

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS DE PROCESSOS PARA RECUPERAÇÃO DE ÁGUA EM PLANTAS DE MINÉRIO DE FERRO¹

Luís Fernando Batista da Silva²
Mark Crozier³

Resumo

Plantas tradicionais de beneficiamento de minério de ferro usam peneiras de lavagem e jigagem em seus processos, o que acaba requerendo grandes volumes de água. No entanto, quando um grande depósito de minério de ferro é encontrado em um local onde a precipitação é irregular, fontes de água bruta são limitadas ou os custos para sua aquisição são muito altos, projetos de processos inovadores são necessários para minimizar as perdas de água, maximizar a reutilização de água de processo e minimizar o consumo de água bruta para garantir a viabilidade do projeto. Este estudo de caso fornece uma visão geral da instalação de Khumani para a barragem de disposição de Pasta (Khumani Paste Disposal Facility (PDF)), localizada no Cabo do Norte da África do Sul, enfatizando as inovações tecnológicas implementadas para superar os desafios naturais impostos pela localização e clima onde a planta se encontra. A planta usa um anel central de circuito principal de recirculação de água combinado com um sistema de espessamento em dois estágios para maximizar a recuperação de água. Na planta de processo, existem dois grandes espessadores de tração periférica de 90m de diâmetro e dois espessadores de pasta de 18 m de diâmetro na barragem de deposição de pasta (PDF). O uso de água bruta nova foi minimizado, e as perdas de água na barragem (PDF) estão em níveis entre 0,43 m³/t a 0,69 m³/t depositados.

Palavras-chave: Água, recuperação; Barragem; Disposição de rejeitos.

TECHNOLOGICAL INNOVATIONS PROCESS FOR WATER RECOVERY IN IRON ORE PLANTS

Abstract

Traditional iron ore beneficiation plants using washing screening and jigging processes require large volumes of process water. However, when a large deposit of iron ore is found in a location where rainfall is irregular, sources of raw water are limited or the costs of acquisition are very high, innovative processes designs are needed to minimize losses water, maximizing the reuse of process water and minimize the consumption of raw water to ensure the viability of the project. This case study provides an overview of the Khumani paste disposal facility (PDF) located in the Northern Cape of South Africa, emphasizing the technological innovations implemented to overcome the natural challenges imposed the climate and location where the plant is located. The plant uses a central ring main circuit of water recirculation combined with a system of two thickening stages to maximize recovery of water. In the process plant, there are two major peripheral traction thickeners of 90m diameter and two 18m diameter paste thickeners in the dam. The use of new raw water was minimized, and the loss of water in the dam (PDF) are at levels between 0.43 to 0.69 m³/t deposited.

Key words: Water recovering; Dam; Tailings disposal.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Químico, Engenheiro de Processos, Westech Equipamentos Industriais, São Paulo, Brasil.

³ Chemical Engineer, Managing Director, WesTech Process Equipment Africa Pty Ltd., Johannesburg, South Africa.

1 INTRODUÇÃO

A Mina de Ferro Khumani está situada no norte da província do Cabo da África do Sul, ao lado da mina de Kumba Sishen e aproximadamente de 30 km de Kathu.

Antigamente conhecido como Projeto BKM (Bruce, King e Mokaning), onde os depósitos de minério de ferro estão localizados.

A mina faz parte do grupo Assmang Ltd, que é de propriedade conjunta da African Rainbow Minerals e Assore Ltd.

A primeira fase da Mina de Khumani foi comissionada em 2008, com uma produção inicial de 8,4 milhões de toneladas por ano de minério de ferro. A segunda fase foi implementada em 2012, com aumento da produção para 16 milhões de toneladas por ano, aumentando o tempo de vida da mina em 25 anos, pelo menos.

A região possui clima semiárido, com histórico de chuvas de aproximadamente 330 milímetros por ano, ocorrendo principalmente entre outubro e abril. As taxas de evaporação são elevadas, com valores reportados por volta de 1.900 milímetros por ano. A área possui um grande número de mineradoras e as alocações de água bruta do Departamento de Recursos Hídricos são limitadas e cuidadosamente geridas.

Isto se tornou um grande desafio, envolvendo um fluxograma de processo para processamento por via úmida, devido, principalmente, ao elevado teor de argila relacionado com os corpos de minério em Khumani.

