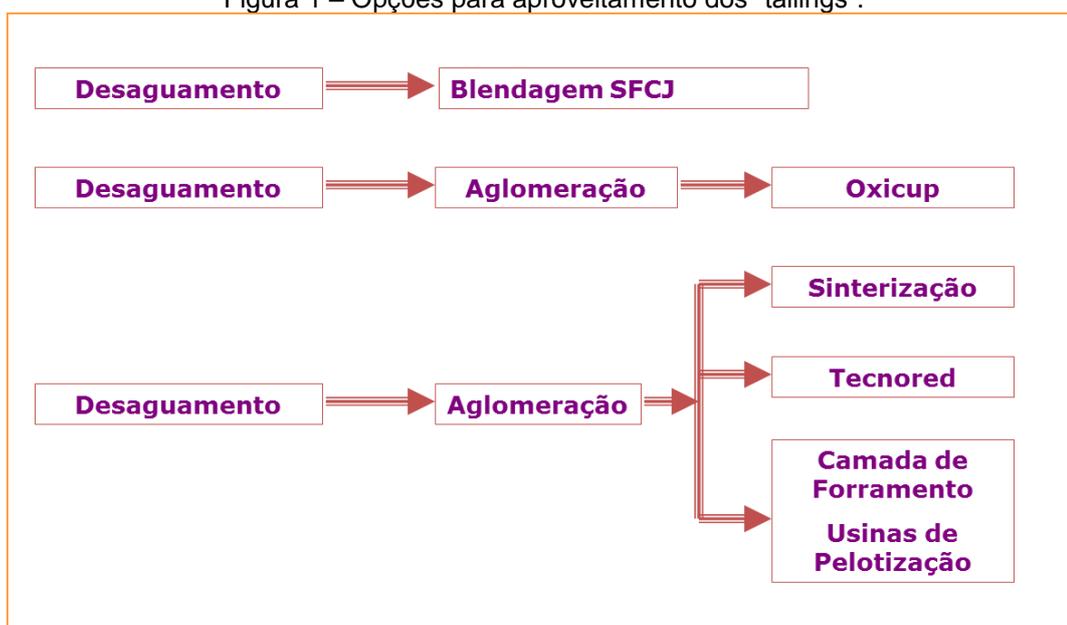
residual, pois é esse o valor que permite a movimentação e o manuseio desses rejeitos, além de permitir sua incorporação na blendagem de produtos mais grossos.

O desafio é estimulante e requer muitos ensaios visto que esses “*tailings*” (rejeitos) são ultrafinos, muito porosos e de altíssima superfície específica (> 6.500 Blaine).

### 1.2.3 Possibilidades de aproveitamento do “*tailing*”

Opção de aumento de produção do Sistema Norte, com o aproveitamento dos materiais considerados rejeitos atualmente passam por solução de deslamagem com para poder ser reaproveitado. A umidade alvo de 9,00% permite o manuseio e a incorporação desse material para aplicações específicas, que precisam ser melhor estudadas depois, sob a ótica dos efeitos da inclusão desses ultrafinos ricos de minério de ferro, de forma a desenvolver rotas de processo/desaguamento (Figura 1) e posterior aproveitamento metalúrgico do “*tailing*” da usina de beneficiamento do Sistema Norte. Esse aproveitamento pode ser superior a 17 Mtpa de ultrafinos ricos.

Figura 1 – Opções para aproveitamento dos “*tailings*”.



Fonte: Próprio autor, 2013.

### 1.3 Estruturação do assunto

Esta pesquisa foi estruturada em forma de capítulos, visando facilitar o entendimento do leitor, para inseri-lo no contexto da realidade abordada. Assim, esse primeiro capítulo apresenta a introdução do assunto pesquisado, destacando sua relevância, as tecnologias e variáveis de estudo, e o que se pretende com esta pesquisa.

O segundo capítulo traz os objetivos propostos para o estudo, delineando o objetivo geral de apresentar uma abordagem científica das tecnologias aplicáveis dentro do processo de recuperação dos ultrafinos ricos sob a ótica dos impactos produtivos na cadeia do minério de ferro, os objetivos específicos pretendidos, que estão traçados no sentido de expor o comportamento desses sistemas de desaguamento, modificados ou inovadores, para demonstrar o seu desempenho e assim evidenciar suas associações à luz das características reológicas, mineralógicas, físicas e químicas, típicas desses valiosos ultrafinos do jazimento.

O terceiro capítulo inclui revisão bibliográfica dos parâmetros básicos de separação sólido-líquido, incluindo os conceitos de diversas tecnologias de desaguamento investigadas nessa pesquisa. O circuito de processamento de minérios de ferro na Usina de Carajás, e o problema de manuseio dos finos e ultrafinos contidos nos rejeitos da hidrociclonação, que é o alvo principal do estudo são também apresentados ao leitor. No quarto capítulo são descritas as amostras testadas em escala de bancada e também aquelas processadas nas plantas piloto. Os materiais e os equipamentos pesquisados são relacionados, e são detalhados os ensaios de laboratório e também os realizados em escala piloto.

O quinto capítulo traz os resultados alcançados e ainda a discussão a cerca das alternativas e inovações relacionadas nos ensaios de bancada e piloto, destacando-se as novas tecnologias para o desaguamento dessas polpas de ricos ultrafinos de minério de ferro.

As conclusões dessa pesquisa são apresentadas de forma a resumir os aspectos mais relevantes ao tema da Dissertação, principalmente em relação aos equipamentos mais apropriados e promissores para adequar os ultrafinos do manuseio de minério de ferro, e são relacionadas sugestões para linhas de pesquisas e trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo deste capítulo é descrever de forma resumida as propriedades físico químicas de maior relevância e influência no processo de desaguamento dos ultrafinos. Essa revisão objetiva ainda apresentar as tecnologias pesquisadas e os equipamentos testados no desenvolvimento desse trabalho. Serão abordadas algumas características desses mecanismos, as premissas e condições de operação, as suas vantagens e restrições competitivas.

### 2.1 Terminologia do desaguamento

Os termos finos, ultrafinos, coloides e lamas são utilizados na definição de tamanho de partículas. Neste trabalho os termos são concordantes com as definições de SOMASUNDARAN (2006), com base no tamanho e no comportamento das partículas em meio aquoso:

- a. **Finos:** partículas que não são facilmente separadas por processos físicos de concentração e que têm tamanho inferior a 100  $\mu\text{m}$ , mas superior a 10  $\mu\text{m}$ .
- b. **Ultrafinos:** partículas que não são facilmente separadas por métodos convencionais de concentração (inclusive flotação) e que têm tamanho inferior a 10  $\mu\text{m}$ , mas superior a 1  $\mu\text{m}$ .
- c. **Coloides:** partículas de tamanho inferior a 1  $\mu\text{m}$ .
- d. **Lamas:** misturas contendo coloides e ultrafinos, geradas durante a lavra e o beneficiamento de um minério.

## 2.2 Porosidade

PENA, et al. (2008, p. 56), analisaram a caracterização dos parâmetros de porosidade de concentrados de minérios de ferro pelo método de adsorção de nitrogênio, e destacaram a importância da “caracterização dos parâmetros intrínsecos de porosidade e superfície específica de concentrados de minérios de ferro”.

Nesse sentido, a porosidade deve ser cuidadosamente avaliada, no que se refere à análise dos mecanismos de redução de perdas de rejeitos descartados em Carajás e sua influência no desaguamento e manuseio de minério de ferro, em especial o de Carajás. Isto porque, nota-se que, naturalmente, os minérios de ferro processados na atualidade, envolvem uma mistura constituída por minérios anidros e hidratados, que tendem a gerar alterações de porosidade e de superfície específica. Porém, essa influência não fez parte do escopo dessa dissertação.

## 2.3 Dispersão e Agregação

O parâmetro “grau de dispersão” dos diversos minerais presentes na polpa é muito importante nos processos de deslamagem. Quanto mais estável o estado de dispersão de um dado mineral, maior é a tendência para este mineral se concentrar nas lamas.

Há muito se sabe que a principal fonte causadora dos problemas de manuseio em Carajás é o excesso de umidade, especialmente do *sinter-feed* (SFCK). Inúmeras tentativas de reduzir a umidade foram feitas ao longo de pelo menos 20 anos, incluindo secagem, uso de reagentes tensoativos e dispersantes, drenagens, filtragens, raspadores, equipamentos desaguadores, dentre outros (CAVALLI, 2010, p. 4).

A dispersão é o fenômeno no qual as partículas coloidais hidrofílicas mantêm afinidade com a molécula de H<sub>2</sub>O, dispersando-se na água de forma espontânea, e que, por consequência, formam um sistema termodinamicamente estável, devido às

interações químicas dos íons com a superfície colóide e com as moléculas de água. Ao contrário, tem-se que as dispersões de colóides hidrofóbicos e de partículas minerais ( $< 100 \mu\text{m}$ ).

Agregação equivale a um fenômeno inverso ao da dispersão, ou seja, a destruição da estabilidade de uma dispersão, e pode ser obtida através de quatro métodos distintos: aglomeração, ligações hidrofóbicas, coagulação, floculação. Estes quatro métodos de formação de agregados têm aplicações em várias etapas de tratamento de minérios, principalmente nas etapas de desaguamento e concentração.

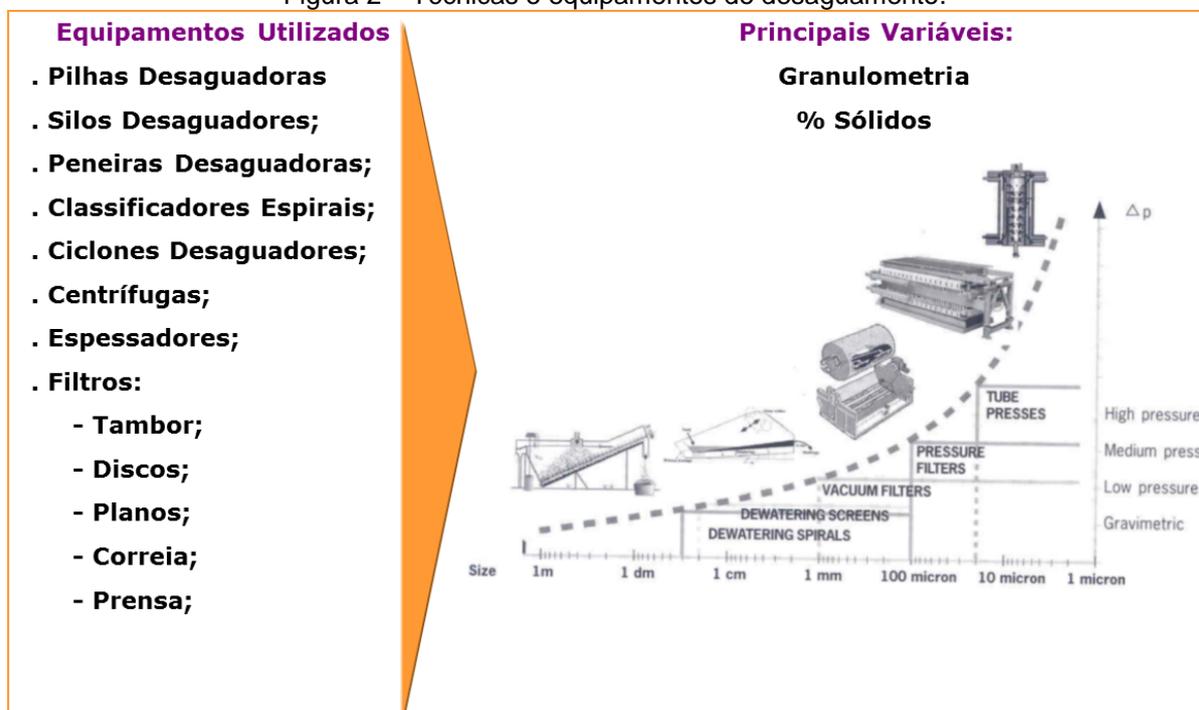
## **2.4 Mecanismos de desaguamento**

No processamento de minério de ferro, o desaguamento inclui diversas etapas, iniciando com a análise da consistência da disposição (com a avaliação da polpa, polpa alta, pasta alto e pasta baixo); o equipamento de desaguamento requerido (com o uso do espessador convencional, espessador de alta velocidade, “*deep cone*” e filtro disco); o sistema de bombeamento requerido (usando a bomba centrífuga, bomba centrífuga ou de diafragma, e bomba de deslocamento positivo); o processo de ângulo repouso (com o incremento no volume depositado).

Os métodos de desaguamento podem ser classificados em três grandes grupos: Sedimentação, Filtração e Secagem.

O esquema apresentado na Figura 2 ilustra as mais comuns técnicas e equipamentos de desaguamento aplicados na Indústria Mineral.

Figura 2 – Técnicas e equipamentos de desaguamento.



Fonte: METSO, 2006.

#### 2.4.1 Drenagem estacionária

A drenagem estacionária é o método mais rudimentar de deslamagem. No caso mais simples, um monte de material úmido é disposto em um piso, o líquido então, sob ação da gravidade, se direciona para as camadas inferiores da pilha formada e se a superfície de suporte for levemente inclinada o líquido escoará para fora da área de empilhamento.

Algum líquido residual ainda pode estar preso por adesão à superfície das partículas sólidas e ainda por capilaridade entre superfícies de sólidos adjacentes. O volume de água retida desta maneira depende primeiramente do tamanho das partículas sólidas. Os grãos mais finos, de área superficial maior, retêm maior

volume de água residual; um menor peso específico do sólido, implica em uma porcentagem de umidade mais alta do sólido drenado.

Em alguns casos, uma peneira forma a superfície de drenagem. Caixas podem substituir o piso na base do empilhamento, de forma a conter os sólidos drenados de forma mais eficiente.

#### 2.4.2 Deslamagem convencional

A deslamagem (remoção de lamas) é uma operação necessária em algumas operações do tratamento mineral por causa dos efeitos prejudiciais das partículas muito pequenas ( $< 10 \mu\text{m}$ ) em etapas metalúrgicas subsequentes. A deslamagem, no sentido mais amplo do termo (remoção de finos e lamas), pode ser feita por algumas técnicas de peneiramento ou de classificação.

A deslamagem realizada por peneiramento só é viável no caso particular de minérios com distribuição granulométrica favorável. Operações de deslamagem podem ser utilizadas inclusive para concentração de minérios quem contêm minerais de ganga distribuídos predominantemente nas frações granulométricas mais finas. Minerais úteis se concentram, normalmente, nas frações mais grossas (acima de  $10 \mu\text{m}$ ).

O circuito de deslamagem é essencialmente o mesmo do atual Concentrador de Germano, com uma etapa *rougher* feita em hidrociclones de 15 polegadas de diâmetro, uma etapa *cleaner* feita em hidrociclones de 10 polegadas e uma etapa *scavenger* feita em hidrociclones de 4 polegadas ou equivalente. Inicialmente foi considerada a utilização de hidrociclones de 3 polegadas na etapa *scavenger*. No entanto, hidrociclones modernos de 4 polegadas de diâmetro, com geometria adequada, podem “cortar” tão fino quanto os de 3 polegadas. Não haverá a etapa *scavenger* final, aquela feita na planta de recuperação de finos das lamas. Com a utilização de hidrociclones modernos nas etapas *rougher* e *cleaner*, que também cortam mais fino, não se justifica a última etapa da planta de finos, como é feita no concentrador de Germano (CARVALHO, 2010, p. 19).

Hidroclassificadores tradicionais, tais como classificadores espirais e hidrociclones pode ser empregado na deslamagem destes minérios. No caso mais

geral, a deslamagem é feita através de cortes em frações granulométricas bem mais finas (menores que 20  $\mu\text{m}$ ).

Além disso, nos hidrosseparadores, a classificação não é feita somente segundo o tamanho das partículas, mas associando fenômenos que envolvem os pesos específicos dos minerais presentes na polpa. Minerais de menor densidade seguem, com preferência, o fluxo das lamas (overflow). No fluxo inverso, no *underflow*, predominam os minerais, por apresentarem maior densidade relativa.

### **2.4.3 Centrifugação**

Segundo RUBIO (2011) centrifugação é a técnica de desaguamento que consiste na utilização de um dispositivo rotativo que induz uma sedimentação forçada sob a ação de uma aceleração significativamente elevada. As centrífugas são equipamentos caros, porém versáteis, podendo ser usadas como classificadores, espessadores, clarificadores e filtros. No tratamento de minérios elas são utilizadas quando a sedimentação gravitacional é insuficiente para promover a separação de partículas muito finas, ou quando se requer baixos níveis de umidade no produto final. Classificam-se em dois tipos básicos: centrífugas espirais decantadoras e centrífugas de cesto vibratório.

### **2.4.4 Cone desaguador**

É um equipamento utilizado no adensamento de concentrados e rejeitos, espessamento, classificação (opcional) e clarificação, para recuperação de água de processo no beneficiamento mineral.

Além de ser pouquíssimo utilizado no processamento de minerais, devido à sua baixa produtividade e eficiência, o dispositivo não foi alvo desse estudo aqui apresentado.

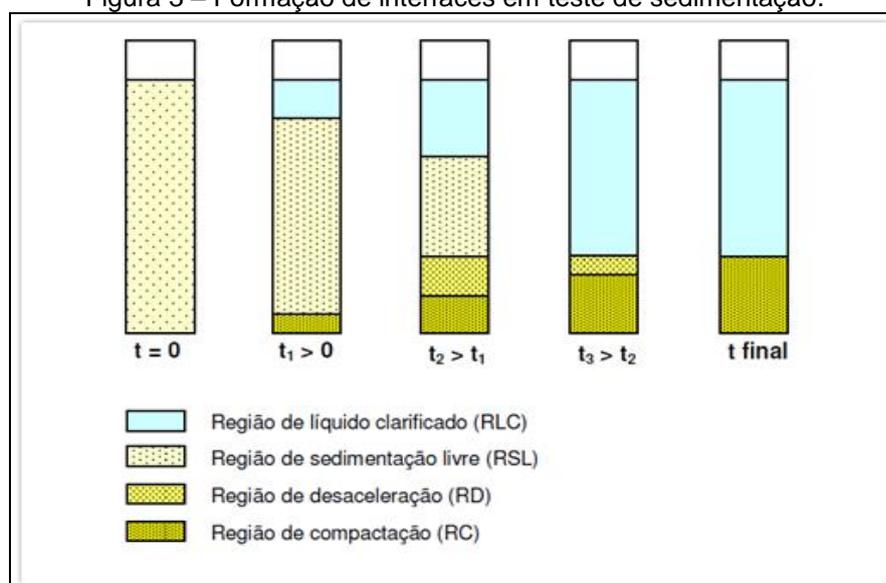
### 2.4.5 Espessamento

Segundo CHAVES (2010), o processo de espessamento visa, essencialmente, separar as fases da lama – líquida e sólida –, a fim de reduzir o volume e aumentar a matéria sólida, a partir do resultado obtido com a sedimentação. Trata-se, portanto, de uma forma de se separar o material sólido do líquido, distinguindo as densidades que constituem o produto, com sua suspensão.

A remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida ocorre pela ação do campo gravitacional, com o intuito de se obter a polpa do sólido extraído com porcentagem adequada do produto, o qual confere ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional. A larga utilização industrial dos sedimentadores promove um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos, com a finalidade de melhorar a sua utilização e eficiência no atendimento aos objetivos operacionais.

Para CHAVES (2010), o conhecimento do processo de espessamento foi desenvolvido com base na apreciação do comportamento de sedimentação de partículas sólidas em polpas diluídas, tomando por base, o desenvolvimento de ensaios em tubos longos ou curtos graduados. Tais ensaios de sedimentação em proveta podem determinar o deslocamento da interface sólido/líquido, ao longo do tempo, bem como a formação de regiões distintas, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Formação de interfaces em teste de sedimentação.



Fonte: Reis (2010).

Assim, para aumentar a eficiência do espessamento (a velocidade da decantação), são utilizados aditivos denominados de floculantes, cuja principal função é aglomerar as partículas em suspensão formando flocos que decantam rapidamente. Conforme Valadão (2007), na extração mineral, os espessadores são bastante usados, devido aos interesses relacionados aos minérios com alto valor comercial, sendo que tal processo apresenta as seguintes finalidades:

- Obtenção de polpas com concentrações adequadas a um determinado processo subsequente;
- Espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando transporte e descarte mais eficazes;
- Recuperação de água para reciclo industrial;
- Recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos.

Portanto, no setor industrial, os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente, em regime contínuo. Em linhas gerais, esses equipamentos são constituídos por: um tanque; um dispositivo de alimentação da polpa com mínima turbulência; e um mecanismo de varredura. Tipos de espessador:

- Convencional;
- High Rate;
- Tipo pasta;
- Lamela;
- Bandeja;
- Hidroseparator

Uma pasta mineral pode ser definida como um sistema coloidal com características de um fluido homogêneo, no qual não ocorre segregação granulométrica, e que ao ser disposto não apresenta drenagem significativa de água. A disposição utilizando pastas minerais representa uma alternativa, de excelente potencial, às práticas convencionais.

Os principais fatores envolvidos na formação de pastas de minérios de ferro são: A taxa de partículas finas/grossas; viscosidade-maior com uma maior taxa de frações finas e ultrafinas e parâmetros de design do sistema de escoamento (por exemplo, inclinação da calha).

Figura 4 – Espessador Deep Cone.



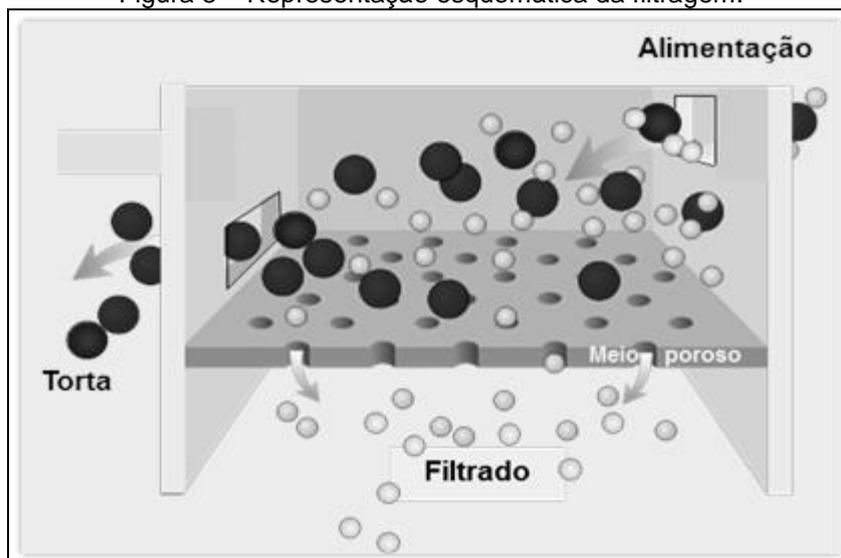
Fonte: Dorr-Oliver EIMCO, 2006.

#### 2.4.6 Filtragem

A filtragem, ou filtração, é uma operação unitária que permite a separação de partículas suspensas em um meio líquido, através da sua passagem por um material permeável, em geral, um filtro ou membrana. O filtro pode ser poroso, fibroso ou granular. A filtração pode ocorrer por ação da gravidade, de pressão, da força centrífuga e do vácuo.

A filtração consiste numa das etapas do beneficiamento mineral responsável pelo desaguamento de concentrados e rejeitos finais e pela maximização da recuperação de espécies dissolvidas em processos hidrometalúrgicos. Segundo CHAVES (2010), o líquido que atravessa o meio poroso é denominado de filtrado e os sólidos retidos, de torta.

Figura 5 – Representação esquemática da filtração.



Fonte: Chaves (2010).

As condições para que seja efetuada a filtração são muitas e variadas e a escolha do tipo mais apropriado de equipamento dependerá de um grande número de fatores. Independentemente do tipo de equipamento utilizado, a torta gradualmente se acumula sobre o meio e a resistência ao fluxo aumenta progressivamente ao longo da operação. São fatores que afetam a taxa de filtração:

- A queda da pressão da alimentação para o outro lado do meio filtrante. Isto ocorre em filtros de pressão, devido à aplicação da pressão positiva na extremidade de alimentação e, em filtros de vácuo por aplicação de vácuo ao lado oposto do suporte, sendo o lado de alimentação à pressão atmosférica;
- A área de superfície de filtração;
- A viscosidade do filtrado;
- A resistência do meio filtrante e as camadas iniciais da torta.

No processamento de minerais, a filtração se procede habitualmente após o espessamento. A polpa proveniente do espessador pode ser alimentada para tanques agitados de armazenamento, de onde é retirada uma alíquota uniforme que será direcionada para os filtros. Todavia, floculantes podem ser adicionados a fim de auxiliar a filtração.

Conforme disposições de CHAVES (2010), por sua vez, um lodo pode se formar e promover um efeito adverso sobre a filtração, uma vez que tendem a "cegar" o meio filtrante, ou seja, interromper a passagem do filtrado através do meio; a floculação reduz este lodo formado e aumenta a porosidade entre as partículas, fazendo com que o fluxo de filtrado ocorra com mais facilidade.

Os floculantes de menores pesos moleculares tendem a ser usados na filtração. Haja vista que os flocos formados pelos produtos de alto peso molecular são relativamente grandes e arrastam a água para o interior da estrutura, aumentando o teor de umidade da torta, mesmo com os floculantes de baixo peso molecular que possuem uma maior resistência de cisalhamento. Ao final a torta do filtro resultante é uma estrutura uniforme porosa que permite a desidratação rápida, mas evita a migração das partículas mais finas através da torta para o meio.

Princípios de operação da filtração industrial:

- Operação cíclica: formação, secagem, sopro e descarga.
- Variáveis operacionais: área de filtração, resistência do meio filtrante, pressão (vácuo) aplicada, viscosidade da polpa e resistência da torta.
- Fatores importantes: temperatura da polpa, porcentagem de sólidos, granulometria das partículas e pH da polpa.

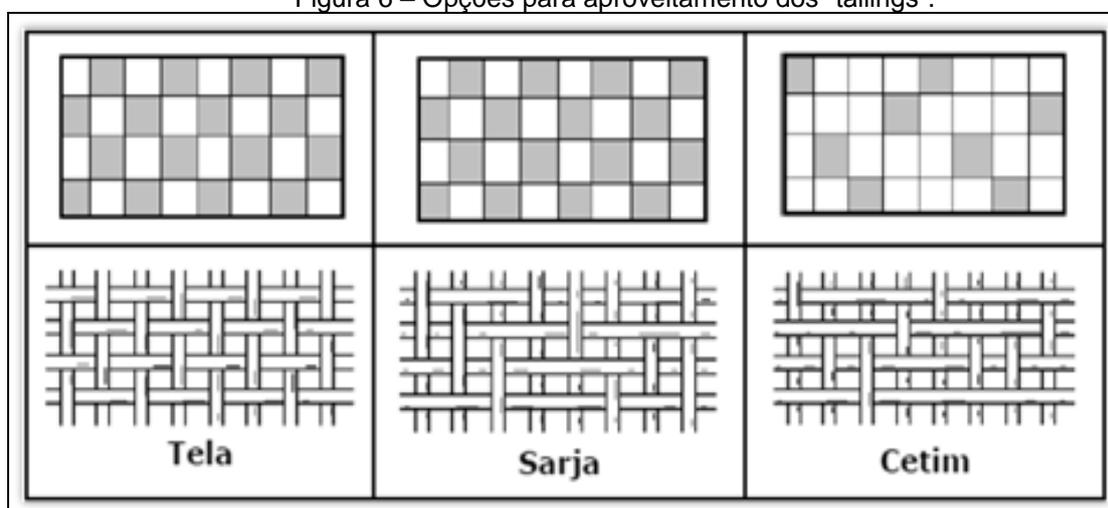
#### **2.4.6.1 Meios filtrantes**

Segundo Oliveira, Luz e Lacerda (2004, p. 104), “os meios filtrantes podem ser fabricados em algodão, lã, linho, nylon, seda, juta, fibra de vidro, borracha porosa, carbono poroso, metais, e outros materiais sintéticos”. A escolha do meio filtrante é, frequentemente, o aspecto mais importante no sentido de assegurar o funcionamento eficiente de um filtro.

