



APLICAÇÃO DA GEOMETALURGIA PARA AUMENTO DA RECUPERAÇÃO DE OURO – SANTA BÁRBARA, MG

**MAGALHÃES, M.F.¹, LEMOS, M.G.², MOREIRA, V.A.¹, PEREIRA, M.S.¹,
SOUZA, T.F.Q.¹, VIEIRA, M.M.S.¹**

¹Anglogold Ashanti, Departamento Metalurgia, Córrego do Sítio Mineração, Santa Barbara, Brasil.

²Anglogold Ashanti, Mining & Technical, COO International.

RESUMO

O Greenstone Belt Rio das Velhas, localizado na região do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, é o mais importante distrito de ouro do Brasil. O complexo de minas Córrego do Sítio são depósitos de ouro explorados pela AngloGold Ashanti Brasil usando o método de mineração subterrânea. Este trabalho tem como objetivo demonstrar como esses parâmetros geometalúrgicos podem ser utilizados em diferentes áreas operacionais de uma mineração de ouro, identificando previamente a variabilidade no comportamento metalúrgico de diferentes tipos de minérios e, além disso, auxiliando na estabilidade do processo. A implementação do Processo Geometalúrgico teve início em 2015, englobando planos de amostragem, tipos de testes e análise e uso de dados na rotina operacional. Sua metodologia consiste na amostragem de amostras de furos de sonda de acordo com o plano de lavra, testes de bancada representativos das operações da planta metalúrgica e caracterização química e mineralógica das amostras antes e depois do teste. Através da busca por tal conhecimento, que envolve uma caracterização geológica mais detalhada, combinada e correlacionada com as características metalúrgicas, um método adequado de tratamento de minério foi obtido, aumentando a eficiência do sistema metalurgia, bem como a previsibilidade da metalurgia.

PALAVRAS-CHAVE: Ouro, Recuperação de Au, Geometalurgia

ABSTRACT

Rio das Velhas Greenstone Belt, largely located in the Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero) region of the State of Minas Gerais, is the most important gold district in Brazil. Córrego do Sítio mines complex are gold deposits exploited by AngloGold Ashanti Brazil using the underground mining method. This work aims to demonstrate how these geometalurgical parameters can be used across different operating areas of an active gold mining operation, by previously identifying the variability in the metallurgical behavior of different types of ores and, in addition, assisting with process stability. Implementation of the Geometallurgical Process began in 2015 following decisions made in respect of sampling plans, types of tests and analysis and use of data in the operational routine. Its methodology consists of drill core sampling in line with the mining plan, core logging, bench tests representative of the metallurgical plant's operations and chemical and mineralogical characterization of samples before and after being tested. Through the pursuit of such knowledge, which involves a more detailed geological characterization, combined and correlating with metallurgical characteristics, a suitable ore treatment method has been obtained, increasing the efficiency of the ore - treatment – metallurgy system, as well as the predictability of metallurgical behavior.

KEYWORDS: Gold, Recovery, Geometallurgy

1. INTRODUÇÃO

O Greenstone Belt Rio das Velhas, em grande parte localizado na região do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais, é o mais importante distrito de ouro do Brasil, com produção estimada em 30 milhões de onças (GOLDFARB et al., 2001). A Mina do Córrego do Sítio, o foco deste trabalho são as jazidas de ouro exploradas pela AngloGold Ashanti Brasil utilizando o método de mineração subterrânea e a céu aberto. Eles estão localizados na porção norte do Quadrilátero Ferrífero, em Santa Bárbara, Minas Gerais, a 110 km da capital, Belo Horizonte (Figura 1). Os corpos mineralizados, hospedados em rochas arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas, são estruturalmente associados e controlados por alterações hidrotermais. O complexo Córrego do Sítio (CDS) é subdividido em três principais corpos: Cachorro Bravo, Carvoaria e Laranjeira.

