

MOAGEM SEMI-AUTÓGENA DA USINA DO SOSSEGO – HISTÓRICO DOS 10 ANOS DE OPERAÇÃO E OTIMIZAÇÕES

**MIRANDA, A.¹, LUIZ, D.², SOUZA, M.³, OLIVEIRA, G.⁴, BERGERMAN, M.G.⁵,
DELBONI JR., H.⁶**

¹Vale S.A., Mina do Sossego, e-mail: anderson.miranda@vale.com

²Vale S.A., Mina do Sossego, e-mail: daniel.lui@vale.com

³Vale S.A., Mina do Sossego, e-mail: marlon.souza@vale.com

⁴Vale S.A., Mina do Sossego, e-mail: geovan.oliveira@vale.com

⁵Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.
e-mail: mbergerman@usp.br

⁶Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.
e-mail: hdelboni@usp.br

RESUMO

A usina do Sossego foi a primeira operação da Vale S.A. a operar com um moinho semi-autógeno (SAG) para o processamento de minério sulfetado de cobre e ouro. A usina está localizada no sudeste do estado do Pará. O circuito de cominuição foi projetado para processar 41.000 toneladas por dia de *run of mine*, sendo o circuito composto por um britador primário, um moinho semi-autógeno de 11,6 m de diâmetro que opera em circuito fechado com britadores cônicos, seguido de dois moinhos de bolas de 6,7 m de diâmetro. O projeto do circuito se baseou em dados de extensa campanha piloto, assim como em simulações baseadas nos resultados de ensaios de caracterização em amostras de furos de sonda. Após o comissionamento do circuito, observou-se que algumas variáveis estavam contribuindo para vazões horárias abaixo das esperadas. Uma série de otimizações e adequações foram realizadas ao longo dos 10 anos de operação do moinho semi-autógeno, incluindo mudança na área aberta, tamanho e disposição das aberturas das grelhas, perfil dos revestimentos e mudanças no plano de fogo da mina. Este trabalho descreve os principais aspectos do projeto do circuito, assim como as otimizações realizadas ao longo dos primeiros anos de operação.

PALAVRAS-CHAVE: moagem semi-autógena; SAG; simulação; otimização; cobre; Geometalurgia.

ABSTRACT

Sossego was the first Vale S.A. SAG mill operation to process copper-gold ore. It is located in Para state, south east of Amazon region in Brazil. The comminution circuit was designed to process 41,000 metric tons per day comprising primary crushing, one 38 ft diameter SAG mill operating in closed configuration with cone crushers, followed by two 22 ft diameter ball mills. The circuit was designed on the basis of data obtained from an extensive pilot plant campaign. The ore variability was also assessed through simulation using data from a drill core characterization program. After commissioning it became clear that a number of variables were contributing to the low throughputs obtained in the SAG mill. Several optimizations and circuit adjustments were made in the 10 initial years of operation, including changes in the grates open area, lifters profile and blasting patterns at the mine. This paper describes the main aspects of designing the circuit, as well as the work carried out at

the 10 initial years of operation of the industrial grinding circuit to improve its performance.

KEYWORDS: semi-autogenous grinding; SAG; simulation; optimization; copper; Geometalurgy.

1. INTRODUÇÃO

A mina do Sossego, da Vale S.A., localizada em Canaã dos Carajás, no estado do Pará iniciou suas operações em 2004, sendo a primeira mina de cobre da empresa. Esta possui uma reserva estimada de 245 milhões de toneladas com teores de 0,98% de cobre e 0,28 g/t de ouro (para um *cut off* de 0,33% de cobre equivalente), divididos em dois corpos, denominados Sequeirinho (principal) e Sossego. Este último representa aproximadamente 15% das reservas. Há também cerca de 16,5 milhões de toneladas de minério de cobre oxidado (VALE S.A., 2001).

O minério de cobre é basicamente calcopirítico, com pequena presença de bornita e calcocita. A usina do Sossego processa 41.000 toneladas de minério de cobre por dia e está projetada para uma produção superior a 470.000 toneladas de concentrado de cobre por ano. O fluxograma de processo é apresentado na Figura 1.