Sua função é, geralmente, atuar como um suporte para a torta, à medida que as camadas iniciais da torta se formam. O meio filtrante deve ser escolhido principalmente pela sua capacidade de reter os sólidos sem cegar, ou seja, sem falhar. Ele deve ser mecanicamente forte, resistente à corrosão, e oferecer a menor resistência ao fluxo de filtrado.

A escolha do meio filtrante não está, exclusivamente, voltada para as suas propriedades químicas e sim também para a forma com que as fibras são tecidas (Figura 6). A Tabela 1 exemplifica as composições químicas, físicas e composição das fibras mais utilizadas no processamento mineral.

Figura 6 – Opções para aproveitamento dos “tailings”.



Fonte: França e Casqueira (2007).

Os filtros de algodão são, de longe, o tipo mais comum de meio filtrante, principalmente por causa do seu baixo custo inicial e a disponibilidade de uma grande variedade de tecidos. Eles podem ser utilizados para filtrar sólidos tão finos como, por exemplo, na faixa de 10  $\mu\text{m}$ .

A tela tem fios que passam alternadamente por cima e por baixo uns dos outros, semelhante à gaze hospitalar, resultando num aspecto semelhante a um tabuleiro de xadrez com quadrados alternados entre si.

Tabela 1 – Propriedades físicas das fibras de tecidos filtrantes

	Temperatura Máxima de operação segura °C	Densidade g/cm <sup>3</sup>	Absorção de água (%)
Acetato	210	1,30	9-14
Acrílico	275-300	1,14-1,17	3-5
Algodão	200	1,55	16-22
Fluorocarbono	400	2,3	-
Vidro	550-600	2,50-2,55	Até 0,3
Modacrylic	160-180	1,31	0,04-4
Nomex	400-450	1,38	-
Nylon	225-250	1,14	6,5-8,3
Poliéster	300	1,38	0,04-0,08
Alta densidade	150-165	0,95	0,01
Baixa densid.	200-230	0,92	0,01
Polipropileno	250	0,91	0,01-0,1
PVC	151-160	1,30	
Rayon	2010	1,50-1,54	20-27
Saran	160-180	1,7	0,1-1,0
Lã	180-200	1,3	16-18

	Tenacidade a seco (g/den)	Alongamento na ruptura	Resistência ao Desgaste
Acetato	0,8-12	30-50	Pobre
Acrílico	1,8-3	25-70	Boa
Algodão	3,3-6,4	5-10	Razoável
Fluorocarbono	1-2	13-27	Razoável
Vidro	3-6	2-5	Pobre
Modacrylic	2-4	14-34	Razoável
Nomex	4,1	14	Excelente
Nylon	3-8	30-70	Excelente
Poliéster	3-8	10-50	Excelente
Alta densidade	1-3	20-80	Boa
Baixa densid.	3,5-7	10-45	Boa
Polipropileno	4-8	15-35	Boa
PVC	1-3		Razoável
Rayon	0,7-4	6-40	Pobre
Saran	1,2-2,3	15-30	Razoável
Lã	0,76-1,6	25-35	Razoável

Fonte: Adaptado de Chaves (2010).

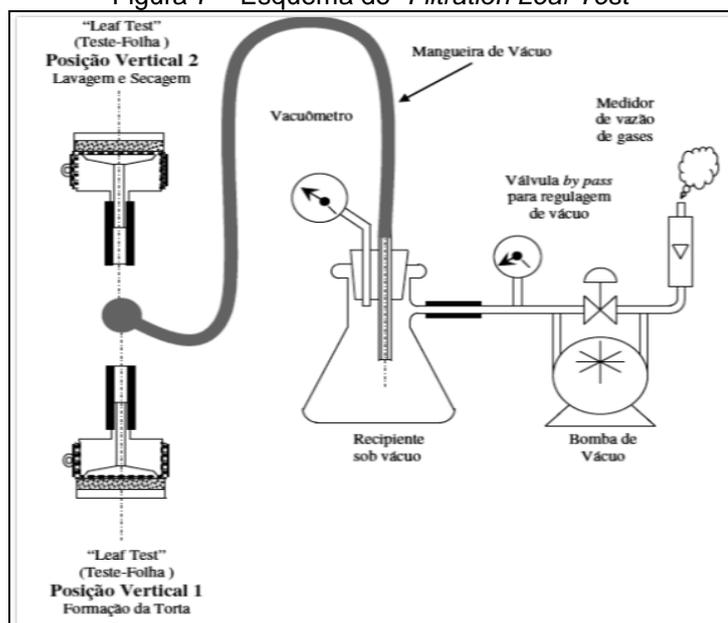
Verifica-se, portanto, que a sarja possui um aspecto de desenho diagonal, resulta e trama em cadeia ou em “*ziguezague*”, ou seja, de o fio passar por cima e por baixo, alternadamente, de dois ou mais fios consecutivos. No mesmo sentido, tem-se que o cetim é semelhante à sarja, no entanto, tem seu fio passando por cima e por baixo quatro ou mais fios cruzados consecutivos, resultando em uma superfície mais lisa, sem diagonais ou tramas visíveis.

#### **2.4.6.2 Teste de filtração (filter leaf test)**

Normalmente, não é possível prever o que pode ser realizado na filtração sem haver um teste prévio. Assim, têm de ser feitos ensaios preliminares com amostras representativas da polpa, antes que a planta em grande escala seja projetada. Os ensaios são também, geralmente, realizados com amostras de polpas de projetos ou plantas em funcionamento para avaliar o efeito da mudança condições de operação, aparelhos de filtragem, etc.

O teste de filtragem em folha é uma metodologia laboratorial que utiliza aparelhagem de simples operação, é aplicado no dimensionamento de filtros industriais. Este teste é feito com um suporte de filtragem padrão (Figura 7), a escolha do revestimento está, intrinsecamente, ligada a granulometria da polpa que se deseja filtrar, podendo ser um papel de filtro de porosidade conhecida.

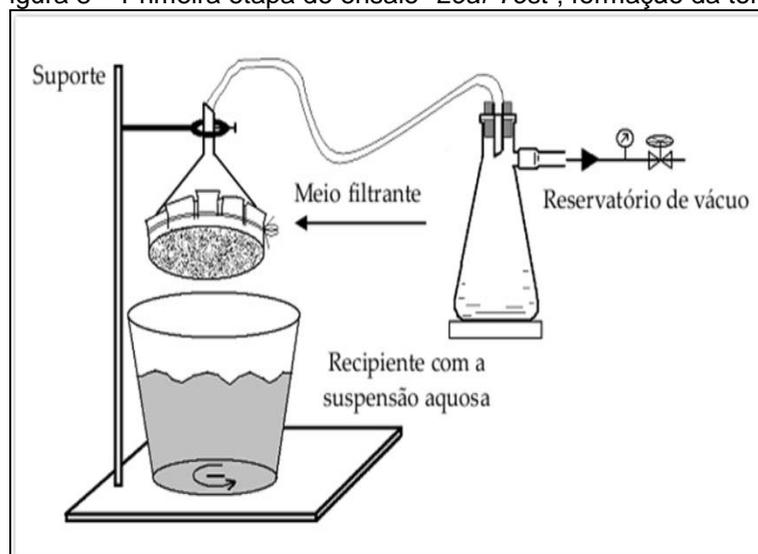
Figura 7 – Esquema do “Filtration Leaf Test”



Fonte: Polonio, Gonçalves e Razuk (2005).

O suporte então é conectado por meio de mangueiras ao kitassato (vidraria usada, juntamente com o funil de *Büchner* para realização de filtração em laboratório), a uma bomba de vácuo e a um rotâmetro (medidor de fluxo). O ensaio é dividido em três seções: formação da torta, ou "pick-up", (Figura 8), secagem (Figura 9) e descarga.

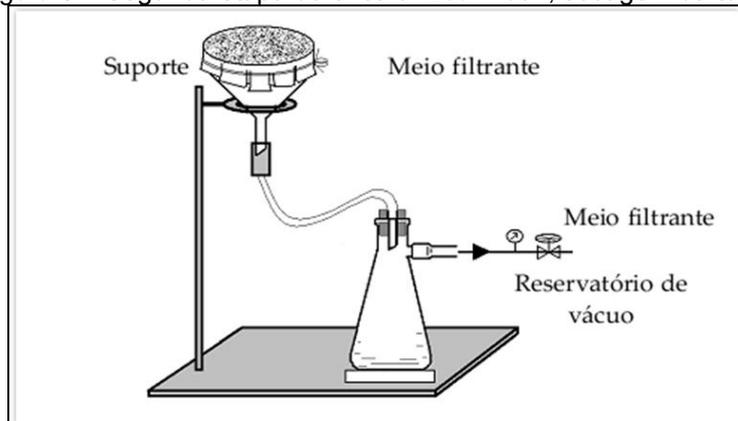
Figura 8 – Primeira etapa do ensaio “Leaf Test”, formação da torta.



Fonte: Sampaio; França e Braga (2007).

Algumas vezes, a etapa 'pick-up' é seguida por um período de lavagem da torta e pode também ser submetida à compactação, durante a secagem. Durante o vácuo, a folha de teste é imersa na polpa agitada para ser testada. A folha é então removida e mantida com o cano de escoamento para baixo durante o tempo de secagem previsto.

Figura 9 – Segunda etapa do ensaio "Leaf Test", secagem da torta.



Fonte: Sampaio, França e Braga (2007).

Os testes de laboratório devem ser conduzidos com uso de técnicas adequadas e operadores treinados. Os resultados obtidos serão utilizados para o dimensionamento de diversos filtros contínuos, conforme descrito nos exemplos que se seguem (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Verifica-se que a torta pode, então, ser removida, pesada, e secada, considerando-se que a capacidade diária do filtro pode ser determinada pelo peso seco da torta, por unidade de área da folha de teste multiplicado pelo número de ciclos por dia e a área do filtro.

#### 2.4.6.3 Tipos de filtro

Segundo Wills e Munn (2006), com algumas exceções, a maioria dos processos de separação mineral envolve o uso de quantidades substanciais de água e o concentrado final tem que ser separado a partir de uma polpa em que o percentual de sólidos pode ser elevado. Desaguamento, ou separação sólido-líquido, produz um concentrado relativamente seco para estocagem ou expedição.

O desaguamento parcial também pode ser realizado em várias fases do processo de tratamento, de modo a promover a preparação da alimentação das etapas subsequentes.

Os Filtros que formam torta são o tipo mais utilizado no processamento mineral, pois permitem a recuperação de grandes quantidades de sólidos, contudo, para sua correta operação a utilização de suspensões com alta concentração de sólidos é pré-requisito. Nos processos nos quais o requisito principal é a remoção de pequenas quantidades de sólidos a partir de suspensões relativamente diluídas são conhecidos como filtros de clarificação. De acordo com suas características, os filtros de torta podem ser: de vácuo; de pressão; com descarga em bateladas ou contínua.

#### **2.4.6.3.1 Filtros a vácuo**

Conforme CHAVES (2010), os filtros formadores de tortas na superfície são o tipo mais utilizado no processamento mineral, onde a recuperação de grandes quantidades de resíduos sólidos provenientes das suspensões concentradas é o principal requisito. As posições relativas da alimentação da polpa e do meio filtrante são fatores relevantes quanto à classificação dos filtros. Os filtros podem ser alimentados por baixo ou por gravidade.

A alimentação por baixo, operacionalmente, é muito mais eficiente, mas é limitada a polpas homogêneas ou heterogêneas que possam ser mantidas em suspensão mediante agitação moderada. Desse modo, a forma de descarga da torta, do ponto de vista operacional, é muito importante. Existem vários dispositivos utilizados, como transportadores de parafusos, cilindros, fios de arame, sopro de ar e lâminas. Esses dispositivos além de descarregar o material desaguado são muito úteis quando se faz necessário desentupir os poros do meio filtrante.

Todavia, CHAVES (2010), ainda consideram que existe sempre uma tendência dele tornar-se progressivamente 'cego'. Os equipamentos básicos usados em mineração são filtros de discos, de mesa (planos), de tambor e de correia. Filtro-prensa (filtro de pressão – não a vácuo), usado na indústria de cerâmica e em algumas operações de metalurgia extrativa (cianetação de minérios de ouro). Dentre

os mais diversos tipos de filtros da indústria mineral, alguns merecem destaque especial neste estudo.

Existem muitos tipos diferentes de filtro de vácuo, mas todos eles incorporam meios filtrantes apropriadamente suportados em um sistema de drenagem, sob o qual a pressão é reduzida por uma conexão a um sistema de vácuo. Filtros de vácuo podem ser de descarga descontínua ou contínua. Os filtros a vácuo que produzem por batelada, possuem certa quantidade de setores, cada um consistindo de uma estrutura de metal ou de uma placa com ranhuras sobre o qual meio filtrante é fixado.

Tais setores estão conectados a orifícios perfurados em tubulações, de modo que, quando é aplicado um vácuo, uma torta se forma sobre os dois lados do setor de filtração. Certa quantidade de setores está geralmente interligada, e são primeiramente imersos em polpa acondicionada em um tanque de alimentação do filtro e, em seguida, transferida para um receptor de torta, onde a mesma é descarregada através da substituição do vácuo por pressão de ar.

Embora seja de operação simples, este equipamento de filtração necessita de considerável espaço físico, e ainda existe a possibilidade de partes da torta desprender-se, durante o transporte do tanque de polpa para a descarga da torta. Atualmente eles são usados apenas para clarificação, isto é, a remoção de pequenas quantidades de sólidos em suspensão de licores.

De acordo com WILLS E MUNN (2006), os filtros horizontais que operam por batelada, apresentam processo muito semelhante ao do filtro de Buchner, de laboratório, e são constituídos por recipientes retangulares que têm um fundo falso com meio filtrante. Eles são preenchidos com a polpa, então o vácuo é aplicado até que a torta esteja seca, quando o recipiente é invertido, sendo suportado em pivôs, o vácuo é desligado e é introduzido ar comprimido a baixa pressão sob o meio filtrante, assim removendo a torta.

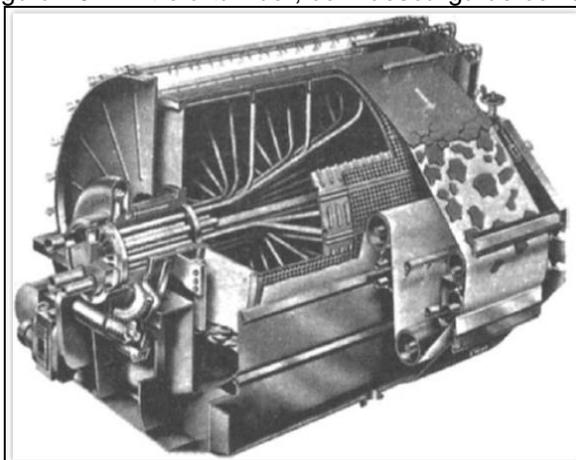
Portanto são características principais dos filtros de vácuo, mesmo em altitudes elevadas; boa secagem das tortas de filtração; altas taxas de filtração/produtividade; baixo consumo de energia; filtrados bem clarificados; instalação, operação e manutenção simples; filtro integrado aos sistemas auxiliares; operação contínua; alta disponibilidade; sistemas de recirculação se instalados minimizam o consumo de água; contínuo, a descarga da torta é eficiente.

Os filtros a vácuo contínuos são os mais aplicados no processamento de minerais e se dividem em quatro classes – filtros de tambores, a discos, de correia e filtros horizontais ou lineares.

#### **2.4.6.3.1.1 Filtro de tambor a vácuo**

O Filtro de tambor é um equipamento muito versátil quanto ao carregamento de polpa, descarga da torta e lavagem da tela, conforme se apresenta na Figura 10.

Figura 10 – Filtro a tambor, com descarga de correia.



Fonte: Wills e Munn (2006).

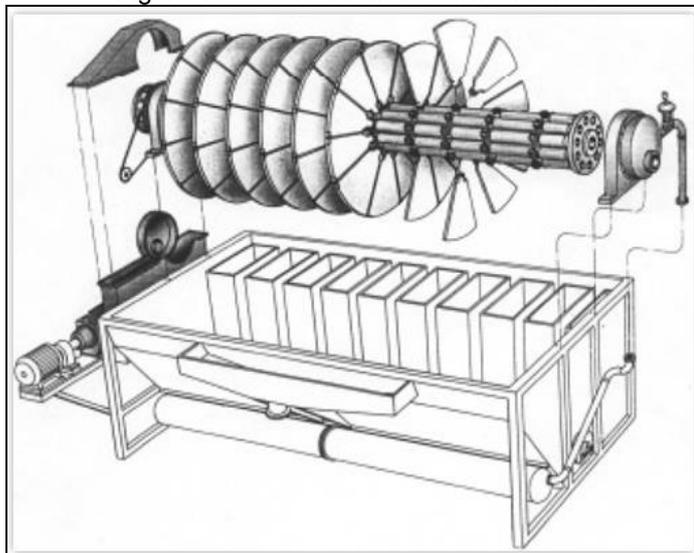
Este modelo de filtro possui um grande cilindro que gira longitudinalmente em torno do seu eixo. Neste movimento, o cilindro é imerso em um tanque contendo a polpa, a torta é formada por aspiração, de semelhante modo ao filtro de discos. Em seguida a descarga é feita por intermédio de um raspador, por rolos ou fios. A sua grande vantagem industrial é devido à capacidade de se lavar a tela, de modo a desentupí-la.

#### **2.4.6.3.1.2 Filtros a vácuo de discos**

O filtro de disco convencional, é outro tipo, que se apresenta com uma série de discos espaçados, conectados entre si por um tubo que executa um movimento de rotação. A torta é formada em ambas as faces dos discos verticais, através da

aspiração da polpa para junto da tela. Cada um dos discos é composto de vários setores independentes, cobertos de tela e que se comunica com as tubulações de vácuo e de ar comprimido. Pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Filtro de disco convencional.



Fonte: Valadão (2007).

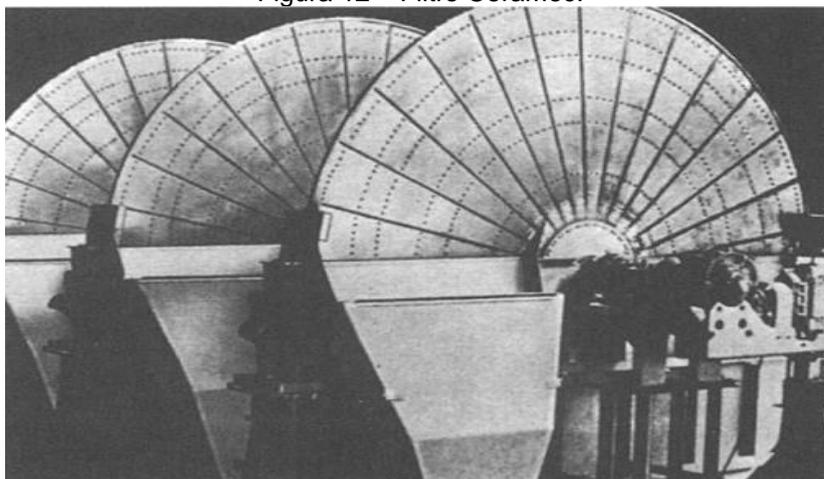
Na operação de filtros de disco a torta é formada em ambos os lados dos discos circulares, os quais estão ligados ao eixo horizontal da máquina. Os discos estão em contínua rotação e elevam a torta acima do nível da suspensão na bacia, após esta etapa a torta é submetida à secagem por sucção e é em seguida removida por um sopro de ar pulsante. Os discos podem ser localizados ao longo do eixo com cerca de 30 centímetros de espaçamento e, conseqüentemente uma área de filtragem de grandes dimensões pode ser acomodada num espaço reduzido. O custo por unidade de área é, portanto, menor se comparado ao sistema de filtros de tambor. Os parâmetros de desempenho da Filtragem de Discos a vácuo são expressos geralmente como:

- . *Umidade final da torta:* De acordo com o controle de umidade realizado na planta e as premissas estabelecidas no projeto, indica a eficiência na formação da torta e sua secagem, é influenciada principalmente pela superfície específica velocidade de rotação do filtro, percentual de sólidos na polpa.

- . *Espessura da torta:* A espessura da torta é uma variável que nos permite avaliar qualitativamente a produtividade da filtração.
- . *Taxa Unitária de Filtração (produtividade):* A Taxa Unitária de Filtração, ou TUF, é o parâmetro que mede a produtividade da operação de filtração, consistindo na massa produzida (massa seca) em relação à área filtrante, por unidade de tempo.
- . *Sólidos no filtrado:* esse parâmetro indica se o meio filtrante está sendo eficaz na retirada dos sólidos, caso o percentual de sólidos no filtrado estiver acima dos padrões de projeto, então há ineficiência ou dano ao meio filtrante. Isto pode acarretar diversos efeitos indesejáveis, como por exemplo, a obstrução dos tubos de filtrado e o seu prematuro desgaste.

Este tipo de equipamento é largamente utilizado na indústria mineral brasileira, seus baixos custos de instalação e manutenção configuram fator decisivo na sua disseminação. Contudo, seu sistema auxiliar de vácuo demanda bombas de vácuo com potências elevadas quando em operações de alta capacidade produtiva, além de construções robustas e espaço físico relativamente extenso. Isso demanda alto custo operacional destas instalações, especialmente em função da escala de produção. A operação do filtro rotativo a vácuo caracteriza-se por produzir tortas de pequena espessura e quantidades razoáveis de água contida.

Figura 12 – Filtro Ceramec.

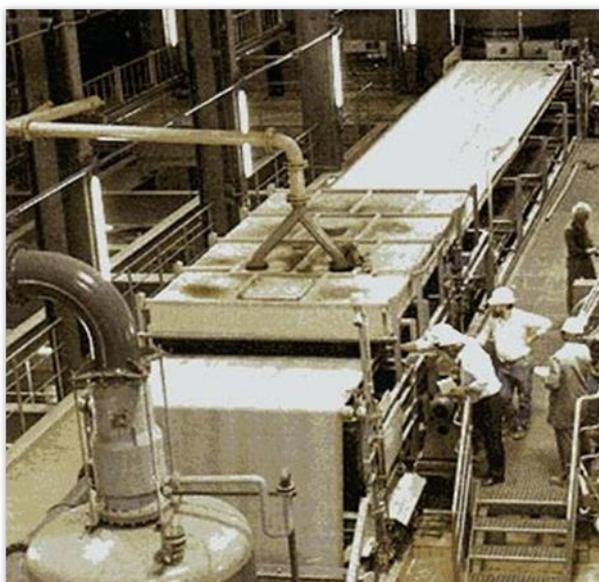


Fonte: Wills e Munn (2006).

### 2.4.6.3.1.3 Filtros a vácuo de correia

Tem-se, também, o filtro de correia (ou lineares), que pode operar com uma alta porcentagem de sólidos, ou seja, permite processar grandes vazões de sólidos e com polpas heterogêneas. Sua correia (Figura 13) tem por objetivo servir de suporte para uma tela colocada sobre ela e que permite a passagem de ar através da mesma, assim como o escoamento do filtrado por sobre a correia.

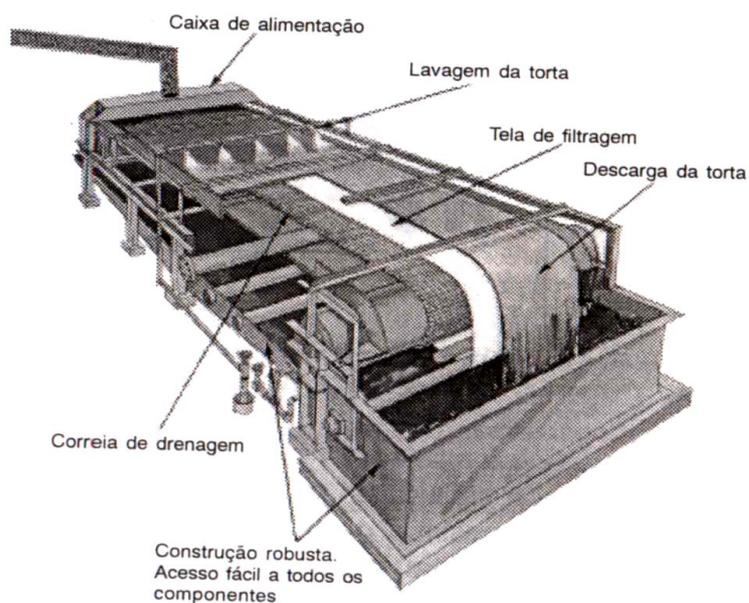
Figura 13 – Filtro linear, de correia.



Fonte: Disponível em: [www.technicalfilter.com.br](http://www.technicalfilter.com.br). Acesso em: 31/01/2013.

Portanto, é possível notar que neste tipo de filtro, a polpa é alimentada em uma das extremidades da correia, ocorrendo formação da torta, secagem, lavagem e descarga. Se for necessário, a torta pode ser ainda lavada uma ou mais vezes. Abaixo um esquema do sistema de Filtro de correia.

Figura 14 – Filtro linear, etapas do processo.

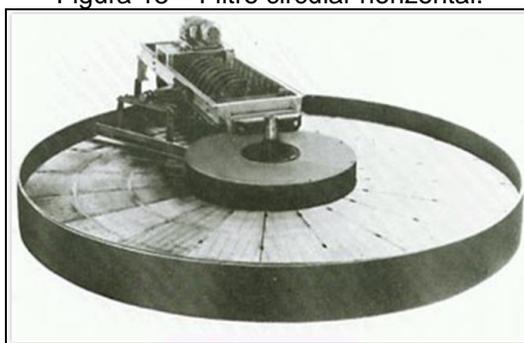


Fonte: Disponível em: [www.technicalfilter.com.br](http://www.technicalfilter.com.br). Acesso em: 31/01/2013.

#### 2.4.6.3.1.4 Filtro a vácuo horizontal ou de mesa

Há, ainda, o filtro horizontal ou de mesa, que é constituído basicamente de uma superfície plana ou circular horizontal, que exerce um movimento rotacional em torno de um eixo vertical onde é apoiada a tela que serve de aparato para a polpa que se deseja filtrar. O vácuo tem o mesmo sentido da força gravitacional. A parte circular possui várias partes ou setores, que se conectam com a câmara de vácuo do filtro a descarga é realizada com auxílio de ar comprimido proveniente de uma câmara, ambas – vácuo e ar comprimido – posicionadas abaixo do filtro (Figura 15).

Figura 15 – Filtro circular horizontal.



Fonte: Valadão (2007).

