

MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS *

*Nilton Carlos Torquato¹
Washington Pirete da Silva²
Marco Túlio Santiago Ferreira³*

Resumo

Em 2005, com a significativa redução do teor de ferro nas reservas do Quadrilátero Ferrífero, a Vale iniciou o estudo de alternativas para o descarte dos rejeitos em outras estruturas, que não são barragens de rejeitos. Em 2011, após testes em escala de bancada e piloto, foi definido pela implementação do projeto "Métodos alternativos para disposição de rejeitos", incluindo a construção de pilhas de drenagem experimental para obter parâmetros do processo mineral e geotécnicos para aplicação em projetos futuros. O resultado deste estudo mostra que é tecnicamente possível substituir o descarte tradicional de rejeitos (barragens), para o empilhamento a seco, até a proporção de 20% de rejeitos ultrafinos na composição total de rejeitos, no entanto, esse estudo está em evolução e a escala do projeto / pilha está sendo aumentada gradativamente de forma a garantir uma boa performance para o processo.

Palavras-chave: Filtragem de rejeitos; Disposição de rejeitos; Empilhamento a seco.

ALTERNATIVE TAILINGS DISPOSAL METHODS

Abstract

In 2005, with the significant reduction of iron content in the "Quadrilátero Ferrífero" reserves, Vale began the study of alternatives for the tailings disposal in other structures, that are not tailings dams. In 2011, after bench-scale and pilot-scale tests, it was defined to implement the project "Alternative methods for tailings disposal", including the construction of experimental drainage piles to get mineral and geotechnical process parameters for future projects. The result of this study shows that it is technically possible to replace traditional tailings disposal (dams), to dry stacking, with the proportion up to 20% of ultrafine tailings in the total tailings composition, however, this study is in evolution and the scale of the project / pile is being gradually increased to guarantee a good performance for the mineral and geotechnical process.

Keywords: Tailings Filtering; Tailings Disposal; Dry stacking.

¹ Mestre em tratamento de minério, especialista em processo mineral, empresa Vale, Belo Horizonte, MG – Brasil.

² Eng. Civil, mestre em geotecnia, engenheiro especialista, empresa Vale, Belo Horizonte, MG – Brasil

³ Eng. de Minas, gerente de desenvolvimento de processo, empresa Vale, Belo Horizonte, MG – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de disposição de rejeitos, gerado nas instalações de beneficiamento de minério de ferro, em outras estruturas que não sejam barragens de rejeitos, legitimam esse projeto “Métodos alternativos para disposição de rejeitos”, cujas metas são:

- Manutenção das operações com qualidade dos produtos;
- Eliminação ou redução de barragens de rejeito;
- Necessidade de menor outorga com maior recuperação de água;
- Maior facilidade para obtenção de licença ambiental; e
- Maior rapidez na recuperação de área impactada.

Em função de suas características os rejeitos são classificados em dois tipos:

- Rejeito arenoso, com aproximadamente 90% de partículas acima de 10 μm e de fácil permeabilidade. Na maior parte das instalações esse rejeito é gerado na operação unitária de concentração por flotação, mas também pode ser obtido em outros processos de concentração, como exemplo concentração magnética; e
- Rejeito ultrafino, normalmente com 60% ou mais de partículas abaixo de 10 μm e com maior dificuldade de permeabilidade. Esse rejeito é gerado na operação unitária de deslamagem, que prepara a polpa para a etapa de concentração por flotação.

Os rejeitos arenosos podem ser desaguados em peneiras ou filtros. Devido aos grandes volumes de rejeitos gerados e à baixa capacidade das peneiras, a alternativa mais viável é o desaguamento em filtros.

Os rejeitos ultrafinos podem ser desaguados em espessadores de pasta ou filtros. O ultrafino em forma de pasta é um material que não flui como polpa, tem alta viscosidade e não segrega mais água, ou seja, apenas perde água por evaporação. Com o objetivo de reduzir a área impactada com a disposição de rejeitos, através de desaguamento e disposição em pilha, ao invés da disposição hidráulica, realizada atualmente em barragens, esse projeto tem como desafio:

- Demonstrar a viabilidade construtiva e a estabilidade de estruturas para disposição de rejeitos através de métodos alternativos;
- Estudar a viabilidade de trabalhar os rejeitos depositados com equipamentos mecânicos (caminhões e tratores), nas metodologias escolhidas;
- Determinar qual é o manejo requerido; e
- Testar em escala industrial, de pequeno porte, a filtração de rejeito arenoso, rejeito ultrafino e a mistura de ambos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1) Separação de sólido líquido – Estudo em escala de bancada e piloto

Para definição dos equipamentos, a serem aplicados no projeto, foi levado em consideração a análise prévia, realizada em escala de bancada, considerando as tecnologias disponíveis, conforme representado na tabela 1. Nesta fase foi considerado os estudos apresentados na dissertação de mestrado [Guimarães, N.C. - Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas].

Tabela 1 - Tecnologias aplicadas para separação de sólido/líquido com rejeito de minérios de ferro.