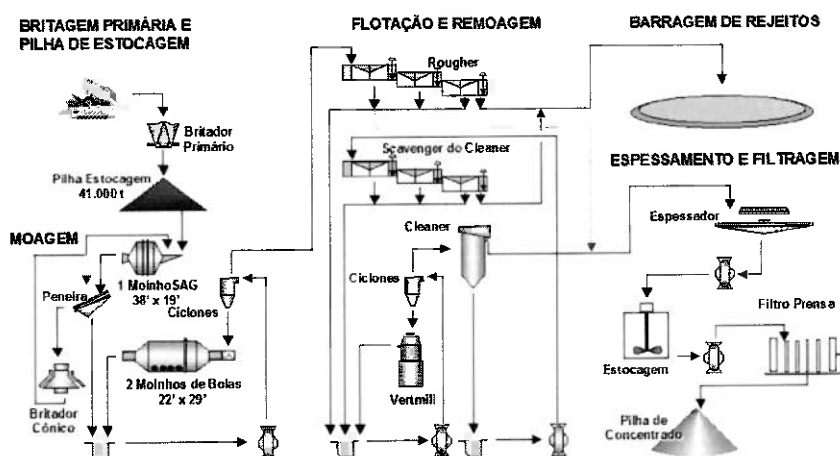


Figura 1. Fluxograma de processo da usina do Sossego (Fonte: ROSA et al., 2007b).

O circuito da usina do Sossego é descrito em detalhes por Bergerman (2009) e Rosa et al. (2007b).

Para o dimensionamento do circuito de cominuição, uma extensa campanha de testes em escala piloto foi realizada no *Centro de Investigaciones Mineras y Metalurgicas* (CIMM) em 2000. Diversas configurações de circuito e condições operacionais foram avaliadas com amostras dos depósitos do Sossego e Sequeirinho. A configuração SABC (moinho SAG em circuito fechado com britador de *pebbles*) foi selecionada e os equipamentos dimensionados para processar 41.000 t/d. Os resultados da planta piloto deixaram claro que o desempenho do moinho SAG é impactado fortemente pela quantidade de material próximo do tamanho crítico no moinho, confirmando os resultados de características do minério de alta resistência ao impacto, com um valor médio do índice A_{xb} de 32,2 para o minério do Sossego e 49,5 para o minério do Sequeirinho. Adicionalmente aos ensaios em planta piloto, foram conduzidos estudos de variabilidade com amostras de furos de sonda que permitiram a avaliação do comportamento do circuito por meio de simulações com o software *JKSimmMet*. Maiores detalhes sobre o projeto do circuito de cominuição podem ser obtidos em Delboni Júnior et al. (2006).

Após o comissionamento do circuito, observou-se que algumas variáveis estavam contribuindo para vazões horárias abaixo das esperadas. Uma série de otimizações e adequações foram realizadas no moinho semi-autógeno, incluindo mudança na área aberta, tamanho e disposição das aberturas das grelhas, perfil dos revestimentos e mudanças no plano de fogo da mina. A seguir são descritas as otimizações mais relevantes realizadas ao longo dos dez primeiros anos de operação.

2. DESCRIÇÃO DAS OTIMIZAÇÕES REALIZADAS

2.1. Modificações nos perfis das grelhas e dos revestimentos

Uma das principais características observadas ao final de 2004, alguns meses após o início da operação da usina foi a intensa acumulação de material próximo do tamanho crítico, chamado de *pebbles*, no interior do moinho SAG. Independente da realização de amostragens, visualmente era possível observar uma grande quantidade de material entre 25 e 76 mm na carga do moinho durante as paradas para inspeção. Na ocasião, a carga circulante era de aproximadamente 20 – 25% da alimentação nova do SAG de aproximadamente 1.100 – 1.200 t/h. Nesta época, o moinho operava com grelhas de descarga de 8,6% de área aberta e *pebble ports* de 63,5 mm. Esta configuração de grelhas operou de março a dezembro de 2004. Desde então, uma série de modificações foram realizadas no projeto das grelhas de forma a aumentar a área aberta das grelhas e a abertura dos *pebble ports*, de forma a minimizar o acúmulo de material próximo do tamanho crítico no interior do moinho. A Tabela 1 ilustra as modificações realizadas no projeto das grelhas até se chegar a configuração considerada ótima.

Tabela 1. Evolução da configuração das grelhas do moinho SAG do Sossego.

