



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS POR SOBRECARGA DE
BRITADORES DE MANDÍBULA: UM ESTUDO DE CASO DA BRITAGEM
PRIMÁRIA DA PLANTA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO DA
*ANGLO AMERICAN (MINAS – RIO)***

Matheus Nogueira Gomes

Ouro Preto

2021

MATHEUS NOGUEIRA GOMES

**REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS POR SOBRECARGA DE
BRITADORES DE MANDÍBULA: UM ESTUDO DE CASO DA BRITAGEM
PRIMÁRIA DA PLANTA DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO DA
*ANGLO AMERICAN (MINAS – RIO)***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof^o. Magno Silvério Campos

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633r Gomes, Matheus Nogueira.

Redução de paradas operacionais por sobrecarga de britadores de mandíbula [manuscrito]: um estudo de caso da britagem primária da planta de beneficiamento de minério de ferro da Anglo American (Minas – Rio). / Matheus Nogueira Gomes. - 2021.

47 f.: il.: color., gráf..

Orientador: Prof. Dr. Magno Silvério Campos.

Coorientador: Igor Carneiro Abreu.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração. 2. Britagem. 3. Minérios de ferro. 4. Seis sigma (Padrão de controle de qualidade). I. Abreu, Igor Carneiro. II. Campos, Magno Silvério . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.73



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 13 dias do mês de dezembro de 2021, às 19h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Matheus Nogueira Gomes** matrícula 16.1.1577, intitulado: “**REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS POR SOBRECARGA DE BRITADORES DE MANDÍBULA: UM ESTUDO DE CASO DA BRITAGEM PRIMÁRIA DA USINA DE TRATAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO NA ANGLO AMERICAN (MINAS-RIO)**”, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Magno Silvério Campos, Eng^o. Igor Carneiro Abreu (Coorientador), Prof^a. M.a. Débora Rosa Nascimento e M.e. Mauro Lúcio da Costa. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro, a Prof^a. Débora Rosa Nascimento, segundo, o M.Sc. Mauro Lúcio da Costa, terceiro, o Eng^o. Igor Carneiro Abreu e, em último, o Prof. Dr. Magno Silvério Campos. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi **APROVADO** por unanimidade, com a nota 9,0 (nove). O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 (quinze) dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. Ouro Preto, 13 de dezembro de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Magno Silvério Campos

Membro: Eng^o. Igor Carneiro Abreu

Membro: Prof^a. M.a. Débora Rosa Nascimento

Membro: M.e. Mauro Lúcio da Costa

Discente: Matheus Nogueira Gomes

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus**, por estar sempre presente na minha vida e na vida da minha família.

Agradeço ao imenso amor e dedicação da minha mãe **Eliane**, que nunca mediu esforços para que eu conseguisse galgar os caminhos por mim escolhidos, sempre me apoiando e me incentivando, me acolhendo e me alertando, sempre me dando condições para continuar. Obrigado mãe, sem a senhora eu não teria finalizado esta jornada. A meu pai, **Sérgio**, agradeço pelos ensinamentos constantes, pelo companheirismo incondicional, pelo amor, carinho e preocupação. Não conseguiria ter vencido estes obstáculos sem o senhor.

Agradeço às minhas irmãs **Ana Clara e Maria Carolina**, que apesar de sentirem saudade, nunca deixaram de compreender e comemorar nossos encontros anuais curtos, tornando minha vida muito prazerosa e valorosa, mesmo com nosso pouco tempo convivido nestes últimos anos. Obrigado meninas, sem vocês eu não teria conseguido. À todos da minha família também agradeço, especialmente à minha tia **Cleunice**. Agradeço aos que conosco estão e aos que já se foram, mas que ainda se fazem presentes em nossos corações.

Agradeço à minha noiva **Kárita**, pelo amor e companheirismo, pelo carinho e atenção depositados em mim, por tornar meus dias mais alegres e valiosos. Obrigado por me incentivar e me apoiar nos meus projetos e metas, assim também como me presentear com mais uma família! Agradeço aos meus sogros **Mariléia e Saulo**, e ao meu cunhado **Rodrigo**, por fazerem eu me sentir em casa, mesmo à 800 km de distância da minha origem.

Agradeço a todos os amigos, em especial à **Guilherme, Gustavo e Thiago**. Vocês não só contribuíram para meu crescimento acadêmico, como também colaboraram para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço a todos os colaboradores do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, em especial ao **Profº Dr. Carlos Alberto**, que me ofertou oportunidades de amadurecimento acadêmico e direcionamento profissional, além de ter sido um grande amigo, sempre muito sincero.

Agradeço a **Anglo American**, pela oportunidade de crescimento profissional e por ter permitido a utilização das informações divulgadas neste trabalho.

Agradeço ao **Prof. Dr. Magno Silvério Campos**, por me orientar neste trabalho, sempre se mantendo presente e a todo o tempo sendo prestativo.

Agradeço ao **Eng. Igor Carneiro Abreu**, pelos ensinamentos práticos/operacionais, assim como pelas contribuições e apoio durante todas as etapas deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora por terem aceito o convite, em especial **Eng. M.e. Mauro Lúcio da Costa**, pelo apoio, acessibilidade e autorização para uso das informações.

RESUMO

O minério de ferro é empregado em sua maioria na produção do aço, que por sua vez, é amplamente utilizado pelo homem em virtude das suas propriedades físico-químicas e relação custo/benefício, se comparado a outras ligas metálicas. Com o aumento da demanda mundial pelo metal, assim como, pelos menores teores de alimentação das usinas brasileiras, faz-se necessário operar os equipamentos tirando o maior proveito da sua capacidade e desempenho. Este trabalho visa reduzir o número de paradas operacionais causadas pela sobrecarga de minério, direcionado aos britadores primários de mandíbula da Mina do Sapo, Minas-Rio. A partir das análises realizadas por meio da metodologia DMAIC, geralmente aplicada em projetos 6-Sigma em conjunto com a utilização dos conhecimentos técnicos e do cenário de operação, foi obtida uma solução, empregando tanto tecnologia de instrumentação industrial alinhada com as lógicas programáveis de operação. Estas medidas tornaram dinâmica a vazão de alimentação dos britadores, de forma a adequar a quantidade de minério alimentada em função das propriedades morfológicas, granulométricas e mecânicas dos litotipos, estando todas estas variáveis representadas pelo enchimento ou esvaziamento da câmara dos britadores de mandíbula *Metso C140*. No que diz respeito às paradas por sobrecarga dos britadores de mandíbula, os resultados obtidos após teste operacional demonstraram que, a linha 02 (uma das duas linhas de britagem idênticas), que não recebeu a melhoria, parou 220% a mais que a linha 01 (linha que recebeu a melhoria). A melhoria do circuito de britagem primária conseguiu superar a meta de redução, uma vez que a linha que foi melhorada obteve média mensal de horas paradas reduzidas de 10,6/mês para 3,0/mês, ficando abaixo de 4,75h/mês (meta).

Palavras-chave: Britagem Primária, Minério de Ferro, Instrumentação Industrial, Metodologia 6-Sigma.