Equipamento	Disco Convencional	Horizontal de Correia	Prensa Horizontal	Prensa Vertical (*)	Hiperbárico	Disco Cerâmico	Espessador de Pasta
Foto							
Rejeito Grosso	x	x	x	x	x	x	
Rejeito Ultrafino			x	x		x	x
Rejeito Total Grosso + Ultrafino			x	x	x	x	

* Filtro prensa vertical com injeção de calor

De acordo com o resultado, em escala de bancada, apresentado na tabela 1, podia-se afirmar que:

- Rejeito arenoso: Todas as tecnologias de filtragem poderiam ser aplicadas;
- Rejeito ultrafino: Filtro prensa, hiperbárico e cerâmica poderiam ser aplicados, com ou sem espessador. O uso do espessador reduz *Capex* e *Opex*; e
- Rejeito total (arenoso + ultrafino): Filtro prensa, hiperbárico e cerâmica poderiam ser aplicados.

As informações apresentadas, na figura 1, são referentes a estudos em escala de bancada e influenciaram na tomada de decisão para escolha dos aplicados neste projeto.

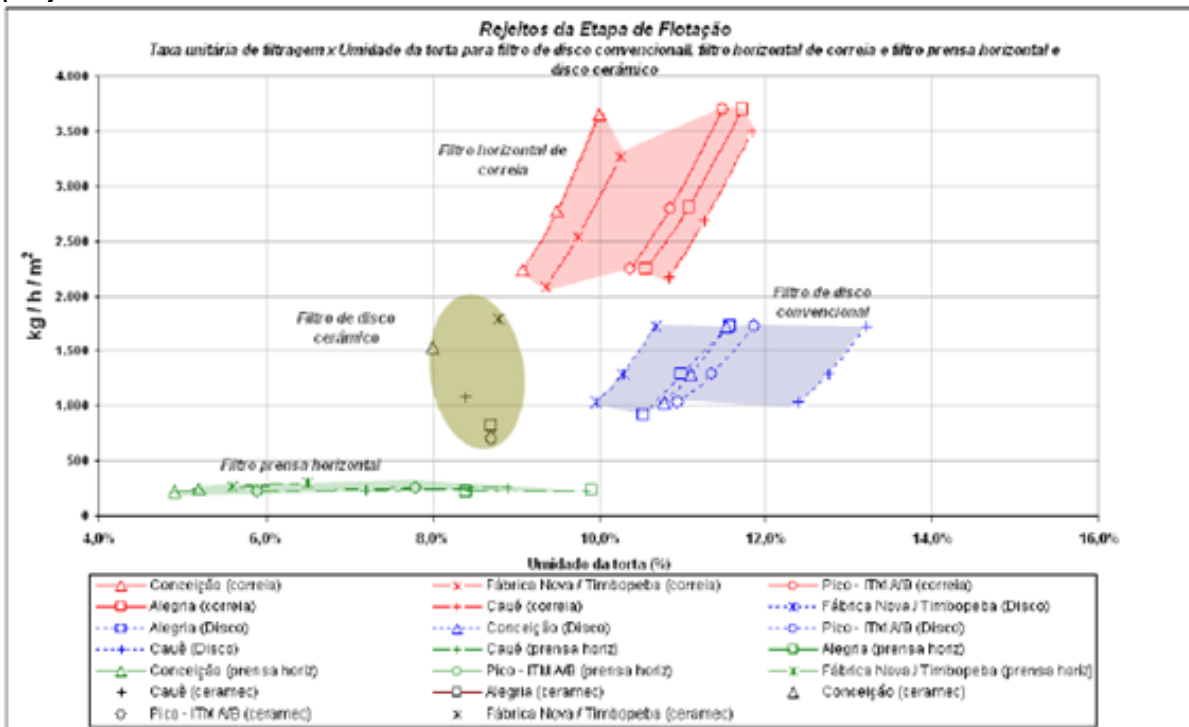


Figura 1. Produtividade X Umidade – Rejeito Arenoso

Na figura 2, está apresentado o espessador piloto ($\varnothing = 1\text{m}$ e altura = 4,8m), utilizado para teste de pasta, em 2011, com ultrafinos gerado na unidade industrial de Cauê, em Itabira/MG. Com o tempo a pasta perde umidade e adquire resistência, diante do

bom resultado, em escala piloto, a ideia de instalar um espessador industrial de pequeno porte, para confirmar ou obter resultados mais concretos, tornou-se essencial.

