



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
TCE - Escola de Engenharia
TEM - Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO II

Título do Projeto :

ANÁLISE DOS EFEITOS DA TROCA DE CORPO MOEDOR NO CUSTO DAS ETAPAS DE MOAGEM E FLOTAÇÃO NO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO

Autor :

MARINA MORAES CHAVES

Orientador :

Prof. OSVALDO LUIZ GONÇALVES QUELHAS, D. Sc.

Data : 22 de Março de 2016

MARINA MORAES CHAVES

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA TROCA DE CORPO MOEDOR
NO CUSTO DAS ETAPAS DE MOAGEM E FLOTAÇÃO NO
BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal Fluminense, como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador:

Prof. OSVALDO LUIZ GONÇALVES QUELHAS, D. Sc.

Niterói

2016

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

C512 Chaves, Marina Moraes

Análise dos efeitos da troca de corpo moedor no custo das etapas de moagem e flotação no beneficiamento de minério / Mariana Moraes Chaves. – Niterói, RJ: [s.n.], 2016.

32 f.

Trabalho (Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, 2016.

Orientador: Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas.

1. Beneficiamento de minério. 2. Moagem (Beneficiamento de minério). 3. Flotação (Beneficiamento de minério). I. Título.

CDD 622.7



PROJETO DE GRADUAÇÃO II

AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO

Título do Trabalho:

ANÁLISE DOS EFEITOS DA TROCA DE CORPO MOEDOR NO CUSTO DAS ETAPAS DE MOAGEM E FLOTAÇÃO NO BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO

Parecer do Professor Orientador da Disciplina:

- Grau Final recebido pelos Relatórios de Acompanhamento:

- Grau atribuído ao grupo nos Seminários de Progresso:

Parecer do Professor Orientador:

maquina demonstrou persistencia, curiosidade e precisão na busca do conteúdo.

Nome e assinatura do Prof. Orientador:

Prof. OSVALDO LUIZ GONÇALVES QUELHAS, D. Sc. Assinatura.

Parecer Conclusivo da Banca Examinadora do Trabalho:

Projeto Aprovado sem restrições

Projeto Aprovado com restrições

Prazo concedido para cumprimento das exigências: *30/04/16*

Discriminação das exigências e/ou observações adicionais:



PROJETO DE GRADUAÇÃO II

AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO (continuação)

Aluno: Marina Moraes Chaves Grau: 9,0 (noce)

Composição da Banca Examinadora:

Prof.: OSUALDO L. G. Ovelhas	Assinatura
Prof.: BRUNO AMPOS PEDROZA	Assinatura
Prof.: SERGIO LUIZ B. FRANCA	Assinatura

Data de Defesa do Trabalho : 22/03/16

Departamento de Engenharia Mecânica, / /

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a minha família, início da minha formação, que agora tem mais uma etapa concluída. Ela que sempre esteve ao meu lado, me incentivando, apoiando e dando força para que não desistisse nos momentos de dificuldade.

Queria deixar um muito obrigada especial para os meus pais, Mário e Míriam e meus irmãos Rafael e Tiago que sempre confiaram em mim até nos momentos que nem eu mesma confiei, por serem meu pilar de segurança. Vocês são o que eu tenho de essencial na minha vida, amo vocês.

Aos meus amigos da faculdade que compartilharam conosco essa jornada e tornaram os momentos mais difíceis menos penosos, o meu muito obrigado. Quero agradecer aos meus amigos Pilar Lobianco, Clara Chaves, Fernanda Marques, Maria Clara Mello, Eduarda Figueira e Roberto Franco por entenderem as minhas faltas para me dedicar à faculdade. Vocês são pessoas especiais que completam a minha vida.

Eu gostaria de fazer um agradecimento especial aos meus colegas de área no estágio: Roberto Oliveira, Ana Murga, Mariana Costa, Daniel Serpa, Rafael Cabral, Ana Marinho e Leonardo Fiuza por contribuírem para o meu crescimento profissional e humano e por mostrarem que é possível encontrar verdadeiros amigos no trabalho.

Ao Victor Cautela gostaria de agradecer do fundo do meu coração por dividir esse percurso comigo, primeiro como amigo e depois como namorado, me apoiando nos momentos de crise e dividindo comigo o peso do dia a dia da faculdade, tornando-o mais leve e divertido. Sem o seu apoio tudo isso teria sido muito mais difícil e penoso.

Às empresas e seus colaboradores que nos auxiliaram no estudo por toda atenção, ajuda e disponibilidade. Sem essa contribuição não seria possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Osvaldo Quelhas, por todo auxílio dado e disponibilidade em nos atender sempre que necessário.

RESUMO

É notória a importância da mineração na economia e para indústria brasileira. Em épocas de crise econômica como a que vivemos, a estagnação no desenvolvimento dos países força a diminuição da demanda do minério. Para se manterem lucrativas as mineradoras devem tomar decisões competitivas e sustentáveis no mercado otimizando o custo da produção. Com o objetivo de alcançar essa meta de otimização é importante fazer uma análise da cadeia de produção como um todo, desde a extração do minério, passando pelo seu processamento até a entrega do produto final, de modo que todas as etapas conversem entre si para melhor compreensão do que impulsiona o custo da produção final, ou seja, o que importa é o custo total e não o custo parcial de cada uma delas. Considerando esse cenário, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar a aplicação desse conceito, comparando o efeito do custo final das etapas de moagem e flotação no processo de beneficiamento de minério separadamente e em uma planta de mineração de cobre na Austrália. Com esse modelo foi possível analisar não só o impacto da escolha do corpo moedor nos custos como também na produtividade da planta. As ações propostas são alternativas viáveis de serem realizadas e têm como intuito melhorar o desempenho da empresa.