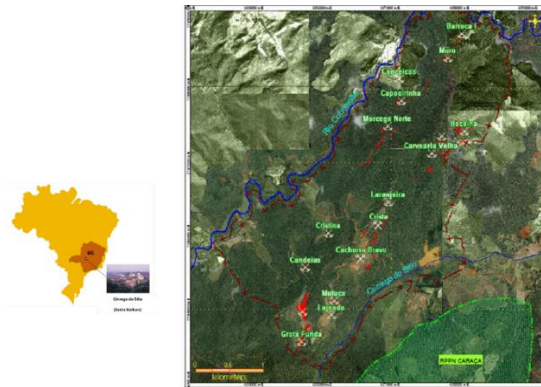


Figura 1. Localização do Complexo Córrego do Sítio

Nos últimos anos, projetos e / ou depósitos minerais mudaram radicalmente seus paradigmas, buscando integrar minas e metalurgia para aumentar a produtividade. Segundo Dunham & Vann (2007), essa abordagem multidisciplinar engloba o conceito de geometalurgia, cuja incorporação na mineração visa minimizar as incertezas associadas a valoração dos recursos minerais e, conseqüentemente, a determinação de prosseguir ou não com o desenvolvimento. Ao integrar informações sobre geologia, planejamento de minas, projeto operacional e recuperação metalúrgica, é possível melhorar a compreensão e o conhecimento de um depósito mineral, obtendo assim uma melhor utilização de reservas e recursos minerais (Turner-Saad, 2010). Como forma de tornar e manter o processo competitivo, a AngloGold Ashanti, uma produtora de ouro, está ativamente e continuamente buscando novas opções para otimizar e alcançar a excelência em seus processos e reduzir os custos operacionais.

Nas Minas Córrego do Sítio, diferentes tipologias, como a formação de ferro, rochas metassedimentares clásticas e turbidíticas e veios de quartzo, hospedam a mineralização. A principal associação de ouro nativo, aurostibite e electrum ($AuAg_2$) é a arsenopirita, com outros sulfetos subordinados, como pirita, pirrotita e berthierita. Além disso, na carvoaria, a associação de ouro nativo e quartzo também é comum. Os dois tipos são extraídos e tratados juntos em plantas de concentração por moagem, separação gravimétrica, flotação e lixiviação, resultando em um produto de alta pureza.

No passado, a planta processava predominantemente minério do Cachorro Bravo. Nos últimos anos, houve um aumento substancial na produção de minério a partir de *orebodies* da Carvoaria e Laranjeiras. Alta variabilidade combinada com baixa previsibilidade levou a variações nos processos de tratamento, causando um declínio na recuperação e

dificuldade em alcançar a qualidade especificada para o concentrado de flotação. A fim de avaliar as influências e variabilidade dos diferentes tipos de minério, uma nova etapa foi adicionada ao processo, segundo a qual diferentes tipos de minérios são tratados individualmente em escala de bancada e os produtos são caracterizados química e mineralogicamente. A informação resultante é usada para melhorar o processo, a compreensão da economia de diferentes áreas das minas e previsibilidade nas etapas metalúrgicas.

1.1. Geometalurgia: Conceito e Importância

Em um depósito mineral, além da variação de teores, vários outros parâmetros afetam diretamente o rendimento final da mineração. Exemplos desses parâmetros são variação de dureza, mineralogia, grau de liberação de minerais minérios e porosidade. A geometalurgia envolve o estudo de desenvolvimentos tecnológicos na caracterização mineralógica, britagem, moagem, flotação, entre outras áreas.

O esforço para detalhar a natureza e a complexidade das tipologias minerais presentes em um depósito tem como objetivo determinar a melhor oportunidade de extração do mineral de interesse.

O uso destes parâmetros geometalúrgicos quebra as barreiras entre diferentes áreas operacionais, identificando previamente a variabilidade no comportamento metalúrgico de diferentes tipos de minérios, enquanto suporta a estabilidade dos processos.