Este artigo apresenta uma visão geral das operações da Mina de Khumani, com foco na gestão da água recuperada através de um processo de deposição em dois estágios de espessamento, minimizando o consumo de água bruta para níveis abaixo de 0,09 m³/t de minério de ferro.

1.1 Khumani: Critérios de Projeto e Processo

A opção de processamento adotada foi a britagem primária e secundária, seguida de lavagem por peneiramento e jigagem. Para a recuperação dos finos, adotou-se o uso de deslamagem por ciclones.

Cada uma dessas operações unitárias envolve o consumo de água em larga escala.

Os primeiros estudos teóricos embasaram-se em experiências anteriores envolvendo espessadores de grande porte (90 m de diâmetro) em Assmang Beeshoek, a cerca de 60 km das instalações da Khumani e o uso de tecnologia de espessamento de pasta implementada com sucesso cerca de 250 km de distância em De Beers, em uma planta de diamantes em Kimberley.⁽¹⁾

Logo, a pergunta óbvia era: seria possível usar a mesma tecnologia para operações de processamento de minério de ferro na Mina de Khumani?

A Figura 1 ilustra graficamente a comparação teórica do consumo de água baseada em lamas de minério de ferro com 12% e 14%, para variações de concentração de sólidos no underflow, que vão desde espessamento convencional até espessamento de pasta.

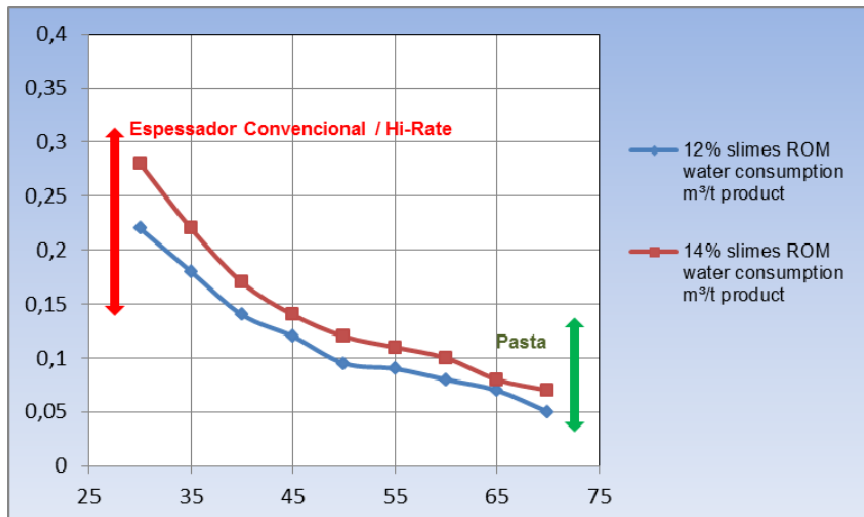


Figura 1. Comparação teórica entre espessadores convencionais vs sistema de espessamento de pasta.

A Figura 2 ilustra o volume teórico de água perdida e água recuperada na barragem de rejeitos, para diferentes variações de densidade no underflow de um espessador convencional até espessamento de pasta. O estudo assume 30% de recuperação de água da barragem de rejeitos até 50% de sólidos em massa no underflow do espessador, reduzindo de zero a 65% de sólidos em massa no underflow do espessador de pasta.

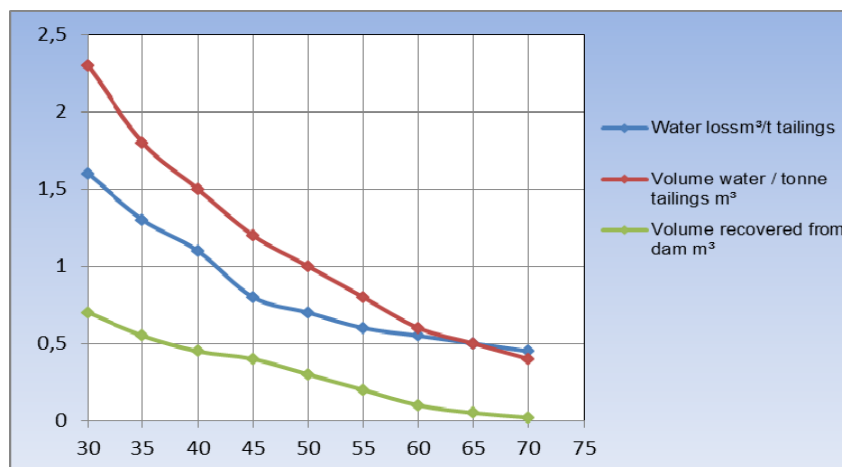


Figura 2. Comparação teórica entre espessadores convencionais vs sistema de espessamento de pasta.