Palavras-Chave: Mineração; otimização; moagem; flotação

ABSTRACT

The mining sector is prominent in the Brazilian economy and manufacturing industry. In times of economic crisis, as we currently experience, stagnation generate decrease in ore demand. In order to keep lucrative, miners should seek to take competitive and sustainable decisions, optimizing production cost. Having given objective of optimization in mind, it's important analyze the production chain as a whole, since the extraction of the ore, to its processing, until final product delivery to see how which part of the process interact with the following step. Such analysis allows all steps to be taken into consideration and communicate to each other for a better understanding of what drives the cost of final production; i.e., what matters is the total cost and not the partial cost of each stage. Considering this scenario, this study aims to analyse the implementation of this concept, comparing the effects off grinding media at milling and flotation cost using a case study at an Australia's production os copper. Having such model made an analysis possible, comprehending the impact griding media's choice, which are the steps that suffer major impacts on costs and productivity and what may be the overall results in the production as a whole. The actions proposed are viable alternatives to be performed and intend to improve the company's performance.

Key-Words: *Mining; optimization; miling; flotation*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: PIB mundial e produção da mineração 1992 – 2012, f.18*
Figura 2: Gráfico da evolução da produção Mineral Brasileira (PMB), f.20
Figura 3: Regime Catarata, f.22
Figura 4: Regime Cascata, f.22
Figura 5: Processo de flotação, f.24
Figura 6: Corrosão do corpo moedor, f.27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise comparativa de custo e produtividade das etapas de moagem e flotação para bolas forjadas e de alto cromo, f. 30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

- 1.1 CONTEXTO 12
- 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO 13
- 1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA: 13
- 1.4 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA 14
- 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO 15

2 REVISÃO DA LITERATURA 16

- 2.1 A INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO 16
 - 2.1.1 A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO NO MUNDO 17
 - 2.1.2 A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO NO BRASIL 19
 - 1.1 20
- 2.2 PROCESSO DA MINERAÇÃO 20
 - 2.2.1 MOAGEM 21
 - 2.2.2 FLOTAÇÃO 22

3. METODOLOGIA 25

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 26

- 4.1 ESCOLHA DO CORPO MOEDOR 26
- 4.2 EFEITOS DA MOAGEM NA FLOTAÇÃO 28
- 4.3 ESTUDO DE CASO 28
 - 4.3.1 DESCRIÇÃO GERAL DAS EMPRESAS 29
 - 4.3.2 DESENVOLVIMENTO DO TESTE 29
- 4.4 RESULTADOS 30

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS 32

- 5.1 ANÁLISE CRÍTICA DA PESQUISA 32
- 5.2 SUGESTÃO DE NOVOS ESTUDOS 33

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS (EM ORDEM ALFABÉTICA) 34

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A mineração foi e permanece sendo imprescindível para o desenvolvimento da vida moderna. Ela atua como geradora de matéria prima para diversos setores como o civil, de telecomunicações e aeroespacial. É notória a importância desse setor na economia e para indústria brasileira. Em épocas de crise econômica como a que vivemos, a estagnação no desenvolvimento dos países força a diminuição da demanda do minério.

Segundo o instituto brasileiro de mineração (IBRAM¹), no Brasil a queda do preço do minério chegou a 50% em 2014, acompanhada do aumento de toneladas produzidas de bens minerais. Segundo (Andrew Mackenzie, 2015), a mineração é “um mercado altamente competitivo e cíclico, onde o desempenho de lucro acima da média durante o ciclo depende em ser o fornecedor mais eficiente, não em restrição da oferta”.

Buscando tal eficiência as empresas devem tomar decisões competitivas e sustentáveis no mercado otimizando o custo da produção, que “pode ser traduzida pela maximização do lucro ou pela minimização do custo” (Goldberg e Luna, 2000). A KPMG Internacional, durante a pesquisa que elenca os pontos importantes que as empresas do setor devem considerar para implantar programas de redução de despesas sem deixar de lado a lucratividade e competitividade, analisou que “o cenário hoje é bem diferente do passado, quando as mineradoras alcançavam resultados históricos e não se preocupavam com custo. Aqui, no Brasil, é visto a redução de muitos investimentos atrelados também à discussão do novo marco. Atualmente, com o consumo em baixa e com a queda do preço do minério, a otimização é realmente a única saída para as empresas enfrentarem os desafios do mercado e se manterem fortes diante dos concorrentes.”.

Com o objetivo de alcançar essa meta de otimização, um dos processos cabíveis é o *Mining to Plant*. Ele se baseia numa análise da cadeia de produção como um todo, desde a extração do minério, passando pelo seu processamento até a entrega do produto final, de modo que todas as etapas interagem entre si para melhor compreensão do que impulsiona o custo da produção final, ou seja, o que importa é o custo total e não o custo parcial de uma delas.

¹ Instituto Brasileiro de Mineração

Uma opção para aplicação do processo, objeto do presente estudo, é a avaliação do tipo do corpo moedor que será utilizado na etapa de moagem, não só considerando os efeitos e custos dessa etapa como também as consequências que essa escolha acarreta na etapa seguinte, a etapa de flotação.

Dado o exposto, este trabalho tem como objetivo principal estudar o processo de produção de minério, com foco nas etapas de moagem e flotação, de maneira a identificar qual corpo moedor traz maiores vantagens comerciais e produtivas.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o processo de produção de minério de maneira a identificar formas de otimização da cadeia de processos, focando na etapa de moagem e flotação, analisar os ganhos da alteração do corpo moedor de forjado para fundido de alto cromo no custo final da produção. Em relação aos objetivos específicos, estes podem ser sintetizados como:

- Entender o cenário do setor de mineração e a importância da otimização de seus processos;
- Detalhar os processos da mineração e beneficiamento do minério com foco nas etapas de moagem e flotação;
- Análise preliminar para detectar oportunidades de otimização de processos da moagem para aumentar a performance dos equipamentos, aumentar a taxa de recuperação do cobre na etapa de flotação e melhorar o desempenho dos processos da usina.
- Analisar um projeto de implementação dessa troca, que obteve sucesso.
- Elaborar uma tabela com os resultados apresentados, demonstrando o ganho da troca.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA:

O presente trabalho tem o propósito de analisar a troca de corpo moedor de forjada para fundido de alto cromo, implantado em uma mina de cobre na Austrália, projetando os impactos da aplicação desse processo nos custos das etapas de moagem e flotação, além da produtividade da mesma.

No que se refere à abrangência geográfica da pesquisa, a mesma estará limitada ao estudo de caso em uma planta de mineração de cobre situada na Austrália.