#### 2.4.6.3.1.5 Filtros a Vácuo – Ceramec

Em geral, um filtro CERAMEC consiste de um conjunto de placas de cerâmica circulares, vertical e rotativa, tanque misturador, raspador de descarga e limpeza, distribuidor de alimentação, agitador de polpa, dispositivos de limpeza (incluindo ultrassom e ácidos, a depender da aplicação), sistema de vácuo, sistema de tubulações, sistema para descarga de filtrado, sistema de lubrificação automática, calha de descarga, válvula automática e sistema de controle PLC.

O conjunto de discos é acionado por um eixo principal, a placa de filtragem gira em direção a um raspador. Sob o efeito do sistema de vácuo (bomba de vácuo, tanque de filtrado, o distribuidor e os tubos de filtrado), o disco de filtragem abaixo do nível da polpa absorve a torta, enquanto a parte das placas de filtração acima do nível de polpa faz com que o material seja submetido à secagem. O filtrado é transferido para dentro dos tanques de filtrado e a partir dele é drenado através de um sistema de descarga (bombas e tubulações de filtrado).

Quando a placa de filtragem atingir a posição do raspador, a torta é retirada por raspagem e, em seguida, transferida por meio da calha de descarga para uma correia transportadora. Após a descarga do material, o disco de filtragem é submetido a um fluxo inverso para limpeza uma vez a cada ciclo de rotação. Assim, alguns dos resíduos remanescentes entre o espaçamento da placa de filtragem e o raspador são retirados, então a função da placa de filtração é restaurada durante o funcionamento do equipamento.

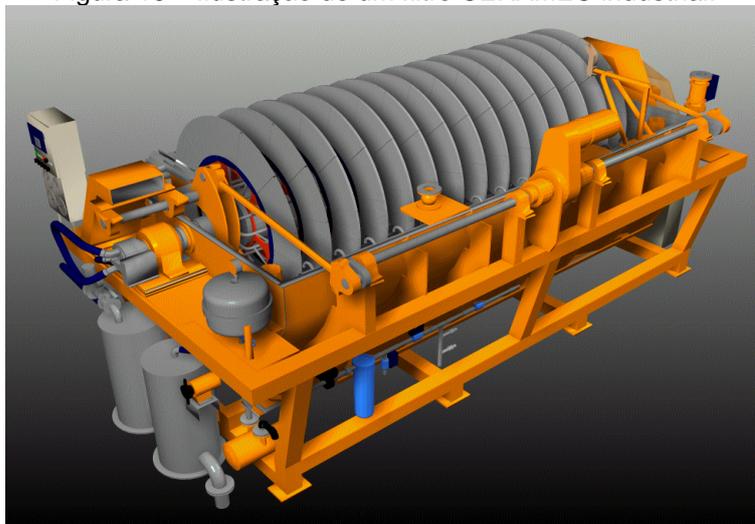
Os setores são compostos por alumina sinterizada que têm uma membrana com microporos uniformes, criando uma sucção por meio de ação capilar. Este filtro

de meio microporoso permite que apenas o líquido flua através dele. Dessa forma, o filtrado é extraído através dos discos de cerâmica que estão imersos na polpa, e uma torta se forma sobre a superfície destes discos. Apesar de um vácuo quase absoluto estar presente no lado do filtrado, há uma mínima penetração de ar pelo meio filtrante (Adaptado de Catálogo Técnico LAROX, 2008).

A torta é removida dos discos cerâmicos através a ação de um raspador, eliminando a necessidade de sopro de ar comprimido para a sua descarga.

A ação capilar do sistema de desaguamento é versátil para a indústria de mineração. O material do qual é composto o disco é inerte, resistente a quase todos os produtos químicos e temperaturas de polpa, e tem uma longa vida útil operacional. Os filtros CERAMEC são adequados para filtração de suspensões com consistente concentração de sólidos, e a granulometria das partículas de sólidos (d80) mais grosseiras do que 40 micra.

Figura 16 – Ilustração de um filtro CERAMEC industrial.



Fonte: Internet, acessado em 12/02/2013.

#### 2.4.6.3.2 Filtros tipo prensa

De acordo com WILLS E MUNN (2006), os filtros prensa são equipamentos compostos por quadros e placas separadas entre si pelo meio filtrante. Uma suspensão alimenta concomitantemente o conjunto de quadros, formando-se a torta junto ao meio filtrante; o filtrado percola através do meio filtrante, e escoar pelas ranhuras dos quadros e é conduzido para fora do filtro. O filtro prensa é então fechado por meio de um dispositivo de hidráulico ou de parafuso e promove a compressão do tecido de filtro entre as placas e os quadros.

A etapa de filtração está concluída quando a torta ocupa todo o espaço oferecido pelos quadros. Segue-se a lavagem da torta. Em seguida, o filtro é aberto e a torta descarregada, sendo a operação do filtro prensa caracteristicamente conduzida em bateladas. Segundo Wills e Munn (2006), o filtro prensa é o tipo de filtro de pressão mais utilizado. Eles podem ser construídos de duas formas - a prensa é realizada entre o quadro e a placa; ou com a formação de uma câmara de filtração.

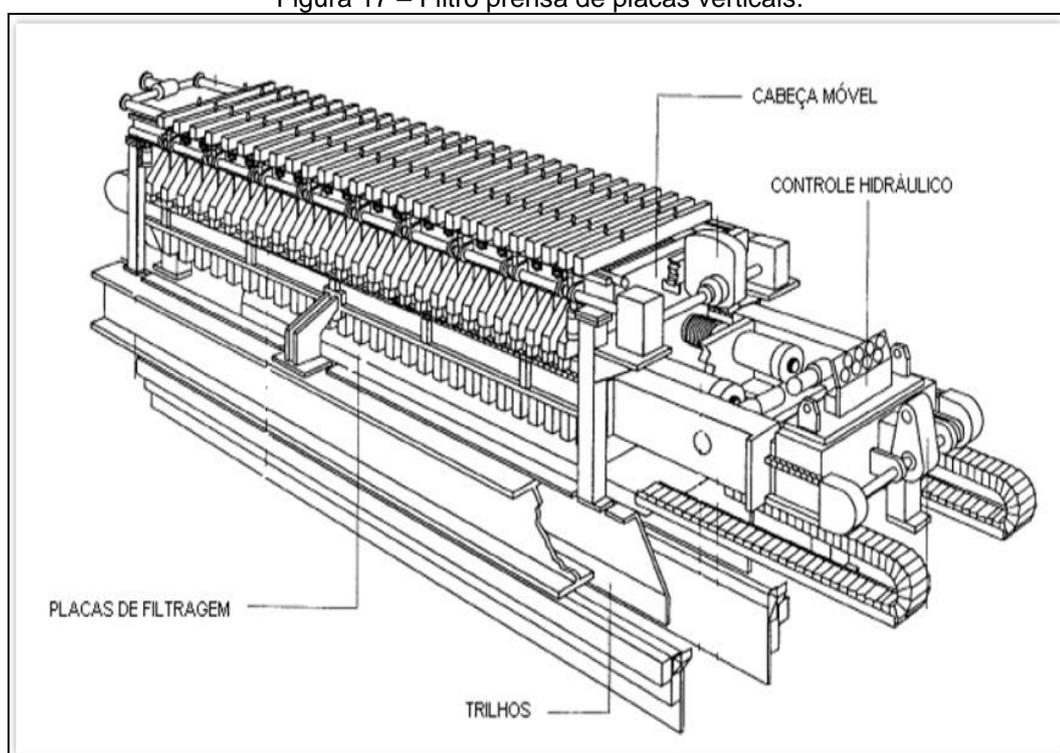
WILLS E MUNN (2006) destacaram que a câmara de filtração é formada entre cada par de placas. A polpa é introduzida nos quadros vazios através de um canal contínuo formado por furos presentes nos cantos das placas e quadros. O filtrado passa através do pano e escoar para baixo, nas superfícies estriadas das placas e é removido através de um canal contínuo. Os sólidos permanecem no quadro e, quando o quadro estiver cheio, a torta do filtro pode ser lavada, após o qual a pressão é libertada e as placas e quadros separados. A torta de filtração nos quadros pode então ser descarregada, o filtro é fechado novamente o ciclo repetido.

O filtro com prensa na câmara é semelhante ao filtro citado acima quanto à sua estrutura, exceto devido ao fato de que as câmaras individuais do filtro são formadas entre placas sucessivamente dispostas. Todas as câmaras são conectadas por meio de um orifício relativamente grande no centro de cada placa. O pano de filtro também contém um orifício central e cobre toda a placa e então a suspensão é introduzida através do canal de entrada. O líquido filtrado passa através do tecido e é removido por meio de orifícios na placa, a torta é depositada gradualmente nas câmaras.

O Filtro-prensa opera de forma descontínua (bateladas) e usa a pressão para realizar a filtração, e é composto por quadros e placas separados entre si pelo meio filtrante. Esse equipamento realiza a filtração em etapas:

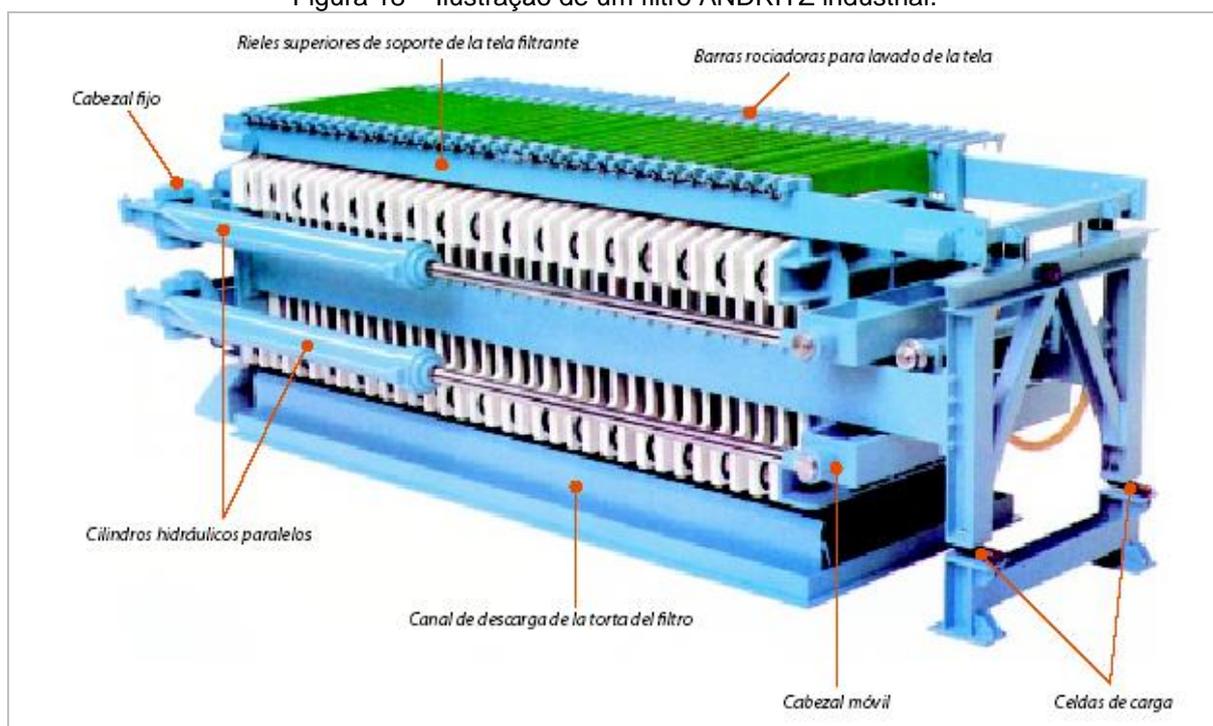
- a) A polpa é bombeada entre duas placas, que são então comprimidas, provocando a expulsão do filtrado através de espaços existentes nas placas;
- b) As placas são abertas uma a uma, descarregando então as tortas; e
- c) O compartimento onde as tortas são descarregadas é então fechado e as telas são então lavadas.

Figura 17 – Filtro prensa de placas verticais.



Fonte: Green e Perry (2008).

Figura 18 – Ilustração de um filtro ANDRITZ industrial.



Fonte: Andritz do Brasil, 2006.

Nota-se que se trata de um equipamento de alta complexidade, com ciclo composto por várias operações realizadas: bombeamento da polpa, pressurização das placas, desligamento das bombas, aberturas das placas, abertura do compartimento, descarregamento da torta, cobertura do compartimento, lavagem das telas. A principal vantagem em sua utilização é a formação de tortas com baixa umidade.

Devido à incompressibilidade virtual de sólidos, a filtração sob pressão tem certas vantagens sobre o método que utiliza vácuo, apresentando maiores taxas de vazão e uma melhor lavagem e secagem resultam a partir das pressões mais elevadas que podem ser aplicadas. No entanto, a remoção contínua dos sólidos provenientes da câmara de filtragem pode ser extremamente difícil e, por conseguinte, ainda que diversos modelos de filtros prensa contínuos existam no mercado, a grande maioria ainda opera por batelada. Adaptado de WILLS, 2006.

Filtros prensa com alto grau de automatização são atualmente utilizados na maioria das novas plantas de flotação. A “automatização” significa ter um filtro em que a abertura do pacote de placas, o bombeamento, os equipamentos auxiliares e

de partida, a operação das suas válvulas, assim como a descarga da torta são automaticamente controlados (TOWNSEND, 2003).

Estes equipamentos podem processar até 150 t/h de sólidos secos por unidade, em processos de desaguamento de concentrados de cobre, com áreas de filtração de até 144 m<sup>2</sup>. Mesmo produtividades mais elevadas podem ser encontradas em aplicações para minério de ferro. A umidade residual da torta depende do material a ser filtrado, mas os valores no intervalo entre 7,5 e 12,5% são característicos.

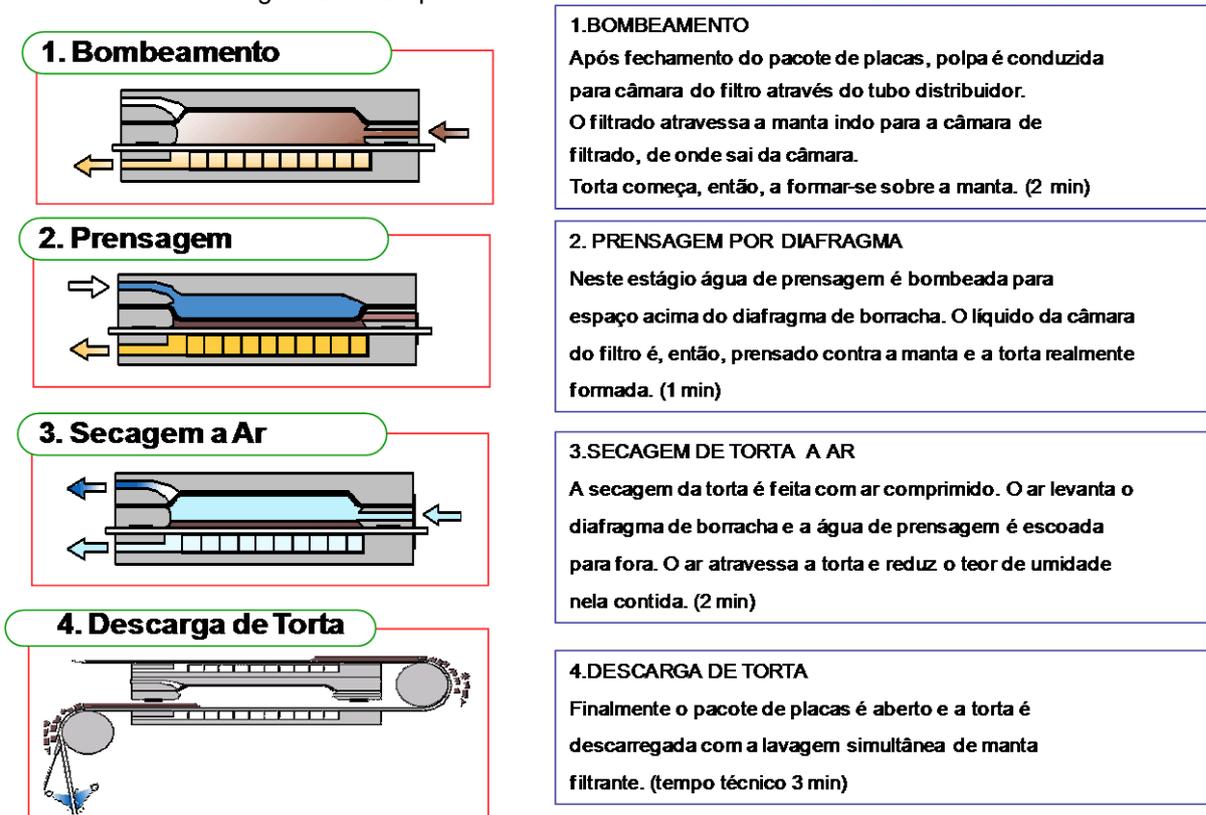
Neste trabalho foram avaliados os desempenhos dos filtros prensa de placas verticais fabricados pela METSO e pela ANDRITZ, ambos possuem semelhantes designs e princípios de funcionamento, sendo, portanto as suas características diferenciais descritas juntamente aos procedimentos de teste dos equipamentos.

Figura 19 – Filtro Larox Industrial, aplicado na produção de PPL1 – VALE/Carajás.



Fonte: LAROX, 2006.

Figura 20 – Esquema de funcionamento de um Filtro LAROX industrial.

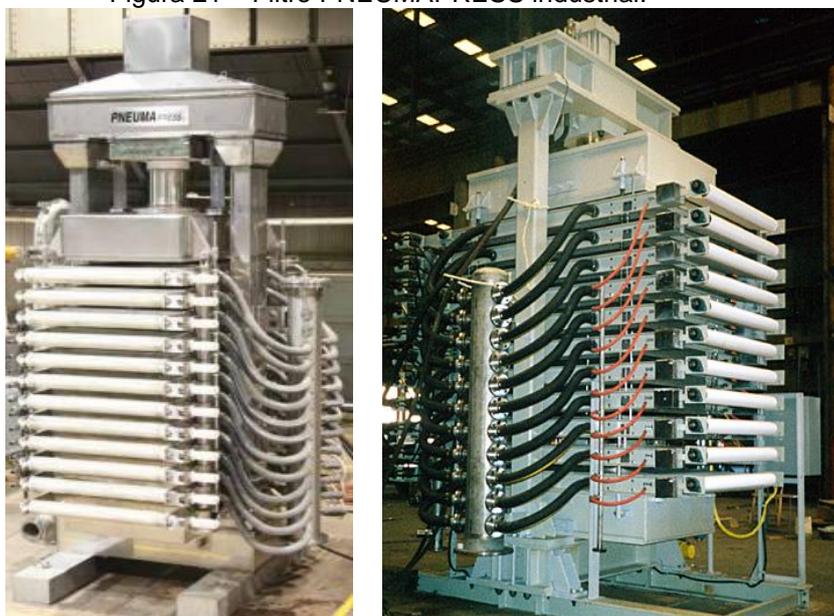


Fonte: Larox, 2006.

### 2.4.6.3.2.1 Pneumapress

O filtro Pneumapress® é composto por placas orientadas horizontalmente formando um conjunto vertical, Figura 21, desde apenas uma placa até o conjunto com dezoito placas de filtragem instaladas num único equipamento.

Figura 21 – Filtro PNEUMAPRESS industrial.



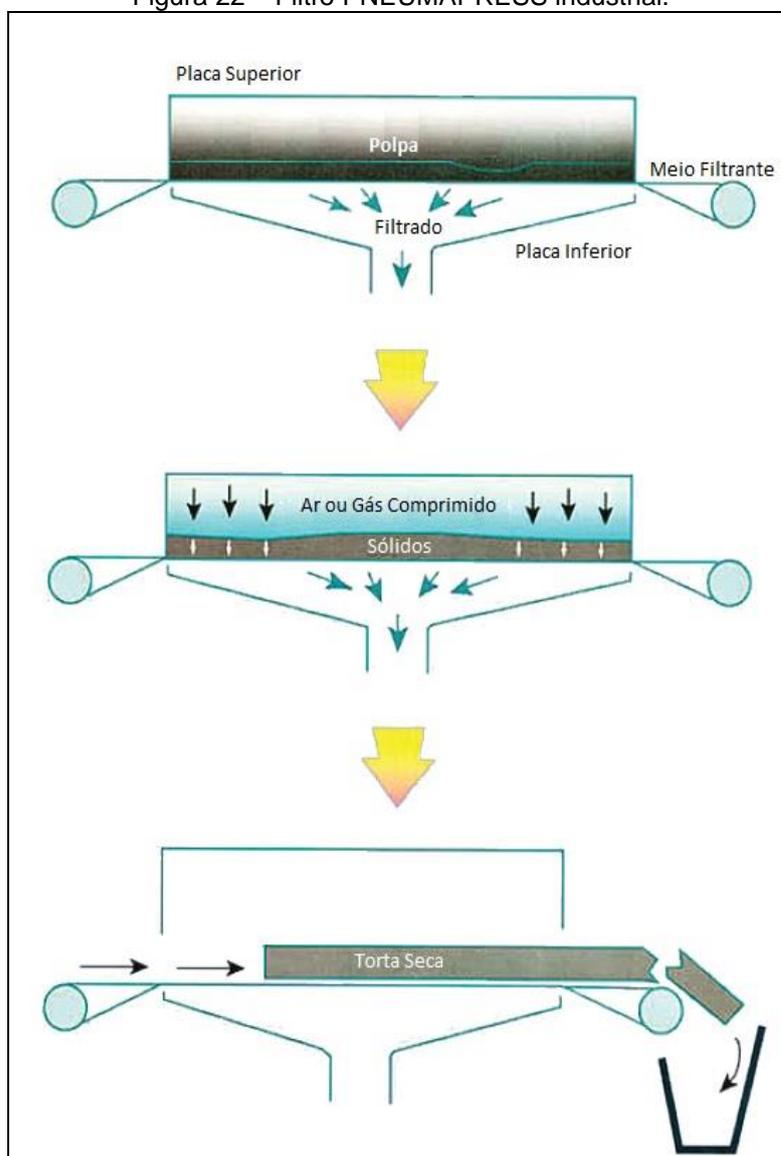
Fonte: FLSMIDTH, 2013.

As tortas formadas no filtro são descarregadas de um lado do equipamento através do avanço do tecido filtrante, montado sobre rolos, e qualquer torta remanescente é limpa por um raspador antes de o pano ser pulverizado com água de alta pressão. O tecido é submetido à lavagem ao fim de cada ciclo.

Existem duas vantagens significativas no projeto do filtro Pneumapress®: (1) Não são aplicadas membranas/diafragmas, e (2) as câmaras de filtragem são totalmente isoláveis. Ao eliminar a necessidade de membranas de pressão, o projeto da placa de filtro Pneumapress® é menos complexa, ou seja, sem uma membrana ou os suportes de fixação, o número de componentes por placa de filtro é reduzido. As placas que possuem membrana são de manutenção mais cara porque há mais componentes para substituir.

Resumidamente, o ciclo ocorre da seguinte maneira: o pacote de placas é fechado, e então a suspensão é bombeada para o interior das câmaras formadas, a pressão típica de alimentação varia entre de 5,00 e 8,00 bar. Há então uma injeção de ar comprimido, ou gás, nas câmaras, forçando o filtrado através do elemento filtrante, e assim a consolidação dos sólidos em forma de torta. Depois que a torta seja formada, o ar comprimido continua a soprar através para secar os sólidos até a umidade alvo do processo. A ilustração abaixo demonstra o Ciclo básico de produção do filtro Pneumapress

Figura 22 – Filtro PNEUMAPRESS industrial.



Fonte: Adaptado de catálogo técnico FLSMIDTH (2013).

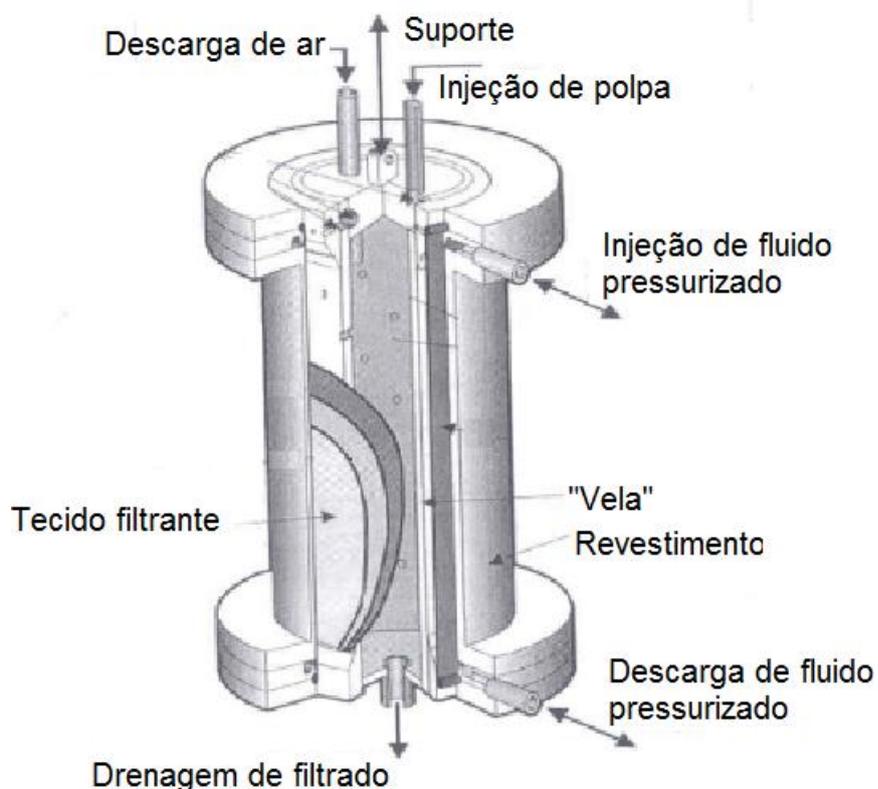
#### 2.4.6.3.2.2 Tube Press ®

O Tube Press® é um tipo de filtro prensa com membrana, projetado em formato cilíndrico e capaz de operar em altas pressões de filtração, até 100 bar. A utilização de pressões elevadas permite um maior grau de separação das fases líquida e sólida. Este formato de equipamento é adequado para as seguintes aplicações:

- Alternativas para a secagem térmica;
- Quando o processo requer muito pouca umidade na torta;
- Onde manuseabilidade da torta é crítica.
- Onde filtrado é um produto valorizado;
- Onde os custos de transporte da torta são significativos;
- Onde a torta deverá ser descartada em aterro.

O processo de filtração ocorre entre dois cilindros concêntricos, o cilindro mais exterior é o invólucro e o interior, a “vela”. A polpa é bombeada para dentro do espaço anular entre o meio filtrante e o diafragma de pressão. O fluido hidráulico, geralmente água, é depois bombeado para o diafragma, pressionando a polpa, ocorrendo assim a filtração. Quando se completar a filtração do fluido hidráulico é retirado por uma pressão de vácuo, deslocando o diafragma no sentido de liberar a câmara.