Para determinar a melhor rota a ser implementada, Khumani convidou a WesTech África do Sul para efetuar testes em escala laboratorial,⁽²⁾ seguidos de testes piloto.

Como esses trabalhos já foram anteriormente divulgados e publicados, sendo de domínio público,⁽¹⁾ não abordaremos novamente os ensaios efetuados.

Em julho de 2004 iniciaram-se testes em escala de laboratório. Em novembro do mesmo ano, foram realizados testes em planta piloto. Os dados obtidos nestes trabalhos foram utilizados para os estudos preliminares ($\pm 30\%$), engenharia básica e estudo de pré-viabilidade ($\pm 10\%$). O estudo de viabilidade para o projeto Khumani foi concluído em maio de 2005.

A concepção do sistema de espessamento foi uma abordagem integrada casando requisitos da planta de processamento com o espessamento, bombeamento e

limitações de deposição.

Os resultados dos testes em bancada e testes em planta piloto realizados com o material de Beeshoek foram usados por todas as partes envolvidas no sistema do projeto iterativo. Além disso, dados de processo e experiências do cliente com o espessador instalado em Beeshoek foram usados para refinar a filosofia de design e controle.

Todos os trabalhos de testes (bancada e piloto) basearam-se no material de Beeshoek, assumindo-se que o material a ser tratado futuramente em Khumani teria características semelhantes.

Um local adequado para deposição de resíduo de pasta foi identificado na região de King, a aproximadamente 5 km de distância da instalação de Khumani, a inclinação natural na região facilitaria o escoamento para a fase inicial do projeto, além do que, a área possuía capacidade de armazenamento adequada para o tempo de vida útil da mina.

Overburden ao Norte do poço King, pôde ser utilizado para a construção do talude nas fases iniciais da construção da barragem, otimizando desta maneira os custos de construção. Além disso, a água recuperada na instalação de pasta retornaria para as operações de Parsons por gravidade, devido ao desnível natural entre os locais.

O projeto final incorpora a combinação de um espessador primário de tração periférica WesTech na planta de processamento principal em Parsons, combinado com recuperação de água usando um espessador secundário de pasta Deep Bed Paste Thickener WesTech, localizado na região de King a 5 km de distância.

Um sistema de anel principal existente na planta de Parson retorna a água recuperada dos espessadores de pasta localizados na borda da barragem em King, realimentando a planta continuamente.

O comissionamento da fase 1 teve início em janeiro de 2007 e foi concluído em abril do mesmo ano. O projeto detalhado para a fase 2 - Projeto de Expansão Khumani (KEP), foi concluído em março de 2010.

O comissionamento do espessador primário adicional de tração periférica de 90 m de diâmetro e do espessador secundário adicional de pasta começou em abril de 2011.

1.2 Khumani Objetivos do Projeto de Disposição de Pasta

Para que o projeto alcançasse seu objetivo principal de recuperação de água, tendo em conta a escassez de água na região, as condições de chuvas irregulares e à necessidade de se evitar a percolação dos valiosos recursos hídricos no solo, estabeleceram-se critérios rígidos de operação.

O principal critério estabelecido foi um consumo de água de 0,09 m³/t de minério de ferro, em que pelo menos 70% da água do underflow do espessador primário seria recuperada pelo espessamento secundário no espessador de pasta.

Aliado a isso, foram definidos como objetivos primários para a barragem de rejeitos:

- segurança: criar uma barragem segura e estável, minimizando os riscos para vidas humanas;
- sustentabilidade: a implementação precisava ser adequada a todas as influências ambientais externas que pudessem ocorrer;
- meio-ambiente: minimizar os impactos ambientais;
- cumprir os requisitos legais;
- separar água limpa da água de processos;
- minimizar o nível de água sobrenadante na barragem;
- realizar um custo eficiente de construção, operação e encerramento.