Quanto à realização da pesquisa de campo, a mesma ocorreu entre os meses de maio a dezembro de 2015. No entanto, os dados analisados são referentes ao período de julho de 2014 a junho de 2015.

Por último, é importante ressaltar que este estudo será baseado em uma única empresa do setor de mineração e por esse motivo, não se pode supor que outras empresas do mesmo ramo atuem de maneira semelhante à retratada no trabalho em questão. Desse modo, os resultados obtidos não devem ser entendidos como uma verdade absoluta na indústria.

1.4 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

O presente trabalho pode ser relevante para os estudiosos que desejam compreender através da literatura, como pode ser realizada a otimização de uma planta de mineração de cobre e como determinadas alterações no processo de extração do minério podem afetar o custo total da produção.

O Engenheiro Mecânico caracteriza-se por sua versatilidade, podendo atuar em ramos tais como o de Pesquisa e Desenvolvimento, Controle de Qualidade, Engenharia de Projetos e de Processos e Produção, além de poder conduzir equipes de instalação, montagem, operação, reparo ou manutenção. Assim, possui as características necessárias para planejar alterações na cadeia produtiva, buscando a otimização dos processos da empresa através da análise dos efeitos mecânicos que essas alterações trazem para cada etapa da cadeia.

Além dos pontos citados acima, pode-se ressaltar que este estudo está dentro das atribuições relacionadas à profissão de Engenheiro Mecânico, listadas pelo Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA) em seu site² desde que sejam “referentes a processos mecânicos, máquinas em geral; instalações industriais e mecânicas; equipamentos mecânicos e eletro-mecânicos; veículos automotores; sistemas de produção de transmissão e de utilização do calor; sistemas de refrigeração e de ar condicionado; seus serviços afins e correlatos”. Dentre as atividades citadas estão:

- Estudo, planejamento, projeto e especificação;

² Site CONFEA:

< <http://normativos.confea.org.br/ementas/visualiza.asp?idEmenta=266&idTipoEmenta=5&Numero=>>. Acesso em 14/03/2014

- Estudo de viabilidade técnico-econômica
- Elaboração de orçamento;
- Padronização, mensuração e controle de qualidade.

Dado o exposto, pode-se observar que o conteúdo deste trabalho está relacionado à Engenharia Mecânica e, portanto, pode contribuir para conhecimento dos profissionais da área no que diz respeito ao objetivo da pesquisa.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo está dividido em 5 capítulos. A seguir será apresentado o conteúdo de cada um deles.

O capítulo 1 aborda o contexto da pesquisa, os seus objetivos, assim como a relevância e delimitação do estudo.

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura com o intuito de fornecer ao leitor a base teórica necessária ao entendimento da pesquisa.

O capítulo 3 descreve a metodologia de pesquisa que será utilizada, detalhando os passos que serão seguidos para alcançar os objetivos e responder às questões do estudo.

O capítulo 4 primeiramente analisa as características dos corpos moedores para escolha na etapa de moagem. Em seguida, descreve quais são os efeitos do produto da moagem na etapa da flotação, para enfim demonstrar e analisar os resultados obtidos com a troca do corpo moedor.

O capítulo 5 apresenta a conclusão da pesquisa e contempla a análise crítica do trabalho, onde é avaliado se o estudo desenvolvido responde aos objetivos e às questões levantadas. Ao final, o capítulo apresenta sugestões de novas pesquisas que possam ser realizadas a partir do tema tratado neste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados assuntos relevantes ao entendimento do estudo, responder às questões e aos objetivos da pesquisa. Assim, primeiramente será feito um breve histórico sobre a indústria de mineração no Brasil e no mundo, como forma de evidenciar a importância deste setor na economia global. Em seguida, serão introduzidas as etapas de moagem e flotação, bem como suas relevâncias dentro da cadeia de produção de minério.

2.1 A INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO

Cerca de 50 países do mundo, muitos dos quais de baixa e média renda, são fortemente dependentes das atividades de mineração e metais. Para os vários milhões de pessoas que moram nesses países, a mineração é imprescindível à geração dos meios econômicos para o alcance de suas aspirações sociais. (IBRAM, 2013)

A busca por minerais tem constituído um desafio para o homem. A sedução exercida pelo ouro, a prata e os diamantes, determinou movimentos migratórios. No mundo ocidental, as minas de carvão da Inglaterra, da Alemanha e de outros países, representaram as bases nas quais foram montadas as primeiras estruturas industriais modernas, seguindo-se os EUA, com o petróleo e o aço. Bens de capital, sob a forma de maquinaria, material ferroviário, etc., eram transferidos para as regiões em que houvesse minerais em abundância. E, fora da Europa e da América, nos continentes mais distantes onde fossem descobertas jazidas economicamente rentáveis, de cobre, de estanho, de petróleo, ali se aplicavam grandes investimentos para a exploração dessas riquezas. (DNPM-PE³)

Modernamente, a mineração é uma atividade cara e complexa. Tem início com a localização de jazidas minerais, o que se faz por mero acaso ou cientificamente, através de estudos geológicos regionais, seguidos por mapeamento geológico de detalhe da área selecionada. Uma vez confirmada a existência de jazidas mineral, passa-se a realizar a pesquisa mineral. Nesta fase, faz-se uso de vários trabalhos e técnicas, quais sejam: sondagens, poços de pesquisa, trincheiras, etc., bem como a eventual aplicação de métodos de prospecção geofísicos e/ou geoquímicos. Todo esse trabalho visa confirmar, com um nível razoável de segurança, a existência da jazida, seu condicionamento geológico (extensão, comportamento estrutural, teores do minério, etc.) e, sobretudo, calcular as reservas do

³ Site DNPM-PE:
<<http://www.dnpm-pe.gov.br/index.htm>>. Acesso em 15/01/2016

minério em foco e sua economicidade. Só depois de qualificado e quantificado o minério e determinada a sua exequibilidade econômica, é que se deve dar início a atividade de mineração propriamente dita: extração e beneficiamento do minério. (DNPM-PE)

A mineração apresenta uma série de características especiais, inclusive as seguintes: (1) horizonte de longo prazo, (2) necessidade de mão-de-obra qualificada e não qualificada, (3) vínculos com a infraestrutura regional e a criação de serviços, (4) a importância dos produtos que gera. A mineração também enfrenta uma série de difíceis desafios ambientais e sociais ao longo do caminho. (IBRAM, 2013)

2.1.1 A indústria de mineração no mundo

A atividade da mineração existe desde o tempo que o homem retirava do solo a argila e as rochas para a produção de armas e artefatos de corte. A partir de então o desenvolvimento da mineração caminha junto com o desenvolvimento do homem e da sociedade, pois a exploração e tratamento dos minerais é a atividade base para o progresso industrial e do comércio.