O objetivo deste artigo é demonstrar como as ferramentas geometalúrgicas contribuem para aumentar a previsibilidade do comportamento do minério de ouro nas minas de Córrego do Sítio nas etapas de processamento e metalurgia. Os resultados alcançados incluem aumento da recuperação e suporte para melhorar a estabilidade do processo, correlacionando características geológicas com parâmetros de tratamento de minério.

2. MATERIAS E MÉTODOS

A implementação do Processo Geometalúrgico teve início em 2015, quando os membros da equipe do projeto e os líderes foram selecionados. Empresas foram formalmente contratadas para fornecer serviços, incluindo preparação de amostras de seção polida e caracterização mineralógica. Durante esse período, amostras das minas CDS também foram selecionadas para exploração, como pode ser visto na Tabela 1. Estes corpos foram subdivididos em domínios por controles estruturais principais, litotipo, mineralogia (Figura 2). Amostras de furos foram coletadas e compostas para representar esses domínios. As informações do plano da mina foram usadas para priorizar os testes e correlacionar o teor de ouro planejado para alimentar a planta.

Como passo para construir a base de dados mineralógica utilizada com o software MLA, foi concluída uma etapa completa de caracterização, incluindo análises de microscopia ótica, fluorescência e difração de raios X de todos os litotipos.

Desde o início do trabalho em 2015 até o final de 2017, o projeto foi definido com base no modelo de processo geometalúrgico construído para os principais domínios. O estágio 1 de planejamento compreendeu a seleção de amostras para investigação, instalação de laboratórios e seleção de membros da equipe do projeto.

Tabela 1. Orebodies de Córrego do Sitio utilizados para denominação dos domínios geometalúrgicos

| Corrego do Sitio | |
|------------------|-----------------|
| OREBODIES | Carvoaria Velha |
| | Laranjeiras |
| | Cachorro Bravo |

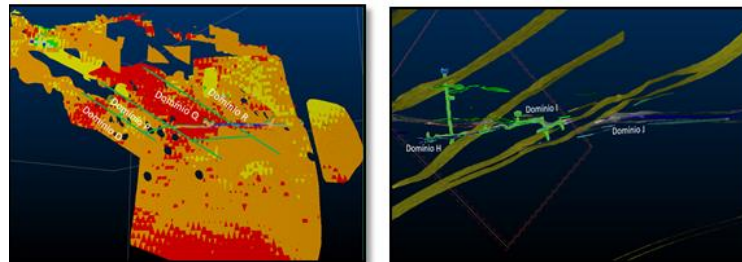


Figura 2. Domínios Geometalúrgicos de CDS

No estágio 02, banco de dados dos minerais foram determinados para as minas de CDS. Para cada domínio, foram realizadas difração de raios X, fluorescência de raios X, microscopia óptica e investigações petrográficas para caracterização adequada. Com o banco de dados mineral em vigor, o trabalho iniciou-se compreendendo testes metalúrgicos e caracterização de cada domínio. Todas essas amostras representam minérios planejados para alimentação da usina de 2015 a 2018 e serviram como base para testes geometalúrgicos.

Os principais parâmetros derivados dos testes geometalúrgicos são a recuperação de ouro e enxofre durante os estágios de processamento, concentração, WI, distribuição granulométrica e composição química, níveis de contaminantes (definidos como matéria carbonácea e Cl), grau de enriquecimento, especificações de moagem, entre outros. Para realização dos testes, um laboratório foi especialmente desenvolvido e comissionado para esta etapa do processo no departamento da metalúrgica. Alíquotas dos produtos de testes foram enviadas para análise usando um microscópio eletrônico acoplado ao software de análise de imagens (Mineral Liberation Analyzer-MLA), cuja mineralogia pode ser relacionada aos resultados dos testes. O fluxo de trabalho pode ser demonstrado pela Figura 3.