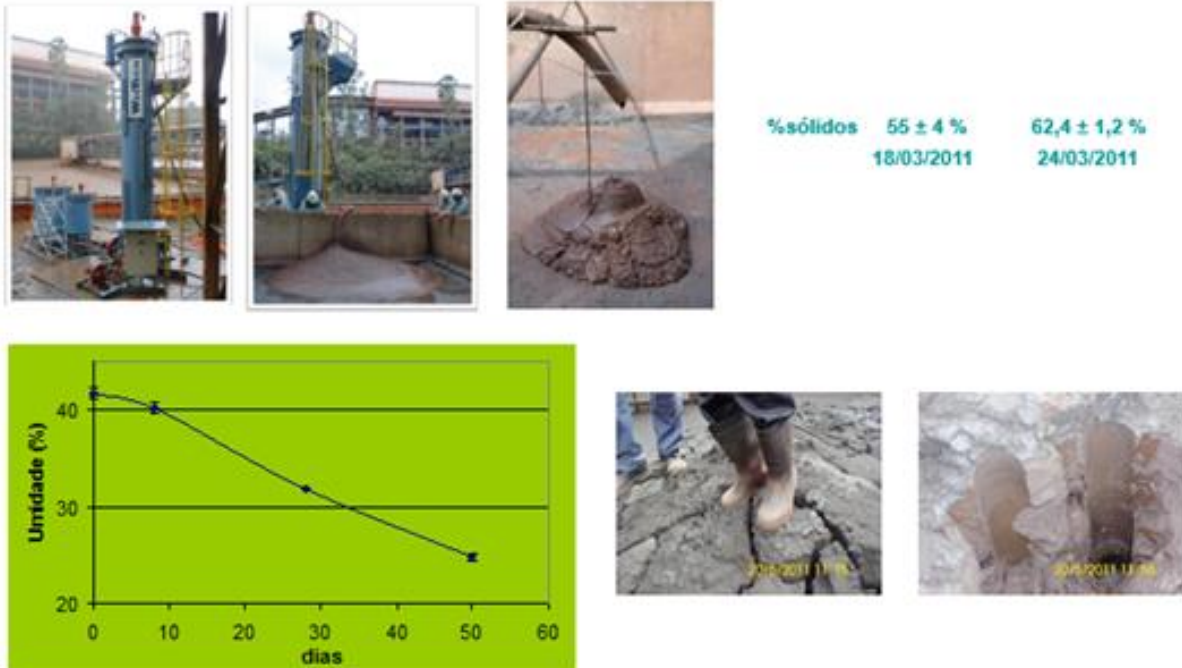


Figura 2. Imagem e resultado de umidade do rejeito ultrafino da mina do Cauê

2.2) Separação de sólido líquido – Estudo em escala industrial

2.2.1) Premissas para dimensionamento dos equipamentos e pilhas

Essas precisas foram definidas em 2011, pela equipe Vale (Washington Pirete, Marconi Silva, Carlos Gontijo e Nilton Torquato), levando em considerações os seguintes itens:

- ✓ Todo estudo deverá ser desenvolvido com rejeitos (arenoso e ultrafino) gerado na instalação de tratamento de minério I – ITMI, da mina do Pico, devido os seguintes pontos:
 - A qualidade do rejeito arenoso e ultrafino, gerado na ITMI é compatível com a qualidade dos rejeitos arenosos e ultrafinos dos projetos vindouros; e
 - A pilha de estéril Cianita atuará como guardiã do projeto, ou seja, se alguma pilha de teste entrar em colapso o impacto ambiental será nulo.
- ✓ As pilhas deverão representar a operação industrial e a construção deverá obedecer a variação cotidiana (dia / noite, chuva / sol), ou seja, o regime operacional deverá ser de 24h/dia. A operação do espessador de pasta também deve ser contínua, 24h/dia, pois, leva tempo para atingir a concentração de sólidos ideal, no *underflow*.
- ✓ Os equipamentos para processamento do rejeito ultrafino deverão ser alocados na pilha de estéril Cianita, pois, após a obtenção da pasta não é recomendado o manejo a grande distância. Transporte de pasta a grande

distância pode provocar a liquefação, ou seja, o fluido passa a ser não newtoniano.

- ✓ Os equipamentos para processamento do rejeito arenoso deverão ser alocados fora da pilha de estéril Cianita, pois, todas as instalações alocadas em Cianita deverão ser desmobilizadas até 2018 e a área ocupada devolvida para a mina.

Notas:

- A dimensão da pilha experimental de drenagem, 160m de comprimento por 40m de largura e sua construção por camadas, com altura oscilando de 600mm a 4.000mm, foi dimensionada considerando a experiência dos geotécnicos.
- A alimentação elétrica dos equipamentos deverá ser limitada em 440v, ou seja, os equipamentos cuja potência for superior a 150cv deverá ser previsto inversor de frequência para possibilitar sua manutenção de alimentação em 440v.
- Como as instalações são temporárias, não deverá ser previsto tapamento e cobertura nos prédios.
- Para o filtro de disco a vácuo deverá ser previsto aplicação de uma bomba de polpa em substituição a perna barométrica. Essa alteração no *lay out* possibilita a redução da estrutura predial “redução de *capex*” e eleva a mobilidade do prédio.

2.2.2) Instalações industriais de teste

Após definição pela mina do Pico, dimensionamento, especificação e aquisição dos equipamentos foi concebido as instalações industriais. Nas figuras 3 e 4 estão apresentadas à vista dos os principais prédios.