Durante a Idade Antiga os vales do Tigres, Eufrates e Nilo foram a casa das principais culturas da época e grandes usuárias de metais, como ouro e cobre. Do Egito e da Mesopotâmia, o conhecimento do trabalho com metais, se espalhou pela Europa. O cobre foi substituído pelo bronze pela época de 1500 BCE, melhorando significativamente a qualidade das ferramentas. O uso de ferro só passou a ser difundido a partir de 1400 BCE. (Graham C. e Evans V. 2007)

O italiano Georgius Agricola foi quem melhor descreveu as antigas técnicas de mineração no seu livro “*DE RE METALLICA*” publicado em 1556.

Um dos desenvolvimentos mais interessantes de se observar no passado da mineração foi o crescimento do minerador, de escravo nos antigo Egito e Roma para homem livre na Idade Média, às vezes até com alguns privilégios, como ser isento do serviço militar ou tributação. (Graham C. e Evans V. 2007).

No século XIX a mineração mais uma vez teria forte importância nas mudanças que a sociedade estava vivendo com a Revolução industrial. A população estava abandonando a vida agrícola para a vida urbana, as famílias iam trabalhar nas fábricas ou nas minas de

carvão, que como era base da produção de energia para as indústrias que estavam surgindo, se disseminaram rapidamente pela Europa.

Hoje, apesar do apelo mundial por novas fontes de energias mais limpas e renováveis, o carvão continua sendo uma das fontes mais utilizadas. O desenvolvimento da indústria, não só levou a mineração do carvão para esse patamar, como fez crescer rapidamente na última década, o papel da mineração na economia global. Em 2012, o valor da produção global da mineração era 6 vezes maior que em 2000 e 60% mais alta que em 2008. Esse aumento pode ser justificado pelo, sem precedente, crescimento da demanda de metais por parte da China, Índia e outros países emergentes. (ICMM, 2014⁴)

Na Figura 1, vemos um comparativo durante a última década do crescimento do valor da produção da mineração e o crescimento do PIB mundial.

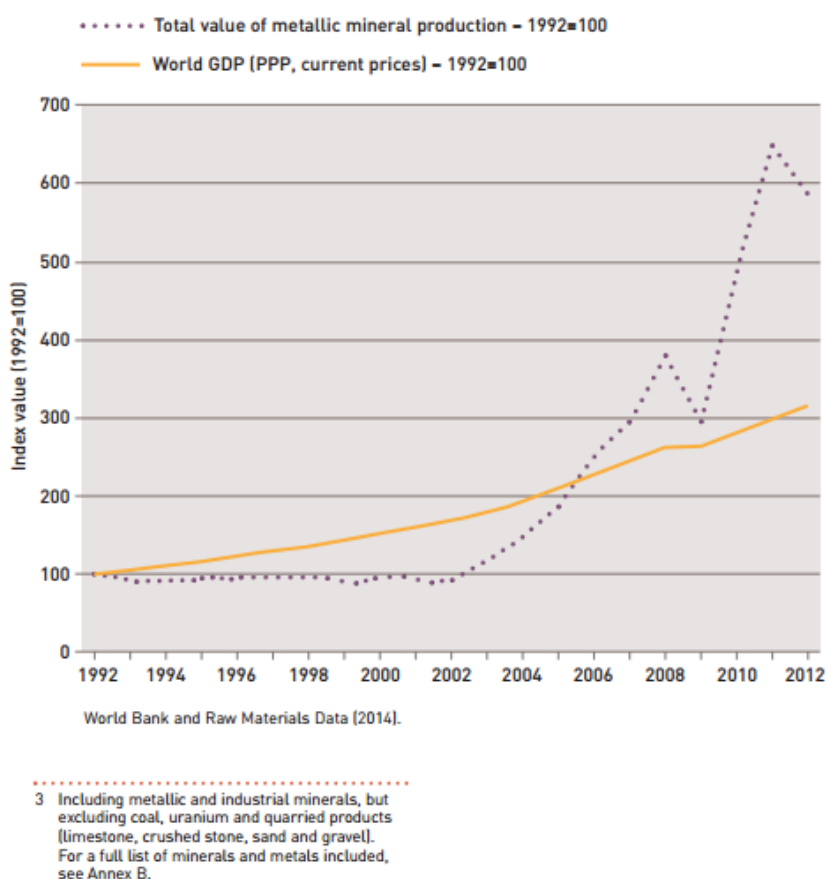


Figura 1: PIB mundial e produção da mineração 1992 - 2012

Fonte: O papel da mineração nas economias nacionais, 2ª edição, outubro de 2014

⁴ Conselho Internacional de Mineração e Metais

2.1.2 A indústria de mineração no Brasil

No início da nossa colonização as principais demandas de minerais eram argila, areia e cascalho para construção, e a quantidade de material que era extraído era muito pequena e as técnicas muito rudimentares. Apenas no fim do século XVII, o Brasil começou a investir em mineração, quando houve a queda das exportações do açúcar e descoberta das primeiras minas de ouro no país. Até o século XIX, era muitíssimo pequena a produção do ferro no Brasil, existindo apenas algumas forjas catalãs em Minas Gerais.

Em 1942, o então presidente Getúlio Vargas criou a Companhia Vale do Rio Doce, para impulsionar a exploração das riquezas minerais do subsolo brasileiro, principalmente o ferro na região de Minas Gerais. Em 1967, houve a descoberta de minério de ferro na serra dos Carajás no Pará, que futuramente abrigaria o Projeto Grande Carajás.