2 KHUMANI DESIGN

O minério de ferro em Khumani é extraído de uma série de minas a céu aberto, por meio de técnicas convencionais de perfuração por explosão, sendo transportado por caminhões até a bateria de britadores primários e secundários, nos respectivos sites da mina.



Figura 3. Peneiramento, jigagem e planta de ciclones na Parsons.

O minério bruto (ROM) é estocado em pilhas de mistura em duas categorias, “on grade” (alto teor) e “off grade” (baixo teor). O “on grade” é lavado e peneirado, produzindo o produto final; do mesmo modo, o “off grade” também é lavado e peneirado com o oversize da britagem terciária, depois seguido de beneficiamento através de jigs para remover contaminantes.⁽³⁾

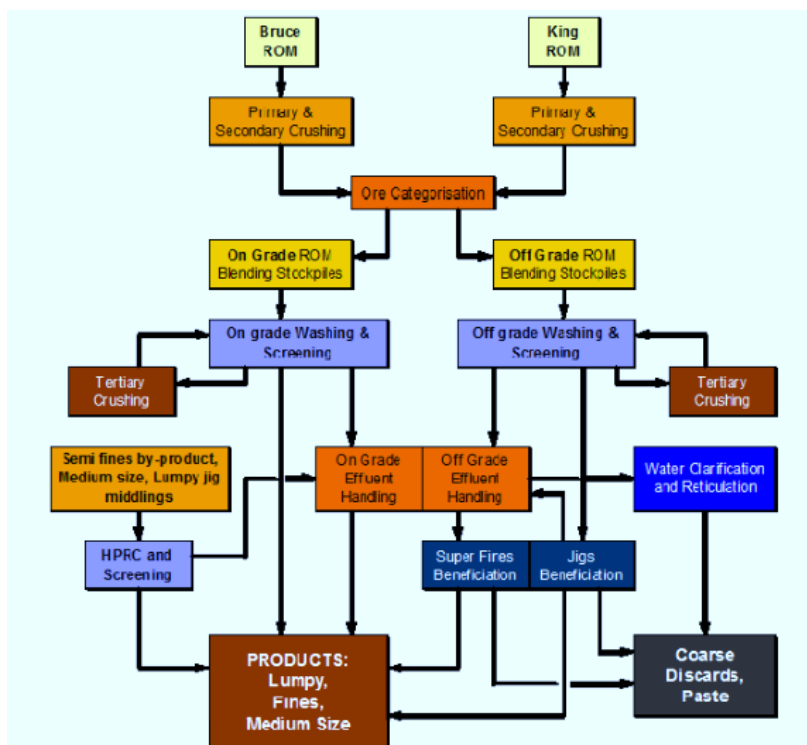


Figura 4. Visão geral do processo de minério de ferro da Mina de Ferro em Khumani.

3 RECUPERAÇÃO DE ÁGUA, CLARIFICAÇÃO E PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PASTA

A planta consiste em dois espessadores primários de 90 m de diâmetro situados na planta principal, e dois espessadores pasta de 18 m de diâmetro.

O espessador primário recupera a maior parte da água (cerca de 95% em volume). O underflow do espessador primário é bombeado a uma distância de cerca de 5 km para alimentar o espessador de pasta na barragem. O espessador de pasta é necessário para recuperar, pelo menos, 70% da água do underflow do espessador primário, que é então bombeada de volta para a planta principal.

A água clarificada no espessador primário (overflow) tem uma concentração de sólidos inferior a 50 ppm.



Figura 5. Dois espessadores de tração periférica de 90 m de diâmetro e tanque simples de coleta de overflow.

3.1 Dimensionamento dos Espessadores, Seleção e Design

3.1.1 Os espessadores primários

Os espessadores primários operaram como clarificadores regressando a maior parte da água clarificada para a unidade principal (12.000-15.000 m³/h com um máximo de 18.000 m³/h). Estes espessadores foram dimensionados em função da carga hidráulica.

Cada espessador primário está equipado com um medidor de turbidez e um dispositivo de dosagem inteligente de floculante Alcotech. O floculante é adicionado proporcionalmente com a resposta dos sinais dos instrumentos de saída.