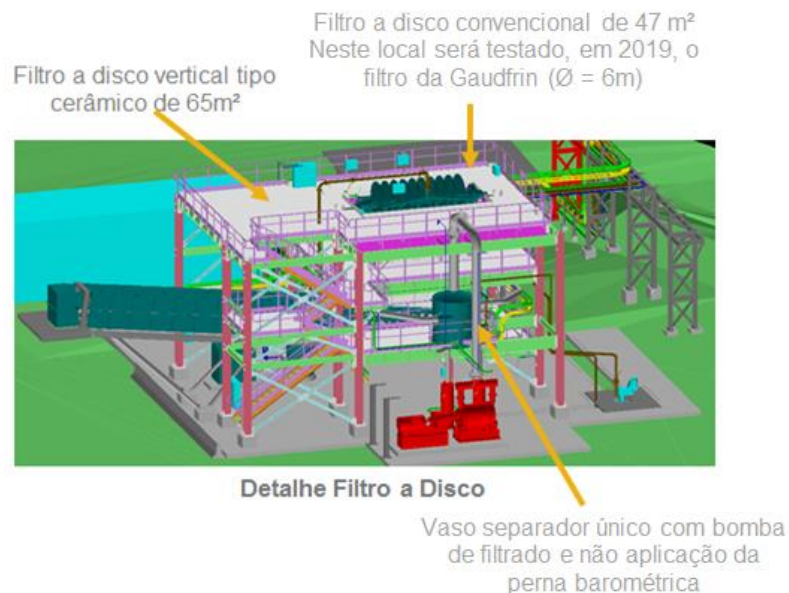


Figura 3. Prédio dos filtros a disco verticais (convencional e cerâmico)

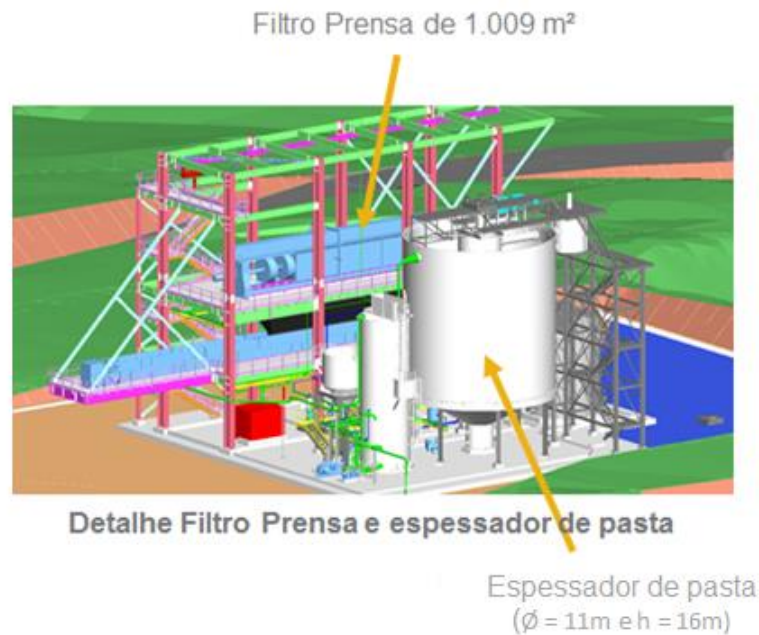


Figura 4. Prédio do espessador de pasta e filtro prensa

2.2.3) Características dos rejeitos estudados

Para entender como são gerados os rejeitos arenosos e os rejeitos ultrafinos será apresentado uma sequência das principais fases do processo, desde a extração do minério até obtenção do concentrado e dos rejeitos, considerando:

- Extração do minério / ROM;
- Cominuição e classificação do minério a ser beneficiado;
- Deslamagem do minério a ser concentrado. Nesta etapa gera-se o **Rejeito Ultrafino**, material abaixo de 10 μm , indesejável no processo de concentração, por flotação, pois, inibe a atuação do coletor sobre as partículas do rejeito;
- Concentração do minério, ou seja, separação unitária onde obtém-se a geração da porção útil (*pellet feed*) e da porção inútil (**Rejeito Arenoso**); e
- Separação do sólido líquido do concentrado e rejeitos.

A figura 5 apresenta uma frente de lavra de um itabirito compacto com aproximadamente 40% de Fe.



Figura 5. Frente de lavra de um itabirito compacto

Após detonação, o minério abaixo de 1.500mm é transportado para alimentar um circuito de beneficiamento. A figura 6 mostra um fluxograma típico de processo, incluindo as principais operações unitárias e a figura 7 apresenta um diagrama esquemático dos rejeitos gerados.