As minerações a céu aberto fora do Brasil, notadamente nos Estados Unidos, Canadá, África do Sul e Austrália, tiveram um desenvolvimento, de modo geral, mais harmônico por terem tido muitas delas uma decisão arrojada, desde sua implantação, de utilizar equipamentos mais adequados em menor número e de maior porte. O Brasil, sempre foi muito limitado nas decisões para equipar as minas, desde o seu início, tendo em vista os elevados investimentos necessários para se adquirir os equipamentos mais adequados e à pouca capacidade de se levantar os empréstimos externos a juros mais baixos. Quase todas as nossas minas foram sendo modernizadas com o tempo, convivendo-se por longos períodos com os equipamentos existentes, muitas vezes inadequados para a nova escala de lavra estabelecida. Com raríssimas exceções, foram introduzidos equipamentos de última geração nas minas brasileiras, sem que antes tenham sido testados em minas no exterior. (ICMM, 2013)

Segundo o relatório anual do IBRAM, a estimativa era que a Produção Mineral Brasileira (PMB) atingisse, em 2014, US\$ 43 bilhões. Consta que este valor foi de US\$ 40 bilhões, e foi estimado em US\$ 38 bilhões o valor para 2015. O decréscimo é reflexo de uma redução nos preços internacionais das *commodities* minerais e da queda da atividade mineral no país e no mundo. No entanto, não significou, no Brasil, decréscimo de produção. Como a PMB é uma média aritmética do preço do bem mineral x sua produção, este valor em dólares sofreu impacto direto pelos preços internacionais das principais *commodities* negociadas no Brasil, como minério de ferro, ouro, cobre, níquel, zinco, bauxita.

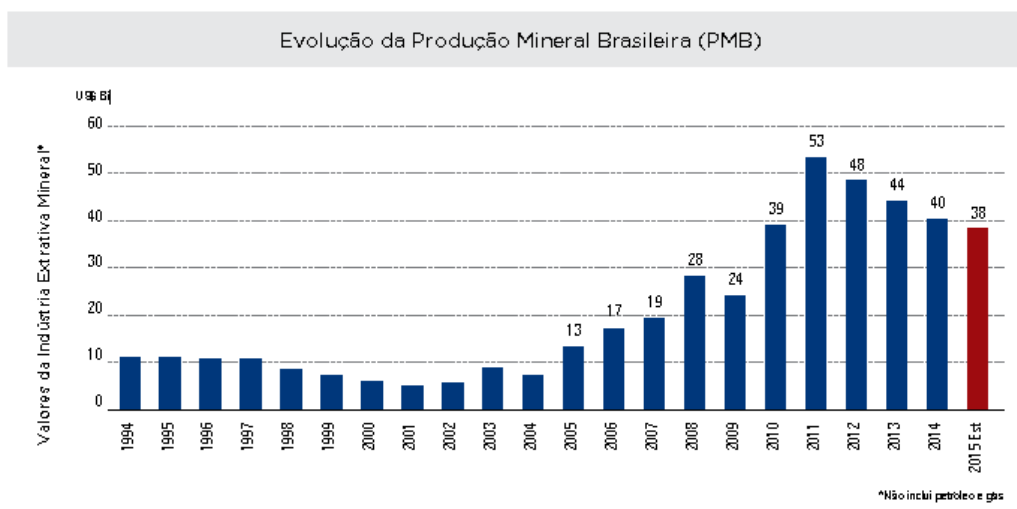


Figura 2: Gráfico da evolução da produção Mineral Brasileira (PMB)

Fonte: Relatório Anual IBRAM Julho de 2014 – Maio de 2015

2.2 PROCESSO DA MINERAÇÃO

O processo de mineração pode ser dividido em duas grandes partes: o desmonte, que é a extração do minério da natureza através de explosões e escavadeiras e a segunda parte do processo, que é denominada beneficiamento do minério, onde o produto do desmonte passa por vários processos até chegar na forma e granulometria final desejada para o consumo.

O beneficiamento do minério é dividido em 4 etapas: a britagem, a moagem, a classificação e a flotação. A britagem e a moagem são chamadas de cominuição do minério sendo, a primeira responsável pela primeira fragmentação. Feita por britadores, ela diminui a granulometria do material para a alimentação dos moinhos. Esses são os equipamentos que fazem a moagem, onde é feita a chamada fragmentação fina e onde ocorre a última redução granulométrica do minério.

A etapa de classificação é feita entre as etapas de cominuição, e é responsável por separar as partículas por tamanho, geralmente utilizando peneiras vibratórias e ciclones. A última etapa do processamento do minério é a flotação, onde ocorre a separação dos minerais desejados dos indesejados, através de reações químicas com reagentes específicos, denominados coletores.

Como o atual trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da etapa de moagem e flotação, essas duas etapas serão mais aprofundadas a seguir.

2.2.1 Moagem

Como foi falado anteriormente, a moagem faz parte do processo de cominuição do minério, que é como Taggart e Wills definiram, o processo de redução gradual da granulometria, também responsável por liberar o material preparando a superfície das partículas que interessam para as operações concentração. (Rosa 2013)

Na moagem, a fragmentação é realizada por forças de abrasão e impacto causadas pela ação de um corpo em queda livre. (Rosa 2013)

Essa etapa normalmente é feita em moinhos, que nada mais são do que tambores rotativos, que possuem uma carga cadente formada pelo minério e os corpos moedores que tem várias formas e materiais, mas os mais comuns são as bolas fundidas de alto e baixo cromo e as bolas forjadas. (Rosa 2013)

Quando o tambor roda produz uma força centrífuga que eleva as bolas que depois descem para moer o material. É nesse momento que ele sofre o impacto e ou abrasão do contato com as bolas, dependendo da velocidade de rotação do moinho. Para a chamada moagem grossa, normalmente é feita com uma velocidade de rotação mais alta e com corpos moedores maiores, causando um fenômeno na trajetória do corpo moedor denominado catarata, quando a bola de moinho alcança uma determinada altura ela é projetada sobre as outras bolas e a polpa (Figura 3) que causa a fragmentação por impacto. Quando a carga do moinho desliza sobre ela mesma a trajetória é chamada de cascata (Figura 4), que decorre de uma baixa velocidade de rotação e um alto fator de enchimento causando a fragmentação do material por abrasão, normalmente mais indicada para a moagem fina. (Rosa 2013)