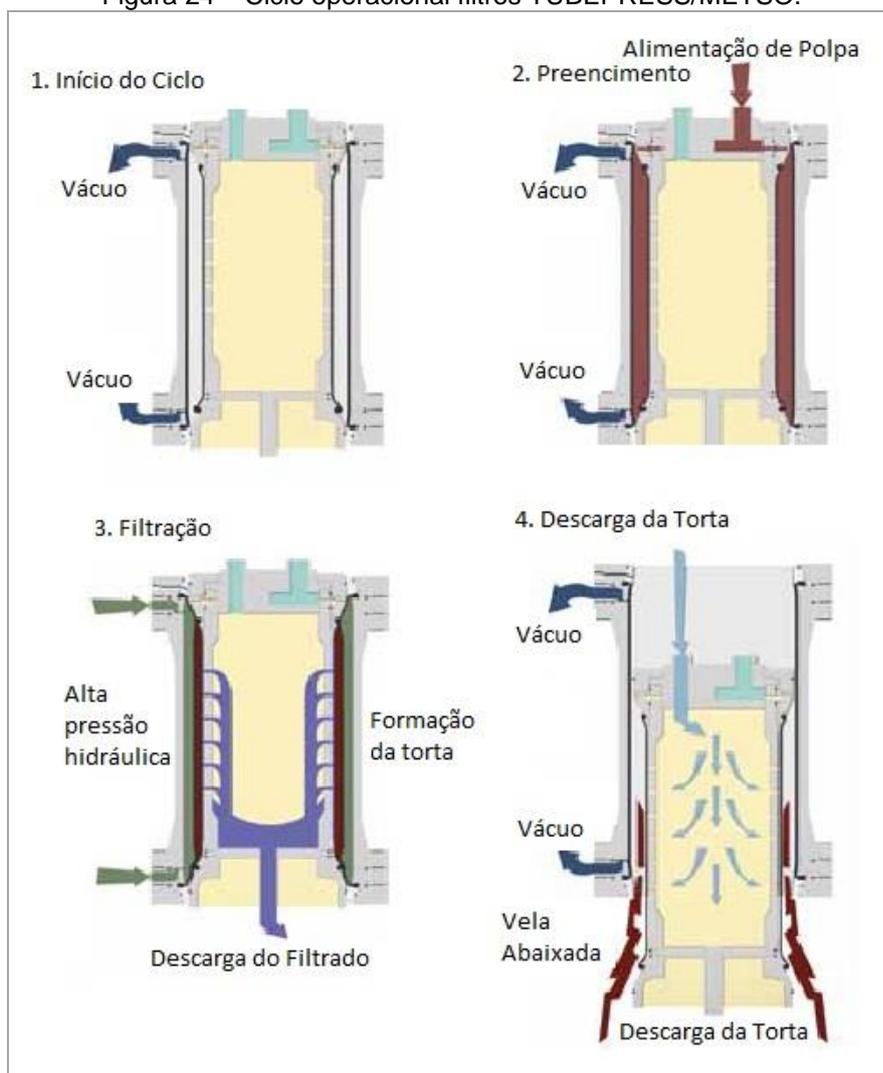
Figura 23 – Filtro TUBEPRESS industrial



Fonte: Adaptado de Catálogo Comercial: METSO, 2013.

A “vela” é então deslocada para baixo, sendo esta a posição de descarga da torta. O processo de descarga da torta é facilitado pela injeção de ar comprimido, em forma de pulso, entre a “vela” e o meio filtrante, fazendo com que este sofra expansão e frature a torta, sendo esta descarregada por gravidade. Quando se completa a operação, a “vela” retorna à sua posição inicial repetição do ciclo.

Figura 24 – Ciclo operacional filtros TUBEPRESS/METSO.



Fonte: Adaptado de Catálogo Comercial: METSO, 2013.

A porosidade e os níveis de umidade da torta são significativamente mais baixos do que aqueles obtidos com filtros de baixa pressão, por conseguinte a recuperação de filtrado é mais elevada. A filtração é conduzida a um nível de pressão que permite formar uma torta com a superfície sólida, seca, e bem compactada. O manuseio da torta é geralmente mais simples do que o das tortas geradas em filtros de baixa pressão, pois estas geralmente são pastosas ou possuem alta umidade superficial.

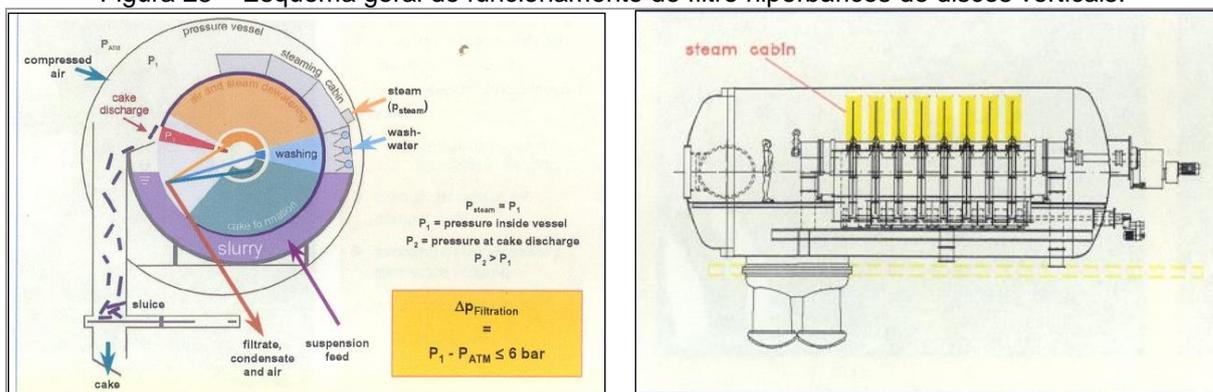
Este design de filtro apresenta produtividade unitária mais elevada se comparado com os filtros a vácuo e prensa de placas convencionais, o filtrado é

recuperado com percentual de sólidos baixo, permitindo seu pronto descarte ou recirculação imediata, sem que seja necessária outra etapa de tratamento.

### 2.4.6.3.2.3 Filtro hiperbárico tipo Bokela

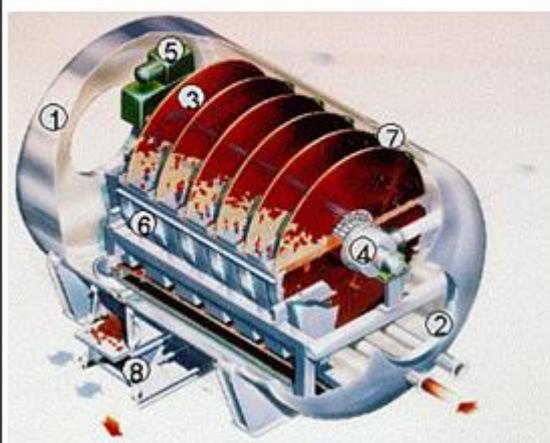
Esse tipo de filtro Hiperbárico consiste em um filtro tipo prensa montado internamente em uma câmara de alta pressão – hiperbárica, de forma a promover forças extras de expulsão de líquidos contidos na polpa a ser filtrada visando reduzir a umidade final do underflow dos espessadores.

Figura 25 – Esquema geral do funcionamento de filtro hiperbáricos de discos verticais.



### Filtragem Hiperbárica

#### Filtro a Discos



- 1 - Vaso de pressão;
- 2 - Janela de visita;
- 3 - Filtro de disco;
- 4 - Eixo de controle;
- 5 - Acionamento;
- 6 - Bacia;
- 7 - Agitadores;
- 8 - Chute de descarga;

Fonte: Adaptado dos catálogos comerciais de BOKELA e ANDRITZ, 2013.

### 2.4.7 Secagem

Conforme WILLS E MUNN (2006), a secagem de concentrados, antes da etapa de expedição, pode ser considerada a última operação realizada em uma planta de processamento mineral. Ela pode reduzir o custo de transporte, e é geralmente destinada a abaixar o nível da umidade até cerca de 5,00% em peso, caso a umidade seja mais baixa do que esse nível poderá existir perda de poeiras.

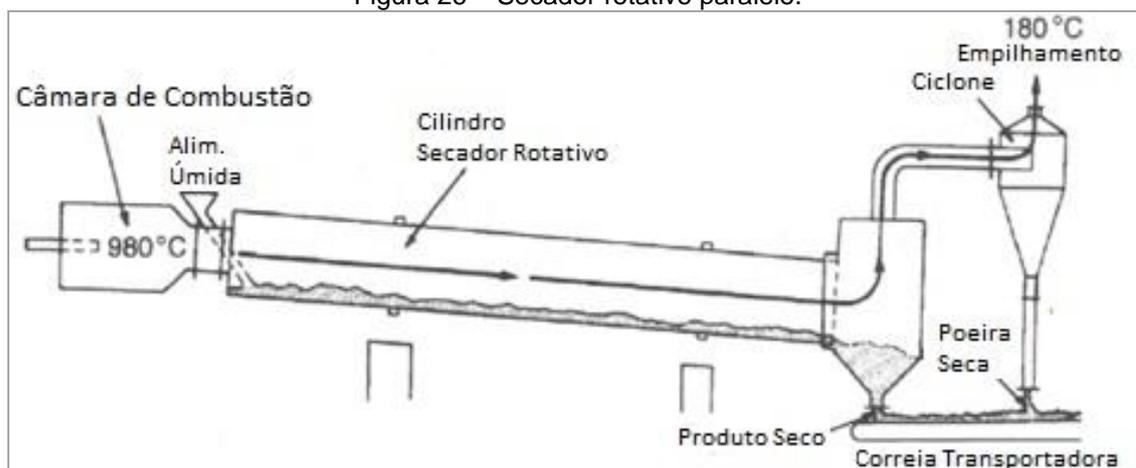
Os secadores rotativos térmicos são os mais frequentemente utilizados e que consistem de um cilindro longo montado sobre rolos e acionado a uma velocidade de até a 25 RPM. Possui uma ligeira inclinação, de modo que o material se mova a partir da extremidade de alimentação para descarregar por gravidade. Gases ou ar quente são injetados a partir da extremidade de alimentação para se obter fluxo paralelo ou na descarga para se obter um fluxo térmico de contracorrente.

Ainda de acordo com WILLS E MUNN (2006), nota-se que o método de aquecimento do material pode ser direto ou indireto. No aquecimento direto os gases quentes passam através do material no secador, e no método indireto o material é inserido em um cilindro aquecido a partir da sua superfície externa.

O método de aquecimento direto é o mais utilizado na indústria mineral, o tipo indireto é aplicado quando o material não deve ter contato com os gases quentes provenientes da combustão. Secadores de fluxo paralelo (Figura 26) são utilizados na maioria das operações atuais, porque eles são de maior eficiência energética e têm maior capacidade volumétrica do que os do tipo contra fluxo.

Uma vez que o calor é aplicado na extremidade de alimentação, o acúmulo de umidade na alimentação é evitado, e, em geral, estas unidades são concebidas para secar o material a 1,00% de umidade. Com secadores de contra fluxo, que aplicam calor na extremidade de descarga do material, um produto completamente seco pode ser alcançado, mas a sua utilização em materiais sensíveis ao calor é limitada, pois o material seco entra em contato direto com o meio de aquecimento, com temperatura mais elevada.

Figura 26 – Secador rotativo paralelo.



Fonte: Adaptado de Wills e Munn (2006).

O produto dos secadores é muitas vezes estocado, antes de ser carregados conforme necessidade da expedição. Os recipientes podem ser fechados, ou a superfície do material pulverizada com uma solução que forme uma película, a fim de eliminar as perdas com poeira.

#### 2.4.7.1 Steel belt dryer – Secador linear

O secador de esteira é conceitualmente muito simples. O produto é transportado através de uma esteira e ar quente é forçado através do leito de produto. É muitas vezes descrito como simplesmente um transportador em uma caixa com ar quente. Embora seja simples, em termos de conceito, uma inadequada compreensão dos processos de transferência de massa e calor no secador de esteira certamente irá levar a uma má manipulação do produto, o desperdício de energia e qualidade do produto não uniforme.

Num secador de esteira (steelbeltdryer) a secagem ocorre com o material sendo continuamente transportado sobre uma tela perfurada através da qual o ar quente é injetado. De forma geral um secado de estágio único é utilizado, porém, para materiais friáveis, secadores de múltiplos estágios podem ser aplicados.

Neste tipo de secador, o leito do material úmido alimentado deve ser permeável, assim, o secador é particularmente apropriado para o material

particulado. Essas características são encontradas em produtos dos processos de separação em espirais de Humphreys e hidrociclones de meio denso.

As camadas formadas sobre a esteira devem apresentar 4,00 e 6,00 cm de espessura média. A velocidade de sucção do ar varia entre 0,50 e 2,00 m/s, mas a velocidade de 1,25 m/s é normalmente aplicada em um fluxo ascendente no início da secagem e ao final o fluxo é descendente. Esse processo tem o objetivo de evitar emissão de pó e promove a secagem uniforme. Embora temperaturas mais altas sejam possíveis, o ar de secagem é aquecido entre 100 e 200°C, usualmente. A fonte de calor são painéis de radiação infravermelha.

Embora não haja um limite prático em relação ao comprimento, a largura do transportador pode variar entre 0,50 e 3,00 m, a velocidade de transporte é continuamente ajustável entre 0,10 e 2,00 cm/s.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesse capítulo são descritas as amostras testadas em escala de bancada como também aquelas processadas nas plantas piloto. É feita uma caracterização geral do material a ser testado enfatizando as propriedades que possivelmente mais afetam o desempenho dos equipamentos correntemente utilizados no desaguamento de minérios. Além disso, estão relacionados os ensaios realizados em laboratórios, os equipamentos pesquisados em escala piloto bem como os métodos e os materiais aplicados nessa pesquisa. Serão abordadas suas características, condições de operação, restrições e vantagens.

#### **3.1 Descrições das fases dos ensaios – bancadas (laboratório) e piloto**

As fases que foram contempladas nessa pesquisa aplicada envolveram apenas o início de fases que necessariamente são percorridas ao longo de um projeto mineral. Aqui nesse estudo se buscou evidências técnicas e práticas da possibilidade de desaguamento da fração ultrafina de minérios. Dependendo dos resultados obtidos aqui, novas estratégias e novos estudos devem ser endereçados no intuito de viabilizar a recuperação e o aproveitamento do material aqui estudado. Isso pode necessitar de um projeto de enorme magnitude, com estudos adicionais de engenharia e economia que podem ser baseados e estruturados tendo em mãos resultados obtidos aqui.

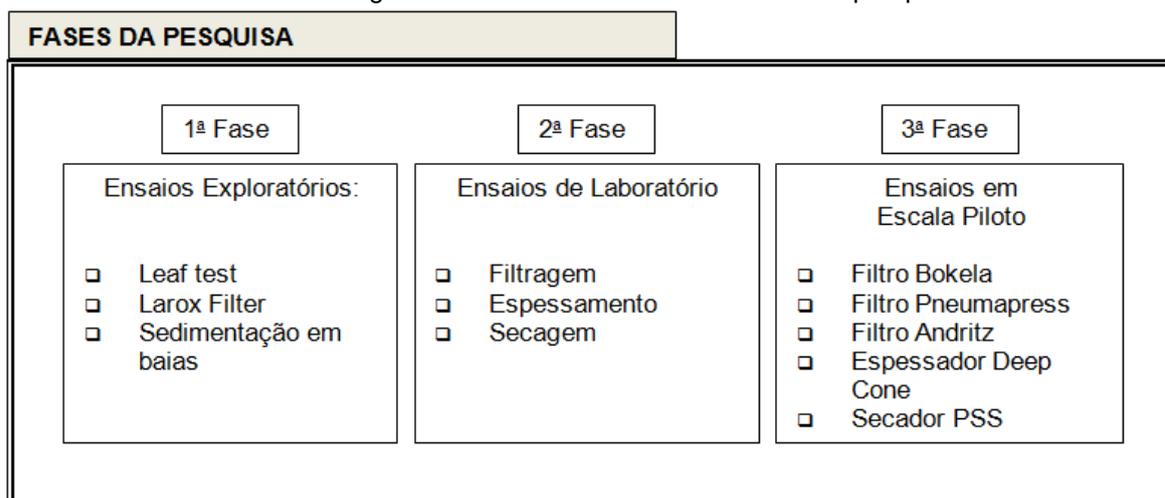
Contudo, mesmo nessa proposta inicial, diversas áreas multidisciplinares dentro da empresa necessitam estar em consonância e em conjunto com renomadas entidades de pesquisa e fundamentadas em experimentados pesquisadores para se determinar quais tecnologias tem fundamento e quais não são ainda passíveis de aplicação para o objetivo alvo aqui determinado.

Em grandes linhas de um projeto, esta etapa pode ser considerada ainda “conceitual do projeto”, pois as etapas foram desdobradas em duas escalas, laboratório e Piloto, de forma a estudar e verificar a aplicação das tecnologias no referido desaguamento e estruturado da seguinte forma:

- i. Caracterização do rejeito e do produto
- ii. Exposição das amostras às tecnologias aplicadas para se verificar a “resposta” dos finos às diversas tecnologias de filtragem (ensaios exploratórios de Laboratório e em escala Piloto).

É importante assim detalhar as principais fases do Projeto como mostrado abaixo no diagrama das Fases da pesquisa.

Figura 27 – Fases de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Próprio autor, 2014.

Normalmente, não é possível prever o que pode ser realizado na filtração sem haver um teste prévio. Assim, têm de ser feitos ensaios preliminares com amostras representativas da polpa, antes que a planta em grande escala seja projetada. Os ensaios são também, geralmente, realizados com amostras de polpas de projetos ou plantas em funcionamento, para avaliar o efeito da mudança condições de operação, aparelhos de filtragem, etc.

Os testes de laboratório devem ser conduzidos com uso de técnicas adequadas e operadores treinados. Os resultados obtidos serão utilizados para o

dimensionamento de diversos filtros contínuos, conforme descrito nos exemplos que se seguem (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Verifica-se, pois, que a torta pode, então, ser removida, pesada, e secada, considerando-se, ainda, que a capacidade diária do filtro pode ser determinada pelo peso seco da torta, por unidade de área da folha de teste multiplicado pelo número de ciclos por dia e a área do filtro.

Diante dos resultados dos ensaios de laboratório e se houve expectativas que promovam a continuidade de alguma tecnologia em particular, busca-se complementar os estudos para viabilização dos ensaios em escala piloto de forma a verificar novos objetivos, mais específicos e com a amostragem “acoplada” à Usina Principal de Carajás.

Nos objetivos gerais de ensaios pilotos pode-se obter parâmetros e indicadores de diversas natureza, porém, e em função dos objetivos específicos da pesquisa aqui apresentadas, pode-se destacar aqueles atingidos ou verificados nessa segunda fase, a piloto:

- Indicar ensaios complementar e de maneira a detalhar os parâmetros de processos básicos a serem considerados em um possível estudo de uma unidade industrial através desses ensaios em escala piloto.
- Sugerir ensaios de manuseio da torta gerada nas operações piloto;
- Gerar amostras que podem ser aplicadas em posteriores ensaios metalúrgicos de forma a determinar o desempenho metalúrgico dos rejeitos em ensaios padronizados de rotas siderúrgicas e sua ótima aplicação;
- Indicar algum viés econômico da melhor tecnologia ou rota de processo;
- Verificar a capacidade do equipamento / tecnologia em absorver as variações do processo, sendo para isso inserida no fluxo natural da usina e recebendo desta a alimentação 100 % “*real*” e “*online*”.
- Determinar a durabilidade ou fragilidade de componentes importantes em sistema de filtração / secagem, pois eles serão submetidos a regime contínuo, “quase industrial”, p.ex. durabilidade dos tecidos filtrantes e os sistemas pneumáticos e de troca de calor;

- Conhecer o efeito de minerais presentes no rejeito e seus possíveis efeitos no desempenho de filtração e componentes: mineralogia versus desempenho, em especial ao teor de  $Al_2O_3$ ;
- Determinar indicadores que possam prever impactos em planos e custos de manutenção (preventivas e corretivas) e que viabilizem as melhores condições para a maximização da capacidade de produção;
- Levantar dados que permitam minimizar erros de “*scale-up*”, conferindo análises de dimensionamento CAPEX e OPEX com mais precisão. Projetos iniciados assim podem estar mais próximos da excelência operacional e da otimização de processos.
- Gerar massa suficiente para ensaios de manuseio, prevendo assim o comportamento do produto gerado nas diversas possibilidades de estocagem e transporte.
- Levantar de forma mais assertiva prováveis impactos ambientais decorrentes da implantação do projeto, inclusive a recuperação quase total dos resíduos gerados.
- Programar medidas preventivas relacionadas à segurança do trabalhador realizando, antecipadamente, análises de risco em situação análoga à industrial. Esta análise deve ser feita contemplando equipamentos de proteção coletiva e toda a infraestrutura necessária à ótima condição do empregado.
- Impactos no retorno financeiro e no fluxo de caixa.

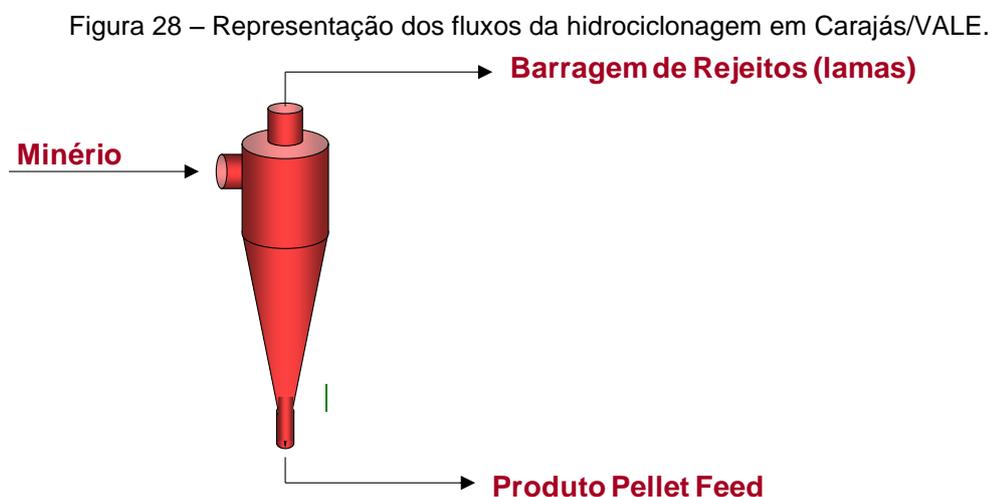
O banco de dados gerado nos ensaios piloto pode estruturar de forma mais correta o projeto de recuperação dos finos e conseqüentemente atender aos novos requisitos de implantação da VALE (prazo, qualidade e orçamento) alinhados às exigências dos FEL's (Front end loading).

Ensaio de laboratório conseguem indicar basicamente performances iniciais, mas resultados podem ser considerados, com base no histórico e em experiência, para obter uma média confiável de taxa de produção.

### 3.2 Definição dos rejeitos e caracterização das amostras testadas

Os rejeitos produzidos na Usina de Carajás têm diversas e distintas origens que se relacionam com os fluxos para obtenção de diversos produtos. Nesses fluxos geradores de dois produtos, “*pellet feed*” Natural (PFCJ) e “*pellet feed*” Moído (PPL1), por conseguinte, são também produzidos os dois rejeitos alvos dos ensaios propostos nessa dissertação. Nesse estudo as amostras são desses rejeitos possuindo características semelhantes no que tange à granulometria, superfície específica e teores. Além disso, ambos são gerados em overflows de hidrociclonagens.

A maioria dos minérios de ferro brasileiro é friável, gerando assim grandes quantidades de ultrafinos que são retirados antes da flotação por hidrociclones. No caso de Carajás, em função do elevado teor do minério, essa etapa de flotação não é necessária, e a fase de hidrociclonagem serve para adensar o produto para a filtragem e posterior manuseio.



Fonte: Vale, 2006.

Figura 29 – Caracterização dos “tailings” – Carajás/VALE.

<b>FONTES DE REJEITO</b>			
Hidrociclonagem tripla	=>	Rejeito Usina	
Moagem Sinter Feed	=>	Rejeito PPL1	
Ciclonagem Barragem	=>	Rejeito PF Barragem	

<b>CAPACIDADES (*)</b>			
Rejeito Usina	=>	11,0	Mta
Rejeito PPL1	=>	1,2	Mta
Rejeito PF Barragem	=>	2,0	Mta
(*) Para o cenário 103 Mta	<b>TOTAL =&gt;</b>	<u>14,2</u>	Mta

Fonte: Próprio Autor, 2014.

**Rejeito Natural – Usina:** São aqueles produzidos na Usina de Carajás cuja origem se relaciona com os fluxos para obtenção do “pellet feed” natural. São de granulometria mais grosseira.

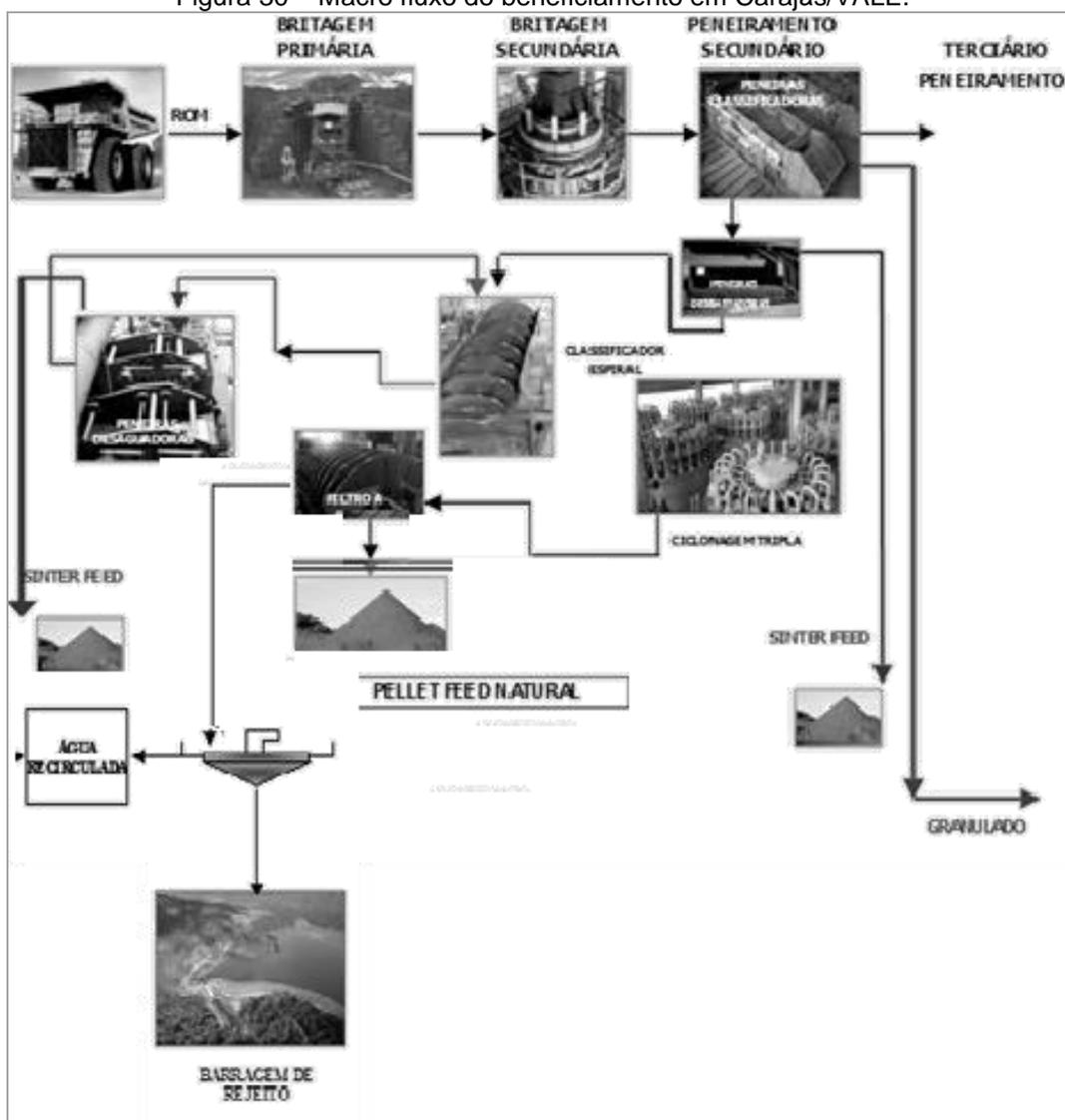
**Rejeito Moído – PPL1:** São aqueles produzidos na Usina de Carajás cuja origem se relaciona com os fluxos para obtenção do “pellet feed” moído.