Geração	<i>Pebble port</i> (mm)	Área das aberturas (cm ²)	Grelhas	Área total (cm ²)	Área aberta** (%)	Período	Vazão SAG (t/h)
Primeira	63,5	2.645	32	84.627	8,6	Abr – Dez/04	1.205
Primeira e segunda	63,5	2.645	22	58.181	8,9	Dez-fev/05	1.247
	76,2	2.974	10	29.744			
Segunda	76,2	2.974	32	95.181	9,7	Fev – mai/05	1.416
Segunda e terceira	76,2	2.974	22	64.437	10,2	Mai – ago/05	1.559
	88,9	3.485	10	34.852			
Primeira, segunda e terceira	63,5	2.645	18	47.603	9,7	Ago – set/05	1.572
	76,2	2.974	1	2.974			
	88,9	3.485	13	45.308			
Primeira e terceira	63,5	2.645	9	23.801	10,5	Set-dez/05	1.639
	88,9	3.485	23	80.160			
Quarta	76,2 e 88,9	3.352	32	107.264	10,9	Dez – fev/06	*
Quinta	76,2 e 88,9	3.352	32	104.264	10,9	Fev – abr/06	*
Sexta	76,2 e	3.299	32	105.568	10,7	Abr –	1.643

	88,9					jun/06	
Sétima	76,2 e 88,9	3.056	32	97.792	9,9	Jun – ago/06	1.694

* Dados não disponíveis pois a usina estava operando sem um moinho de bola, consequentemente com a alimentação limitada.

** Porcentagem da seção de descarga do moinho.

A descrição detalhada das modificações realizadas nas grelhas do SAG neste período pode ser encontrada em Delboni Júnior *et al.* (2006). Estas modificações permitiram subir de um patamar de 1.450 t/h em 2005 para aproximadamente 1.600 t/h em 2006.

2.2. Otimização da ciclonagem, controle de enchimento do moinho e abertura do circuito de rebitagem do moinho SAG

No ano de 2007, as otimizações no circuito SAG se concentraram na etapa de ciclonagem, no melhor controle operacional do enchimento do moinho e na abertura do circuito do SAG, com a possibilidade de se encaminhar o produto da rebitagem diretamente ao moinho de bolas.

Em relação a ciclonagem um diagnóstico realizado, descrito em detalhes em Bergerman *et al.* (2011), mostrou que os ciclones estavam trabalhando com o *bypass* de finos para o *underflow* relativamente alto, maiores que 25%. Além disso, amostragens no circuito de flotação mostraram que 25% do cobre do rejeito da flotação *rougher* estava liberado e abaixo de 10 μ m. A avaliação do histórico dos dados da recuperação da flotação em relação a granulometria de alimentação mostraram ainda uma melhora de recuperação, com valores de até 96% de recuperação *rougher* em granulometrias de alimentação da flotação com aproximadamente 17% retido em 0,21 mm, um ganho significativo em relação ao patamar observado de 93% para uma granulometria mais fina, com aproximadamente 12% retido em 0,21 mm. Em função destas observações, foram realizadas simulações utilizando-se o software *JKSimmet*, calibrado para o circuito de cominuição do Sossego, que mostram que ganhos poderiam ser obtidos com o uso de um *apex* menor e um *vortex* maior, resultando em uma carga circulante menor no circuito e menor geração de finos. Dois ganhos secundários, não previstos inicialmente, foram obtidos. O primeiro se deve ao fato de que com menor carga circulante, a moagem de bolas, que normalmente opera com duas bombas e duas baterias de ciclones, para atingir 100% da carga nominal, consegue atualmente operar com apenas uma bomba e atingir 95% da taxa nominal. Antes desta adequação, o valor não passava de 85%. O segundo se deve ao aumento da vida útil dos revestimentos utilizados nos ciclones. Aproveitando a necessidade de mudança nos tamanhos dos revestimentos, foi realizado junto ao fornecedor um teste com novos materiais. Um revestimento cerâmico substituiu o de borracha normalmente utilizado. Apesar de ter um custo 15 vezes maior, sua vida útil é 25 vezes maior, gerando um ganho significativo, ao se levar em conta que existe ainda uma grande economia com mão de obra e minimização das perdas de produção ao se parar menos a bateria para manutenção.

Quanto ao controle de enchimento do moinho SAG, tal demanda surgiu da baixa disponibilidade do mesmo, observada em função de quebras de revestimentos. A avaliação dos dados operacionais mostrou que em alguns momentos o moinho

operava com baixa carga, o que facilita o impacto dos corpos moedores, que tem aproximadamente 130 mm, com o revestimento do moinho. Foi estabelecido um controle rígido de enchimento do moinho, que considerava para o cálculo do peso ideal de operação o enchimento de corpos moedores e o desgaste do revestimento, assim como foi implantado um controle da velocidade do moinho, que varia principalmente com o desgaste e perfil do revestimento.