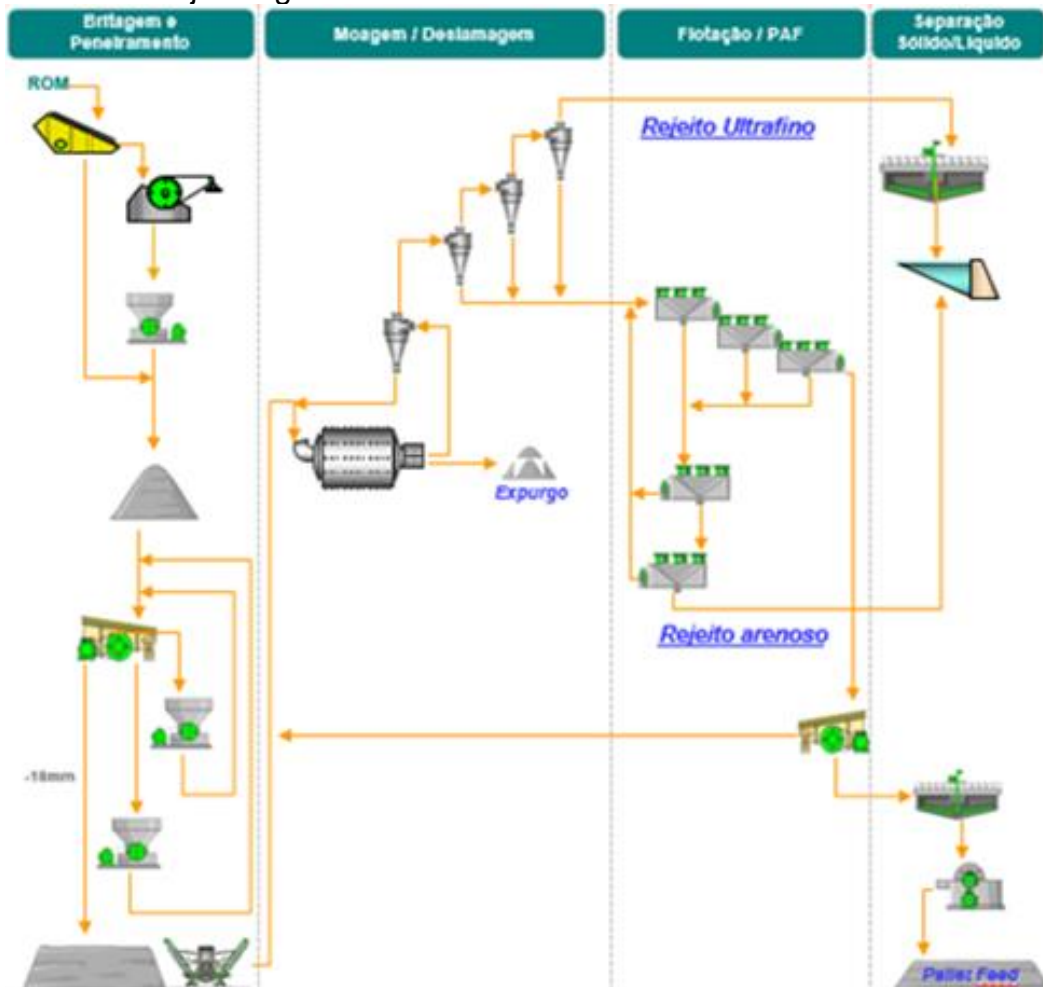


Figura 6. Fluxograma típico do processo destacando a geração dos rejeitos



Figura 7. Imagem dos rejeitos

Na tabela 2 está destacado a qualidade química do rejeito arenoso e do rejeito ultrafino, processado durante o período de teste (março/2016 a março de 2018).

Tabela 2 - Qualidade dos rejeitos processados

Amostra	Análise Química (%)										Superfície Específica	Densidade Real Sólidos (g/cm ³)
	Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	Mn	TiO ₂	CaO	MgO	PPC	F. Q.	Blaine (cm ² /g)	
Rej. Arenoso	19,36	70,51	0,023	0,61	0,015	0,032	0,014	0,026	1,16	99,44	878	3,07
Rej. Ultrafino	48,90	16,26	0,126	5,39	0,177	0,276	0,019	0,119	7,39	99,94	6.406	3,82

Nota: O teor de ferro, do rejeito arenoso mostra um valor acima do previsto / esperado para os projetos futuros, sendo que durante o período de teste foi registrado valores entre 11% a 25%, mas essa variação não penalizou o desempenho das pilhas experimentais de drenagem.

No gráfico 5 está representado a variação granulométrica no período testado. A necessidade de testes nestas proporções visa representar ao máximo as operações Vale, onde a proporção de rejeito ultrafino pode oscilar de 10% para minérios silicosos a 30% para minérios hidratados.