ABSTRACT

Iron ore is mostly used in the production of steel, which, in turn, is widely used by man due to its physicochemical properties and cost/benefit ratio, when compared to other metal alloys. With the increase in world demand for the metal, as well as the lower feed levels of Brazilian mills, it is necessary to operate the equipment taking full advantage of its capacity and performance. This work aims to reduce the number of operational stoppages caused by ore overload, directed to primary jaw crushers at Mina do Sapo, Minas-Rio. From the analyzes conducted using the DMAIC methodology, widely applied in 6-Sigma projects, together with the use of technical knowledge and the operating scenario, a solution was obtained, using industrial instrumentation technologies aligned with programmable operating logics, making it possible to make the feed flow of the crushers dynamic, in order to adjust the amount of ore fed according to the morphological, granulometric and mechanical properties of the lithotypes, linked to the instantaneous operational responses of the Metso C140 jaw crushers. The line that did not receive the improvement stopped 220% longer than the line that was improved, in terms of number of effective hours. The improvement of the primary crushing circuit managed to overcome the reduction target, since the line that was improved had a monthly average of downtime reduced from 10.6/month to 3.0/month, below 4.75h/month (target).

Keywords: Primary Crushing, Iron Ore, Industrial Instrumentation, 6-Sigma Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma simplificado do processamento mineral no Minas -Rio.	1
Figura 2 - Testemunhos de sondagem de minérios da Serra do Sapo: a) itabirito friável, IF; b) itabirito semi friável, ISF; c) itabirito “natural”; IT.....	2
Figura 3 - Vista da seção de perfil de um modelo típico de mandíbulas.	6
Figura 4 - Fluxograma simplificado da britagem primário do Minas-Rio.....	11
Figura 5 - Ilustração esquemática dos mecanismos da parada por sobrecarga de material nos britadores.	12
Figura 6- Descrição do problema operacional de parada por nível alto da câmara (sobrecarga de material nos britadores).....	14
Figura 7 - Perfil das paradas da britagem (horas efetivas), com destaque em vermelho para as paradas por nível alto da câmara (sobrecarga de material).	15
Figura 8 - Comportamento estatístico histórico das paradas por nível alto na câmara de britagem, período entre janeiro e julho 2020.	16
Figura 9 - Teste de hipótese para diferença de média e desvio padrão entre o comportamento das duas linhas da britagem primária, em relação às paradas por nível alto da câmara.....	16
Figura 10 - Entradas principais do processo que tem influência com a parada por nível alto da câmara de britagem.....	18
Figura 11 - Correlação entre paradas por nível alto na câmara de britagem e minérios compactos.	19
Figura 12 - Posição do sensor atual, à esquerda, e lógica atual de alimentação, à direita	20
Figura 13 - Plano de ação para atacar as entradas principais selecionadas	24
Figura 14 - Esquema de funcionamento e posicionamento do novo sensor, à direita, e fotos em campo do novo sensor instalado.	26
Figura 15 - Análise do novo sistema de sensoriamento e alimentação da britagem primária.	27

Figura 16 - Cenário litológico de minérios compactos alimentados na britagem primária da <i>Anglo American</i> (Minas-Rio), no ano de 2020.....	28
Figura 17 - Ganhos obtidos com o novo sistema, em redução de horas efetivas de parada da britagem primária por nível alto da câmara de britagem.	29
Figura 18 - Ganhos obtidos com o novo sistema, em redução de número de ocorrências de paradas da britagem primária por nível alto da câmara de britagem.	30
Figura 19 - Comportamento estatístico das linhas, antes e após novo sistema.....	31
Figura 20 - Sistema para desabilitar segundo sensor a depender do número de indicações falsas de sinal, com retorno automático do sistema em duas horas, caso não seja reabilitado pela sala de controle.	32

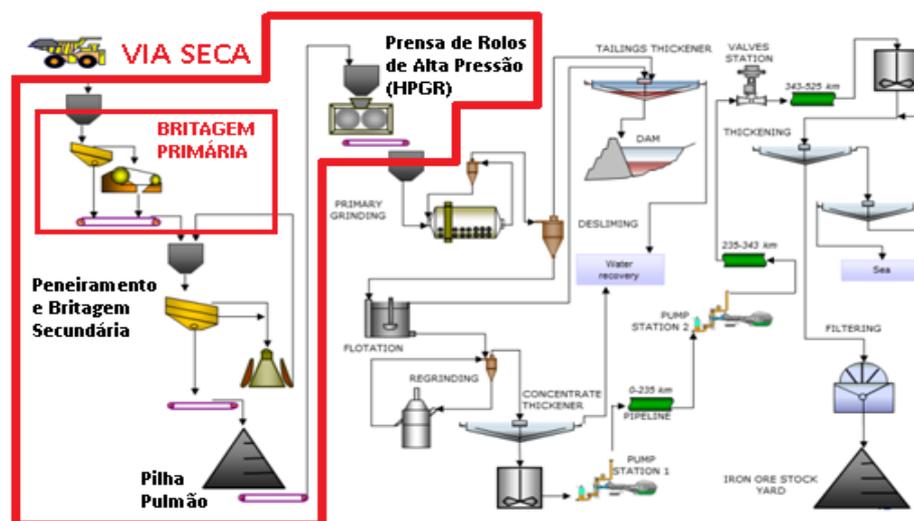
1. INTRODUÇÃO

No contexto da oferta de minério de ferro, a *Anglo American* participa no Brasil como um dos grandes produtores, sendo uma empresa global, de mineração diversificada. Em suas operações produz diamantes, cobre, metais do grupo da platina, carvão, níquel e minério de ferro (Minas-Rio). A Mina do Sapo, pertencente à *Anglo American*, se localiza no município de Conceição do Mato Dentro (MG) e possui quase a totalidade de seu minério constituído por Itabirito, com teores de ferro entre 25% e 60% (BARROS, 2017).

Como pode ser observado no fluxograma simplificado da Figura 1, o processamento do minério de ferro realizado pela unidade se inicia pela britagem primária, com britadores de mandíbula, seguindo do peneiramento e britagem secundária, utilizando peneiras tipo “banana” e britadores cônicos. O minério segue para as prensas de rolos de alta pressão, moinho de bolas em circuito fechado com hidrociclones classificadores, hidrociclones de deslamagem e concentração por flotação em tanques célula. O rejeito final é direcionado diretamente ao espessador, enquanto que o concentrado final é remóido por moinhos verticais, espessado e bombeado por um mineroduto de 529 km de comprimento, até São João da Barra – RJ.

O minério é filtrado e embarcado no Porto de Açu, atendendo os diferentes clientes com *pallet feed*. O circuito destacado em vermelho, na Figura 1, compreende a via seca, área alvo deste trabalho.

Figura 1- Fluxograma simplificado do processamento mineral no Minas -Rio.