A terceira otimização de destaque neste período foi a abertura do circuito de rebitagem do moinho SAG. A fim de flexibilizar o circuito e melhor equilibrar a energia entre a moagem de bolas e a moagem SAG, uma alternativa operacional foi proposta, criando-se a opção de direcionar o produto dos rebitadores de reciclo (circuito fechado com a moagem SAG) para uma outra etapa de peneiramento. A fração grosseira retornaria para a rebitagem, enquanto a fração fina seria encaminhada diretamente à moagem de bolas. Chamou-se esta alternativa operacional de abertura do circuito da rebitagem de *pebbles*.

Os detalhes do projeto e resultados obtidos com a abertura do circuito podem ser obtidos em Rosa *et al.* (2007a). Estas modificações permitiram um aumento aproximado de 50 t/h na alimentação do SAG no ano de 2007, com significativo aumento de disponibilidade, em função da significativa redução do número de quebras dos revestimentos.

2.3. Integração mina usina

Conforme apontado pela literatura (MORELL e VALERY, 2001), o afinamento da distribuição granulométrica de alimentação de moinho semi-autógeno é um dos pontos que pode gerar maiores ganhos de vazão na moagem, sem necessidade de modificações na usina. A fim de avaliar esta opção, foi realizada uma simulação com as distribuições granulométricas da alimentação da usina dos anos de 2005 e 2006, mais grosseiras do que a observada em uma amostragem de 2007 (Caso Base), dia em que o moinho apresentou uma vazão de alimentação acima da de projeto. As características do minério alimentado foram mantidas como no Caso Base, para evitar a influência desta variável na análise. Não foi realizada nenhuma simulação com alimentação mais fina que a do Caso Base, pois este já estava com uma alimentação considerada fina. A metodologia detalhada para a realização das simulações está descrita em Bergerman (2009). A Tabela 2 ilustra as distribuições granulométricas utilizadas nas simulações, assim como os resultados obtidos.

Tabela 2. Resultados das simulações variando a distribuição granulométrica da alimentação do moinho semi-autógeno.

Simulação	F ₈₀ (mm)	Vazão de sólidos de alimentação (t/h)	Grau de enchimento moinho semi- autógeno (%)	Potência do moinho semi- autógeno (kW)
Caso Base – distribuição granulométrica 2007	59	1.892	30,0	14.701
Engrossamento da distribuição granulométrica de alimentação – 2006	74	1.100	29,9	14.457
Engrossamento da distribuição granulométrica de alimentação – 2005	128	700	29,9	14.285

As simulações realizadas indicam que com o engrossamento da granulometria de alimentação, passando de um F_{80} de 59 mm para 128 mm, a vazão de sólidos de alimentação nova do circuito caiu de 1.892 t/h para 700 t/h, mantendo-se a potência consumida do moinho semi-autógeno. Nota-se assim o efeito extremamente significativo e deletério ao desempenho do moinho semi-autógeno e, conseqüentemente, de todo o circuito de moagem do Sossego, do engrossamento da granulometria de alimentação. O patamar observado na amostragem de 2007 pode ser considerado adequado, devendo, portanto, ser mantido, garantindo a vazão nominal de alimentação do circuito, sem a necessidade de investimentos adicionais na usina. A partir das observações realizadas com essa simulação, iniciou-se um trabalho em conjunto com a equipe da mina (BERGERMAN *et al.*, 2008; BERGERMAN, DELBONI e ROSA, 2009), visando à adequação do desmonte na mina, de forma que esta distribuição granulométrica ótima da amostragem de 2007 passasse a ser um valor de referência e de rotina. Foram realizados alguns desmontes em caráter experimental, que confirmaram os resultados ótimos obtidos no dia da amostragem. Desde então, com a nova configuração do desmonte, observou-se um aumento médio na vazão da usina no ano de 2008, em comparação ao ano de 2007, da ordem de 10%. A mina precisou realizar adequações na malha de desmonte e nas razões de carga utilizadas, assim como na utilização de perfuratrizes. Essas adequações, no entanto, podem ser consideradas de baixo custo frente ao ganho observado na vazão da usina. De forma a se acompanhar a granulometria de alimentação do SAG, foi instalado um analisador *on line* de granulometria no produto do britador primário, da empresa *Split engineering*. Com esta adequação, obteve-se uma vazão medida do SAG de 1.731 t/h no ano de 2007.