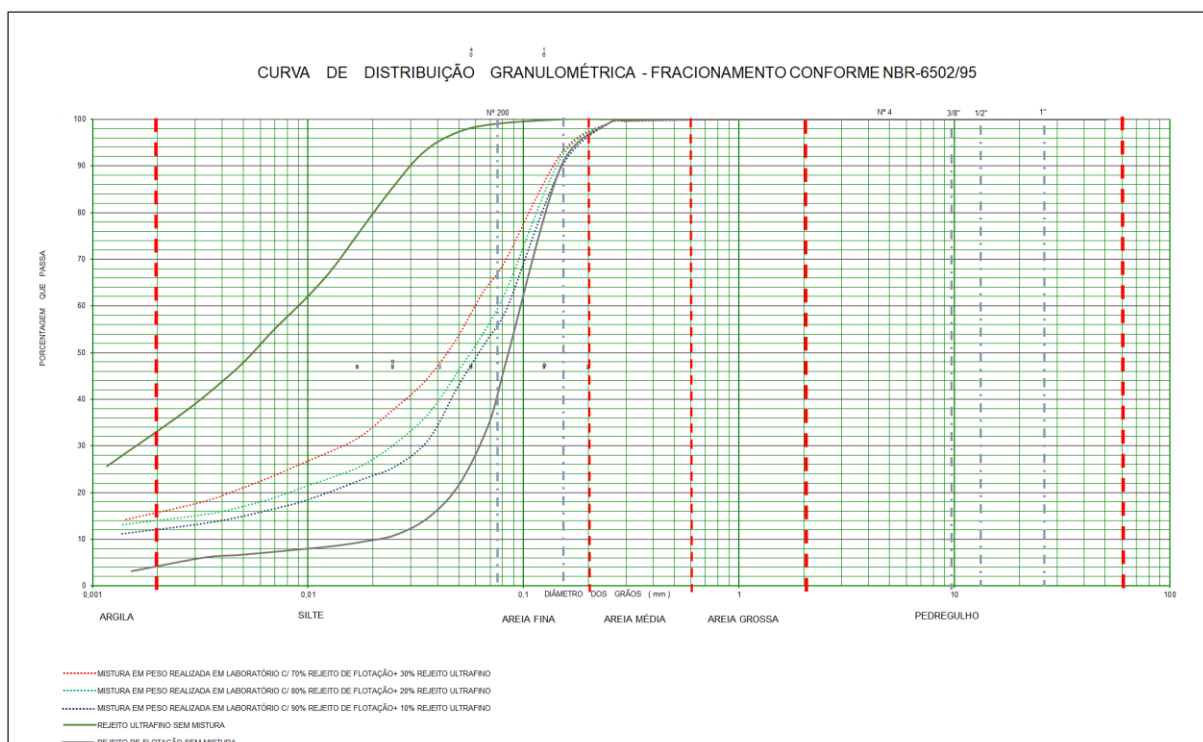


Figura 8. Granulometria dos rejeitos processados

2.2.4) Resultado dos testes industriais

Na tabela 3, está sintetizado o resultado dos principais equipamentos de processo testados e a testar.

Tabela 3 - Resultado dos testes – equipamentos de processo

Resumo das principais equipamentos					
Equipamento	Dimensões	Aplicação	Pontos negativos	Pontos positivos	Resultado
Espessador de rejeito	Ø= 8,2	Rejeito arenoso	Elevada turbidez no OF	- Redução no fator de espuma da polpa. - Elevação na conc. de sólidos no UF até 65%.	Aprovado Capacidade = 110 t/h. Área unitária = 0,020 m²/t/dia
Filtro a disco vertical	47m²	Rejeito arenoso	Pequeno orifício no tecido resulta desgaste acentuado na parte interna dos tubos.	- Não há embasamento no tecido. - Vida útil mín. do tecido = 2100h (local não abrigado).	Aprovado Capacidade = 117 t/h. TUF = 2,49 t/h/m²
		Rejeito total (arenoso + ultrafinos)	Queda na capacidade, quando comparado com rejeito arenoso	- Não há embasamento no tecido.	Aprovado 90/10 => TUF = 2,27 t/h/m³ 80/20 => TUF = 1,53 t/h/m³ 70/30 => TUF = 1,38 t/h/m³
Filtro cerâmico	65 m²	Rejeito total (arenoso + ultrafinos)	- Altamente sensível a presença de ultrafinos; e - Capex alto devido a baixa cap. e valor do equipamento.	- Filtrado isento de sólidos; - Menor consumo de energia (motor da BV de 350 p/ 7,5cv); e - Menor umidade (queda de + ou - 5%).	Aprovado 90/10 => TUF = 1,02 t/h/m³ 80/20 => TUF 0,88 t/h/m³ 70/30 => TUF = 0,44 t/h/m³
Espessador de pasta	Ø=11 h=16	Rejeito ultrafino	Não atingiu a cap. de projeto (47 t/h). Cap. registrada = 28 t/h	Elevação na concentração de sólidos da lama.	Aprovado Dp no UF = 1,75 a 1,85 t/m³ Au =0,141 m²/t/dia
Filtro prensa	1009 m²	Rejeito ultrafino	- Sistema de alimentação subdimensionado => ciclo de filtragem > 90' (projeto = 52'). - Sistema de deslocamento das placas subdimensionado. Equip. não ajustado para material coeso, com peso específico (4 t/m³).	Com retirada de gargalos é possível aplicação contínua para lama de minério de ferro, chegando a 120 kg/h/m² e com umidade < 19%.	Aprovado Taxa atingida = 60 kg/h/m² Taxa possível (após retirada de gargalos) = 120 t/h/m²
Filtro Gaudfrin - HSVDF	Ø= 6m e 45m²	Rejeito total (arenoso + ultrafino)	SAT - Sem ônus (2º semestre 2019). No entanto é de responsabilidade da Vale os custos com engenharia, montagem, desmontagem e transporte do equipamento.		