O diâmetro do poço de alimentação (14,6 m) foi projetado em função de uma velocidade interna de 1,5 m/min e um tempo de residência de 1,5 minutos a uma vazão de 15.000 m³/hora. O poço de alimentação tem um declive (45°) no defletor inferior. O objetivo é desviar as partículas grossas para a parte central do espessador para impedir a formação de ilhas em áreas isoladas do equipamento. Isso reduz picos de torque. Defletores planos foram evitados, a fim de impedir o acúmulo de sólidos.

O poço de alimentação de cada um dos espessadores WesTech de 90 m de diâmetro foram adequadamente projetados usando dinâmica de fluidos computacional de modelagem (CFD) para:

- proporcionar uma velocidade média, crítica para a mistura, dispersão dos sólidos, agregação dos flocos e redução da quebra de flocculante e flocos no poço de alimentação;
- minimizar o consumo de flocculante;
- distribuir o fluxo de descarga de saída do poço de alimentação uniformemente em toda a área de sedimentação do espessador, reduzindo curtos-circuitos e “lavagem” do leito; e
- absorver a maioria das variações de alimentação.

A alimentação de cada espessador primário está a uma elevação superior a 5 m de altura. A energia da alimentação a uma taxa volumétrica de 12.000 m³/hora é excessivamente elevada e requer amortecimento e dissipação antes da entrada no poço de alimentação.

Isto foi alcançado com a instalação de uma “boiler box” antes da entrada do poço de alimentação. A polpa é “retida” na calha alimentação que antecede a “boiler box” por meio de uma válvula guilhotina, controlada por meio de um dispositivo de controle de nível situado a montante da alimentação na calha. Este sistema de inundação reduz a velocidade da corrente de alimentação, a fim de reduzir a turbulência no poço de alimentação e proteger a estrutura da calha e do próprio poço de alimentação.

Apresentamos a seguir um desenho esquemático para melhor ilustrar a tecnologia do boiler box (destacado em verde).

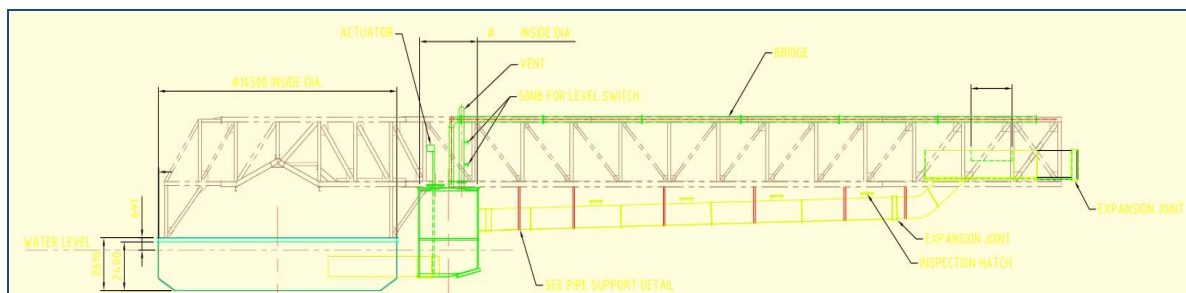


Figura 6. Desenho esquemático do boiler box.

3.1.2 Os espessadores de pasta secundários

O tamanho dos dois espessadores secundários de pasta foi determinado a partir do tempo de residência da suspensão na zona de compactação para se atingir a máxima concentração de sólidos na altura ótima do leito. A carga hidráulica também foi uma consideração importante, tanto interna como externa, a diluição é necessária a elevadas taxas de alimentação. Os espessadores de pasta de 18 m de diâmetro, ou espessadores secundários, possuem altura de parede lateral de 12 m de altura, com um ângulo de cone de 30°.

Os espessadores têm dois braços raspadores, cada um com lâminas de raspagem e 16 piquetes verticais. A alimentação é bombeada para caixas de alimentação individuais a cada um dos espessadores.

O espessador de pasta da Fase 2 possui o novo Poço de Alimentação Evenflo™, projetado para otimizar o consumo de flocculante e prover uniformidade na vazão de alimentação. Sua modelagem foi efetuada utilizando uma fase de modelagem CFD.



Figura 7. Espessadores secundários de pasta, localizados na região da barragem.