**Rejeito PF Barragem:** São os rejeitos Natural e Moído, acima descritos e formam acumulados na Barragem de Rejeito de Carajás ao longo do tempo. Esse material não foi alvo de estudo na linha pesquisa dessa dissertação.

A figura 30 demonstra as etapas envolvidas na geração do pellet-feed natural e rejeito fino natural. Esses fluxos são obtidos através de duas etapas de britagem e peneiramento, o fluxo passante nas peneiras secundárias alimentam um circuito de tratamento de finos com classificadores espirais e hidrociclones, o “*overflow*” da hidrociclonagem é o rejeito fino (“*tailings*”) e o “*underflow*” compõe o pellet-feed natural (PFCJ).

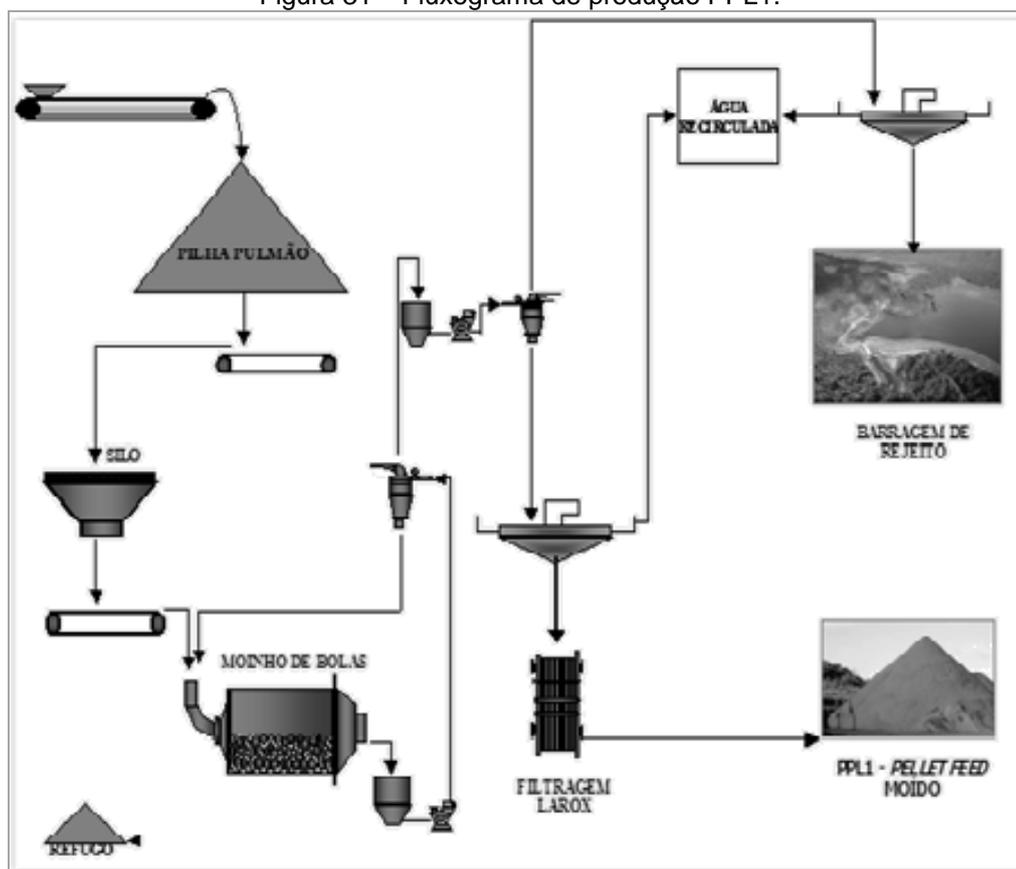
A figura 31 apresenta o circuito de produção de *pellet-feed* moído, obtido através da comuniação do “*sínter-feed*” natural e posterior etapa de deslamagem, adequando assim a granulometria aos processos subsequentes e obtendo também dois fluxos distintos: PPL1 – Pellet-feed moído e rejeito fino (“*tailings*”).

Figura 30 – Macro fluxo do beneficiamento em Carajás/VALE.



Fonte: Próprio autor, 2014.

Figura 31 – Fluxograma de produção PPL1.



Fonte: Vale (2013)

### 3.2.1 Amostras de *tailing* natural usadas nos testes em escala de Laboratório

Nessa fase da pesquisa, em escala de laboratório, intencionando promover o desaguamento dos ultrafinos ricos de minérios de ferro, foram programados inicialmente ensaios de bancadas aplicando as diversas técnicas possíveis para atingir o objetivo estipulado de umidade residual da torta de ultrafino desaguada.

Identificadas empresas no mundo, detentoras de prováveis tecnologias capazes de desaguar, filtrar ou secar lamas, foram enviadas amostras para realização de ensaios nesses diversos equipamentos. A estratégia utilizada para envio das amostras contemplou a comparação das diferentes tecnologias e / ou as diferentes empresas de mesmo equipamento, ensaiando as mesmas amostras nas diversas possibilidades. Ou seja, ter a mesma base de comparação.

Grandes amostras do Rejeito Natural, aqui identificadas como “*tailings*” Natural, proveniente das etapas de hidrociclonagem no circuito do “*pellet feed*” Natural, foram recolhidas no ponto de descarga da polpa do rejeito mostrada acima no item 3.1 e preparadas de forma a permitir a coleta e ensaios da amostra do “*tailing*” separadamente ou em amostras compostas desse mesmo rejeito adicionado em diferentes proporções com produtos de granulometria mais grosseira, PFCJ e SFCK (sinter-feed Carajás).

Assim, sete amostras foram compostas com diferentes proporções do “*tailing*” Natural – cujas características são alvo desta etapa do trabalho. Uma amostra (a de n<sup>o</sup>1) foi composta com 100 % de “*tailing*” natural e as amostras mistas foram compostas misturando o “*tailing*” Natural com dois produtos de Carajás: “*Sínter Feed*” Carajás e com o “*pellet feed*” Carajás. As proporções do “*tailing*” natural foram previamente definidas de forma empírica e variaram de 100,00 % a 25,00 % na mistura com os dois produtos enviados, separadamente, Tabela 2.

Tabela 2 – Composição das amostras testadas.

<i>ID da Amostra</i>	<i>Produtos</i>
Amostra01	100% Tailing
Amostra02	50% PFCJ; 50% Tailing
Amostra03	75% PFCJ; 25% Tailing
Amostra04	25% PFCJ; 75% Tailing
Amostra05	50% SFCK; 50% Tailing
Amostra06	75% SFCK; 25% Tailing
Amostra07	25% SFCK; 75% Tailing

As amostras assim compostas foram então caracterizadas de forma a gerar resultados de análises físico-químicas que suportassem a seleção das tecnologias de deslamagem. Já se sabia nesse ponto, pelas características reológicas dos ultrafinos amostrados, que somente alternativas não convencionais deveriam ser submetidas aos ensaios.

Dessa caracterização ficou confirmado o tamanho do desafio para obter tortas com 9,00 % de umidade residual.

Tabela 3 – Caracterização química e física das amostras.

<i>ID da Amostra</i>	<i>%Fe</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>P</i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Mn</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>TiO<sub>2</sub></i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>PPC</i>	<i>S.E.</i>
Amostra 01	64,00	1,97	0,066	2,78	0,92	0,012	0,048	0,228	0,022	2,93	7742
Amostra 02	65,47	1,00	0,047	2,00	0,66	0,013	0,044	0,169	0,015	2,43	4480
Amostra 03	66,21	1,00	0,037	1,60	0,53	0,014	0,041	0,139	0,012	2,18	2849
Amostra 04	64,74	1,00	0,056	2,39	0,79	0,013	0,046	0,198	0,019	2,68	6111
Amostra 05	65,70	1,40	0,046	1,78	0,65	0,012	0,042	0,137	0,016	2,17	-
Amostra 06	66,54	1,12	0,036	1,28	0,52	0,012	0,038	0,091	0,013	1,78	-
Amostra 07	64,85	1,69	0,056	2,28	0,79	0,012	0,045	0,182	0,019	2,55	-

Tabela 4 – Caracterização granulométrica das amostras (g).

<i>mm</i>	<i>ID da Amostra</i>						
	<i>Amostra 01</i>	<i>Amostra 02</i>	<i>Amostra 03</i>	<i>Amostra 04</i>	<i>Amostra 05</i>	<i>Amostra 06</i>	<i>Amostra 07</i>
10,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,70	0,20
8,000	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	4,00	1,30
6,300	0,00	0,00	0,00	0,00	5,70	8,50	2,80
4,000	0,00	0,00	0,00	0,00	11,70	17,60	5,90
2,000	0,00	0,00	0,00	0,00	20,90	31,30	10,40
1,000	0,00	0,00	0,00	0,00	28,60	42,90	14,30
0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	35,00	52,60	17,50
0,250	0,20	0,30	0,30	0,20	41,00	61,50	20,60
0,150	1,10	1,80	2,10	1,50	44,60	66,40	22,90
0,106	2,90	5,00	6,10	3,90	1,90	1,40	2,40
0,075	5,70	10,40	12,70	8,00	3,30	2,10	4,50
0,045	9,80	18,20	22,30	14,00	5,60	3,50	7,70
0,038	11,90	22,30	27,60	17,10	6,30	3,50	9,10
0,026	18,00	32,20	39,30	25,10	9,80	5,70	13,90
0,019	22,10	39,20	47,70	30,60	11,60	6,40	16,90
0,014	28,00	49,60	60,50	38,80	14,90	8,30	21,40
0,009	35,70	60,40	72,70	48,00	18,70	10,10	27,20
0,007	43,20	66,60	78,30	54,90	21,90	11,20	32,50
<0,7µm	56,80	33,40	21,70	45,10	29,00	15,10	42,90

### 3.2.2 Amostras dos testes piloto

Conforme mencionando anteriormente, os ensaios em escala piloto foram executados com alimentação direta do fluxo de rejeitos ultrafinos da Usina de Carajás. As amostras desse rejeito eram então coletadas no momento que os sistemas eram estabilizados. As características da amostra eram conhecidas, pois se tratava de fluxo comumente amostrado na rotina de produção, e aproxima-se, em química e granulometria, à “Amostra 01” descrita na seção anterior, tabelas 3 e 4.

### 3.3 Tecnologias pesquisadas – ensaios de bancada e piloto

#### 3.3.1 Empresas/equipamentos selecionados para ensaios de bancada – diversos laboratórios

As empresas que apoiaram essa pesquisa promoveram ensaios de bancadas em seus respectivos laboratórios e geraram relatórios específicos em parceria com os pesquisadores da Vale na busca da melhor solução tecnológica de desaguamento de rejeitos ultrafinos com elevadíssima superfície específica.

Tabela 5 – Testes de bancada realizados.

<i>Empresa</i>	<i>Local</i>	<i>Equipamento</i>	<i>Objetivo</i>
Metso	Suécia	Tube Press	Filtragem
		VPA	FILTRAGEM
Andritz	Brasil	Filtro (Vpa)	Filtragem
	EUA	FILTRO HIPERBÁRICO	FILTRAGEM
Pneumapress	EUA	Filtro Hiperbárico	Filtragem
		FILTRO A VÁCUO	FILTRAGEM
Bokela	Alemanha	Filtro Hiperbárico	Filtragem
Glv	Brasil	Filtro Prensa (Vpa)	Filtragem
Pss/Tornator	África Do Sul	Steel Belt/Dryer	Filtragem/Secagem

Os resultados das empresas de laboratório foram animadores, pois apontaram para a real possibilidade de se atingir o alvo de umidade residual na torta final, sugerindo assim a continuidade dos estudos, porém em outra fase: em escala piloto.

### 3.3.2 Empresas e equipamentos selecionados para ensaios em escala piloto na planta de Carajás/VALE

Os resultados obtidos em laboratório suportaram a seleção de tecnologias a serem testadas em escala piloto, Tabela 6.

Tabela 6 – Equipamentos selecionados para teste piloto.

<i>EMPRESA</i>	<i>EQUIPAMENTO</i>	<i>TECNOLOGIA</i>
BOKELA	Filtro Piloto Bokela	Filtragem Hiperbárica
PNEUMAPRESS	Filtro Piloto Pneumapress	Filtragem Hiperbárica
GLV	Espressor Piloto Tipo Deep Cone	Espessamento Não Convencional De Lamas

Os ensaios em escala piloto com o espessador tipo *Deep Cone* foram introduzidos na pesquisa de forma direta pois uma instalação piloto (semi-industrial) já se encontrava instalada na planta da Vale em Carajás.

### 3.3.3 Base de dados

A base de dados consta nos relatórios específicos dos fornecedores e nos relatórios internos obtidos em ensaios específicos e com os resultados obtidos no Laboratório Vale Carajás. A fase de planejamento, que antecede a tomada de decisão em investir, pode ser dividida em três fases de estudo: conceitual, pré-viabilidade e viabilidade.

## **4 RESULTADOS DOS TESTES**

Foram fornecidas, para os ensaios, sete amostras. Esses testes foram realizados em duas etapas, uma de teste estático e outra de testes dinâmicos em escala piloto. Os resultados do teste estático, de laboratório, podem indicar que se pode esperar algum resultado em escala industrial de produção. Os testes foram realizados nas amostras já descritas e identificadas como “amostra 1” a “amostra 7”, de diferentes composições e características físicas e químicas. Porém, nem todas as situações puderam ser experimentadas, em função de limitações apresentadas pelos equipamentos de laboratório.

### **4.1 Resultados dos testes de bancada**

A Tabela 7 apresenta os ensaios realizados em escala bancada com as amostras compostas e descritas na Tabela 2.

Basicamente, as empresas detentoras das tecnologias alvo e que foram selecionadas pela presença no mercado e expectativa de atingir objetivo de redução da umidade da torta formada por ultrafinos para aproximadamente 9,00%, receberam as amostras e realizaram os ensaios nas condições determinadas. O filtro CERAMEC foi avaliado em teste cronologicamente posterior aos que são apresentados aqui, contudo seu resultado não foi satisfatório, apresentando níveis de umidade residual que não atendem aos requisitos do produto.

A Tabela 7 a seguir apresenta as empresas e os equipamentos das empresas que realizaram os ensaios, emitiram o relatório e buscaram passar para a fase seguinte, dos ensaios piloto.

Tabela 7 – Ensaios Realizados Em Escala De Laboratório

Empresa/Localização	Equipamento	Objetivo/Data
Metso – Suécia	TubePress	Filtragem realizada. Agosto/2005.
	VPA	Filtragem realizada. Agosto/2005.
Andritz – Brasil	Filtro Prensa Tipo	Filtragem realizada. Outubro/2005.
	Diafragma	
Andritz – EUA	Filtro Hiperbárico	Filtragem realizada. Janeiro/2006.
	Filtro a Vácuo	
Pneumapress – EUA	Filtro Pneumapress	Filtragem realizada. Agosto/2005
	Filtro Hiperbárico	
Bokela – Alemanha	Filtro Hiperbárico	Filtragem realizada. Agosto/2004
PSS/Tornator – África do Sul	Steel Belt Dryer	Testes realizados em Agosto/2005
		Janeiro e Abril/2006

#### 4.1.1 Metso TubePress

Os testes foram realizados no Laboratório de Processos da “Metso Minerals” na Suécia, utilizando sete diferentes amostras (1 a 7). O objetivo foi comparar a filtrabilidade das diferentes composições de polpa, com uma umidade alvo de 9,00% base peso.

Apesar de sete amostras serem disponibilizadas para os testes, somente quatro foram aplicadas, isso ocorreu por que as amostras que continham sinter-feed apresentam granulometria mais grosseira, inviável de se tratar nos equipamentos disponíveis.

A operação com o filtro “TubePress” foi simulada em bancada utilizando um equipamento com área de filtração correspondente a 45 cm<sup>2</sup> (Figura 32). Assim, a cada teste, 200 ml eram alimentados na câmara de teste e submetidos a uma pressão de 100 bar (1500 psi), os resultados estão sumarizados na Tabela 8.

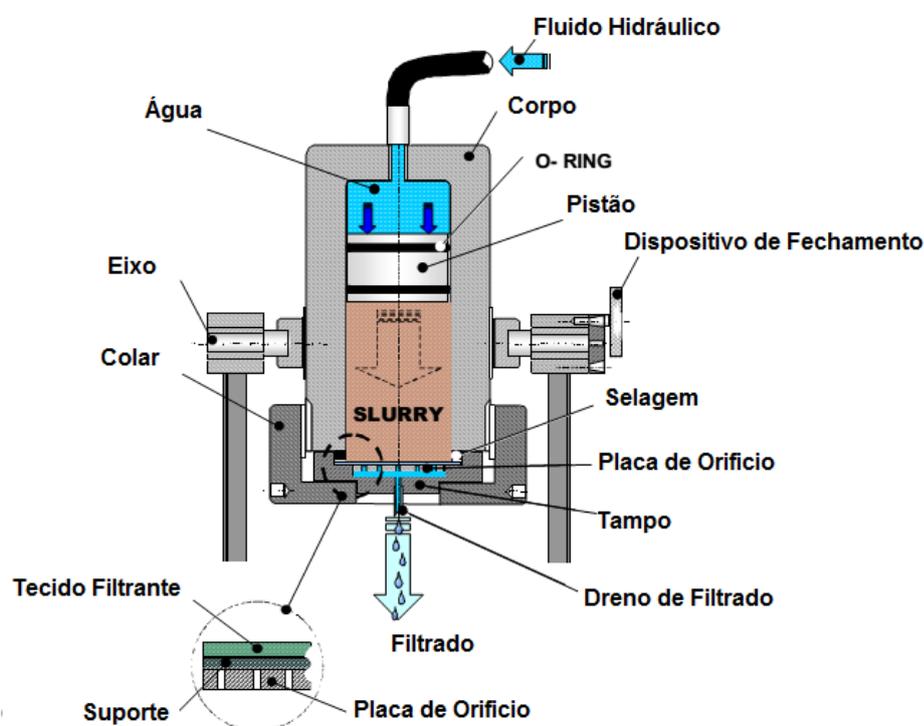
Tabela 8 – Ensaios Realizados Em Escala De Laboratório

Parâmetro	Amostras			
	1	2	3	4
%Sólidos na Alimentação	58,30	58,90	55,70	56,30
Tempo de Filtragem (min)	3,00	1,50	1,00	1,80
Umidade da Torta (%)	11,20	10,70	10,80	11,30

Fonte: Adaptado de Metso, 2006.

Em nenhuma das situações testadas o equipamento que simula a operação do filtro “*TubePress*” apresentou resultado de umidade abaixo de 10,00%, o que não condiz com os objetivos do estudo aqui apresentado.

Figura 32 – Esquema de equipamento de bancada – TUBE PRESS.

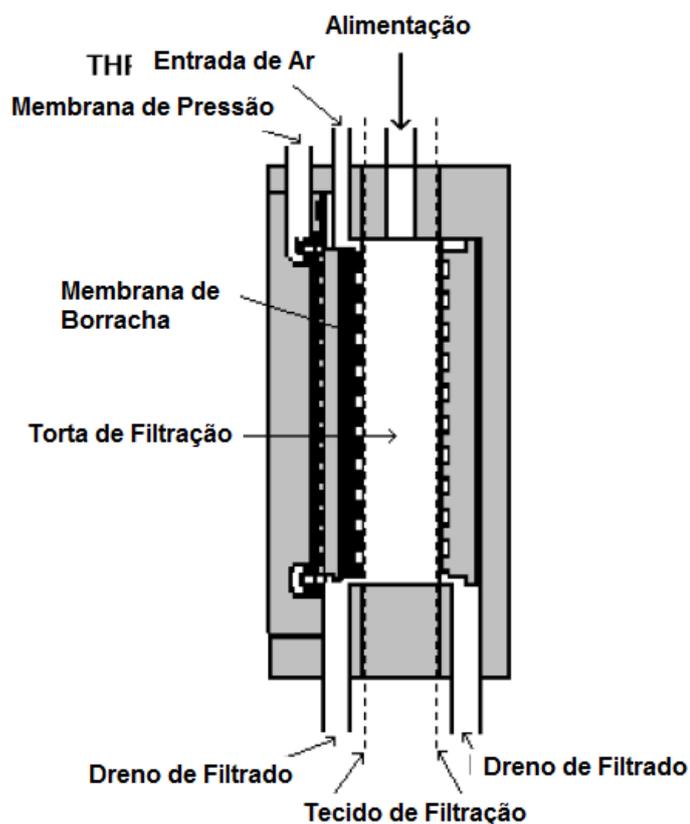


Fonte: Metso, 2006.

#### 4.1.2 Metso VPA

O teste com o filtro VPA – “*Vertical Plate Pressure Filter*”, *Figura 36*, com 7 bar de pressão de secagem apresentou melhor resultado de umidade na Amostra 3 (75% PFCJ e 25% rejeitos), após 6 minutos de tempo de secagem. E, aplicando pressão de 100 bar, somente com etapa de compressão, resultou em uma torta de 11% de umidade.

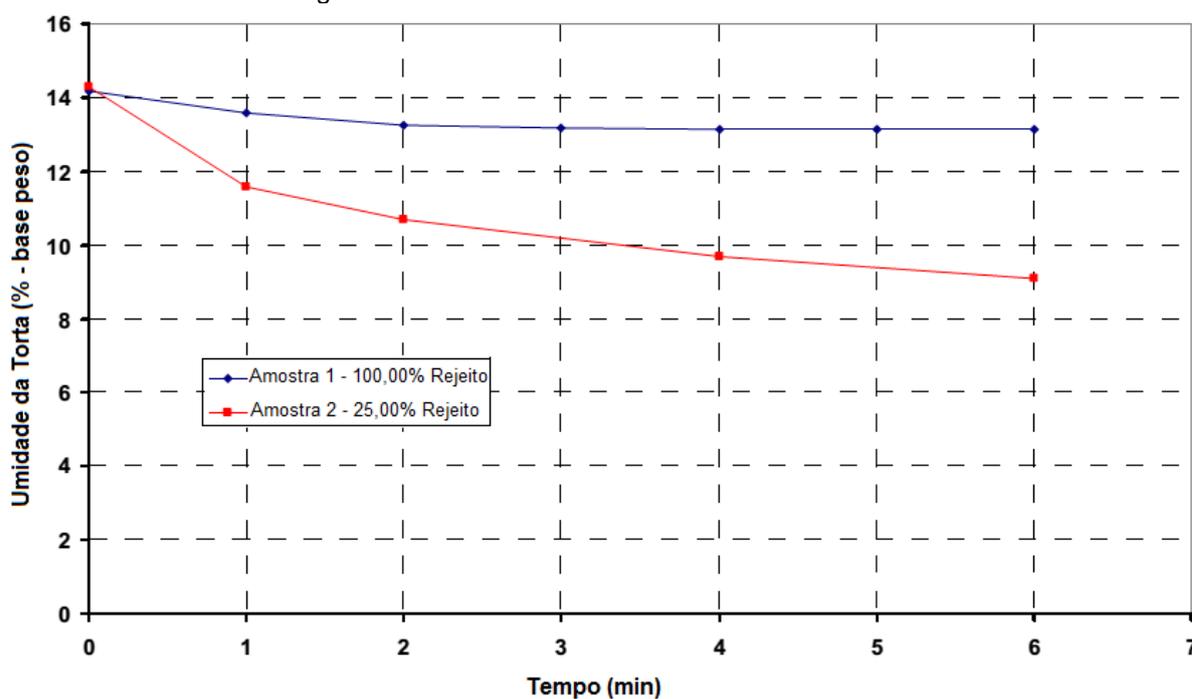
Figura 33 – Esquema de equipamento de bancada – VPA



Fonte: Metso, 2006.

De acordo com os testes realizados, o filtro VPA fornece uma torta com 9,00% de umidade *Figura 34* somente na condição em que é alimentado um percentual de 25% de rejeitos e a pressão de ar de secagem é ampliada de 7,00 bar (condição testada) para o nível de 8,00 a 9,00 bar.

Figura 34 – Resultados de Teste em bancada – VPA



Fonte: Metso, 2006.

### 4.1.3 Andritz filtro prensa

O filtro prensa ANDRITZ® tipo diafragma é composto por diversas placas individuais intercaladas entre câmara e diafragma, sendo que as placas de diafragmas são revestidas por um diafragma elástico, formando assim um pacote de placas denominado de pacote misto. Cada placa possui um espaço livre nos dois lados, que juntamente com a placa adjacente forma uma câmara. A entrada de produto nas placas normalmente é central, podendo variar para inferior ou superior, conforme necessidade de cada processo específico.

Figura 35 – Equipamento piloto de filtração.



Fonte: ANDRITZ, 2005

Figura 36 – Equipamento piloto de filtração.



Fonte: ANDRITZ, 2005

Os ensaios foram realizados em filtro prensa, escala piloto, formato 470 x 470 mm, tipo diafragma misto e câmara, com placas de filtração em polipropileno, e espessura de torta de 40 mm, com lonas de filtração em polipropileno com alto acabamento por calandragem na área de filtração.

Para avaliar o grau de filtrabilidade e desaguamento dos sólidos foram realizados ensaios com sistema câmara e diafragma misto com pressão de alimentação de 4 a 5 bar e pressurização de diafragmas em 7 bar.

#### 4.1.3.1. Resultados dos testes com filtro Andritz

Tabela 9 – Polpa com polpa de minério de Ferro 100% rejeito.

Descrição	Testes								
	01	02	03	04	05	06	07	08	09
<b>Polpa Com Polpa De Minério De Ferro 100% Rejeito.</b>									
<b>DADOS DO PRODUTO</b>									
%Sólidos (%)	54,45	54,65	54,50	56,70	56,20	58,90	56,40	55,20	55,30
Espessura De Torta (Mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
<b>DADOS PRESSURIZAÇÃO</b>									
Pressão De Pressurização (Bar)	8	-	15	-	8	8	15	8	8
Tempo De Pressurização (Min.)	8	-	10	-	10	10	10	9	10
Volume Filtrado (Litros)	3	-	4	-	3	3,5	3	3	2,5
Fator De Pressurização	0,8	-	0,78	-	0,78	0,79	0,80	0,80	0,80
<b>DADOS DA TORTA</b>									
Teor De Sólidos Na Torta (%)	88,80	86,75	89,55	87,10	89,10	88,10	88,45	88,54	88,10
Peso Específico Da Torta (Kg/Litro)	3,10	2,97	3,17	3,12	3,06	3,10	3,19	3,14	3,15
Peso Das Tortas (Kg)	40,10	41,10	37,55	42,6	40,3	40,65	41,50	41,30	39,80

Tabela 10 – Ensaio Com Polpa Minério De Ferro 75% E 50 % Rejeito.