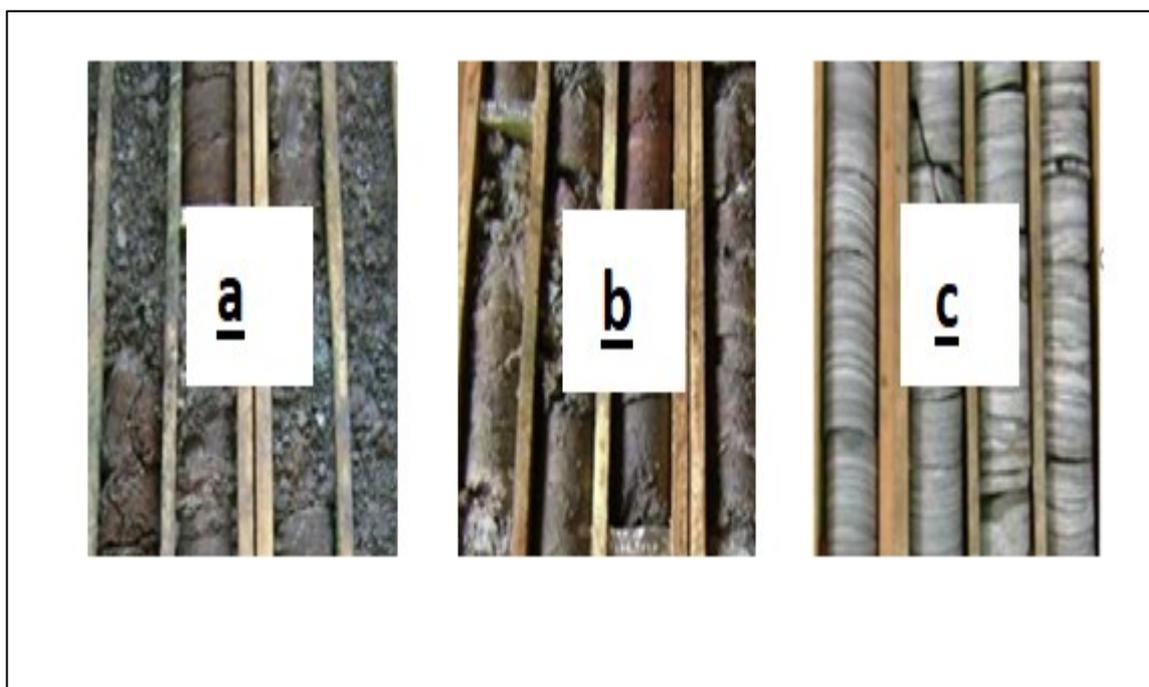


Adaptado de: TURRER e MAZZINGHY, *et al.* (2015).

Com a licença de operação obtida em 2014, a usina foi projetada para produzir 26,5 milhões de toneladas naturais de *pellet feed* por ano. Até 2023 a unidade da empresa buscará atingir a capacidade de produção projetada, ocasionando alterações no *layout* da usina, refletindo a necessidade de adequação dos processos e equipamentos ao plano de lavra e produção.

Um dos problemas identificados é a variabilidade dos litotipos de minério que alimentam a britagem primária, sendo os três principais classificados como: Itabirito Compacto (IC, classificado como “natural”, na figura), Itabirito Semi-Friável (ISC) e Itabirito Friável (IF), conforme mostram os testemunhos de sondagem da Figura 2.

Figura 2 – “Testemunhos de sondagem de minérios da Serra do Sapo: a) itabirito friável, IF; b) itabirito semi friável, ISF; c) itabirito “natural”; IT.” TURRER e MAZZINGHY, *et al.* (2015).



Adaptado de: TURRER e MAZZINGHY, *et al.* (2015).

Enquanto o itabirito compacto (IC) da Serra do Sapo apresenta elevada resistência a esforços de compressão (114 Mpa), os itabiritos friáveis nem sequer podem ser ensaiados, devido sua natureza altamente pulverulenta (TURRER e MAZZINGHY *et al.*, 2015).

Uma vez que apresenta diferentes resistências a depender da litologia, essas rochas respondem de maneira diferente ao desmonte, o que interfere de forma direta na

partição percentual de minério granulado que é utilizado na alimentação dos britadores. (MORAIS e GRIPP, 2004).

É sabido que minérios mais compactos tendem a requerer maior gasto energético da britagem primária, devido maior direcionamento de massa aos britadores, a partir da maior quantidade de massa retida na grelha vibratória que precede estes equipamentos.

Quantidades significativas de paradas foram identificadas na britagem primária da Mina do Sapo, em virtude de sobrecarga dos britadores (vazão mássica de entrada de minério maior que vazão mássica de saída). Esta sobrecarga afeta a utilização física dos equipamentos e, conseqüentemente, seu rendimento operacional.

De acordo com Reis *et al.*,(2017), a metodologia DMAIC (sigla atribuída às 5 etapas para solucionar problemas industriais de forma estruturada) é constituída por cinco fases, sendo elas: (D) definir; (M) medir; (A) analisar, (I) improve, ou melhorar e (C) controlar. Os autores ainda ressaltam a importância deste método para o alcance de metas estratégicas das empresas de mineração, visto que os gargalos tendem a depender de parâmetros diversos e devem ter seus processos sempre revistos, a fim de garantir segurança, competitividade e eficiência.

Sabendo que a metodologia DMAIC é aplicada a processos, produtos e serviços já existentes, ratifica-se a escolha da mesma em relação à DFSS (*Design Six Sigma*, aplicada a desenvolvimento de novos processos).

Este trabalho buscará então, a partir de metodologia estruturada de raciocínio, definir, medir, analisar, melhorar e controlar a quantidade mensal de horas paradas por sobrecarga dos britadores primários da usina de tratamento de minérios de Anglo American. A metodologia empregada na estruturação do processo de tomada de decisão será brevemente explorada, assim como os recursos e ferramentas aplicadas durante a mesma.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por motivação a necessidade de redução de paradas operacionais por sobrecarga de material na alimentação da britagem primária da usina de tratamento de minérios da *Anglo American*, a fim de contribuir com o *rampup* de capacidade da planta.

Encontrou-se ainda a justificativa de que existem dificuldades operacionais e estruturais para se medir a massa real de alimentação dos britadores, visto que uma grelha de escalpe precede o equipamento e não se tem conhecimento da distribuição granulométrica na alimentação da britagem (caminhões basculam diretamente nos britadores, elevada variabilidade destes parâmetros).

2.1. Objetivo Específico

Disponibilizar mais horas calendário para operação dos equipamentos, partir da redução de paradas operacionais por sobrecarga de material na alimentação dos britadores, mesmo desconhecendo diretamente a massa direcionadas aos equipamentos instantaneamente.

- Reduzir a quantidade de média de horas efetivas paradas na britagem primária, por sobrecarga dos britadores, de 12,1 hora/linha/mês para 4,7 horas/linha/mês (meta de redução de 61%), até dezembro do ano de 2020. Esta meta foi definida em função do comportamento estatístico histórico destas paradas, demonstrando possibilidade operacional de obtenção do valor, como será mostrado ao longo dos demais tópicos desenvolvidos neste documento.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