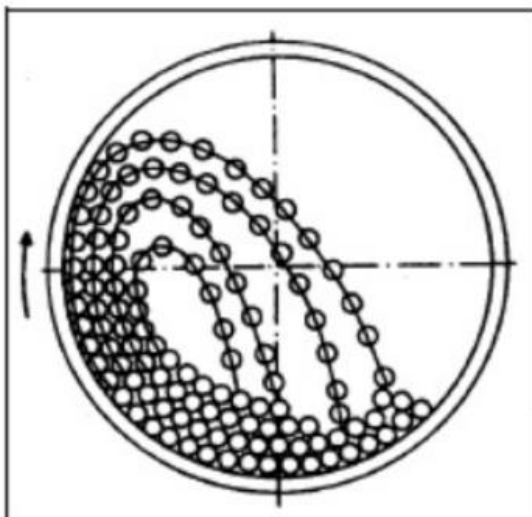


Figura 3: Regime Catarata
Fonte: Rosa 2013

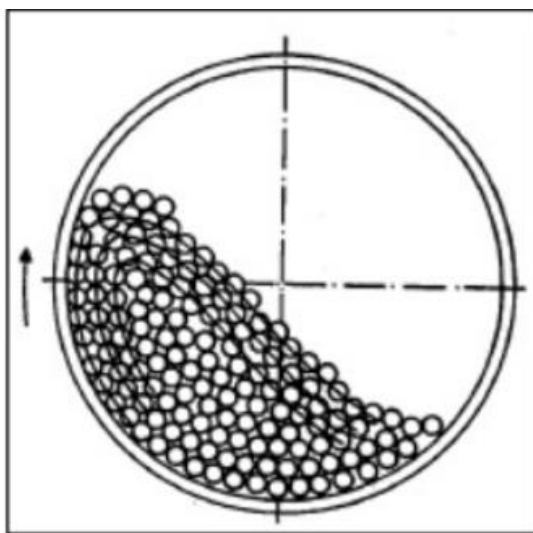


Figura 4: Regime Cascata
Fonte: Rosa 2013

Esta etapa é a mais dispendiosa no processamento do minério, por isso segundo Rosa (2013), o grau de cominuição de um minério deve ser fixado tendo em vista a otimização de uma função econômica que considere os custos de moagem, a taxa de produção, a recuperação final do mineral útil e o teor de concentrado.

2.2.2 Flotação

É nessa etapa que ocorre a separação das partículas de interesse, suspensas na polpa (fase aquosa). Isso ocorre, alterando a superfície do material a ser flotado, adicionando reagentes e tornando-a hidrofóbica. Assim, elas aderem às bolhas de ar introduzidas na polpa sendo carregadas até a camada de espuma, separando-se do material que permaneceu hidrofílico. (Brod, 2012)

A química da interface é comandada pelos reagentes da flotação. Para que uma partícula possa ser flotada, são necessários três requisitos sejam satisfeitos: liberação, diferenciabilidade e separabilidade dinâmica. (Brod, 2012)

Entende-se por liberação, o nível de exposição do mineral de interesse (Brod, 2012). Sendo assim, o tamanho dos grãos e a forma como estão dispostas em uma partícula são fundamentais para o sucesso da flotação, porque vai exatamente definir o nível de liberação do material e é por essa razão que as fases de cominuição e as decisões tomadas interferem na etapa de flotação, porque é nelas que o grão vai adquirir essas características.

Na maioria das vezes, o material que desejamos separar não é hidrofóbico. Para conferir essas características ao material e assim possibilitar a separação, se faz necessário a adição de reagentes químicos, que se adsorvam preferencialmente na superfície do mineral, modificando as propriedades do ângulo de contato da superfície e tensão superficial. Existem inúmeros reagentes orgânicos que atuam como coletores, quando atuam na interface sólido-líquido e como espumante quando atuam na interface ar-líquido. (Brod, 2012)

O processo de flotação ocorre devido a formação do agregado partícula-bolha e o seu transporte até a camada de espuma, onde ocorre a raspagem por meio de pás mecânicas. Na Figura 5 temos um esquema do processo.

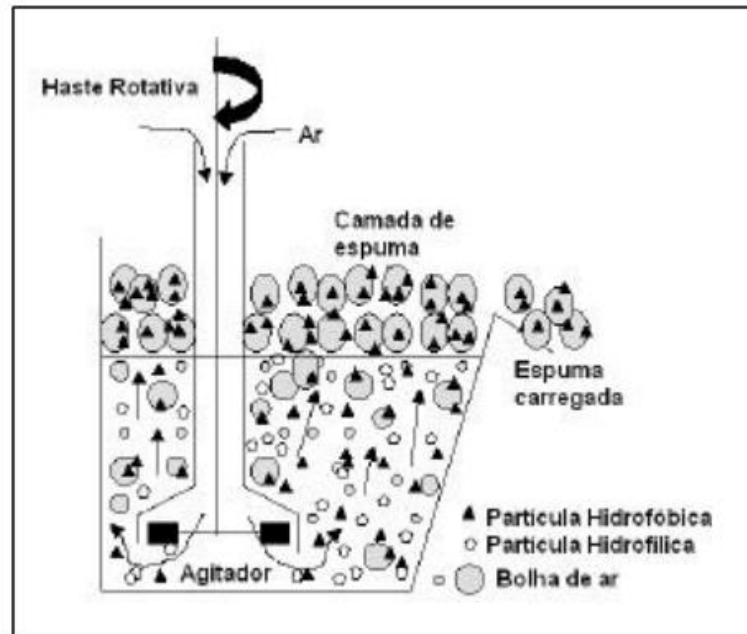


Figura 5: Processo de flotação
Fonte: Loyola 2006

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, a pesquisa foi desenvolvida através de duas abordagens: a teórica e a empírica. A primeira consiste no levantamento, através da literatura, de temas que sejam relevantes para o entendimento da pesquisa e que possam auxiliar no atendimento aos objetivos da mesma.

A segunda consiste em um estudo de caso, que consistiu no acompanhamento de um teste comparativo entre bolas de moinho forjadas e de alto cromo em uma planta de produção de cobre situada na Austrália e que foi conduzida por um fornecedor de corpo moedor.