	Testes						
	01	02	01	02	03	04	05
Suspensão a Filtrar	Polpa com polpa de minério de Ferro 75 e 50 % rejeito.						
Minério de Ferro Denominado de	75%	75%	50%	50%	50%	50%	50%
<b>DADOS DO PRODUTO</b>							
Valor do pH	7,3	7,3	7,3	7,5	7,5	7,6	7,5
Temperatura operação (°C)	25	25	25	25	25	25	25
Teor de sólidos insolúveis na suspensão (%)	51,25	50,65	55,73	54,70	49,20	49,90	51,40
Peso Específico da suspensão (Kg/l)	1,69	1,69	1,70	1,69	1,70	1,68	1,69
<b>DADOS DA FILTRAÇÃO</b>							
Sistema de placas	Diaf. Misto	Diaf. Misto	Câmara	Câmara	Diaf. Misto	Diaf. Misto	Diaf. Misto
Pressão de Filtração (bar)	6	6	5	6	6	6	6
Tempo de Filtração (min.)	10	11	7	10	6	7	8
Volume filtrado (litros)	36	21	28	33	35	34	26
Espessura de torta (mm)	40	40	40	40	40	40	40
<b>DADOS PRESSURIZAÇÃO</b>							
Pressão de pressurização (bar)	8	8	-	-	8	8	8
Tempo de pressurização (min.)	10	10	-	-	10	9	10
Volume Filtrado (litros)	2,5	3	-	-	3	2,5	3,5
Fator de Pressurização	0,80	0,78	-	-	0,78	0,82	0,80
<b>DADOS DA TORTA</b>							
Teor de sólidos na torta (%)	90,35	90,10	87,55	88,40	89,50	90,40	91,10
Peso específico da torta (Kg/litro)	3,18	3,09	3,17	3,15	3,12	3,16	3,17
Peso tortas (kg)	42,65	41,90	44,60	44,4	43,3	43,65	42,50
<b>DADOS DO FILTRADO</b>							
Características	Limpo	Limpo	Limpo	Limpo	Limpo	Limpo	Limpo
<b>CONDICIONADO</b>							
Floculante	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Produto Repolpado	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não

Em conclusão, o desaguamento da polpa de Minério de Ferro, nas amostras com “*Blend*” de 100%, 75% e 50% de rejeito apresentou bom desempenho, aplicando o sistema de diafragma misto, alcançado teores de umidade nas tortas entre 9,00% e 12,00%. Os melhores resultados foram alcançados no tratamento das polpas com 50% e 75% rejeito, cuja torta apresentou média de 10,00% de umidade.

O líquido filtrado mostrou-se límpido e não apresentou precipitado, após uma hora de decantação.

Figura 37 – Nível de clarificação do filtrado.



Fonte: ANDRITZ, 2005

As tortas apresentam boa soltura em relação ao meio filtrante, para garantir automatismo dos Filtros Prensa o fabricante recomenda a instalação de um dispositivo vibratório para os tecidos de filtragem.

Os ensaios demonstraram que o filtro prensa tipo diafragma misto permite execução e operação totalmente automatizada no que abrange a alimentação do filtro prensa; descarga das tortas e lavagem automática dos tecidos filtrantes com alta pressão até 100,00 BAR, de forma esporádica.

Figura 38 – Torta formada em teste piloto.



Fonte: ANDRITZ, 2005

Figura 39 – Torta formada em teste piloto



Fonte: ANDRITZ, 2005.

#### 4.1.4 Pneumapress

Os testes com o filtro Pneumapress em laboratório foram realizados em agosto de 2005, em laboratório do próprio fabricante do filtro nos EUA. As sete amostras de dos finos de ferro com diferentes proporções de granulometria foram enviadas ao fornecedor. Em cada caso, as amostras de polpa continham uma média de 55,00% a 60,00% de sólidos em peso. A equipe técnica do laboratório da Pneumapress inicialmente esteve focada na Amostra 01, porque esta continha a fração mais fina, a 56,80% menor que 0,007 mm, portanto certa dificuldade de desaguar e secar esta amostra era esperada, após essa etapa inicial as outras amostras (2 a 7) foram testadas, entretanto os resultados foram divulgados de forma geral não detalhando o desempenho de cada amostra. Trata-se de um procedimento similar ao “*Leaf Test*” convencional, contudo aplica-se alta pressão na formação e secagem da torta (Figuras 43 e 44). Esse é um artifício diferenciado no processo de desaguamento do filtro Pneumapress. Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros de processo para o teste.

Tabela 11 – Parâmetros de processos.

<b>Temperatura da Polpa</b>	<b>18 – 30 °C</b>
Quantidade de Polpa	100 ml
% Sólidos na Polpa (wt%)	55% a 60%
Tamanho das Partículas	25% a 100% < 0.007 mm
Pressão do Gás de Filtragem	5.5 bar a 8 bar

Fonte: Pneumapress, 2006.

Figura 40 – Torta formada em ensaios Inicias em Laboratório da PNEUMAPRESS/EUA.



Fonte: PNEUMAPRESS, 2005.

Figura 41 – Filtrados e tortas de ensaios Inicias em Laboratório da PNEUMAPRESS/EUA.



Fonte: PNEUMAPRESS, 2005.

Os resultados obtidos estão caracterizados na tabela a seguir:

Tabela 12 – Resultados em teste de bancada.

<i>Tempo de Ciclo (minutos)</i>	<i>Entre 1 e 4 minutos</i>
<i>Espessura da Torta (cm)</i>	<i>Entre 1,25 e 2,00 cm</i>
<i>Umidade da Torta (%)</i>	<i>Entre 6,10 e 9,70%, média de 7,90%</i>
<i>Produtividade Base Seca (kg/m<sup>2</sup>/h)</i>	<i>Entre 875 e 2300 kg/m<sup>2</sup>/h</i>

Fonte: Pneumapress, 2006.

A produtividade depende da porção de ultrafinos contida na polpa. Os resultados foram apresentados com os valores mínimos e máximos devido cláusula de confidencialidade do teste, não foram divulgados os resultados completos.

#### **4.1.5 Bokela hiperbárico**

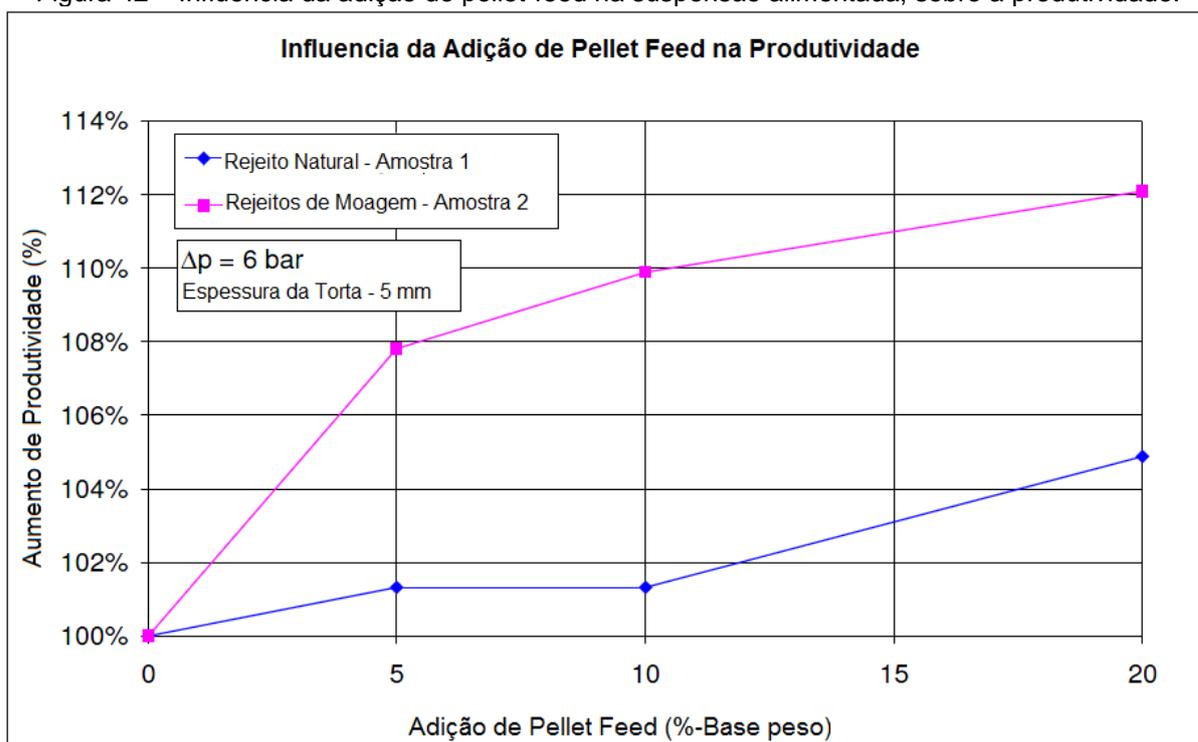
Várias condições de trabalho com o filtro hiperbárico BOKELA foram testadas em laboratório, com intuito de dimensionar os testes de filtração industrial. Tais testes foram realizados com o equipamento FILTRATEST fornecido por BOKELA. As seguintes condições foram testadas com o FILTRATEST:

- 1) Influência da adição de pellet-feed natural, codificado como PFCJ (amostra nº 3) pela VALE nas suspensões de alimentação, em relação à taxa de filtração (produtividade) e umidade contida;
- 2) Influência da adição de auxiliar de filtração no teor de umidade.

##### **4.1.5.1. Influência da adição de pellet-feed natural à suspensão de tailing**

A presença de partículas mais grosseiras, presentes no pellet-feed leva a um aumento da taxa de filtração (produtividade) nas amostras com adição de sólidos de pellet-feed (amostras 2 a 4), a melhoria é mais forte porque os rejeitos de moagem não possuem grandes quantidades de partículas na granulometria do pellet-feed.

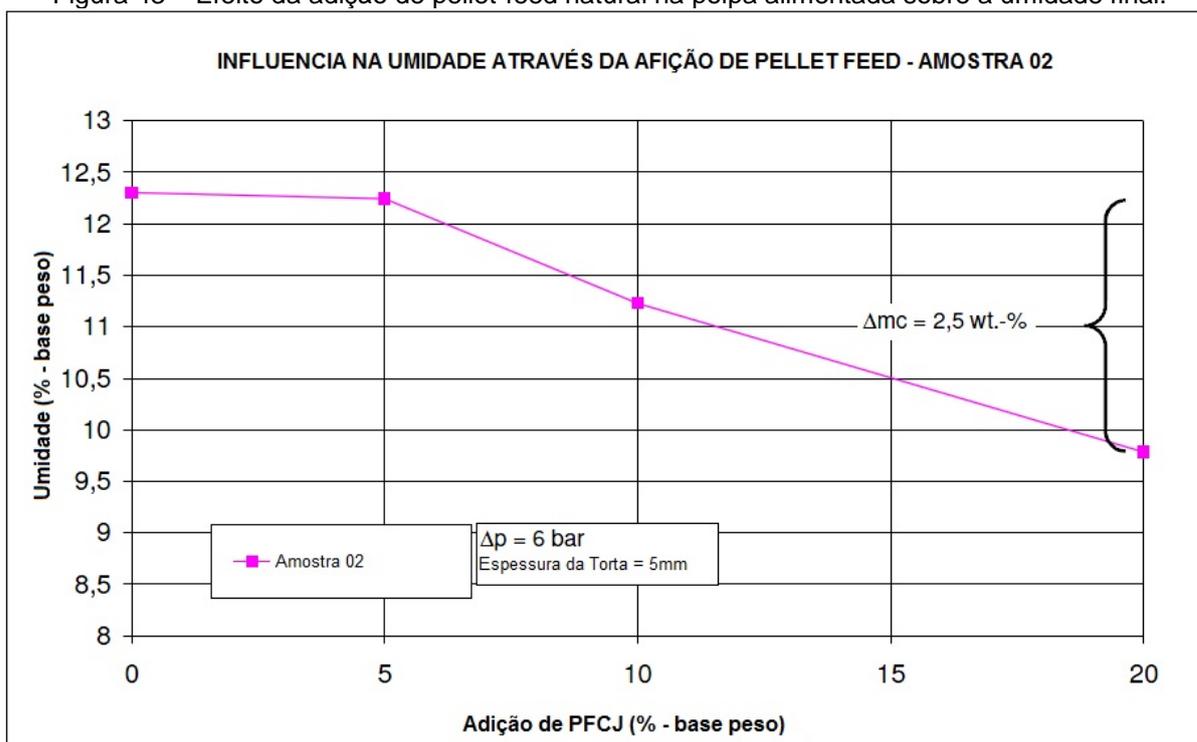
Figura 42 – Influencia da adição de pellet-feed na suspensão alimentada, sobre a produtividade.



Fonte: VALE, 2006.

Estas partículas mais grosseiras do pellet-feed conferem à torta de filtração da mistura uma característica mais porosa e as forças capilares são menores. Como se pode ver na Figura 43 (a seguir) isso leva também a uma notável redução do teor de umidade quando se aumenta a participação da parcela de pellet-feed.

Figura 43 – Efeito da adição de pellet-feed natural na polpa alimentada sobre a umidade final.

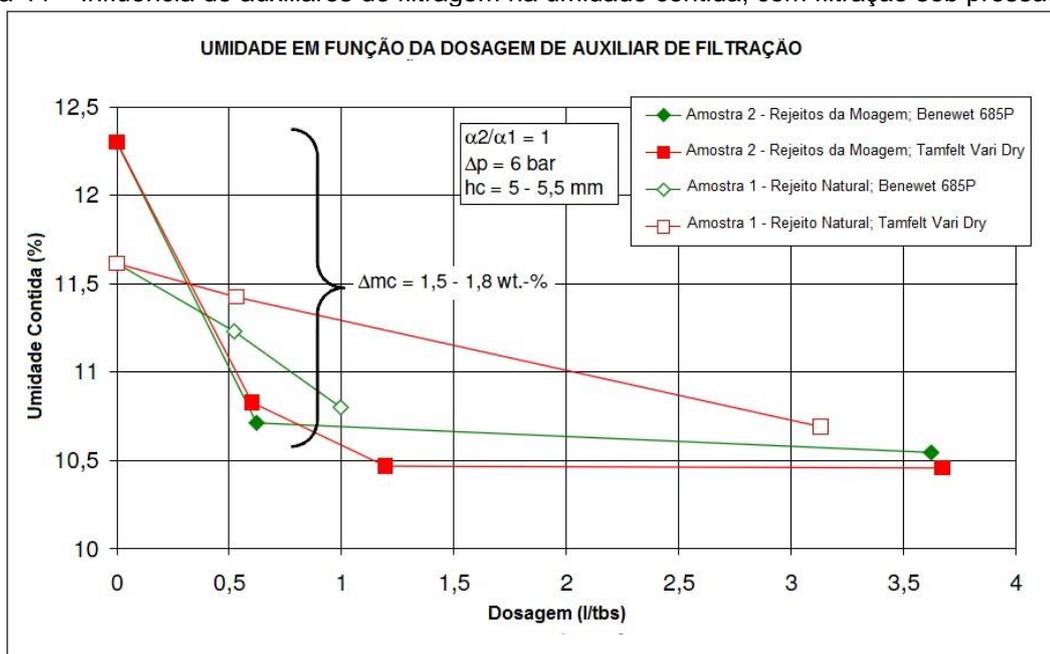


#### 4.1.5.2. Influência da adição de auxiliar de filtração no teor de umidade

Os auxiliares de filtração atuam com o objetivo de reduzir a pressão do capilar, que é a pressão mínima para que haja drenagem do poro. Os reagentes mais comumente aplicados são os floculantes e surfactantes.

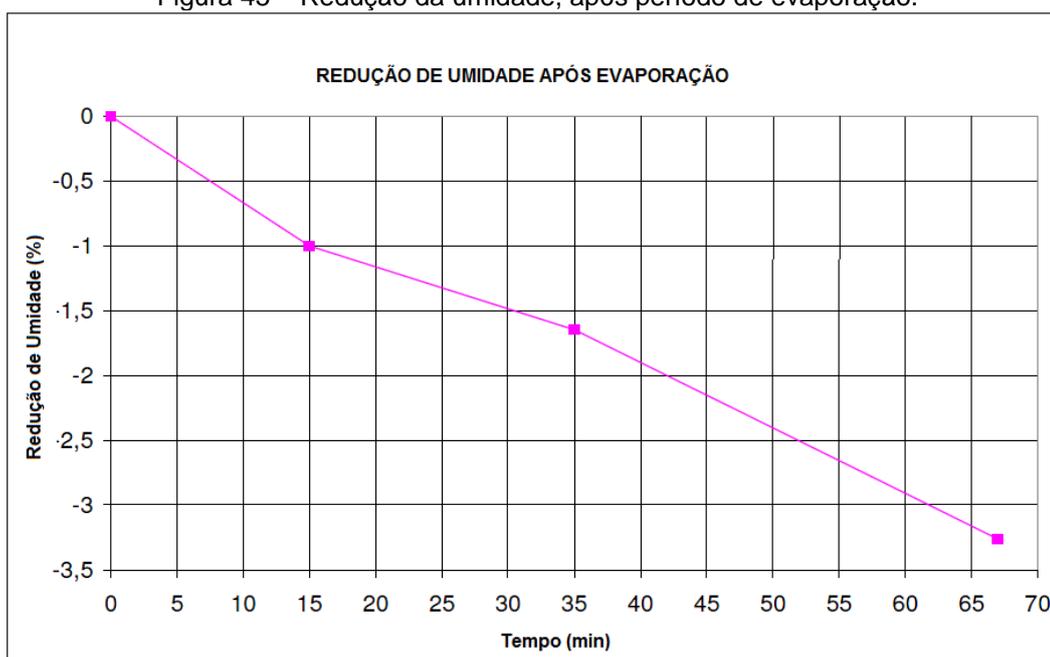
A figura 47 apresenta os resultados dos testes com dois tipos distintos de auxiliar de filtração. Quando são adicionados a uma taxa de 0,01 a 0,5 l/tbs há uma melhoria significativa no teor de umidade contida. Uma dosagem mais elevada não conduz a uma melhoria adicional no teor de umidade.

Figura 44 – Influencia de auxiliares de filtragem na umidade contida, com filtração sob pressão de ar.



Com base nos resultados apresentados na figura 45 a seguir, uma redução do teor de umidade de pelo menos 1,00%, é esperada para 15 minutos de transporte em correias transportadoras, a uma temperatura inicial de Torta de 72°C. Os valores estão negativos pois expressam a redução observada em relação à umidade inicial.

Figura 45 – Redução da umidade, após período de evaporação.



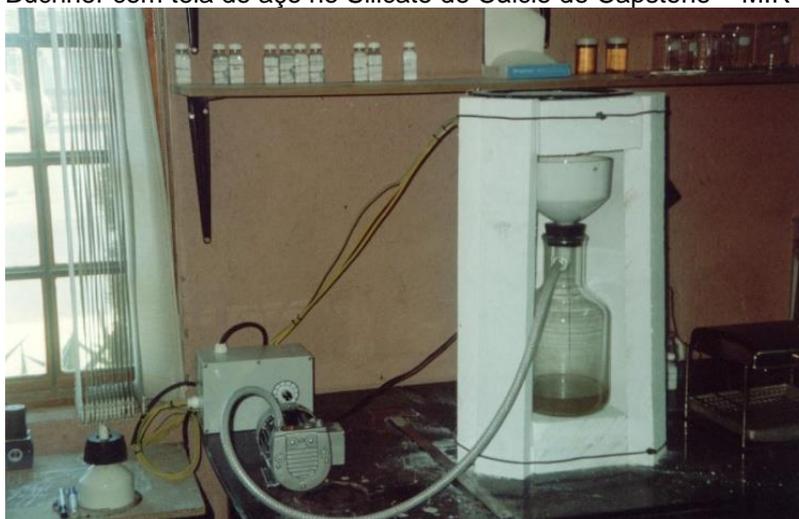
#### 4.1.6 Steel belt dryer – Secador linear

O principal parâmetro a ser definido nesta etapa é a altura do MIR em relação à torta, uma altura reduzida aumenta sensivelmente a eficiência da transferência de calor. A altura “ideal” para esse teste foi definida em 80 mm acima da malha de aço.

O equipamento utilizado consiste de uma tela de aço com abertura de 200 micra fixada em um Buchner fabricado em inox, com diâmetro de 170 mm, esse conjunto foi conectado a um bomba de vácuo, que cria uma pressão negativa na malha de aço. A unidade de Radiação Infravermelha de Onda Média (MIR) é montada em uma câmara com isolamento de silicato de Cálcio dentro da qual o Buchner é instalado.

A unidade MIR tem ajuste de potência entre 0 e 100% até 3kW que é distribuída em uma área circular com diâmetro de 210 mm, disposta acima do Buchner.

Figura 46 – Buchner com tela de aço no Silicato de Cálcio de Capstone – MIR sobre vácuo.



Fonte: PSS, 2006.

Procedimentos de realização do teste em bancada:

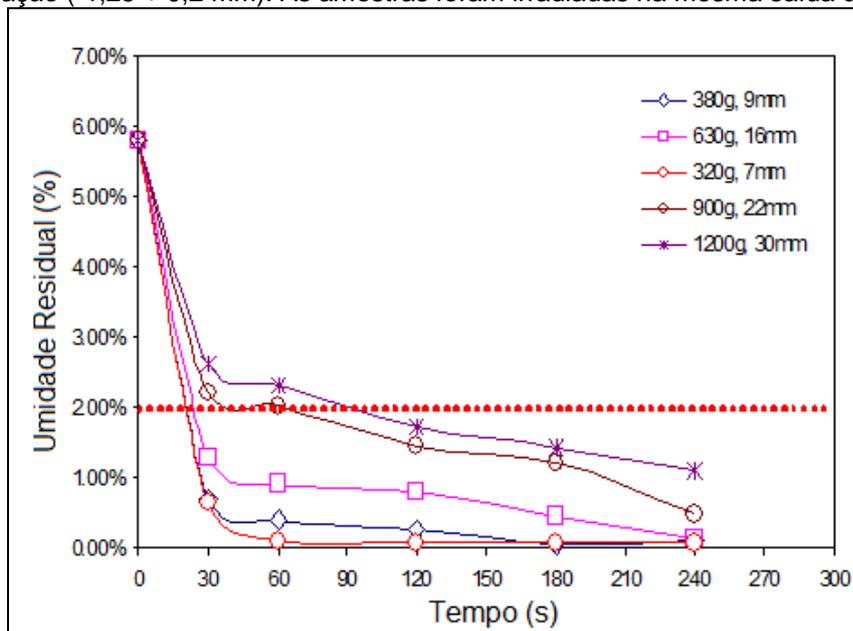
- 1) O funil com polpa de minério de ferro é colocado dentro da câmara, onde a unidade MIR está disposta a 80 mm da superfície do minério de ferro a ser submetido a secagem;
- 2) Inicialmente foi aplicada 70% da potência nominal, sendo 70% de 3kW igual a 2,1 kW (60,1 kWh/m<sup>2</sup>);
- 3) A amostra de minério de ferro foi preparada com aproximadamente 40 a 50% de umidade e inserido no Buchner;
- 4) A amostra foi colocada sob o MIR e o vácuo foi ligado;
- 5) Após certo intervalo de tempo o vácuo foi desligado e o Buchner foi removido para que a amostra fosse pesada, registrando a perda de umidade e a temperatura.

As seguintes medições foram registradas:

- 1) Peso da amostra e volume composto;
- 2) Diferencial de pressão sobre minério de ferro;
- 3) Ajustes de MIR, intensidade e altura;
- 4) Tempo de secagem;
- 5) Massa antes e depois do tempo de secagem;
- 6) Redução de umidade.

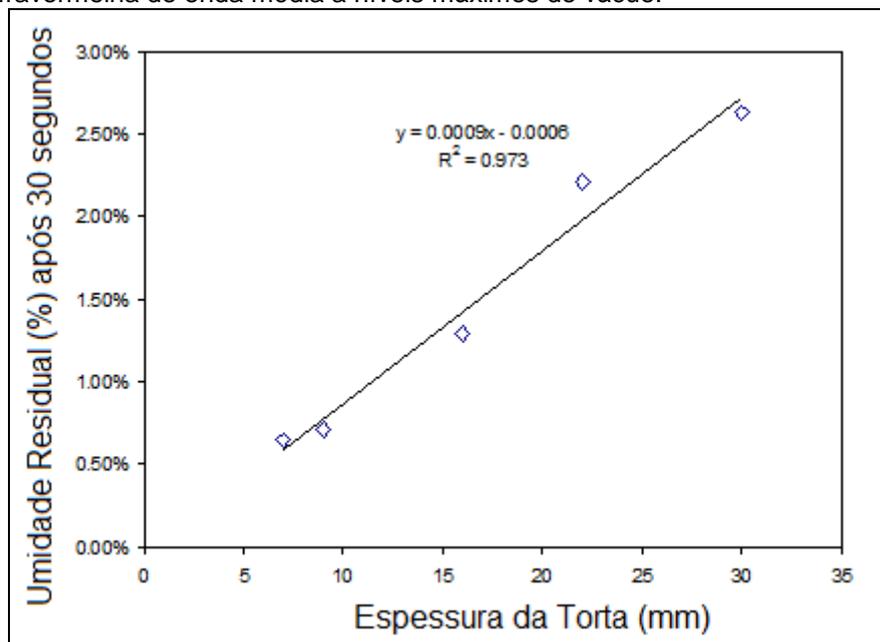
O propósito desta investigação foi descobrir a possibilidade do uso de radiação Infravermelha de Onda Média (MIR), em escala de laboratório, como uma ferramenta de redução de umidade contida no minério de ferro para níveis abaixo de 9,00% em peso.

Figura 47 – O efeito da espessura de camada sobre a umidade residual nas amostras de minério de ferro de fração (-1,25 + 0,2 mm). As amostras foram irradiadas na mesma saída de potência.



Fonte: PSS, 2006.

Figura 48 – O efeito da espessura de torta da umidade remanescente após 30 segundos da radiação infravermelha de onda média a níveis máximos de vácuo.



Fonte: PSS, 2006.

A umidade é rapidamente removida das amostras para níveis abaixo de 2,00% usando radiação MIR. Relacionando a umidade residual (Y) com a influência da espessura da torta, para as mesmas condições de irradiação, tem-se uma correlação linear aproximada, com  $R^2$  de 97,00%, sendo possível estabelecer a equação 2:

$$Y = 0,0009X - 0,0006 \quad (2)$$

Onde “Y” é o nível de umidade e “X” é espessura da torta.

Para obter o nível de umidade de 2% em 30 segundos, a equação 2 determina que a espessura de torta deverá ser de 21,5 mm fornecendo uma secagem ótima para a fração fina. Adicionalmente, o efeito do vácuo na espessura de torta, e das várias alturas de MIR acima da torta afetam o desempenho da secagem.

Com base nos resultados obtidos, a camada de minério para tratamento das amostras 5, 6 e 7 foi de aproximadamente 25,00 mm, pois essas amostras apresentam distribuição granulométrica mais grosseira, com menor superfície específica e maior facilidade de secagem. Para as frações finas, nas amostras 1, 2, 3 foi usada espessura de torta de 20 mm, para a amostra 4 a espessura aplicada foi de 22 mm.