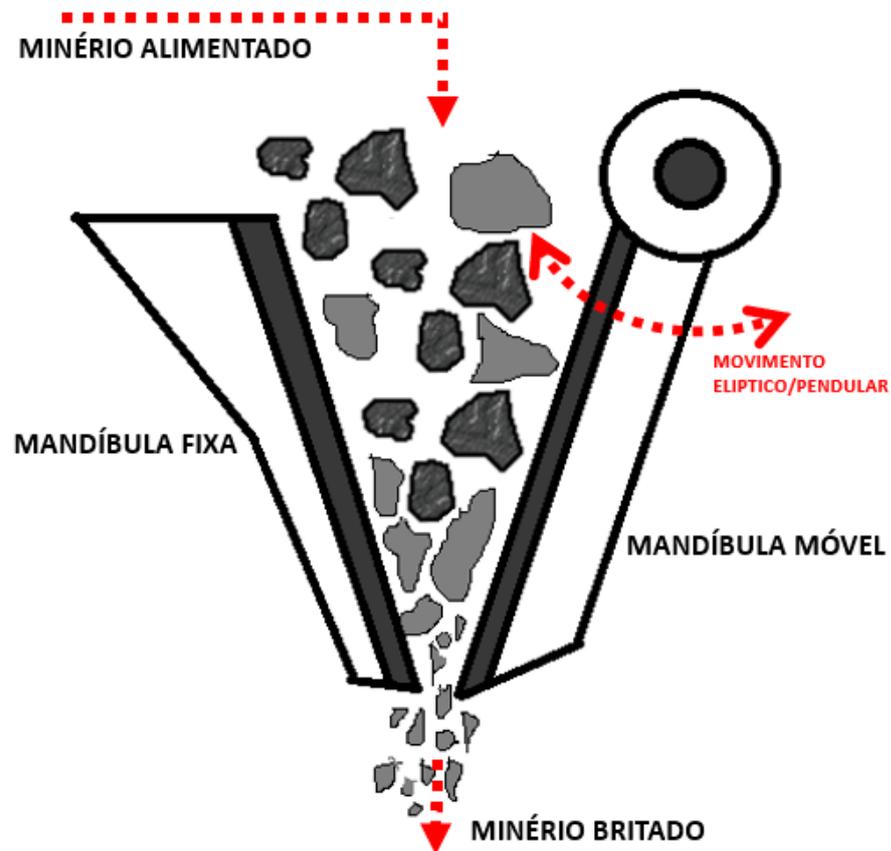
De acordo com a *The Steel Industry in Brazil*, Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil, de 2012, o consumo per capita de aço no Brasil era da ordem de 130 kg/habitante, enquanto em outras nações desenvolvidas se supera os 400 kg/habitante. Logo, é imprescindível que consigamos manter a oferta do metal, a fim de que seja possível dar continuidade ao ritmo de crescimento e desenvolvimento mundial.

Sabe-se que o ferro metálico está contido nas estruturas dos minerais minério, é notório que muitas sejam as rotas possíveis de tratamento destes minerais, fazendo com que haja uma gama de equipamentos e insumos, com finalidades diversas, possibilitando melhor aproveitamento do metal, mediante seus produtos principais para comercialização - granulados, *sinter feed* e *pellet feed* (DE SALES, 2012).

O britador de mandíbulas é empregado na mineração geralmente em estágios primários do processo de fragmentação, visto que sua granulometria de trabalho eficiente é para partículas de tamanhos ainda grossos, porém com morfologia e potência suficientes para serem transportadas aos processos subsequentes por meios dos transportadores de correias (AMORIM JÚNIOR *et al.*, 2017).

Como mostrado na Figura 3, pela vista da seção de perfil de um modelo típico de britador de mandíbulas, tem-se a identificação de que o minério é alimentado na parte superior, enquanto que a mandíbula realiza movimento elíptico/pendular, comprimindo o leito de minério contra a mandíbula fixa, fragmentando as partículas durante o movimento de aproximação das mandíbulas e descarregando minério fragmentado durante o afastamento das mesmas, na parte inferior do equipamento.

Figura 3 - Vista da seção de perfil de um modelo típico de mandíbulas.



Adaptado de: PERES, *et al.* (2002).

Assim como De Souza (2010), relata em sua análise crítica de processos, usualmente se aplicam grelhas vibratórias ou estacionárias no desbaste do material que é direcionado aos britadores de mandíbula primários, elevando a capacidade de alimentação da planta, a partir do *by-pass* do britador para o material passante na grelha.

Luz *et al.*, (2018) também menciona que a utilização do escalpe antes da britagem é uma alternativa muito aplicada nas plantas, para elevar a capacidade de entrada de minério. Por outro lado, caso não haja espaço estrutural para aplicação de balança dinâmica (antes e após o britador), torna-se muito difícil mensurar a massa retida na grelha e direcionada ao britador.

É necessário fazer algumas observações a respeito da dificuldade de estimar a massa que será direcionada aos britadores, já que além do corte da grelha também ocorre a influência do minério que é alimentado sobre a grelha vibratória, pois conforme Peres *et al.*, (2002), mesmo conhecendo a distribuição granulométrica da

alimentação e a abertura das malhas de classificação, ainda poderiam ocorrer situações diversas no comportamento individual das partículas, culminando em diferentes probabilidades de classificação, tornando ainda menos atrativo buscar o conhecimento da distribuição granulométrica em base instantânea, para utilizar como variável de controle da alimentação dos britadores.

Logo, no que diz respeito a limitações de capacidade, o britador torna-se o gargalo da entrada de minério no beneficiamento que faz uso deste sistema na etapa primária, já que a massa passante na grelha tem lugar garantido para prosseguir para os próximos processos, enquanto que a massa a ser britada deve atender a capacidade instantânea do britador para não precisar parar a planta. Caso contrário, pode ocorrer a sobrecarga de material direcionada ao britador, causando um possível corte da alimentação, até que o britador finalize a cominuição do minério “acumulado”.

Este tipo de parada impacta a utilização física do equipamento. Destarte, é possível aplicar estudos de processos que sejam baseados em metodologias que buscam identificar as causas, possíveis soluções e planos de ação e controle, buscando redução possível destas paradas.

Conforme Fernandes *et al.* (2015), em estudo de caso que conduziu na britagem da Votorantim Metais, conseguiu-se elevação de 15% na utilização física dos britadores, fazendo uso da metodologia DMAIC na identificação de gargalos e atuação. Esta metodologia é amplamente empregada em estudos de projetos *Lean Six Sigma*, e outros estudos de melhoria de processos.

Além de metodologias estruturadas para resolução de problemas, a utilização dos dispositivos elétricos e eletroeletrônicos, junto às lógicas de operação, contribuem para ganho de eficiência nos processos de tratamento de minérios, fornecendo condições de maior assertividade nas manobras, devido à menor incidência de erros e subjetividade para cumprimento dos parâmetros técnicos operacionais.

Um exemplo clássico, bem estruturado e utilizado na mineração são os sensores de nível. Estes sensores, interligados aos equipamentos a partir das lógicas operacionais, podem controlar a vazão de bombas, cortar a alimentação de equipamentos, ou até mesmo determinar uma condição para redução de taxa, tudo isso apenas pela resposta dos níveis que retornam das leituras e pelas regras e restrições do procedimento operacional e lógicas de operação a eles aplicada.

Vieira *et al.*, (2013), relata em seu estudo a utilização de sensores de nível ultrassônico, instalados nas caixas das bombas, controlando a entrada de polpa e água em processos de classificação de produtos de moagem a úmido.

4. METODOLOGIA

Os tópicos a seguir destinam-se a definir o problema de nível alto da câmara dos britadores, bem como mensurar o grau de impacto do mesmo, a partir do tratamento dos dados coletados. Apresenta-se, também, uma relação entre as teorias e as informações que embasaram este trabalho. Trata ainda, brevemente, das etapas envolvidas na instalação do novo sensor de nível de câmara (solução que será avaliada para atingir a meta do trabalho). Neste tópico serão também abordadas as informações pertinentes à etapa de definição da metodologia DMAIC, aplicadas em paralelo com aos demais detalhamentos, embasando os objetivos de ganho de performance, assim como a comparação dos resultados obtidos.