No presente trabalho, o estudo de caso foi conduzido seguindo os passos a seguir:

- Delimitação da planta: consiste em delimitar a unidade que constitui o caso;
- Coleta de dados: consiste na coleta de dados através de entrevistas formais ou informais e acompanhamento dos resultados do teste.
- Seleção, análise e interpretação dos dados: a seleção dos dados é feita considerando os objetivos da investigação e seus limites. Depois de selecionados, os dados são analisados e interpretados.

Os dados utilizados no estudo foram disponibilizados pela empresa que estava conduzindo o teste e a coleta de informações foi realizada através de entrevistas com colaboradores.

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O planejamento e controle da produção em uma planta de mineração e beneficiamento de minério é usualmente feito por equipes que são responsáveis por cada etapa do processo produtivo. Dessa maneira, não é possível detectar o efeito que as decisões tomadas em uma etapa do processo geram nas etapas futuras. Quando se age dessa maneira perdem-se boas oportunidades de otimização e redução de custo, não pontualmente em cada parte do processo, mas olhando a produção como um todo.

Esse projeto tem como objetivo analisar os efeitos que a escolha do corpo moedor na moagem influencia a etapa posterior da cadeia de beneficiamento, a flotação e assim apresentar os reflexos, no custo total da produção.

4.1 ESCOLHA DO CORPO MOEDOR

No mercado atual de corpos moedores, é possível encontrá-los em diversas formas e materiais, que atendem aos vários tipos de indústrias. Para o presente estudo serão avaliadas as bolas de moinho forjadas e as fundidas de alto cromo, que podem ser usadas para a moagem de cobre que será o nosso estudo de caso.

As bolas forjadas apresentam em sua estrutura martensita e austenita e possui em sua composição química de 0,5% a 1,0% de carbono (C) e quantidade menores que 0,5% de cromo (Cr) e possuem durezas avaliadas entre 60 e 63 Rc. As bolas fundidas podem ser de alto (HiCr) ou baixo cromo (LoCr). As de HiCr possuem em sua estrutura martensita, austenita mais carbonetos de cromo. Na composição química é encontrado de 2,5% a 3,5% de C e de 11% a 30% de Cr e tem dureza no intervalo de 64 a 68Rc. Pela baixa presença de cromo nas bolas forjadas, são consideradas bolas de LoCr também.

Na moagem, as bolas diminuem a granulometria do minério através do impacto e da abrasão, mas nas bolas de LoCr é observado também a corrosão dos corpos moedores nos minerais, que decorre de interações galvânicas entre os dois, onde o mineral atua como um catodo e a bola de moincho como um anodo. A Figura 6 demonstra como ocorre essa corrosão.

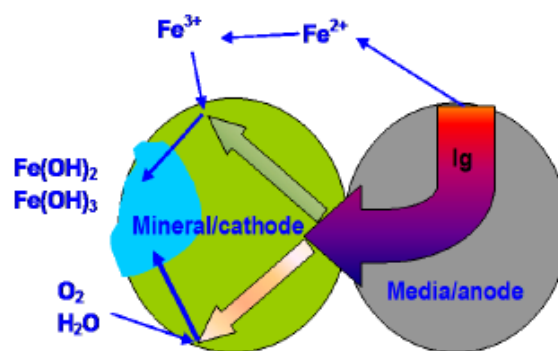


Figura 6: Corrosão do corpo moedor
Fonte: Greet, Kinal E Steiner, 2005

As equações que representam o que ocorre nesse processo são:



É formado então, o hidróxido de ferro (substância com características hidrofílicas) na superfície do material, com o Fe^{+2} da Equação 2 mais a hidroxila da Equação 1. (Greet, Kinal E Steinier, 2005)

Essas reações geram alterações no produto da moagem dentre os quais serão citados os relevantes para o trabalho:

- Menores níveis de oxigênio dissolvido
- Alteração da superfície química do mineral valioso

Os corpos moedores fundidos de alto cromo, além de ter maior durabilidade, não permitem a corrosão, por isso o produto da moagem não possui as características citadas acima. Essas vantagens unidas às maiores quantidades de cromo em sua composição tornam o valor dessas bolas maior que o das bolas forjadas. Nas bolas utilizadas na planta da Austrália, onde foi feito os testes em que a pesquisa se baseia, essa diferença de preço chega a ~18,8%.

4.2 EFEITOS DA MOAGEM NA FLOTAÇÃO

Como o método para separação do mineral valioso na flotação é a transformação da sua superfície para hidrofóbica, a concentração de hidróxido de ferro na superfície do mineral decorrente da corrosão das bolas forjadas, dificulta esse processo, se fazendo necessárias maiores quantidades de reagentes químicos coletores.

A menor concentração de oxigênio dissolvido na polpa também dificulta a formação das bolhas necessária para retirada do minério valioso, exigindo também, maiores quantidades de espumantes

4.3 ESTUDO DE CASO

4.3.1 Descrição geral das empresas

As empresas que participaram do estudo de caso da pesquisa serão tratadas de forma anônima, tanto em relação aos seus nomes como em relação a qualquer outra informação que possa identificá-las. Suas descrições serão feitas de forma sucinta, para que o leitor possa ter uma visão geral sobre a empresa e os seus principais ramos de atuação.

A planta onde foi realizado o teste comparativo, que serviu como estudo de caso do presente estudo está situada na Austrália e extrai e beneficia Cobre e, em pequena quantidade, como resultado da própria produção de cobre, ouro.

A empresa que conduziu o teste é uma multinacional com foco na produção de materiais de desgaste, onde possui posição de destaque. Seus clientes são indústrias que envolvem cominuição, como por exemplo a mineração e a indústria cimenteira.

4.3.2 Desenvolvimento do teste

Primeiro, foi necessário realizar um teste de bolas marcadas com duração de 3 meses, para definir qual seria o melhor tamanho e concentração de cromo nas bolas forjadas e fundidas de HiCr. Após esse teste, foi definido que seria utilizado bolas forjadas de 1” e bolas de fundidas de 20mm e com 24% de Cr.