As amostras foram preparadas com 600 ml de água para cada teste. A drenagem de água através da ação do vácuo mostrou-se rápida, em cinco segundos para amostras mais grosseiras e entre dez e vinte segundos para as amostras de distribuição mais fina (1, 2, 3 e 4).

Após a adição de 600 ml de água na amostra seca, a mesma é inserida no Buchner de teste e o tempo de vácuo é registrado, subsequentemente o material é colocado sob o MIR.

A seguir são apresentados os resultados dos testes em bancada:

Tabela 13 – Resultados de teste em bancada.

Amostra 01	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Peso Úmido (g)	1.138,00	990,00	957,00	930,00	903,00	873,00	848,00
Peso Seco (g)	848,00	848,00	848,00	848,00	848,00	848,00	848,00
%Umidade em relação ao peso total (%)	25,48	14,34	11,39	8,82	6,09	2,86	0,00
%Umidade em relação à massa seca (%)	34,20	16,75	12,85	9,67	6,49	2,95	0,00
Tempo de Secagem (s)	12,00	48,00	96,00	144,00	192,00	240,00	288,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Amostra 02	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Peso Úmido (g)	1.018,00	924,00	879,00	851,00	819,00	797,00	764,00
Peso Seco (g)	764,00	764,00	764,00	764,00	764,00	764,00	764,00
%Umidade em relação ao peso total (%)	<b>24,95</b>	<b>17,32</b>	<b>13,08</b>	<b>10,22</b>	<b>6,72</b>	<b>4,14</b>	<b>0,00</b>
%Umidade em relação à massa seca (%)	33,25	20,94	15,05	11,39	7,20	4,32	0,00
Tempo de Secagem (s)	12,00	48,00	96,00	144,00	192,00	240,00	288,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Amostra 03	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Peso Úmido (g)	1.072,00	944,00	903,00	864,00	838,00	811,00	788,00
Peso Seco (g)	777,00	777,00	777,00	777,00	777,00	777,00	777,00
%Umidade em relação ao peso total (%)	<b>27,52</b>	<b>17,69</b>	<b>13,95</b>	<b>10,07</b>	<b>7,28</b>	<b>4,19</b>	<b>1,40</b>
%Umidade em relação à massa seca (%)	37,97	21,49	16,22	11,20	7,85	4,38	1,42
Tempo de Secagem (s)	12,00	48,00	96,00	144,00	192,00	240,00	288,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00

Fonte: PSS, 2006.

Tabela 15 – Resultados de teste em bancada (Continuação).

Amostra 04	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Peso Úmido (g)	1.238,00	1.177,00	1.148,00	1.124,00	1.095,00	1.073,00	1.047,00
Peso Seco (g)	1.047,00	1.047,00	1.047,00	1.047,00	1.047,00	1.047,00	1.047,00
% Umidade em relação ao peso total (%)	15,43	11,05	8,80	6,85	4,38	2,42	0,00
% Umidade em relação à massa seca (%)	18,24	12,42	9,65	7,35	4,58	2,48	0,00
Tempo de Secagem (s)	12,00	48,00	96,00	144,00	192,00	240,00	288,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Amostra 05	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Peso Úmido (g)	1.463,00	1.390,00	1.348,00	1.322,00	1.298,00	1.274,00	1.257,00
Peso Seco (g)	1.245,00	1.245,00	1.245,00	1.245,00	1.245,00	1.245,00	1.245,00
%Umidade em relação ao peso total (%)	14,90	10,43	7,64	5,82	4,08	2,28	0,95
%Umidade em relação à massa seca (%)	17,51	11,65	8,27	6,18	4,26	2,33	0,96
Tempo de Secagem (s)	10,00	40,00	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Amostra 06	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Peso Úmido (g)	1.561,00	1.496,00	1.447,00	1.411,00	1.377,00	1.346,00	1.328,00
Peso Seco (g)	1.328,00	1.328,00	1.328,00	1.328,00	1.328,00	1.328,00	1.328,00
%Umidade em relação ao peso total (%)	14,93	11,23	8,22	5,88	3,56	1,34	0,00
%Umidade em relação à massa seca (%)	17,55	12,65	8,96	6,25	3,69	1,36	0,00
Tempo de Secagem (s)	10,00	40,00	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00

Fonte: PSS, 2006.

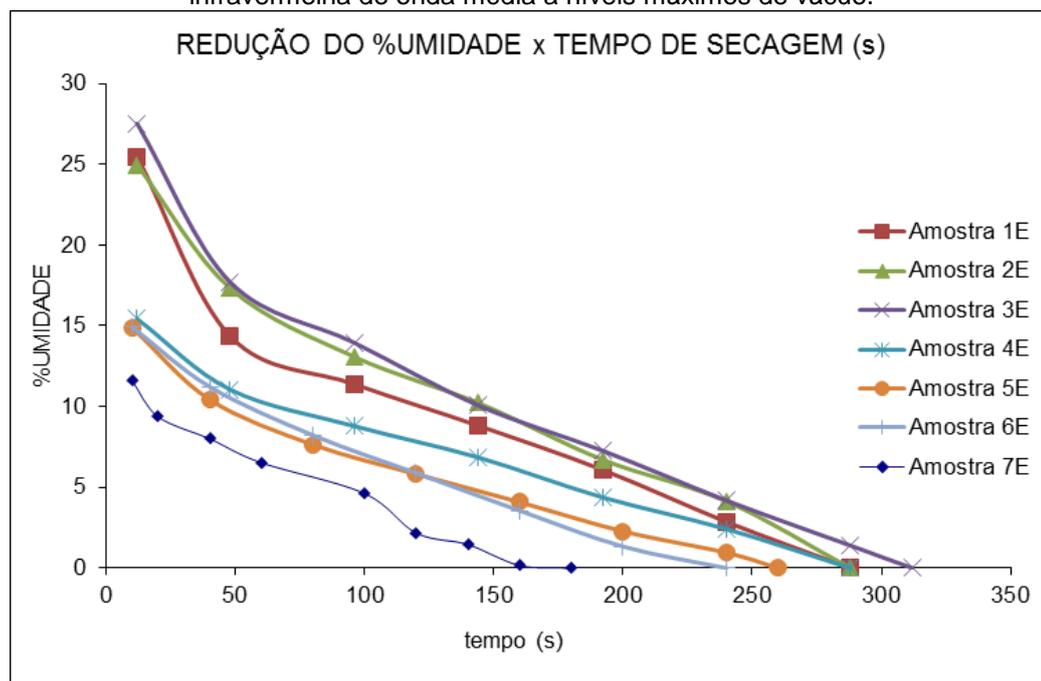
Tabela 15 – Resultados de teste em bancada (Continuação).

Amostra 07	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7
Espessura da Torta (mm)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Peso Úmido (g)	1.378,0	1.344,0	1.324,0	1.303,0	1.277,0	1.245,0	1.236,0
Peso Seco (g)	1.218,0	1.218,0	1.218,0	1.218,0	1.218,0	1.218,0	1.218,0
%Umidade em relação ao peso total (%)	11,61	9,38	8,01	6,52	4,62	2,17	1,46
%Umidade em relação à massa seca (%)	13,14	10,34	8,70	6,98	4,84	2,22	1,48
Tempo de Secagem (s)	10,00	20,00	40,00	60,00	100,00	120,00	140,00
Potencia (%)	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
Altura do MIR (mm)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00

Fonte: PSS, 2006.

Pelo exposto, pode-se considerar que a metodologia pode ser aplicada na obtenção do nível de umidade desejado, abaixo de 9,00%. O tempo de secagem será também fator importante no dimensionamento de planta industrial, pois tem influencia direta sobre o consumo de energia. A Figura 49 a seguir demonstra a relação entre o tempo de secagem e a umidade obtida, o parâmetro de umidade é atingido entre 50 e 150 segundos.

Figura 49 – O efeito da espessura de torta da umidade remanescente após 30 segundos da radiação infravermelha de onda média a níveis máximos de vácuo.

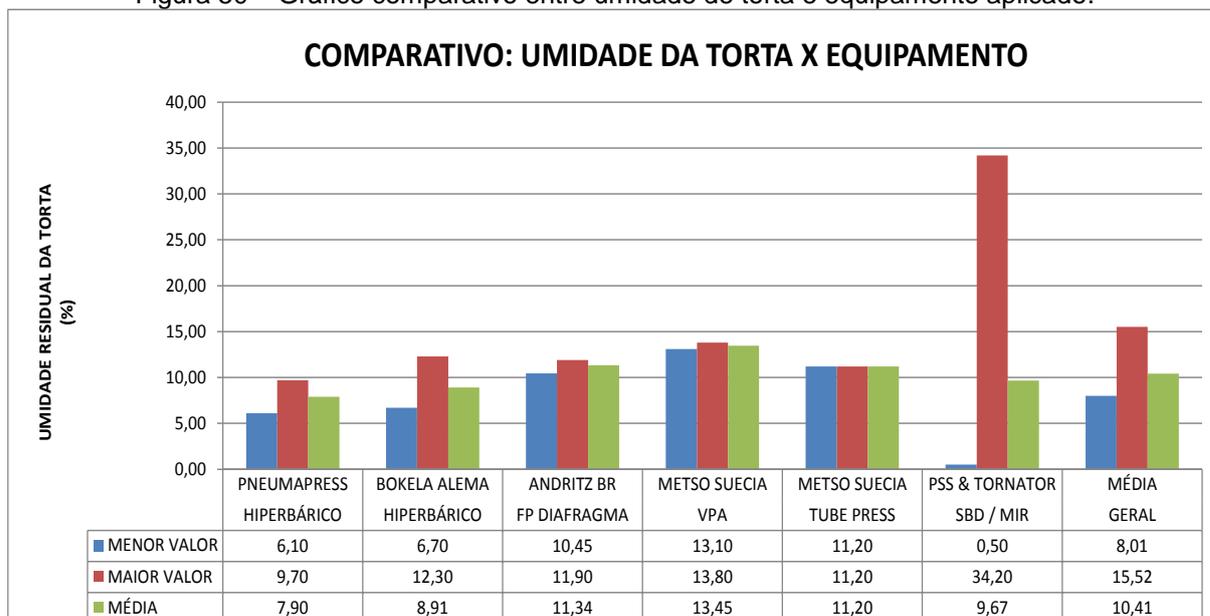


Fonte: PSS/Tornator, 2006.

#### 4.1.7 Comparativo de resultados com teste de bancada

Com base nos resultados obtidos em cada teste apresentado nos capítulos anteriores, pode-se construir o gráfico apresentado a seguir, no qual são comparados os resultados de umidade residual, parâmetro fundamental para a tomada de decisão operacional.

Figura 50 – Gráfico comparativo entre umidade de torta e equipamento aplicado.



Fonte: Vale, 2006.

As diversas tecnologias aplicadas em escala de bancada nos laboratórios poderiam ser experimentadas em escala piloto, visto a boa perspectiva de alcance do alvo de umidade residual da torta de ultrafinos de minério de ferro.

Como serviram para determinar quais os próximos passos e quais equipamentos serem alugados ou adquiridos para a próxima fase, os fornecedores emitiram relatórios específicos para demonstrar essa aptidão (Anexos)

Além disso, esses ensaios são, via de regra, estáticos e podem indicar que se pode esperar alguma melhoria de resultado em escala industrial de produção dinâmica.

Entre os resultados apresentados nesta seção, os que mais se adequaram à etapa seguinte, de testes industriais em escala piloto foram: Espessador Deep-Cone, devido à oportunidade de uma instalação semi-industrial estar disponível na planta da Vale/Carajás; e os filtros Hiperbáricos, BOKELA e PNEUMAPRESS, que apresentaram as condições de umidade residual e dinâmica operacional mais adequadas ao processo atual.

## 4.2 Resultados dos ensaios piloto

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes em escala piloto, realizados na planta de tratamento de Carajás, em linha paralela à produção normal, com diversos fluxos e combinações de material, oportunidade que proporcionou a observação das variações inerentes ao próprio processo de beneficiamento.

### 4.2.1 Filtro hiperbárico bokela

Entre novembro de 2005 e fevereiro de 2006 foram realizados testes piloto de filtração com os filtros BOKELA, em condições de alta pressão. Os testes foram realizados diretamente na planta da VALE/Carajás, com dois tipos de rejeitos de minérios de ferro.

A planta piloto BOKELA de origem alemã é composta por dois contêineres de 20' cada, montados de maneira sobreposta, contendo um filtro de discos 3,75 m<sup>2</sup>, um vaso de pressão padrão e uma comporta de descarga. Uma cabine para controle do processo, um compressor para fornecimento de ar, uma bomba de polpa, um tanque receptor de filtrado e diversas outras unidades auxiliares também são parte da planta piloto, além de um gerador de vapor e um gerador de energia elétrica (50 Hz), estes últimos alugados no Brasil.

Durante os testes com filtro BOKELA a distribuição da granulometria, a composição mineralógica e o percentual de sólidos na alimentação foram medidos continuamente. O gráfico da figura 57 apresenta dados em linhas que fornecem uma visão geral sobre a variação dos parâmetros citados.

Assim, os valores assumidos em garantia de desempenho para a planta piloto de filtragem foram os seguintes:

Tabela 14 – Parâmetros de Projeto: Características da Polpa.

AMOSTRA	%Sólidos	Granulometria (< 7 µm)
Nº 1 - Rejeito Natural	50% (± 2%)	55% (± 2%)
Nº 2 - Rejeito da Moagem	50% (± 2%)	90% (± 2%)

Fonte: BOKELA (2010).

Figura 51 – Utilidades da planta piloto – vaso de pressão no container superior, e comporta de descarga da torta com correia transportadora no container inferior.



Fonte: VALE, 2006

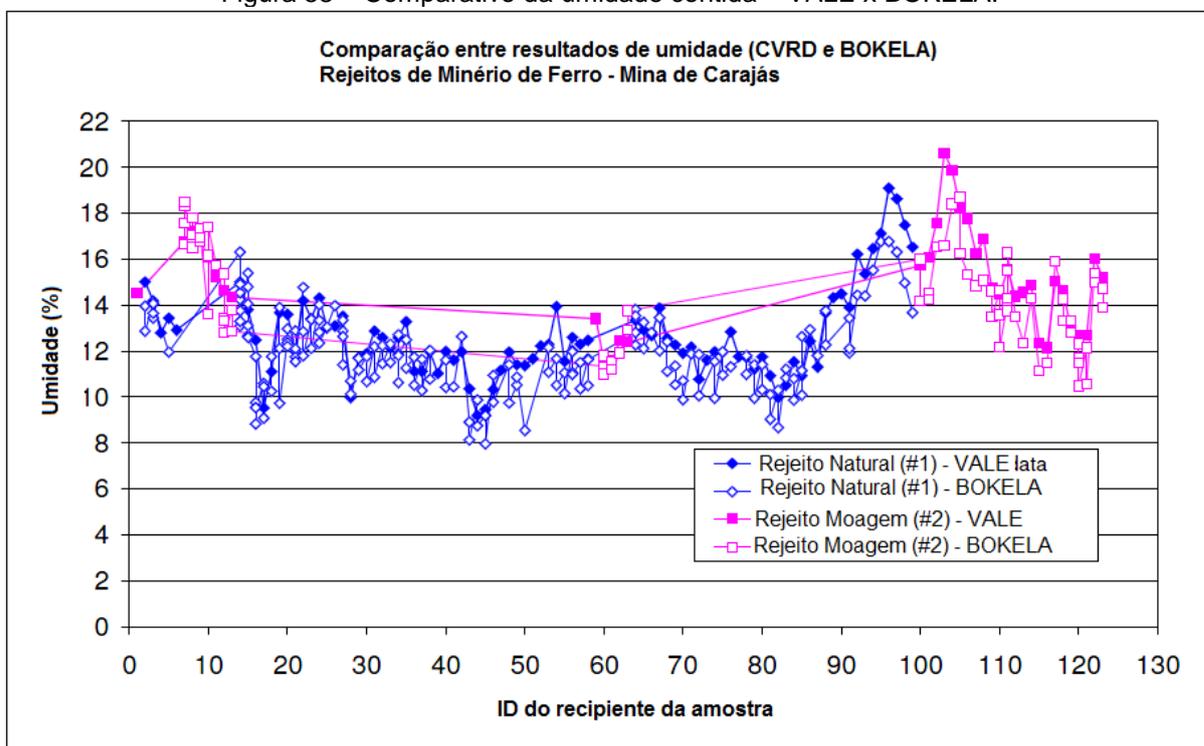
Figura 52 – Sistema de descarga da torta.



Fonte: VALE, 2006.

Os resultados dos testes, quanto aos valores da umidade contida, são apresentados com base na média obtida.

Figura 53 – Comparativo da umidade contida – VALE x BOKELA.



Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que a tecnologia de filtragem sob pressão de ar e vapor (filtros hiperbáricos) permite atingir níveis aceitáveis e confiáveis de desaguamento dos rejeitos finos de minério de ferro da VALE/Carajás em condições industriais. Porém, não atingem o alvo dessa dissertação de 9 % de umidade residual e nem de maneira sistemática.

Com ambos os tipos de rejeitos (amostras nº 1 e nº 2) uma torta de filtragem, seca e quebradiça foi obtida (Figura 54), sem que fosse necessária adição de pellet-feed natural para elevar o número de partículas mais grosseiras. Embora as condições de alimentação (concentração de sólidos e distribuição granulométrica) tenham oscilado em uma ampla gama de valores, o filtro hiperbárico a disco foi capaz de lidar com as variações do processo, sem interrupções da operação. Caracterizando elevada flexibilidade operacional, com a capacidade de compensar os diferentes parâmetros de processo.

Figura 54 – Torta seca e quebradiça, produto da planta piloto.



Fonte: VALE, 2006.

A fim de assegurar um desempenho constante do equipamento, em uma unidade de produção industrial, condições constantes de alimentação devem ser mantidas numa gama limitada de variação. Caso as condições pré estabelecidas estejam fora dos limites estabelecidos, o equipamento pode continuar a funcionar, porém sem garantir o teor de umidade e a produtividade do circuito.

Ainda com base nos resultados dos testes piloto, as seguintes tabelas de desempenho da filtração com os dois tipos de rejeitos foram especificadas para diferentes modos de operação com o filtro objeto do deste estudo.

Os dados de desempenho com os rejeitos naturais puros (amostra nº 1) são apresentados na Tabela 15. Os valores apresentados são baseados em uma concentração de alimentação de 50% e uma distribuição granulométrica de 55% <7 $\mu$ m. O teor de umidade alvo é de 9,00 a 11,00% em massa. Tal nível de umidade pode ser atingido com a filtração sob pressão sem a adição de agente auxiliar de filtragem (11,00 a 11,50% de umidade) com uma taxa de produtividade de 350 a 375 kg/m<sup>2</sup>xh. O “engrossamento” do rejeito e a conseguinte elevação da superfície específica possibilitaram atingir esses valores de umidade final,. Entretanto o desafio era desaguar o ultrafino sem adição de partículas mais grossas

Tabela 15 – Desempenho do teste com Amostra 1.

	Filtragem – Pressão de Ar			Filtragem – Pressão de Vapor	
	Padrão	Com Floculante	Com Aux. De Filtragem	Padrão	Com Floculante
Umidade (% - em massa)	12,5 – 14,0	14,0 – 15,0	11,0 – 11,50	11 – 11,5	10,0 – 10,5
Taxa Específica de Filtragem – (kg/m <sup>2</sup> h)	350 – 375	400 – 450	350 – 375	350 – 375	350 – 375
%Sólidos no Filtrado – (% - em massa)	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Consumo específico de ar – (m <sup>3</sup> /tbs)	450 – 500	300	450 – 500	300	325
Consumo específico de vapor – (kg/tbs)	-	-	-	140 – 180	140 – 180
Consumo de Auxiliar de Filtragem – (l/tbs)	-	-	0,1 – 0,5	-	0,1 – 0,5
Consumo de Floculante – (g/tbs)	-	100	-	-	-

Fonte: VALE (2006).

Os dados de desempenho com os rejeitos de moagem (amostra nº 2) são mostrados na Tabela 16. Os valores apresentados são baseados em uma concentração de alimentação de 50% e uma distribuição granulométrica de 90% <7µm. O teor de umidade alvo de 9 a 11% em peso. Sendo esta meta atingida com a filtração sob pressão de vapor, com a adição de auxiliar de filtragem (umidade de 10 a 12% em massa, ou 9 a 11% em massa com pós-evaporação) a uma taxa de produtividade de 325 a 375 kg/m<sup>2</sup>xh.

Tabela 16 – Desempenho de filtragem – Amostra nº 2 – Rejeito Moagem + PFCJ.

	Filtragem – Pressão de Ar			Filtragem – Pressão de Vapor			
	Padrão	Com Floculante	Com Aux. De Filtragem	Padrão	Com Floculante	Padrão Com pós evaporação	Aux. De Filtragem com pós evaporação
Umidade (% - em massa)	16,0 – 17,0	18,0 – 19,0	14,5 – 15,0	13,5 – 14,5	10,0 – 12,0	12,5 – 13,5	9,0 – 11,0
Taxa Específica de Filtragem – (kg/m <sup>2</sup> h)	325 – 375	375 – 425	325 – 375	325 – 375	325 – 375	325 – 375	325 – 375
%Sólidos no Filtrado – (% - em massa)	<1,5	<1,0	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5
Consumo específico de ar – (m <sup>3</sup> /tbs)	550	550	550	450	400	450	400
Consumo específico de vapor – (kg/tbs)	-	-	-	150 – 200	200 – 250	150 – 200	200 – 250
Consumo de Auxiliar de Filtragem – (l/tbs)	-	-	0,1 – 0,5	-	0,1 – 0,5	-	0,1 – 0,5
Consumo de Floculante – (g/tbs)	-	100	-	-	-	-	-

Fonte: VALE (2006).

#### 4.2.2 Pneumapress

Após testes em escala de laboratório (bancada), um equipamento em escala piloto foi instalado nas operações de Carajás, e operou entre junho e julho de 2006. Várias condições de polpa e configuração do filtro foram testadas nesse período, com o objetivo principal de avaliar o desaguamento das diferentes condições de polpa de rejeitos, fornecendo níveis aceitáveis de produtividade e umidade residual.

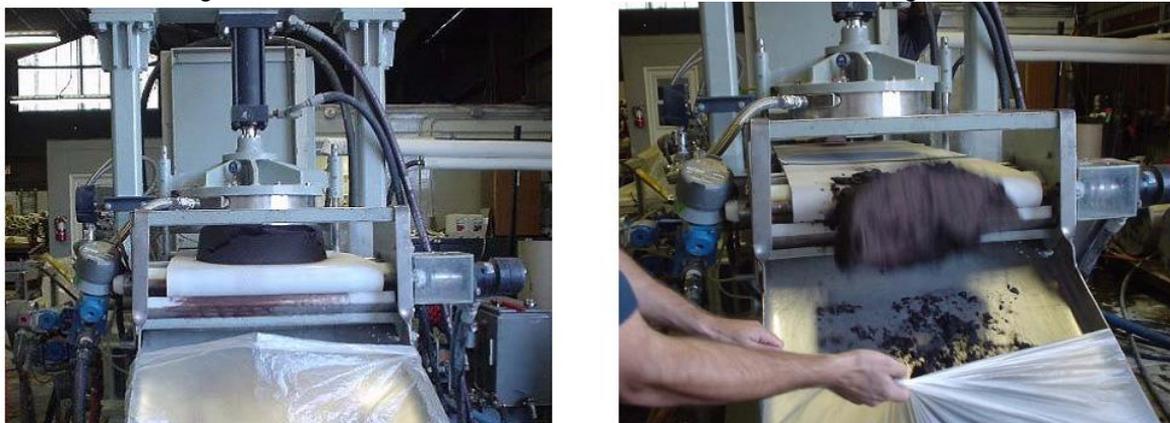
A especificação do fabricante, para o equipamento instalado é filtro Pneumapress M1.3-316 (Figura 55 e 56) extraída do relatório específico do fornecedor.

Figura 55 – Filtro PNEUMAPRESS modelo M1.3-316.



Fonte: PNEUMAPRESS, 2006.

Figura 56 – Filtro PNEUMAPRESS modelo M1.3-316, descarga da torta.



Fonte: PNEUMAPRESS, 2006.

Figura 57 – Vista frontal do filtro Pneumapress M1.3-316, instalado em Carajás/Vale em plena Operação.



Fonte: Próprio Autor, 2006.

Figura 58 – Vista lateral do filtro PneumapressM1.3-316, instalado em Carajás/Vale.



Fonte: Próprio Autor, 2006.

Na planta piloto, as etapas de filtração compreendem:

- 1) Fechamento das placas de filtro: as placas de filtro se fecham e formam uma câmara de filtração, que contém o meio filtrante;
- 2) Preenchimento de polpa: a suspensão é bombeada para a câmara de filtro e uma torta começa a se formar sobre o meio filtrante. À medida que a torta se forma, o líquido liberado através do meio filtrante é escoado para fora do sistema;
- 3) Prensamento: após o total preenchimento da câmara, um gás comprimido é injetado e seca a torta, escoando o líquido remanescente;
- 4) Descarga da Torta (Figuras 59 a 61): após a etapa anterior, a câmara de filtração é aberta automaticamente e a torta é descarregada do sistema. A cada ciclo o elemento filtrante passa por limpeza através de água sob pressão.

Figura 59 – Torta gerada na câmara de filtração do filtro PNEUMAPRESS.



Fonte: Próprio Autor, 2006.

Figura 60 – Torta gerada na câmara de filtração do filtro PNEUMAPRESS.



Fonte: Próprio Autor, 2006.

Figura 61 – Torta gerada na câmara de filtração do filtro Pneumapress.



Fonte: Próprio Autor, 2006.

A sumarização dos resultados médios obtidos com o filtro PNEUMAPRESS está apresentada a seguir (Tabela 17):

Tabela 17 – Resultados dos testes com filtro Pneumapress.

<i>Fluxo Testado</i>	<i>Umidade (%)</i>	<i>Produtividade (t/hxm<sup>2</sup>)</i>
“pellet feed” Natural	11,0	7,00
“pellet feed” Moagem	9,00	3,00
Rejeito Hidrociclonagem Natural	9,00	0,50
Underflow Espessador Usina	9,00	0,50
Rejeito hidrociclones Moagem	9,00	0,40
Polpa 60% Pellet; 40% Rejeito	9,00	1,00
Polpa 40% Pellet; 60% Rejeito	9,00	0,50
Polpa 20% Pellet; 80% Rejeito	9,00	0,40
Polpa 10% Pellet; 90% Rejeito	9,00	0,35
Polpa 5% Pellet; 95% Rejeito	9,00	0,30

Fonte: PNEUMAPRESS, 2010.

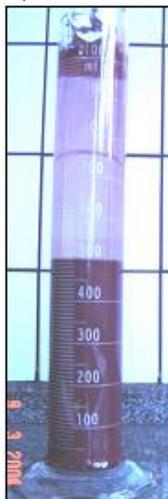
Todos os objetivos foram alcançados com sucesso durante os testes, o desempenho do equipamento permite a manutenção corretiva e utilização mínimas das utilidades (bombas, válvulas, compressores e sistemas hidráulicos), com níveis aceitáveis de produtividade. A meta de umidade foi atingida na maioria dos ensaios realizados, permitindo faixas de trabalho e média de 9,00% de umidade residual.