2.4. Troca intercalada de grelhas

De forma a minimizar o impacto com uma diminuição brusca de área aberta quando se realiza troca das grelhas, foi implementada uma estratégia de troca alternada de grelhas. A Figura 2 ilustra o mapa de troca de grelhas, aonde pode se observar grelhas trocadas em diferentes momentos a cada dois meses.

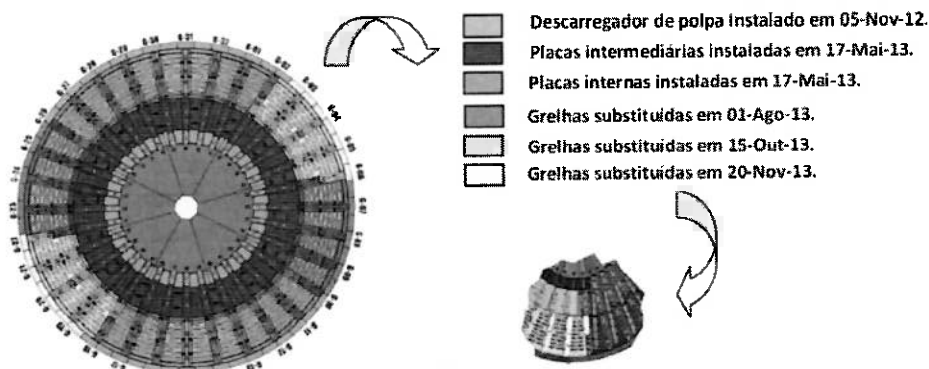


Figura 2. Troca alternada de grelhas do moinho SAG.

Com esta otimização, obteve-se no ano de 2009 uma vazão horária média de 1.766 t/h.

2.5. Otimizações nos revestimentos e estratégias de operação e manutenção

Foram implantadas algumas otimizações no revestimento do moinho SAG, como a utilização de grelhas duplas, revestimentos de borracha, a redução do número de placas do cilindro e a reciclagem de placas altas como baixas, além de um rígido controle operacional do enchimento do moinho. A Figura 3 ilustra as modificações nos revestimentos.

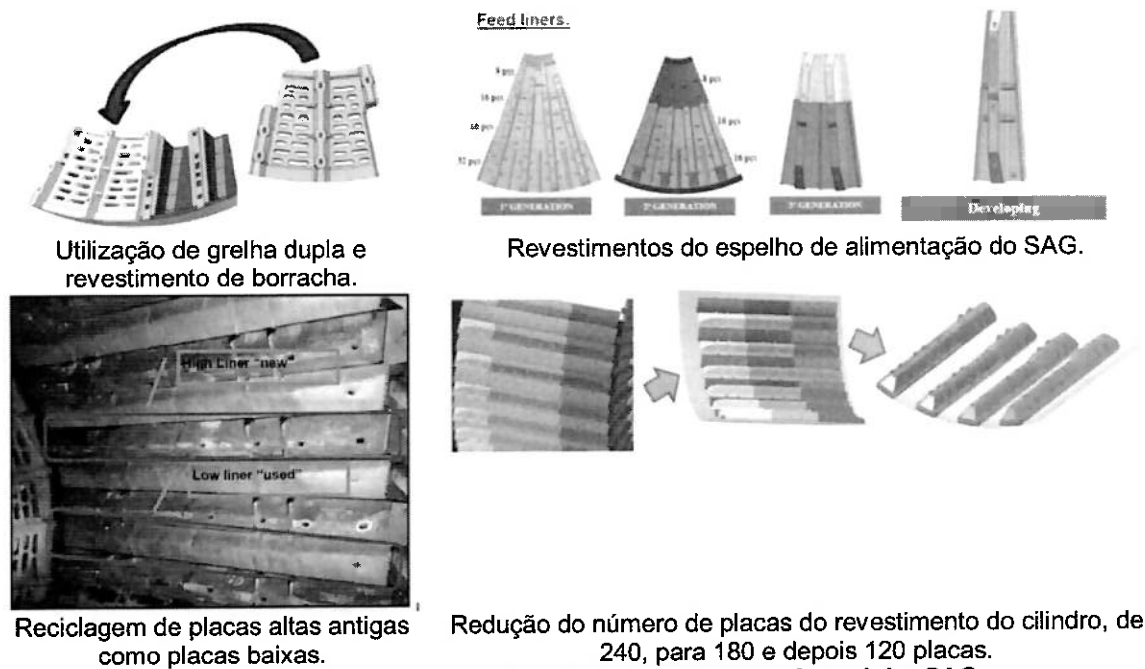


Figura 3. Adequações realizadas nos revestimentos do moinho SAG.