4.1. Metodologia DMAIC

O conceito utilizado para solução do problema (*Lean Six Sigma*, metodologia DMAIC), será tratado adiante, mediante algumas etapas importantes e que foram adotadas como parte da estruturação da proposta de solução deste trabalho, a fim de se obter resposta ao problema investigado. Estas etapas são: definição do problema, medição, análise, melhoria e controle obtidos a partir desta avaliação e validação da técnica da solução dada.

Na metodologia DMAIC, a etapa de definição é aquela na qual se define o problema, onde a equipe irá abordar aquele cenário, qual a meta, escopo, entre outras questões de partida.

Já a etapa de medição consiste na busca pela identificação dos *inputs* (*X's* potenciais), coleta de dados (amostragens, banco de dados, etc.), nível sigma, ou seja, de variações de desvio padrão e seus defeitos.

Na etapa de análise buscamos selecionar os *X's* (*inputs*) vitais, ou seja, aqueles que trazem um maior impacto nos resultados, perante menores esforços empregados. Seguindo a metodologia DMAIC, foram levantadas possíveis ações para a etapa de melhoria do processo.

Por fim, na etapa de controle, avalia-se o novo cenário obtido, verificando a eficácia das ações, adotando medidas para que o processo permaneça controlado, evitando que retorne ao quadro original após melhoria.

Esta será a metodologia que estruturará e norteará as análises deste trabalho, visando atacar o problema de sobrecarga de material direcionado aos britadores primários, a partir de abordagem técnica sobre propriedades da britagem, minério e

particularidades deste tipo de parada, assim como das avaliações *in loco* e estatísticas, partindo da operação assistida e do banco de dados e métodos variados para aplicação da mesma.

4.2. Etapa de Definição - (DMAIC)

De maneira mais simplificada, nesta etapa busca-se reconhecer o problema em questão, seu local de ocorrência, suas características e principais questões envolvidas, adotando sempre aspectos técnicos para embasar as premissas.

A partir da operação assistida, ferramenta “*gemba*”, que representa a busca pela compreensão detalhada e realista do cenário/comportamento operacional investigado, fazendo até mesmo a utilização da filmagem de processos, possibilitando a identificação das variáveis envolvidas no problema analisado, assim também com das disciplinas/áreas que compõem ao possível fórum para busca da solução. (HORNBERG, *et al.*, 2009).

Nos próximos tópicos, os dados coletados serão tratados perante a definição do problema de nível alto na câmara dos britadores primários.

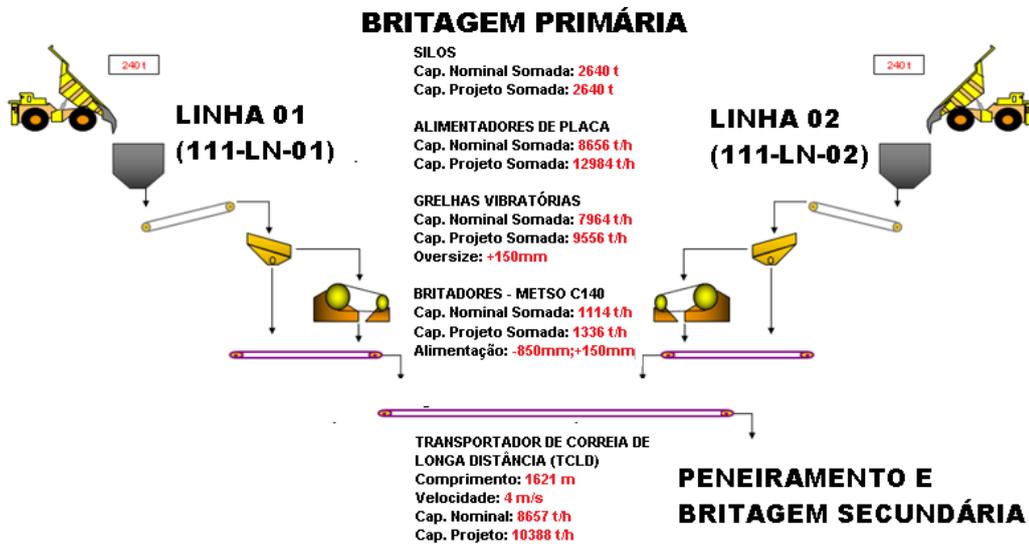
4.2.1. Britagem Primária *Anglo American* (Minas-Rio)

A britagem primária da Mina do Sapo tem capacidade nominal de 8.657 t/h, sendo composta por duas linhas idênticas, como ilustra a Figura 4.

Os caminhões de 240t trazem o minério dos diferentes polígonos de lavra, com diferentes litologias e teores. Após passar pela grelha fixa (850mm de abertura) o minério fica armazenado em um silo e é direcionado para as grelhas vibratórias por meio de alimentadores de placa.

O *undersize* (passante em 150 mm das grelhas vibratórias) segue para a etapa de peneiramento e britagem secundária, enquanto o *oversize* (passante em 850 mm das grelhas fixas e retido em 150 mm das grelhas vibratórias) alimenta os britadores. Cada uma das linhas de britagem possui um britador de mandíbulas *Metso C140*. Este modelo de britador apresenta capacidade nominal de 557 t/h, com APA (abertura na posição aberta) de 100mm.

Figura 4 - Fluxograma simplificado da britagem primário do Minas-Rio.



Adaptado de: TURRER e MAZZINGHY, *et al.* (2015).

O alimentador de placas é dotado de inversor de frequência que controla a sua velocidade, possibilitando o uso da balança virtual para executar o pedido de taxa (*setpoint*) de cada linha da britagem primária.

Entretanto, o alimentador descarrega o material sobre a grelha vibratória, tornando a massa real de que alimenta os britadores uma variável não controlada, sabendo-se que as condições espaciais/estruturais do prédio da britagem atualmente não possibilitam a instalação de balança dinâmica para quantificar a massa passante e retida na grelha, consequentemente a massa real que alimenta o britador.

4.2.2. Paradas por Nível Alto na Câmara

Para que os britadores primários possam trabalhar de forma compatível com seu dimensionamento, é necessário que seu limite de capacidade seja respeitado. Tomando como premissa o cenário nominal da britagem, das 8657 t/h alimentadas, no mínimo 84% devem corresponder ao *undersize* da grelha vibratória, já que os outros 16% retidos (*oversize*), limita-se à capacidade máxima dos dois.

Logo, é notório que o controle da distribuição granulométrica do minério alimentado se faz necessário, tendo em vista que, no máximo 16% do minério deve ficar retido nas grelhas e ser direcionado aos britadores, respeitando a capacidade e evitando as sobrecargas dos equipamentos de cominuição. Porém, pela imprecisão,

assim como pela interferência no número de restrições ao plano de mina, medir esta distribuição granulométrica do minério que alimenta a britagem primária e incluir esta nova restrição ao plano de lavra e aos critérios de mistura de minérios, não se mostra uma alternativa viável, no cenário atual.