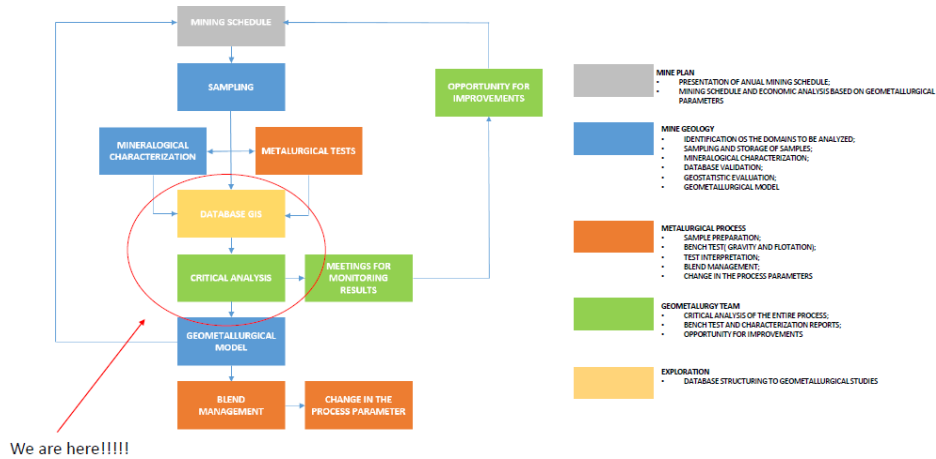


Figura 3. Fluxograma de trabalho da Geometalurgia de Córrego do Sítio

Os dados coletados alimentam o banco de dados da geologia, onde as informações geometalúrgicas são relacionadas aos dados de alimentação da usina. Além dessa rotina, os resultados obtidos são discutidos a cada mês e uma previsão para os próximos meses pode ser feita com base neles. Os problemas exibidos como retroativos são inseridos no banco de dados de oportunidade do site, recebem dedicação exclusiva e são investigados individualmente para identificar oportunidades e obter um melhor entendimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes geometalúrgicos, conforme descrito na seção anterior, são realizados em amostras de furos e canais nas áreas a serem mineradas. Este trabalho foi realizado rotineiramente e continuará durante toda a vida das minas. Com base nos resultados destes testes, que serão apresentados abaixo, é possível correlacionar a recuperação com as características geológicas que suportaram e continuarão a suportar a estabilidade dos processos.

3.1. Testes Metalúrgicos por Domínios

As áreas investigadas foram avaliadas e classificadas em termos de desempenho metalúrgico de acordo com os resultados obtidos nos testes piloto. A Figura 4 mostra as classes de desempenho derivadas dos resultados do teste.

| Mine | Domain | Grade Class | Grav Recovery (%) | Flot Recovery (%) | Leach Recovery (%) |
|----------------|--------|-------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Cachorro Bravo | A | 3 | C | C | B |
| Cachorro Bravo | A2 | 2 | A | B | C |
| Cachorro Bravo | B | 2 | D | C | B |
| Cachorro Bravo | C | 3 | C | A | C |
| Cachorro Bravo | D | 3 | B | B | A |
| Cachorro Bravo | E | 4 | D | A | D |
| Cachorro Bravo | F | 1 | D | B | C |
| Cachorro Bravo | G | 2 | C | A | D |
| Laranjeiras | H | 3 | D | C | C |
| Laranjeiras | I | 4 | C | D | A |
| Laranjeiras | I2 | 3 | C | C | B |
| Laranjeiras | J | 2 | C | D | D |
| Laranjeiras | J2 | 3 | D | C | B |
| Carvoaria | O | 2 | B | D | C |
| Carvoaria | O2 | 2 | A | A | B |
| Carvoaria | P | 4 | C | C | A |
| Carvoaria | P2 | 3 | B | B | A |
| Carvoaria | Q1 | 1 | A | C | D |
| Carvoaria | Q2 | 1 | B | B | D |
| Carvoaria | R | 4 | B | C | B |
| Carvoaria | R2 | 1 | A | D | B |

A: Excellent B: Good C: Bad D: Very Bad

Figure 4. Classificação Geometalurgia da mina de CDS

No estágio de concentração gravimétrica, a recuperação foi maior na área de Carvoaria. Nesta área, as partículas de ouro são maiores e mais facilmente liberadas.