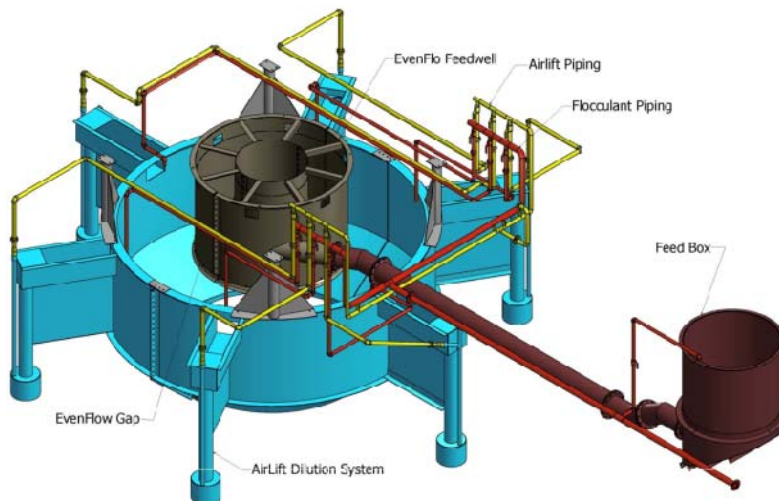


Figura 8. Poço de alimentação Evenflo™.

Cada um dos dois espessadores secundários de pasta acomoda uma vazão nominal de alimentação de 147 a 300 t/h (p/p)

Os espessadores secundários possuem capacidade de absorver vazões de até 450 t/h durante períodos intermitentes de curta duração. No entanto, para quantidades de alimentação superior a 300 t/h, e sustentadas durante longos períodos, uma tubulação de emergência curta de underflow é utilizada, permitindo a remoção de maiores volumes de lama do underflow, protegendo, assim, a integridade mecânica dos espessadores.

Os mecanismos de acionamento dos espessadores não possuem dispositivo de elevação dos braços, mas os braços e mecanismo de unidade foram projetados para um fator K superior a ± 5500 N/m e um torque de pico máximo superior a 1800 kNm com o objetivo de maximizar a densidade do underflow e transporte da lama espessada para o cone de descarga de underflow.

Existe, portanto, capacidade suficiente para atingir altas densidades no espessador de pasta de. No entanto, acima de cerca de 60% de sólidos em massa, a tensão de escoamento (yield stress) excede a 50 Pa e deve atingir rapidamente um valor aproximado de 150 Pa, com cerca de 65% de sólidos em massa de material não-cisalhado.

A concentração de sólidos admitida no sistema deve ser de aproximadamente 58% a 60% em massa, devido, em parte, para ser possível o bombeamento da pasta por bombas centrífugas para a barragem de rejeitos, mas também para permitir que o material seja depositado em camadas bastante finas (<100 mm) para se garantir que a secagem e a consolidação sejam eficazes. Isso pode mudar ao longo do tempo, dependendo da estratégia de gestão da barragem e local de deposição.

Densidades de 70% de sólidos em massa são depositados quando a coleta de água adicional é necessária e os pontos de deposição estão mais próximos do espessador.

3.2 Sistema de Bombeamento

Para que o design do sistema de bombeamento seja mais bem compreendido, abrimos um breve parêntese e dissertar um pouco sobre a diferença entre rejeito espessado em polpa e rejeito espessado em pasta.

Enquanto um rejeito em polpa é uma mistura heterogênea que quando em repouso apresenta separação de fases, um rejeito em pasta apresenta características específicas que o caracterizam:

- não ocorre separação de fases;
- não segrega;
- alta concentração;
- detém sua forma;
- alta viscosidade.



Figura 9. Rejeito espessado em polpa.



Figura 10. Pasta gerada de rejeito de minério de ferro.

O sistema de bombeamento foi projetado por Paterson & Cooke Consulting Engineers e é composto por três sub-sistemas distintos:⁽⁴⁾

- um sistema de bombeamento principal de lamas que bombeia o underflow de cada um dos espessadores primários cerca de 5 km até os espessadores secundários de pasta;
- um sistema de bombeamento que bombeia a pasta gerada nos espessadores secundários (espessadores de pasta) uma distância máxima de aproximadamente 2,5 km na barragem de rejeitos;
- um sistema de bombeamento da água que retorna a água recuperada nos espessadores de pasta para a planta de beneficiamento de minério de ferro.