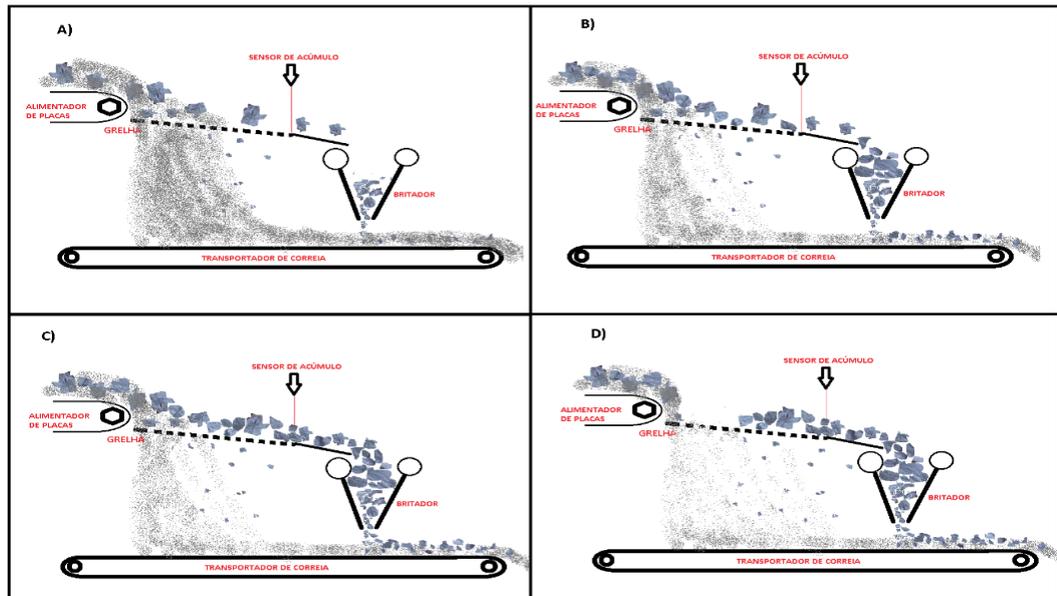
Como pode ser observado nos esquemas da Figura 5, o fenômeno de sobrecarga do britador se inicia pelo aumento gradual de minério retido na grelha vibratória, advindo de frentes granuladas.

Com uma taxa de alimentação superior à sua capacidade, o britador não consegue igualar o balanço de massa, fazendo com que o minério rapidamente preencha toda a câmara de britagem. Como o alimentador ainda continua com a mesma taxa, o minério se acumula sobre a grelha vibratória, até que o sensor de proteção seja atuado, desligando o alimentador de placas.

A grelha e o britador continuam em funcionamento, enquanto o alimentador permanece parado, aguardando o tempo de atuação do sensor, conforme lógica de proteção de acúmulo de material sobre grelha. Após contabilizado este tempo, caso seja edificado que o sensor de acúmulo de minério não está mais emitindo o sinal de minério acumulado sobre a bica de alimentação do britador, o alimentador pode então retomar a alimentação do equipamento.

A partir da Figura 5, no cenário A é possível observar uma operação normal, com minério majoritariamente passando pela grelha e o britador operando de forma compatível com sua capacidade. Já no cenário B, temos uma elevação de minério granulado na alimentação, iniciando o fenômeno de enchimento da câmara de britagem, a partir do momento em que a massa de alimentação dos britadores é superior à massa de descarga de produto dos mesmos. No cenário C, o minério granulado, sobrecarregando os britadores, se acumula sobre a grelha vibratória e atua o sensor de acúmulo, que corta a alimentação e aguarda o britador finalizar a cominuição da massa sobressalente, representado pelo cenário D, na Figura 5. é possível ter uma visão simplificada de como se desencadeia este fenômeno de parada.

Figura 5 - Ilustração esquemática dos mecanismos da parada por sobrecarga de material nos britadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3. Descrição do Problema e Seleção da Meta

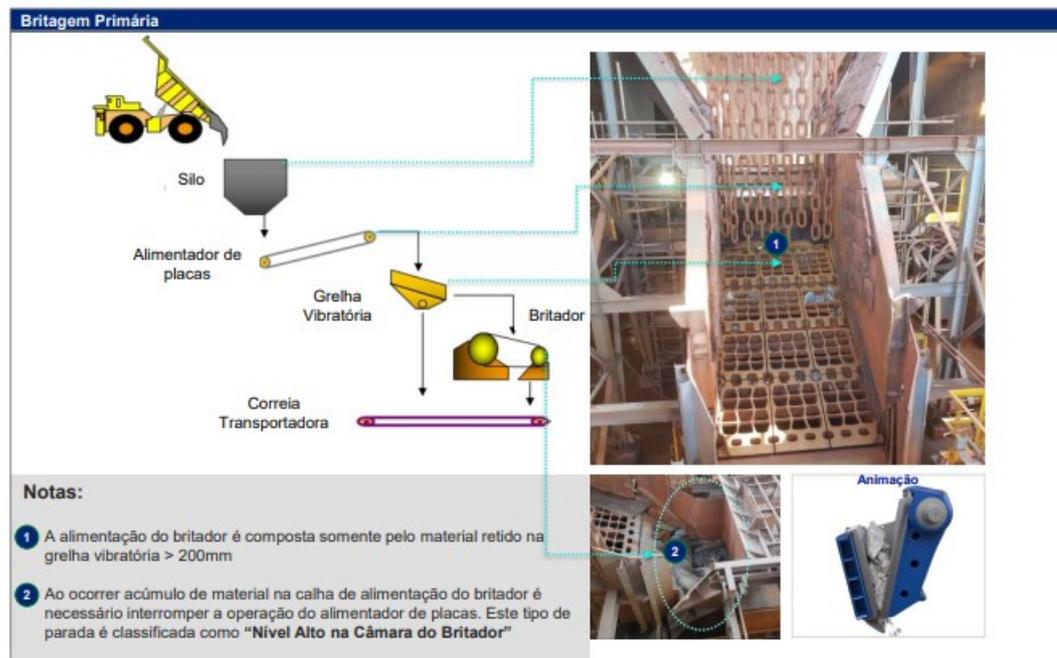
Foi possível identificar, a partir de operação assistida (*Gemba*), que o problema ocorria sempre que a quantidade de material direcionada ao britador estivesse superior à sua taxa instantânea de cominuição.

Outro ponto importante identificado no problema é que a taxa nominal por britador, 557 t/h para 100mm APA (abertura na posição aberta), difere da capacidade real instantânea do equipamento, visto que outras inúmeras variáveis alteram este número.

O equipamento tem sua alimentação cortada quando o material acumulado na câmara atinge a bica de alimentação, atuando o sensor a laser pré-existente, que protege a gelha vibratória e alimentador de placas contra possível dano causado com acúmulo de granulado sobre a grelha.

Todos os pontos destacados nesta etapa estão ilustrados na Figura 6 abaixo, conforme etapa de definição da metodologia DMAIC.

Figura 6- Descrição do problema operacional de parada por nível alto da câmara (sobrecarga de material nos britadores).