Com as bolas definidas, um moinho foi carregado com bolas forjadas e outro em paralelo com bolas de alto cromo. O teste durou um ano, e durante esse período os moinhos foram recarregados quando necessário. Durante as paradas frias da planta, testes foram feitos e relatórios foram gerados, para que servissem como fonte de dados para a formulação dos resultados finais.

Após a conclusão do período de teste, os resultados foram apresentados a empresa proprietária da planta para que essa tomasse a decisão de qual bola usar.

4.4 RESULTADOS

Os resultados da comparação dos custos e da produtividade de planta para o uso de bola forjada e bola de alto cromo gerou a Tabela 1. Os valores apresentados são para uma produção de 11.000.000 toneladas por ano (tpa), com teor de cobre de 1,0% e 0,8g/t de ouro.

Tabela 1. Análise comparativa de custo e produtividade das etapas de moagem e flotação para bolas forjadas e de alto cromo.

	Bola forjada (1")	Bola de HiCr (24% 20mm)
Quantidade de bola (g/t)	160	114
Valor das bolas (\$/t)	1.110,13	1.367,22
Custo da moagem (\$)	1.953.823,28	1.714.495,63
pH da polpa	pH 10,8	pH 9,6
Variação do Custo da flotação	617.218,43	
Recuperação do Cobre (t)	110.000,00	111.430,00
Recuperação do Ouro (g)	8.800.000,00	8.888.000,00
Valor do Cobre (\$/t)	4.726,00	
Valor do Ouro(\$/g)	40,41	
Benefício total (\$)	11.170.806,08	

Apesar do valor da tonelada da bola de alto cromo ser 200 dólares maior que o da forjada, com a troca foi possível diminuir em 28,8% a quantidade de bolas necessárias para a moagem, garantindo, já na etapa de moagem, um benefício de 239.327,66 de dólares.

A diferença no custo da flotação, foi informado pela empresa, e mostram mais uma vantagem da troca para as bolas de HiCr.

Apenas avaliando o custo dessas duas etapas, a utilização de bolas fundidas de alto cromo garantiram à planta uma redução de 856.546,08 dólares. O maior ganho com a troca, no entanto, é com a elevação da recuperação dos minérios, 1,3% para o cobre e 1,0% para o ouro. O benefício total alcançado com o uso das bolas de moinho HiCr foi de 11,2 MM de dólares.

Os valores absolutos encontrados são baseados nos resultados dos testes e valores do mercado na data da pesquisa e não são válidos para outras plantas, apenas representam o potencial de ganhos que elas podem alcançar com a mudanças do corpo moedor de forjado por fundido de alto cromo.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 ANÁLISE CRÍTICA DA PESQUISA

O objetivo primordial da pesquisa era estudar os efeitos que a troca do tipo de corpo moedor nos custos e na produtividade das etapas de moagem e flotação no processo de beneficiamento de minério.

Dessa maneira, para alcançar o objetivo proposto, foi desenvolvida uma abordagem teórica, que permitiu ao autor adquirir o conhecimento necessário para aplicar os fundamentos estudados, e uma abordagem empírica que foi necessária para compreender os resultados obtidos no estudo de caso.

- Compreender a relevância do setor de mineração na economia mundial e a importância da otimização dos seus processos;
- Entender como se desenvolve processo de mineração e beneficiamento de minério, focando nas etapas de moagem e flotação;
- Identificar porque a troca de corpo moedor de forjado para fundido de alto cromo traz benefícios nos custos da etapa de flotação e moagem, além de uma maior recuperação do cobre;
- Elaborar uma tabela para cálculo dos custos e da produtividade da moagem e flotação com os dados obtidos no teste realizado na planta utilizada como estudo de caso.

Portanto, pode-se afirmar que o trabalho atingiu o objetivo proposto e respondeu às questões da pesquisa de forma satisfatória. E espera-se que os resultados obtidos na pesquisa possam ser utilizados por outras empresas mineradoras para alcançar reduções de custos e maiores produtividades em suas plantas. Além disso, foi possível perceber a importância do papel do engenheiro mecânico no contexto do estudo, uma vez que cabe a ele atribuições de planejamento, projeto e controle dos resultados dos testes. Portanto, é fundamental que o engenheiro mecânico, no exercício de sua profissão, tenha estes conhecimentos integrados, de forma que possa desempenhar com êxito as suas funções.

5.2 SUGESTÃO DE NOVOS ESTUDOS

Como sugestão para novos estudos que dêem continuidade a este trabalho ou tenham alguma relação com ele, propõem-se:

- Realizar a análise e acompanhamento da implementação da utilização e bolas de alto cromo em uma mina no Brasil.
- Desenvolver o mesmo estudo no beneficiamento de outros minerais, por exemplo Ferro.
- Realizar estudo dando continuidade a otimização do processo produtivo da mineração, fazendo análises dos efeitos que cada etapa causa no custo e na produtividade da cadeia inteira.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROD, Emanuela Reis Circuito alternativo para flotação de minério de ferro, Minas Gerais: Ouro Preto, 2012

GOLDBARG, Marco César e LUNA, Henrique Pacca L. Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos. São Paulo: Campus, 2000

GONÇALVES, K., V.L.L. Andrade, Peres, A., et al.(2003), The effect of grinding conditions on the flotation of a sulphide copper ore. Minerals Engineering 16 p. 1213–1216

GRAHAM. C e EVANS, V. The evolution of shaft sinking systems in the western world and the improvement in sinking rates (Part 1).CIM Magazine, Canadá, 2007

GREET, C. J., KINAL, J., STEINIER P., Grinding Media – Its Effect on Pulp Chemistry and Flotation Behaviour – Fact or Fiction?, Centenary of flotation Symposium, 2015

IBRAM, Relatório Anual IBRAM Julho 2014 – Maio 2015

ICMM, Mineração: Parcerias para o desenvolvimento, Report: O setor de mineração no Brasil: fortalecimento institucional para o desenvolvimento sustentável, 2013

ICMM, Mining's contribution to sustainable development, Report: The role of mining in national economies, 2ª edição, 2014

MACKENZIE, Andrew. BHP planeja cortes de custos mais profundos para enfrentar queda em commodities, Reportagem: Reuters Brasil, 2015

ROSA, Andreia Carolina Desempenho dos circuitos de moagem direto inverso da SAMARCO, São Paulo, 2013