Existe desnível de aproximadamente 40 m entre o local de deposição e a planta de beneficiamento, sendo o local de deposição o ponto mais alto.

As bombas do sistema de bombeamento primário bombeiam um underflow diluído com concentração em massa de 20%, a partir dos espessadores por um sistema de cinco bombas centrífugas em série, instaladas em um mineroduto de diâmetro nominal de 10" (NB) revestido de borracha

As bombas de underflow (concentração de 60% em massa) do sistema de bombeamento secundário enviam a pasta gerada nos espessadores secundários a vários pontos de deposição ao longo da parede da barragem de rejeitos.

O mineroduto se estende cerca de 2,5 km ao longo da parede noroeste e cerca de 1,5 km ao longo da parede sul da barragem de armazenamento de resíduos.

Estão instalados uma série de seis bombas centrífugas (serviço e standby) com motores de 90 kW. A primeira e a última bomba da série estão equipadas com variadores de velocidade.

Tanto a água coletada no overflow, como a água da chuva coletada na barragem de rejeitos, são bombeadas de volta para a planta.

A vazão de sólidos normal na alimentação do espessador primário é de 147 t/h, mas sob certas condições podem atingir picos de 566 t/h, por um período de até uma hora. Os espessadores primários (90 m) têm tempo de residência suficiente para amortecer esta tonelagem de pico e os sistemas de bombeamento primário e secundário possuem capacidade para bombear uma tonelagem de 450 t/h por até 8 horas. Durante um evento de sobrecarga de sólidos (pico de tonelagem), o sistema de bombeamento secundário dos espessadores de pasta está limitado a um percurso máximo de 1 km para a barragem.

Cada um dos espessadores secundários (espessadores pasta) possuem tubos de recirculação em seus cones, equipados com medidores de vazão e densímetros. Para esse serviço, estão instaladas bombas centrífugas com variadores de velocidade. Os densímetros verificam se a densidade na descarga dos espessadores atende à especificação exigida de disposição de resíduos. Se essa densidade não estiver na faixa especificada, as bombas de underflow permanecem inativas e as bombas de recirculação são acionadas para evitar a compactação dos sólidos espessados, até que a faixa de descarga seja atingida.

Além de evitar a compactação dos sólidos, o circuito de recirculação por bombas centrífugas assegura o cisalhamento das lamas, reduzindo assim sua viscosidade e promovendo um melhor bombeamento do material que vai para a barragem de rejeitos.

4 RESUMO

A seguir apresentamos os pontos fundamentais para a concepção e implementação bem sucedida do sistema de barragem e do sistema de gestão de água na Mina Khumani:

- integrar o projeto de circuito de água da planta, o design dos espessadores e projeto de transporte e deposição dos rejeitos de uma maneira interativa como uma equipe de projetos, foi fundamental para o sucesso dos trabalhos;
- o uso do sistema de espessamento em dois estágios, espessadores primários de 90 m na planta de processo e espessadores de pasta de 18 m localizados na região de King (barragem de rejeitos), minimizaram as exigências de bombeamento e otimizaram a recuperação de água.