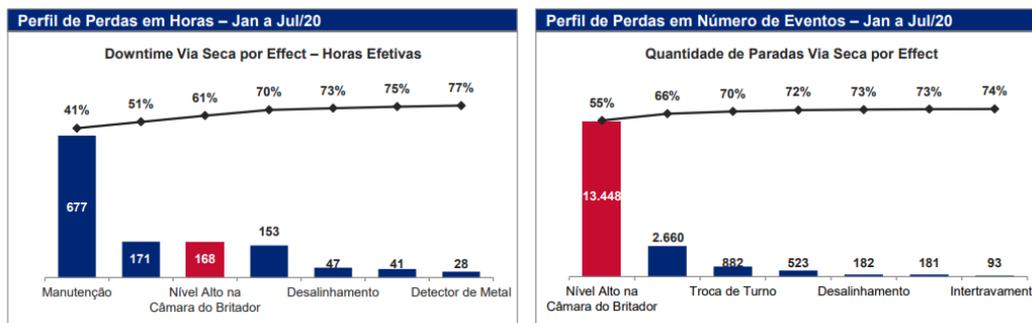


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na etapa de definição do DMAIC, a fim de compreender o cenário produtivo da britagem primária, elaborou-se um diagrama com as principais causas de paradas operacionais, assim como de suas quantidades em efeito, no período entre janeiro e julho de 2020, como pode ser observado na Figura 7.

Foi possível identificar, que neste período, houveram 168 horas paradas por nível alto da câmara dos britadores. Durante o mesmo período avaliado, em termos de número de eventos foi a parada por nível alto da câmara do britador que liderou o *ranking* de perdas, com 13.448 eventos ocorridos no período em questão, conforme destacados em vermelhos nos gráficos da figura.

Figura 7 – Gráfico de Pareto com o perfil das paradas da britagem (horas efetivas), com destaque em vermelho para as paradas por nível alto da câmara (sobrecarga de material).



Fonte: Elaborado pelo autor.

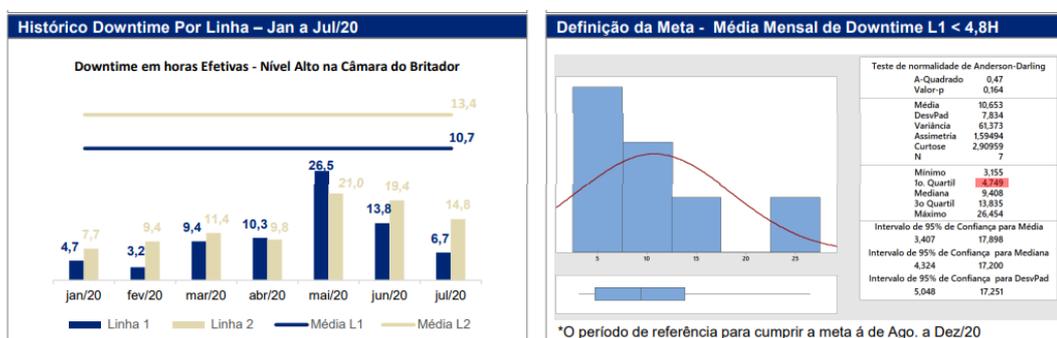
Por fim, buscou-se avaliar o comportamento estatístico destes eventos, com a finalidade de compreender a distribuição de frequência dos mesmos, possibilitando a concepção de uma meta para ganho de eficiência em relação a estas paradas.

Como mostrado nos gráficos da Figura 8, a base histórica mensal, à esquerda, demonstra que existe uma variabilidade mensal das ocorrências destas paradas, com uma média mensal de 10,7 horas paradas na linha 01 da britagem e 13,4 horas de média mensal paradas na linha 02 da britagem, o que ainda não pode nos garantir uma diferença estatisticamente comprovada entre as linhas.

Ainda sobre a Figura 8, abaixo, verificou-se na distribuição de frequência das paradas, à direita, que uma média mensal de 4,8 horas de paradas por linha para este evento seria uma meta viável para busca, visto que representou o primeiro quartil da distribuição.

Definiu-se então a meta de redução das médias de paradas por nível alto de câmara do britador de 12,1h/mês/linha para 4,8h/mês/linha, com prazo para realizar a melhoria entre o período de agosto e dezembro de 2020, findando a etapa de definição do DMAIC.

Figura 8 - Comportamento estatístico histórico das paradas por nível alto na câmara de britagem, período entre janeiro e julho 2020.



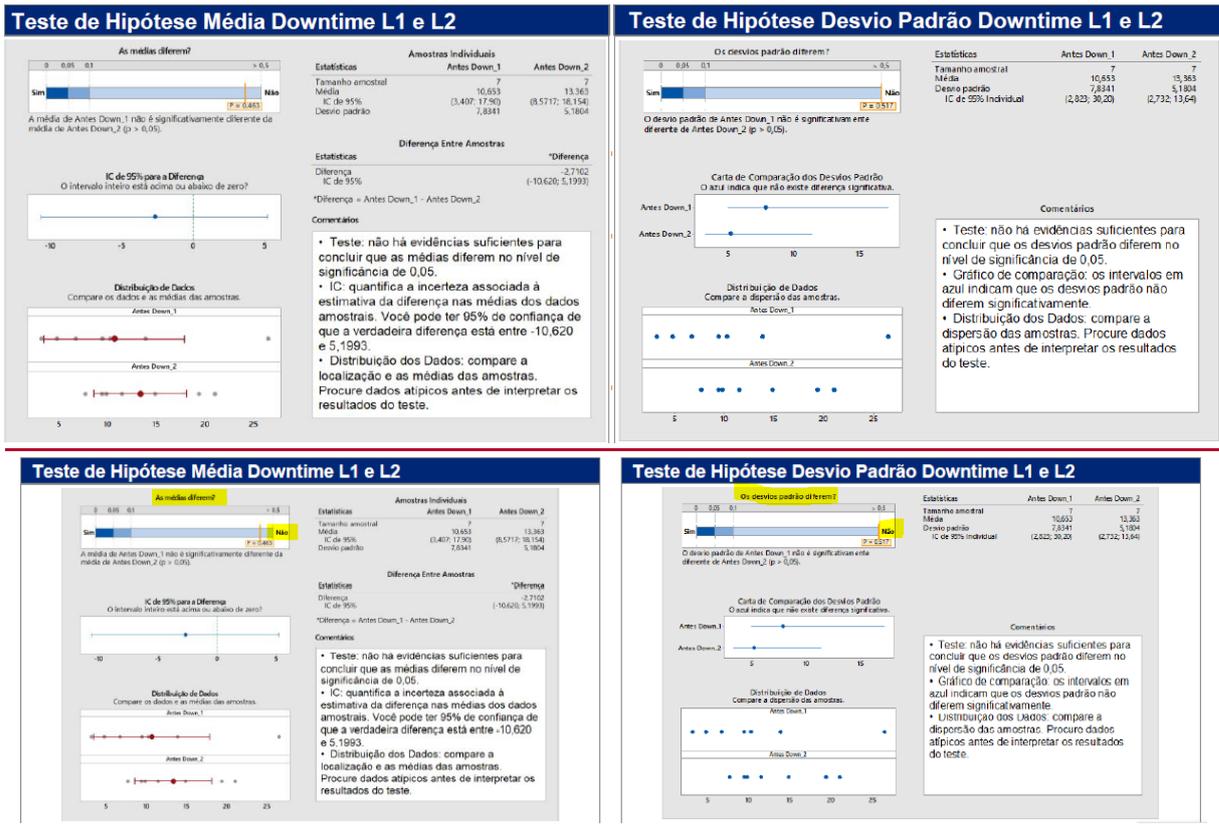
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Etapa de Medição (DMAIC)

Buscando já compreender um possível cenário de melhoria a ser adotado, foi verificado também se as duas linhas se comportavam de forma parecida ou distinta, quanto às ocorrências de paradas por nível alto da câmara. A partir do teste de hipótese, para média e para o desvio padrão, como mostrado na Figura 9.