Quanto à flotação, os maiores resultados em termos de recuperação de ouro e enxofre foram relacionados às áreas do Cachorro Bravo. A alta concentração de matéria carbonosa diminui a seletividade do circuito e afeta negativamente a recuperação de minerais de interesse. Nessas áreas, como Laranjeiras e Carvoaria, os filossilicatos estão amplamente presentes e partículas livres de ouro são vistas associadas a esses minerais, como mostra a Figura 5 - A. O ouro muito fino e liberado foi um problema detectado nesses domínios, principalmente no Laranjeira. Isso afetou diretamente a recuperação de ouro na flotação. Outro problema encontrado foi a baixa recuperação de sulfetos com cinética de flotação mais lenta. No domínio da Carvoaria e Laranjeira a variabilidade dos tipos de sulfetos e fontes de ouro é alta e isso pode afetar a cinética de flotação (Figura 5-B). Esses dois pontos foram abordados separadamente por meio de pesquisas e testes exploratórios. Alternativas para aumentar a recuperação foram identificadas, como o uso de um reagente de formação de espuma mais seletivo, a adição de um coletor "mais forte" projetado especificamente para sulfetos de cinética lenta.

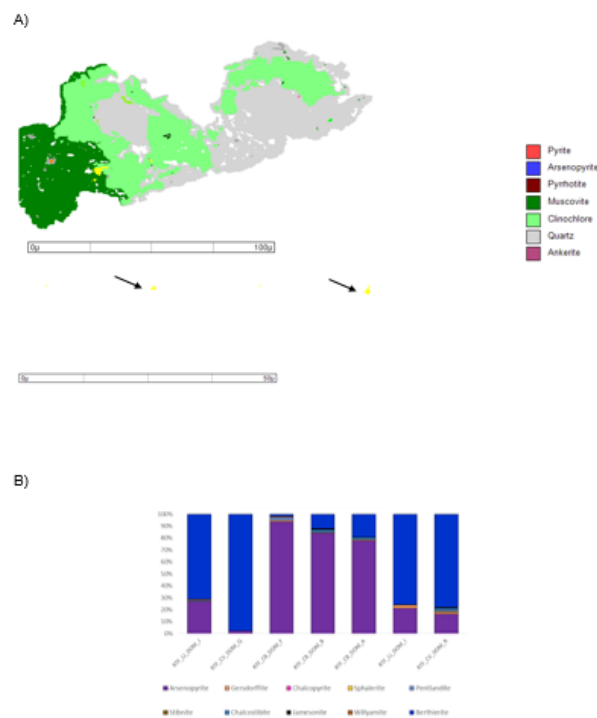


Figure 5. Imagens eletrônicas falsa cor a) Au associado com minerais gangas, finos e liberados no rejeito da flotação b) Variação nos tipos de sulfetos por domínio geometalúrgico

O impacto na lixiviação é maior nos domínios da Cachorro Bravo. A caracterização mostra que a variabilidade das associações das partículas de ouro nessa área é alta e a principal forma é de difícil acesso ao cianeto, baixa oxidação (Figura 6), incluso e pouco liberado.

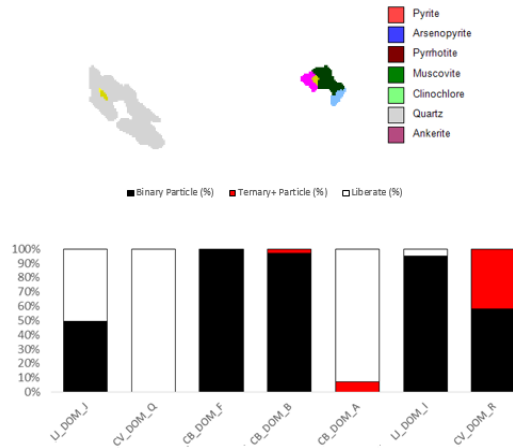


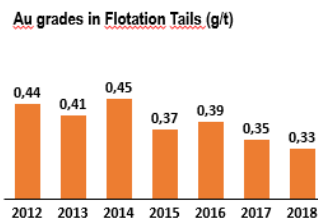
Figure 6. Imagem falsa cor do ouro incluído e seu grau de liberação por domínio geometalúrgico

3.2. Resultados

O trabalho geometalúrgico já produziu ganhos significativos em termos de aumento na recuperação de ouro e enxofre, principalmente devido à redução do teor de ouro no rejeito da flotação, como mostrado na Figura 7.