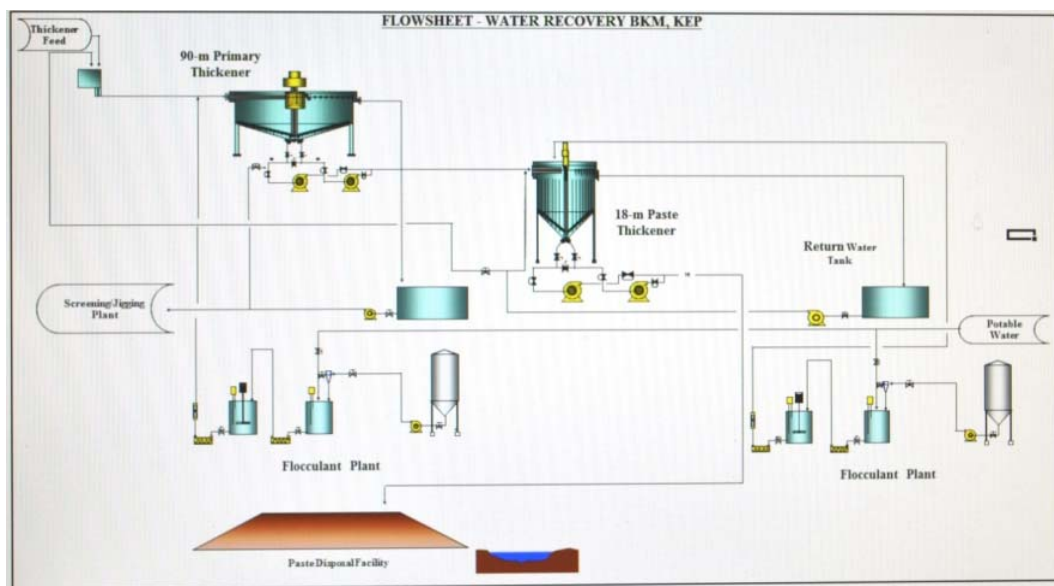


Figura 11. Fluxograma simplificado do circuito de recuperação de água.

Considerando uma concentração de sólidos média de 8% na alimentação do espessador de 90m, a uma vazão média de 15.000 m³/h, em valores absolutos podemos considerar os seguintes resultados para recuperação de água:

Tabela 1. Recuperação de Água nos Espessadores

	Espessador HiFlo de 90m	Espessador de Pasta de 18m
Vazão média de alimentação	15.000 m ³ /h	5.425 m ³ /h
Concentração de sólidos alimentação	8%	20%
Concentração de sólidos underflow	20%	60%
Volume médio de água recuperada	9.575 m ³ /h	4.255 m ³ /h

- o uso dos espessadores primários 90 m e do sistema de anel interno central na planta de Parsons, permite que a maior parte da água de processo seja recirculada dentro da planta; e
- localizando o espessador de pasta na região de King, sob o controle da operação da barragem de rejeitos, permite o controle cuidadoso da pasta (lamas) descarregada, provendo com uma gestão otimizada da barragem e recuperação de água.⁽⁵⁾

Em resumo, através de uma filosofia de design integrado, boas práticas de engenharia e implementação, é possível construir e operar um processamento úmido de minério de ferro com uso racional e sustentável de água. No case apresentado, em ambiente árido, foi possível consumos de água de 0,43 a 0,69 m³/t de sólidos depositados na barragem de rejeito, com sucesso.

5 CONCLUSÃO

Como inovações tecnológicas, podemos ressaltar os seguintes pontos:

- uso de dois estágios de espessamento com alta taxa de recuperação de água no primeiro estágio e alta densidade de underflow no segundo estágio;
- uso da tecnologia “bolier box” para dissipação de energia na entrada do poço de alimentação do primeiro estágio;
- uso do poço de alimentação WesTech EvenFlo™ com sistema AirLift de auto diluição no espessador de 18m de diâmetro.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a gestão da Mina de Assmang Khumani pela permissão concedida para publicar este artigo.

REFERÊNCIAS

- 1 HOUMAN, J.; JOHNSON, G. Commissioning and Operation of the paste thickening farm at Kimberley Combined Treatment, in Proceedings International Seminar on Paste and Thickened Tailings (Paste 2003), 14-16 May, Melbourne Australia, Section 12.
- 2 DU TOIT, T; CRUSIER, M. Paste Thick and Associates (Pty) Limited Pilot plant and geotechnical flume tests internal feasibility study on BKM tailings, January 2005.
- 3 Du Toit, T. Khumani Iron Ore Mine BKM project process description, Internal report, 25 June 2010.
- 4 Paterson & Cooke Consulting Engineers (2005) BKM Residue pumping System: Design Description & Costing Document, Document PST-677.R07 Rev 2, June 2005.
- 5 COOPER, R.A.; SMITH, M.E. Case study operations of three paste disposal facilities, in Proceedings 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings (Paste2011), R.J. JEWELL; A.B. FOURIE (eds), 5–7 April 2011, Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 261–270.
- 6 DE KONING, L. Paste disposal system design criteria document, Report No. ECMP/T1020-1, October 2009.
- 7 DE SWART, G. Functional description for new paste disposal facility (BKM project), Report No. GT-04/2007, Report to ECMP (Pty) Limited, April 2007.
- 8 DU TOIT, T. BKM Internal Feasibility Study Report: Metallurgical Test Work & Interpretation, November 2005. Du Toit, T. (2010) Khumani Iron Ore Mine BKM project process description, Internal report, 25 June 2010.