A Figura 4 ilustra o aumento da massa processada por cada jogo de revestimento do moinho SAG e a diminuição no número de quebras.

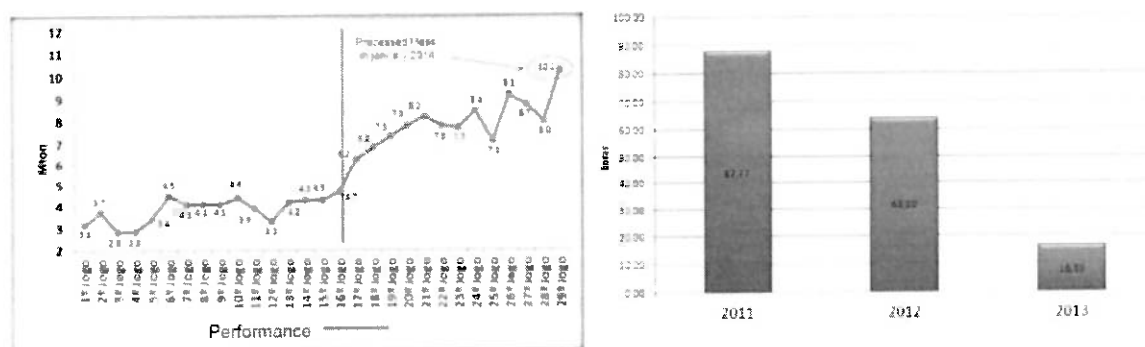


Figura 4. Aumento da massa processada por cada jogo de revestimento do moinho SAG e a diminuição no número de quebras.

3. CONCLUSÕES

O circuito de cominuição do Sossego foi o primeiro do Brasil a operar com um moinho SAG de grande porte. Os primeiros anos de operação apresentaram uma série de desafios a equipe técnica envolvida no início da operação e estabilização do circuito. As otimizações implantadas no circuito permitiram que se atingisse de forma consistente a vazão horária projetada para o circuito.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Vale S.A. pela autorização para a publicação deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

Bergerman MG, Delboni Júnior H, Rosa MAN. Estudo de variabilidade e otimização do circuito de moagem SAG da Usina do Sossego. REM. Revista Escola de Minas 2009, 62; 93-97.

Bergerman MG, Fonseca R, Delboni Júnior H, Dayrell M, Miranda A, Rosa MAN. Otimização da ciclonagem de 33" do circuito de moagem do Sossego. In: XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Proceedings do XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2011; Salvador, Brasil. p. 895-902.

Bergerman MG. Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2009.

Bergerman MG, Morais J, Castro A, Rosa MAN, Delboni Júnior H. Variability studies for the Sossego 41 ktpd grinding circuit. In: XXIV International Mineral Processing Congress, Beijing. Proceedings do XXIV International Mineral Processing Congress, 2008. v. I. p. 407-416.

Delboni Júnior H, Rosa MAN, Bergerman MG, Nardi R. Optimization of the Sossego SAG Mill. In: International conference on autogenous and semiautogenous grinding technology. Proceedings do SAG 06; 2006; Vancouver, Canada. v. I. p. 39-49.

Morrell, S.; Valery, W. Influence of feed size on AG/SAG mill performance. In: International conference on autogenous and semiautogenous grinding technology. Proceedings do SAG 01; 2001; Vancouver, Canada. v. 1, p. I-203 – I-214.

Rosa MAN, Bergerman MG, Fonseca R, Queiroz A, Geraldo J. Abertura do circuito de moagem semi-autógena da usina do Sossego. In: XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Proceedings do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2007; Ouro Preto, Brasil. v. I. p. 123-126. (a).

Rosa MAN, Bergerman MG, Miranda A, Oliveira JL, Souza M, Batista Filho J, Cardoso W. Controle operacional da usina do Sossego. In: XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Proceedings do XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; 2007; Ouro Preto, Brasil. v. III. p. 505-512. (b).

Vale S.A.. Relatório de viabilidade do Projeto Sossego. Carajás: Minerconsult, Bechtel, ECM e Concremat, 2001. 451 p. (Relatório interno).