No segundo semestre de 2015, a dosagem de um reagente coletor foi incluída no circuito industrial com foco nos sulfetos de cinética mais lenta. No final daquele ano, o agente espumante usado na flotação foi alterado por um mais seletivo para aumentar a recuperação de partículas finas de ouro. No segundo semestre de 2016 a distribuição dos pontos de adição de coletores e ativadores foi alterada para aumentar o tempo de condicionamento.

A)



B)

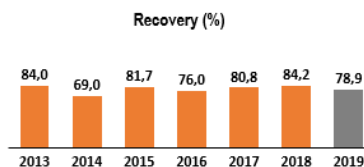


Figure 7. A) Evolução do teor do rejeito da flotação e B) Evolução da recuperação de Au após implementação dos processos geometalúrgicos

Essas etapas foram fundamentais para reduzir o teor de ouro no rejeito de flotação, de 0,4 g/t, para 0,3 g/t, ver figura 8-A. Além dos ganhos de recuperação, vale destacar a

melhora significativa na seletividade do circuito de flotação (Figura 8-B). Novas etapas, como a lixiviação de rejeitos de flotação, já foram inseridas no circuito e foram baseadas neste estudo. A adição deste passo também leva ao aumento da recuperação.

O estudo de hoje é uma rotina do processo e são bases para melhorias e inovações no processo de extração de Au da AngloGold Ashanti Brasil.

4. CONCLUSÕES

Uma nova abordagem foi inserida na rotina do complexo CDS, em que informações geológicas são correlacionadas com parâmetros de tratamento de minério. Os efeitos positivos do estudo geometalúrgico já podem ser vistos nas melhores taxas de produção e qualidade, maior previsibilidade da qualidade do minério e nas melhorias já implementadas no circuito de flotação. O uso de novos reagentes e alterações nos pontos de adição resultaram em um aumento na recuperação de ouro e enxofre no circuito de flotação, com uma redução no teor de ouro e enxofre nos rejeitos de flotação de aproximadamente 0,4 g/t para 0,30 g/t. Além disso, nota-se que a seletividade melhorada permitiu atingir o grau de concentrado de flotação especificado, mesmo com a queda significativa no teor de Au da alimentação.

A compreensão do comportamento geometalúrgico gera informações que devem ser usadas para contribuir com o planejamento estratégico de um projeto, tornando-se essencial para a tomada de decisões.

5. REFERÊNCIAS

Chauvet, A. Gold Deposit Formation during Collapse Tectonics: Structural, Mineralogical, Geochronological, and Fluid Inclusion Constraints in the Ouro Preto Gold Mines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, v. 96, p. 25-48, 2001.

Ciminelli, V.S.T.(2005). Tendências Tecnológicas em Hidrometalurgia. *Revista Brasil Mineral*, 256, novembro, pp. 80-92.

Dunham S. & Vann J. 2007. Geometallurgy geostatistics and project value does you block model tell you what you need to know? *Australasian Institute of mining and metallurgy*. In: Project Evaluation Conference Goldfarb, R. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology Reviews*, v. 18, p. 1-75, 2001.

Figueira, H. V. O.; Almeida, S. L. M. e Luz, A. B. Cominuição. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de Minérios*. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.113-182.

Sales, M. The Geological Setting of the Lamego Banded Iron-Formation-Hosted Gold Deposit, Quadrilátero Ferrífero Distric, Minas Gerais-Brazil.1998 182 f. Dissertação (mestrado), Queen's Universit.

JK tech. Geometallurgy - Optimising Resource Value –