Nota: Em função do bom desempenho do filtro de disco a vácuo deverá ser executado, no segundo semestre de 2019, um teste com o filtro de maior diâmetro (6m), fornecido pela Gaudfrin. Esse filtro é aplicado no tratamento de não ferrosos, material com menor densidade dos sólidos, abaixo de 2 t/m³, sendo sua operação similar ao filtro convencional, portanto, neste caso o único o objetivo é redução de Capex.

2.2.5) Resultado das pilhas / estruturas testadas

Na tabela 4 está apresentado um resumo das pilhas experimentais testadas, destacando as estruturas consideradas viáveis ou não.

Tabela 4 - Resultado das pilhas

% Rejeito Arenoso	% Rejeito Ultrafino	Método de desaguamento			Condição operacional	Viabilidade geotécnica	Impacto no Capex (*)	Impacto no Opex (*)	Observação
		Rej. Arenoso	Rej. Ultrafino	Rejeito Total					
100	0	Disco convenc.	-	-	Excelente	Viável	-	-	Quando comparado ao empilhamento drenado, esta alternativa maximiza o volume depositado / m³.
90	10	-	-	Disco convenc.	Excelente	Viável	-	-	Melhor alternativa
80	20	-	-	Disco convenc.	Excelente	Viável	+ 2%	+ 0,6 US\$/t	Boa alternativa
70	30	-	-	Disco convenc.	Razoável	Viável	+ 2%	+ 0,6 US\$/t	Necessita de repouso de 4 a 5 dias para operacionalizar o trânsito de caminhões.
70	30	Disco convenc.	Filtro prensa	-	Excelente	Viável	+ 10%	+ 0,73 US\$/t	Instalações de filtro prensa não móveis.
0	100	-	Filtro prensa	-	Inviável	Inviável	-	-	-
0	100	-	Esp. pasta	-	Boa	Inviável	-	-	Licenciamento como barragens.
80	20	Disco convenc.	Esp. pasta	-	Inviável	Inviável	-	-	-
90	10	Disco convenc.	Esp. pasta	-	Inviável	Inviável	-	-	-

(*) Considerado um projeto hipotético de produção de pellet feed com 40% de teor de Fe na alimentação e distância de transporte do rejeito filtrado de 750 m.

2.2.6) Discussão dos resultados

2.2.6.1) Referente aos principais equipamentos testados

- Espessador convencional: funcionou bem para o rejeito arenoso, mas para reduzir consumo de insumos e evitar problemas com água recirculada, sempre que possível, é aconselhável repassar seu *overflow* no espessador de lamas;
- Filtro de disco vertical a vácuo: funcionou bem para o rejeito arenoso e para a mistura (rejeito arenoso e ultrafino), desde que seja utilizado coagulante precedido de floculante, conforme apresentado na tabela 5. Os tubos internos até o tanque receptor de filtrado devem ser revestidos contra desgaste. A aplicação da bomba no lugar da perna barométrica permite reduzir a elevação do filtro e conseqüentemente a estrutura predial;
- Filtro de disco vertical cerâmico: funcionou, mas mostrou ser muito sensível a presença de lama, com redução significativa da produção, quando comparado com o filtro convencional. Para a proporção 70/30 (rejeito arenoso / rejeito ultrafino) a TUF do cerâmico = 0,44t/h/m² e filtro convencional = 1,38t/h/m²;
- Espessador de pasta: foi possível chegar na densidade de pasta, com densidade de polpa acima de 1,75t/m³ ou 57,14% de sólidos em peso, mas o equipamento apresentou uma capacidade máxima de 28 t/h ou área unitária = 0,141 m²/t/dia, sendo a capacidade de projeto = 47t/h; e
- Filtro prensa: funcionou, mas o equipamento apresentou capacidade = 60kg/h/m² e mostrou estar subdimensionado no sistema de alimentação e deslocamento das placas. Para operação futura deve-se optar por filtro com diafragma (menor tempo de ciclo) e sistema de deslocamento mais robusto (rejeito ultrafino é muito coeso). Com acerto no filtro é possível elevar a capacidade para 120kg/h/m² e garantir uma umidade (mineira) abaixo de 20%.