#### **4.2.3 Resultados de teste piloto com espessador *deep cone* Dorr Oliver Eimco**

##### **4.2.3.1 Ensaio de sedimentação**

Entre as tecnologias avaliadas na recuperação dos ultrafinos de minério de ferro encontra-se o espessador tipo “*deep cone*”, e para o dimensionamento de suas condições operacionais foram realizados ensaios de sedimentação em bancada, utilizando provetas de 1000 ml (Figura 62) para medição do tempo de sedimentação. Os testes permitiram estabelecer o diâmetro do espessador, o percentual de sólidos na descarga do espessador (underflow), a qualidade do transbordo (overflow) e também a obtenção da dosagem ideal para o floculante que será aplicado no teste, neste caso uma poliacrilamida, de nome comercial FLONEX 9076.

Figura 62 – Proveta 1000 ml, utilizada em ensaios de sedimentação.



Fonte: Próprio Autor

As amostras utilizadas nos testes de bancada foram coletadas dos fluxos exclusivamente de rejeitos denominados “naturais” (Tabela 9), o rejeito fino da moagem, gerado na planta, não foi submetido ao teste de sedimentação, portanto os parâmetros obtidos com o processamento do rejeito natural representam equivalência em relação ao rejeito de moagem, visto ser conhecidamente um material de sedimentação mais lenta. É um material fundamentalmente formado por partículas ultrafinas, e normalmente dispostas de maneira definitiva em barragens de rejeito.

Tabela 18 – Características do rejeito natural.

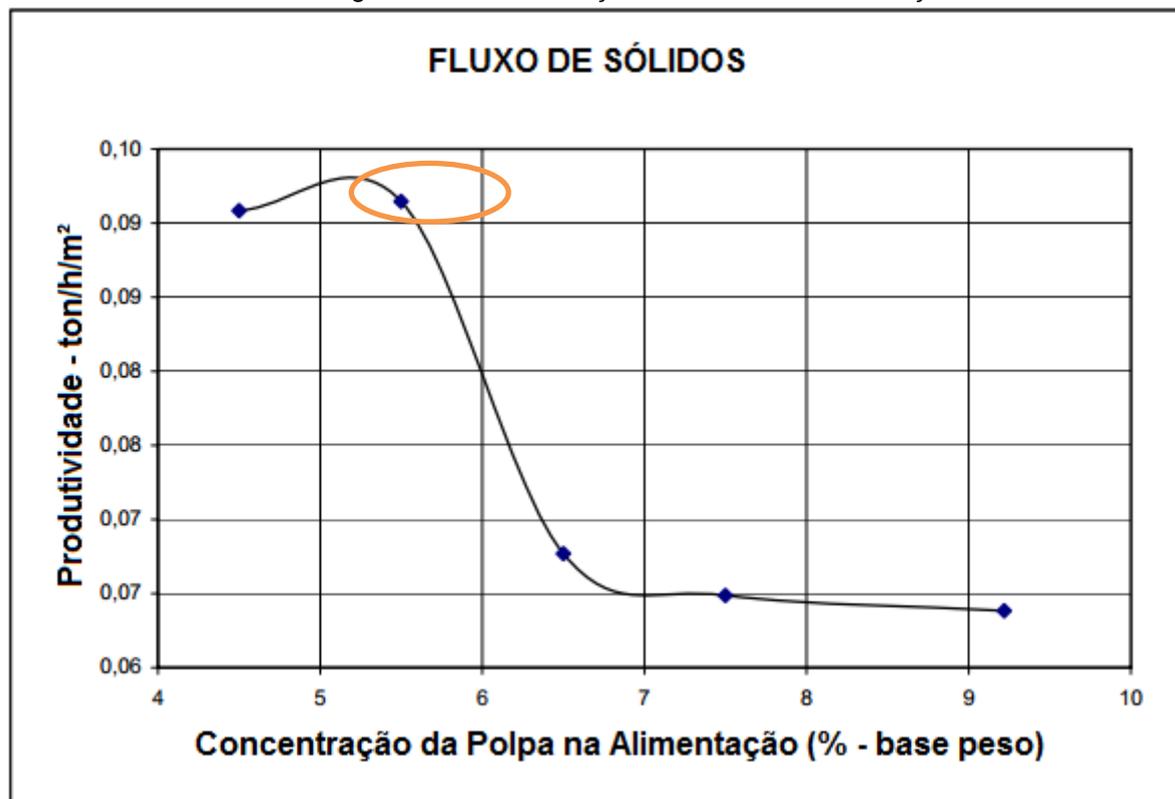
Sólidos na Alimentação (%)	Entre 10 e 12%
Temperatura de Operação	Ambiente
Densidade do Líquido (g/cm <sup>3</sup> )	1,00
Densidade dos Sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	4,80

Fonte: Dorr-Oliver, 2006.

Primeiramente foram realizados ensaios com o objetivo de avaliar a melhor concentração de sólidos na alimentação do filtro, basicamente, para se avaliar em qual concentração de sólidos a sedimentação ocorre mais rapidamente.

Para o fluxo de rejeitos naturais, a concentração de sólidos onde ocorre a maior taxa de transbordo, ou maior taxa de sedimentação é de 5,00% (Figura 63), obtida através da diluição do fluxo de alimentação do equipamento.

Figura 63 – Concentração de sólidos na alimentação.



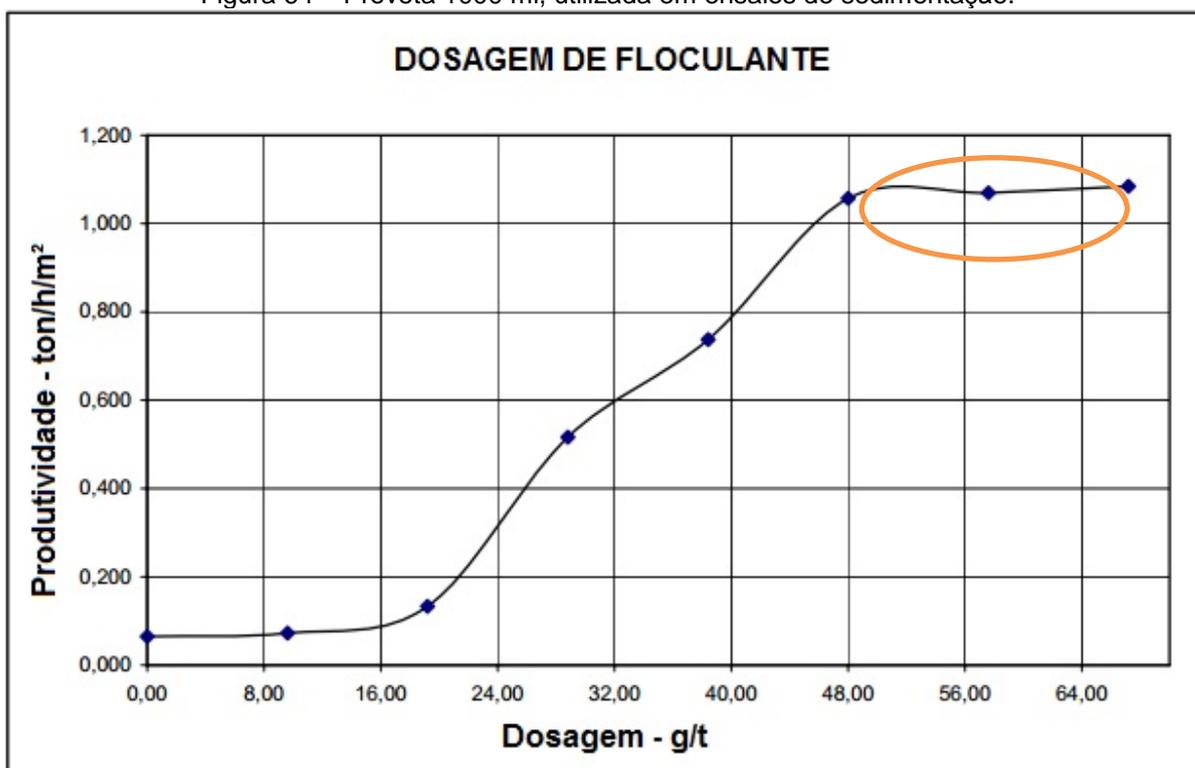
Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

#### 4.2.1.1 Seleção de polímero / floculante

Em estudos efetuados pelo fabricante, os quais não foram apresentados pelo fabricante, ficou definido que o floculante Flonex 9076 seria o mais adequado para os rejeitos a serem processados visto que o mesmo é aplicado industrialmente na planta de tratamento e já estava disponível no local. Sendo assim, o mesmo floculante foi adotado para a condução dos testes em bancada.

Para a determinação da melhor dosagem de floculante foram realizados testes com amostra de rejeito de minério de ferro a uma concentração de 5,00% de sólidos. A figura 64, a seguir, expressa os resultados obtidos para diferentes dosagens do floculante Flonex 9076, em gramas por tonelada.

Figura 64 – Proveta 1000 ml, utilizada em ensaios de sedimentação.



Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

De acordo com a análise do gráfico, o floculante Flonex 9076 apresentou melhor desempenho de sedimentação, a uma dosagem a partir de 48,00 g/t.

#### 4.2.1.2 Resultados obtidos

Foram realizados testes de sedimentação em proveta de 2000 ml, a uma concentração de sólidos em torno de 5,0 % e adição do floculante Flonex 9076 a uma dosagem em torno de 48 g/t

A tabela 19 a seguir mostra os resultados obtidos:

Tabela 19 – Resultados com Amostra 01.

Teste	Sólidos na Alimentação (%)	Dosagem Floculante (g/t)	Sólidos no Underflow (%)	Taxa de Transbordo (m/h)
01	5,00	48,00	38,65	13,40

Fonte: Dorr-Oliver, 2006.

O dimensionamento de um Espessador “*Deep Cone*” envolve vários tipos distintos de testes, sendo os mesmos descritos a seguir com seus respectivos resultados.

- Resultados de Concentração máxima de sólidos obtida

A polpa floculada e adensada é submetida a filtração a vácuo. Essa filtração consiste em formar a torta sob vácuo e interromper antes de iniciar o estágio de secagem. O resultado da concentração de sólidos desse teste, multiplicado por um fator de redução é aproximadamente o limite máximo de concentração de sólidos que a polpa pode atingir no underflow do espessador tipo “*Deep Cone*”. A tabela 20 abaixo demonstra a porcentagem de sólidos encontrada para a amostra de rejeito de minério de ferro proveniente do Overflow da ciclonagem Tripla. Este será a meta para o percentual de sólidos nas etapas seguintes de desenvolvimento.

Tabela 20 – Concentração máxima de Sólidos.

<i>Amostra</i>	<i>Concentração Máxima</i>
Overflow da hidrociclonagem Tripla – Amostra 01	68,00%

Os testes com o equipamento piloto (Figura 65) foram realizados em um período aproximado de 6 a 7 meses com algumas interrupções devido a problemas operacionais na planta. O objetivo do teste piloto é a determinação do tempo de residência e máxima concentração de sólidos no underflow. Os resultados obtidos estão descritos a seguir.

Figura 65 – Planta piloto do espessador “Deep-Cone”, Dorr-Oliver Eimco.



Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

- Determinação do tempo de residência;

Foram realizados testes com diferentes tempos de residência, com o floculante Flonex 9076 a uma dosagem aproximada de 48 g/t. A Tabela 21 expressa os melhores resultados dos testes efetuados:

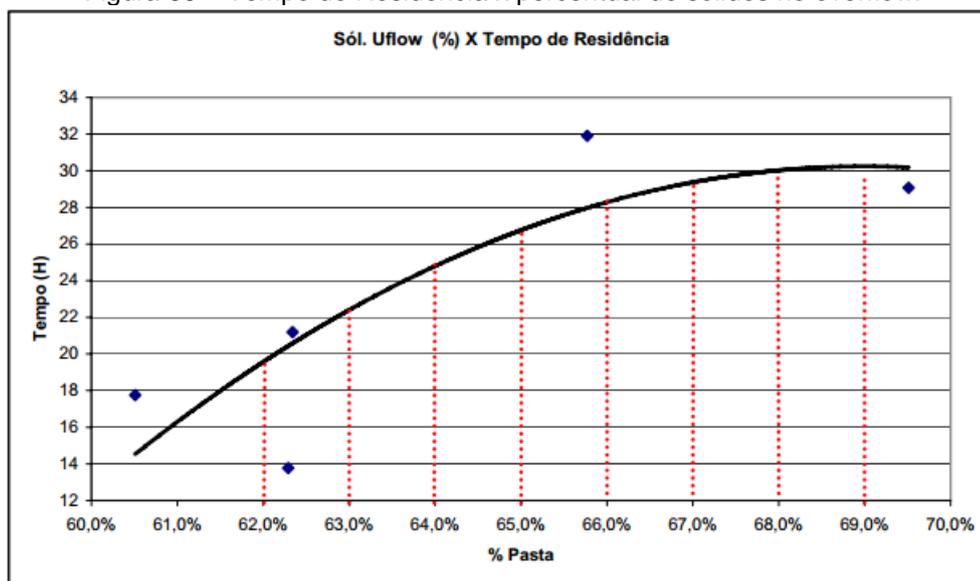
Tabela 21 – Teste piloto com espessador “Deep Cone”.

<i>Data do teste</i>	<i>Tempo de Residência (h)</i>	<i>Sólidos Alimentação (%)</i>	<i>Dosagem de Floculante (g/t)</i>	<i>Sólidos Underflow (%)</i>
30/04/2006	13,78	10,70%	41,62	62,29%
10/05/2006	21,19	8,04%	62,26	62,34%
20/05/2006	31,91	9,31%	48,01	65,77%
09/06/2006	29,07	11,45%	36,81	69,51%
10/06/2006	17,75	9,97%	45,48	60,51%

Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

Pela análise dos dados levantados nos testes, pode-se gerar um gráfico que apresenta os tempos de residência para as diferentes concentrações de pasta obtidas. A Figura 66 mostra o Tempo de Residência (horas) versus a Concentração de Sólidos (%).

Figura 66 – Tempo de Residência x percentual de sólidos no overflow.



Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

Analisando o gráfico, se obtém a tabela 22:

Tabela 22 – Teste piloto com espessador “Deep Cone” em planta piloto.

Tempo de Residência (h)	Sólidos no Underflow (%)
22 a 23	63,00
27 a 28	65,00
30	68,00 a 69,00

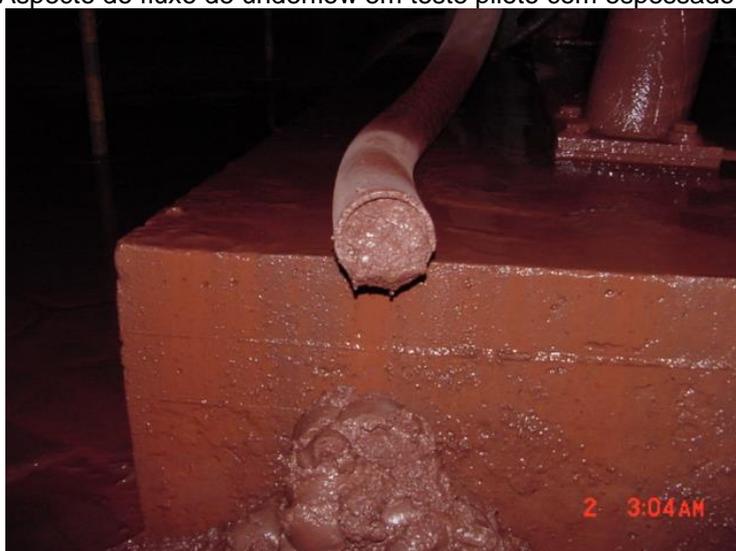
Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

Tabela 23 – Resultados dos testes em planta piloto.

Concentração de Sólidos (%)	Critério de Bolger (Pa)	Critério de Bingham (Pa)
65,77%	315,00	266,80
62,34%	219,00	170,50
60,51%	142,00	112,60
62,29%	107,71	71,66
69,51%	330,00	272,94

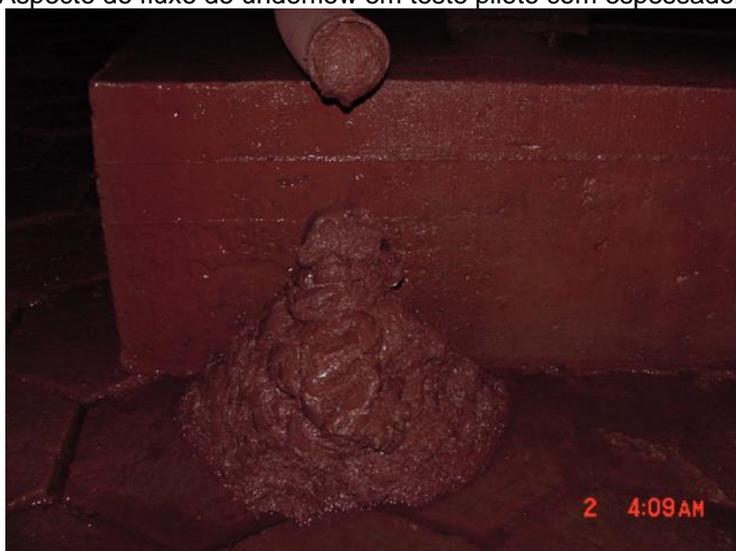
Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

Figura 67 – Aspecto do fluxo de underflow em teste piloto com espessador Deep Cone.



Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

Figura 68 – Aspecto do fluxo de underflow em teste piloto com espessador Deep Cone.



Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

#### - Overflow da deslamagem da moagem

Os testes com a amostra do rejeito da moagem foram realizados somente em escala piloto. Foram efetuados apenas dois testes piloto para a amostra do Overflow da deslamagem da moagem. Os resultados obtidos estão descritos a seguir.

- Determinação do tempo de residência;

Foram realizados dois testes com diferentes tempos de residência, com o floculante Flonex 9076. A Tabela 24 expressa os resultados dos testes efetuados:

Tabela 24 – Teste piloto com espessador “Deep Cone”.

<i>Data do teste</i>	<i>Tempo de Residência (h)</i>	<i>Sólidos Alimentação (%)</i>	<i>Dosagem de Floculante (g/t)</i>	<i>Sólidos Underflow (%)</i>
02/08/2006	13,78	4,98%	114,49	74,86%
03/08/2006	57,87	6,30%	78,20	77,25%

Fonte: Dorr-Oliver Eimco, 2006.

Por se tratarem de apenas dois pontos, não foi possível a geração de um gráfico para obtenção do tempo de residência médio.

Finalmente, os testes para a amostra do Overflow da Hidrociclonagem Tripla foram conclusivos. Os testes para a amostra do Overflow da Moagem não foram conclusivos. Inviabilizando o dimensionamento de uma planta industrial.

## 5 . CONCLUSÃO

Atingir 9,00 % de umidade final em processo de filtração dos rejeitos ricos de minério de ferro gerados em Carajás, contendo alto percentual de partículas ultrafinas (granulometria de 45% até 95 % < 7  $\mu\text{m}$ ) e com elevadíssima área específica (> 6.500 Blaine), mostrou-se possível em rotas de processo aplicando-se corretas tecnologias de desaguamentos estudadas nessa dissertação.

Devido essas características intrínsecas desse material, buscou-se soluções que combinassem sistemas com elevadas pressões para permitir a retirada de parte da água residual contida na polpa e, quando possível, associar a elevadas temperaturas do meio de filtração, melhorando assim a reologia da polpa e permitindo desta forma otimizar o processo durante seu desaguamento.

Os ensaios realizados na fase de laboratório ou bancada mostraram quais equipamentos de fato não possuíam as necessárias condições para reduzir essa umidade aos níveis exigidos nos objetivos específicos do trabalho. Restrições de ordem construtivas ou mesmos operacionais deixaram para trás equipamentos correntemente usados na mineração e assim permitiu no fim da pesquisa concluir que não poderia, ser usados para esse redução de umidade em um material de granulometria tão específica e inerentemente restritiva. Filtros convencionais como os filtros a vácuo ou mesmo os filtros prensa convencionais não tiveram suficiente pressão que reduzisse as níveis desejados de umidade. Outras tecnologias não possuem a níveis industriais equipamentos que suportam tamanha condição operacional, seja devido ao elevado fluxo ou mesmo devido a elevada quantidades de finos.

De forma geral, torna-se claro que a aplicação de equipamentos que combinem pressão e temperatura na filtração, são aqueles que de fato fornecem condições para se obter um minério seco suficientemente que atenda os processos subsequentes de tratamento, manuseio ou mesmo a sua aplicação direta como produto final, permitindo seu aproveitamento com retorno financeiro devido ao seu elevado teor de ferro (> 62%).

Além disso, fluxos elevados como os esperados no sistema Carajás eliminam naturalmente sistemas convencionais ou de reduzida taxa de produção. Esse foi o ponto que deixou claro quais tecnologias seguiriam para a fase piloto.

Dentre as tecnologias avaliadas na fase piloto algumas tecnologias se mostraram aplicáveis, porém não suficientemente robustas para tal fim. Seja pela umidade residual ainda acima do necessário ou pela baixa produtividade exigida nos elevados fluxos apresentados ou até mesmo pelos custos operacionais e de investimento, como exemplos o Bokela o SBD ou mesmo os espessador tipo cone.

Solução alternativa seria mistura previa de outros produtos mais grosseiros que não foram abordados, e que viabilizariam determinados sistemas porém a pesquisa aqui realizada não contemplava esse parâmetro e nem tinha essa flexibilidade, como mostrado nos objetivos da dissertação.

Assim, nessa dissertação o filtro Pneumapress foi o equipamento selecionado por ter a tecnologia mais adequada para o aproveitamento dos rejeitos ultrafinos do minério de ferro da planta de Carajás, pois combina eficientemente dois fatores essenciais ao desaguamento de ultrafinos e comprovados como essenciais nessa dissertação: elevadíssimas pressões e altas temperatura em sua operação de desaguamento. Além disso a automação embarcada e os custos de operação. Dessa forma a produtividade atingida foi da ordem de 50 t/h x m<sup>2</sup> para o Rejeito da Hidrociclonação “Natural” e 40 t/h x m<sup>2</sup> para o Rejeito dos hidrociclones da Moagem.

Esses fatores tornaram a tecnologia atraente a ponto da Vale investir na aquisição de dois módulos de filtragem para a unidade de finos de Carajás. Esse foi o grande ponto dessa dissertação: foi identificada a tecnologia viável sob ponto de vista de aquisição e operação para tais ultrafinos.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se relacionar:

- Possibilidade de utilizar blendagens de produtos com granulometrias mais grosseiras de forma a aproveitar a elevada eficiência do filtro Pneumapress e até mesmo outros equipamentos similares em aplicações convencionais com vantagens de custos operacionais.
- Pesquisa focada na redução do consumo de energia e no elevação da eficiência e produtividade do Pneumapress
- Estudos de viabilidade econômica e financeira para os processos estudados em planta piloto.
- Estudo de variação da eficiência de secagem com SBD, em função da variação e formato da camada de material. Para efeitos sob ponto de vista de manuseio esse tipo de secagem apresenta boas perspectivas, ate mesmo porque já é aplicado em outra minas de ferro no mundo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, T. **Particle Size Measurement**. 3a ed. Chapman and Hall, 1981. Coulson, J.M. and Richardson, J.F.

CARVALHO, W.N. **Considerações Sobre a Usina II da Samarco Mineração S/A**. Pós-Graduação em Beneficiamento Mineral – PGBM. Ouro Preto/Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, 2010. Disponível em: [www.ufop.br/demin/arquivos/beneficiamento\\_mineral/Consideracoes%20sobre%20a%20Usina%20II%20da%20Samarco.pdf](http://www.ufop.br/demin/arquivos/beneficiamento_mineral/Consideracoes%20sobre%20a%20Usina%20II%20da%20Samarco.pdf). Acesso em: 29/12/2013.

CAVALLI, L.F.G. **Estudo do Comportamento Fluidodinâmico do Sinter Feed Carajás**. Vale – Engenharia de Produção Norte (DIFN, GEQAN, GADON). Carajás/PA: Vale, Junho de 2010.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Volume 2: Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. Signus, 2004.

CHAVES, A.P.; et al. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 3 ed. rev. e amp. São Paulo: Signus, 2010. 2 v. 229 p.

DA LUZ, A. B. et al. **Tratamento de Minérios 4ª Edição**. CETEM-CNPq-MCT, 2004.

FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, R.G. **Ensaio de Filtragem em Filtro de Folha (Leaf Test)**. In: Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. p. 411-422.

FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. **Separação Sólido-Líquido**. Capítulo 14. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2004.

GREEN, D. W.; PERRY, R. H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8th edition. United States of America: The MacGraw Hill Companies, 2008. p. 18.1-18.150.

LOH, W.; SANTOS, R.G., MOHAMED, R.S.P. SOMASUNDARAM. (Org.). **Encyclopedia of Colloid and Surface Science**. Nova York: Taylor & Francis, 2007. Massarani G. Massarani. **Fluidodinâmica de Sistemas Particulados**. 2a edição e-papers, Rio de Janeiro, 2002.

OLIVEIRA, M.L.M.; LUZ, J.A.M.; LACERDA, C.M.M. **Espessamento e Filtragem. Departamento de Engenharia de Minas. Ministério da Educação**. Ouro Preto / Minas Gerais: Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: [http://cetm\\_engminas.catalao.ufg.br/uploads/596/original\\_apostila\\_ufop.pdf](http://cetm_engminas.catalao.ufg.br/uploads/596/original_apostila_ufop.pdf). Acesso em: 30/12/2013.

PENA, E.Q.; VIEIRA, C.B.; SILVA, C.A.; SESHADRI, V.; ARAÚJO, F.G. **Caracterização dos Parâmetros de Porosidade de Concentrados de Minérios**

**de Ferro pelo Método de Adsorção de Nitrogênio.** *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, 2008; 4 (4): p. 53-57.

POLONIO, W.L.; GONÇALVES, E.M.; RAZUK, P.C. **Avaliação de Meios Filtrantes Primários em Filtro Contínuo de Tambor Rotativo a Vácuo para Lodo de Caldo de Cana.** *Eng. Agríc.*, 2006; 26 (1): p. 170-180.

REIS, K.M. **Dimensionamento de Espessadores.** Monografia. Minas Gerais: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

RUBIO, J. O. **Mecanismos, técnicas e aplicações da agregação no tratamento mineral e ambiental.** Séries do CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Série Tecnologia Ambiental, ISBN 9788561121730, 69 p., 2011.

RUBIO, J. O. **Tratamento de Minérios: Aspectos ambientais no setor mineiro-metalúrgico.** CETEM. Rio de Janeiro, p. 753-793, 2010.

SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A.; BRAGA, P.F.A. **Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais.** Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia (CETEM-MCT). Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: [http://www.cetem.gov.br/files/docs/livros/2007/Trat.Min.Prat.Laboratoriais%20\(Joao, Silvia%20e%20P.Braga\).pdf](http://www.cetem.gov.br/files/docs/livros/2007/Trat.Min.Prat.Laboratoriais%20(Joao,Silvia%20e%20P.Braga).pdf). Acesso em: 30/12/2013.

TOWNSEND, I. **Automatic Pressure Filtration In Mining And Metallurgy.** *Minerals Engng.*, 2003; 16: p. 165.

VALADÃO, G.E.S. et al. **Introdução ao Tratamento de Minérios.** Minas Gerais: UFMG, 2007. 233p. CD-ROM.

WILLS, B.A.; MUNN, T.J. **Mineral Processing Technology.** 7th edition. 2006. 444p.