Tabela 5. Resumo dos testes com o filtro de disco a vácuo vertical

Proporção		TUF (t/h/m ²) Base úmida	Umidade Mineira (%)		Viabilidade Operacional
Rej. Arenoso	Rej. Ultrafino		No filtro	Crítica na pilha	
100	-	2,49	13	17,8	Alta
90	10	2,27	14,4	16,0	Alta ⁽¹⁾
80	20	1,53	14,5	14,9	Moderada ⁽²⁾
70	30	1,38	15,3	13,1	Possível ⁽³⁾

Notas:

1) Sem ocorrências de umidades próxima da crítica.

2) Boa performance, porém, em alguns momentos pode haver necessidade de repouso, um dia, para redução de umidade / trabalhabilidade na pilha.

3) Boa performance somente após 5 dias de repouso, para redução de umidade / garantia de trabalhabilidade na pilha.

Após execução dos testes, com os equipamentos em escala industrial, foi necessário revisar a tabela 1 “Tecnologias aplicadas para rejeitos de minério de ferro”, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 - Revisão da tabela 1 - Tecnologias aplicadas para rejeitos de minérios de ferro

Equipamento	Disco Convencional	Horizontal de Correia	Prensa Horizontal	Prensa Vertical (*)	Hiperbárico	Disco Cerâmico	Espessador de Pasta
Foto							
Rejeito Grosso	x	x	x		x	x	
Rejeito Ultrafino			x	x			x
Rejeito Total Grosso + Ultrafino	x	x	x	x	x	x	

* Filtro prensa vertical com injeção de calor

Pontos divergentes da condição original:

- Não é recomendado tentar filtrar apenas rejeito arenoso em filtro prensa horizontal, pois, além de maior investimento o desgaste, no sistema de alimentação, será acentuado;
- Apenas rejeito ultrafino, no filtro cerâmico, resulta cegamento das placas;
- É possível aplicar o filtro convencional e cerâmico para o rejeito total (arenoso + ultrafino), desde que seja precedido de uso do coagulante e floculante; e
- Apesar de não testado, a nota anterior, referente ao filtro a disco convencional, válida também o filtro de correia, mas, neste caso, deve-se tomar muito cuidado com a concentração de sólidos na alimentação, quanto menor pior a operação e obviamente maior a umidade do não filtrado.

2.2.6.1) Referente as pilhas experimentais

- Pasta de rejeito ultrafino => não recomendado. Necessita de rejeito arenoso para conter a pasta em células, inclinação da pasta = 3º e, com ocorrência de descontrole operacional, pode aparecer água livre, ou seja, o dimensionamento da estrutura acaba sendo similar a barragem;

- Rejeito ultrafino filtrado => não recomendado. A parte superior da pilha perde umidade e atua como uma cerâmica, impedindo a liberação de água na parte inferior, mesmo depois de 20 dias de sol constante, ou seja, serve apenas para ser armazenado em forma de confinamento;
- Rejeito arenoso filtrado => aprovado, deve-se prever um sistema de combate para o arraste eólico;
- Rejeito arenoso misturado com rejeito ultrafino (filtragens independentes) => aprovado, mas o acompanhamento da mistura deve ser bem criterioso, pois, o rejeito ultrafino forma torrões tornando a mistura heterogênea. A pilha comportou como a do rejeito arenoso com pouco arraste eólico;
- Rejeito arenoso misturado com pasta de rejeito ultrafino => não recomendado. Trabalhabilidade difícil e com pouco controle na homogeneização da mistura.
- Rejeito arenoso misturado com rejeito ultrafino (filtrados juntos) => aprovado para proporções abaixo 80/20. Para proporção de 80/20 a umidade mineira gerada no filtro x a umidade crítica na pilha (presença de borrachudo) é bem próxima (14,5% para 14,9%) e para proporção de 70/30 a umidade mineira gerada no filtro x a umidade crítica na pilha (presença de borrachudo) inverte (15,3% para 13,1%), ou seja, torna-se necessário um tempo, entre 4 a 5 dias, para garantir redução de umidade.

3 CONCLUSÃO

O resultado desse estudo, obtido nas pilhas experimentais, de pequeno porte, mostra ser possível tecnicamente substituir a disposição de rejeitos em barragens por pilhas, até a proporção de 20% de rejeito ultrafino na composição do rejeito total, no entanto, esse estudo está em evolução e gradativamente está sendo crescido a escala do projeto / pilha de forma a garantir uma boa performance para o processo mineral e geotécnico, o que é de fundamental importância para a manutenção da exploração mineral no quadrilátero ferrífero. Para proporções maiores que 20% de rejeito ultrafino pode-se fazer necessário a aplicação do filtro prensa, a disposição em barragens ou estruturas similares.

REFERÊNCIAS

- 1 Guimarães, N.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas. Dissertação de mestrado – UFMG – 2011.
- 2 VALE – Cauê - Estudo com espessador de pasta piloto 2011.
- 3 VALE – CPT - Estudos em escala de laboratório 2016/2017.
- 4 VALE - RT N0477- Métodos Alternativos para Disposição de Rejeitos - Rev. 01 - 2018.
- 5 VALE - ZBB5009-RL-412-002-06 - Relatório executivo – Aterros Experimentais - Rev. A – 2018.