Verificou-se que o comportamento das linhas não era estatisticamente diferente, significando que poderia ser adotada em qualquer uma das linhas a melhoria, comparando o resultado com sua linha espelhada.

Figura 9 - Teste de hipótese para diferença de média e desvio padrão entre o comportamento das duas linhas da britagem primária, em relação às paradas por nível alto da câmara.

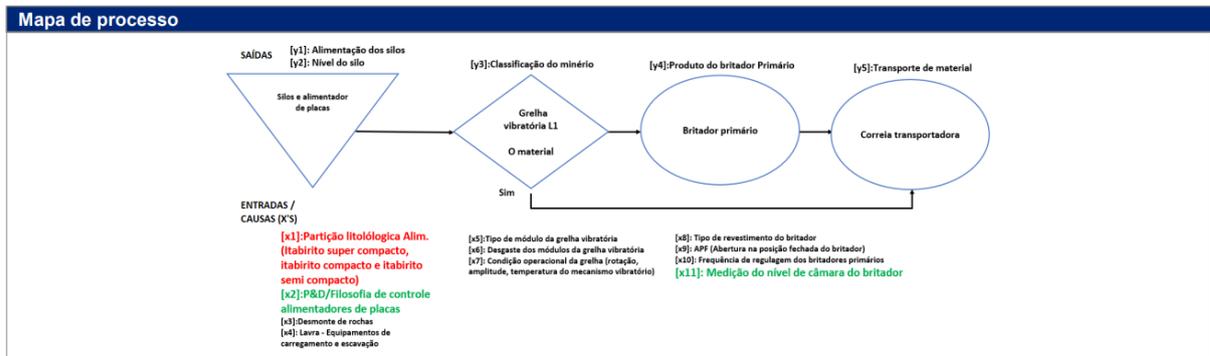


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando como premissa os conceitos do mapa de processos, foram mapeadas as etapas principais envolvidas na porção do circuito, em conjunto com uma equipe de profissionais que tem envolvimento com a área.

A matriz esforço impacto trata-se de uma forma de se calcular, a partir de “pesos”, o quão impactante seria resolver uma determinada dor do processo, levando também em consideração o nível de esforço que seria despendido para que aquele problema seja resolvido. (SORDAN, J. E. *et al.*, 2020). Logo, as entradas foram mapeadas, conforme fluxograma da Figura 10, estando identificadas as variáveis fundamentais para mapeamento do processo pela matriz esforço impacto, detalhadas conforme a figura abaixo, onde podemos identificar, como entrada importantes: [x1] (Partição litológica de minério alimentado: Itabirito Super Compacto, Itabirito Compacto, Itabirito Semi Compacto); [x2] (Filosofia Operacional do Alimentador) e [X11] (Medição do Nível da Câmara).

Figura 10 - Entradas principais do processo que tem influência com a parada por nível alto da câmara de britagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4. Etapa de Análise (DMAIC)

Nesta etapa realizou-se a análise das três principais causas selecionadas, buscando seu entendimento, assim como correlações para com a saída da análise, que vem a ser o problema de paradas por nível alto da câmara.

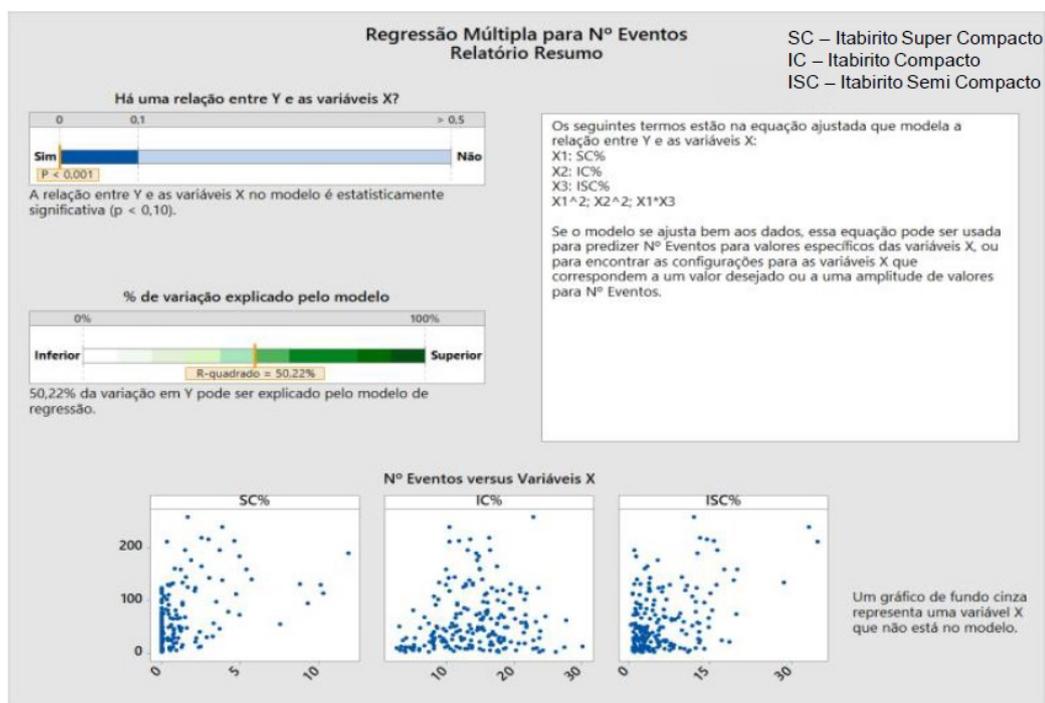
Abaixo serão tratadas brevemente estas entradas, de forma que as investigações sobre as mesmas, assim como os registros operacionais estarão descritos.

4.4.1. Partição Litológica (Minérios Compactos)

Para a entrada [X1], partição litológica, foi possível observar que existe correlação entre a rigidez do minério e o nível de paradas por nível alto da câmara, o que já era esperado, visto que o minério tende a ser mais granulado quão mais dura é a rocha.

O que é mostrado pela significância estatística, mediante informações na Figura 11, onde $p < 0,001$, mostra que há correlação entre a dureza da rocha e o número de paradas por nível alto da câmara dos britadores. Isso reforça a escolha por esta variável como sendo importante para o processo e o problema em questão.

Figura 11 - Correlação entre paradas por nível alto na câmara de britagem e minérios compactos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É notório que a quantidade de eventos tem relação com a quantidade de minério compacto alimentado, entretanto sabe-se que esta é uma variável estocástica dentro do modelo de controle por parte da usina, uma vez que o máximo que se pode interferir no despacho quanto à restrição de litologia é acordar um valor médio e limite deste minério para os planos de alimentação mensais, semanais, diários e horários, porém a variabilidade instantânea é dependente da ordem em que os caminhões que basculam e das frentes que os compõem.

4.4.2. Filosofia de Controle de Alimentação e Nível Alto da Câmara

A filosofia de controle dos alimentadores de placas foi selecionada como entrada importante devido à sua forma de atuação, pois anteriormente ao projeto, cada linha da britagem contava apenas com o sensor de bica, que mede se há minério acumulando-se na grelha e que possa vir a se acumular até chegar ao alimentador de placas, podendo causar um dano no mesmo.

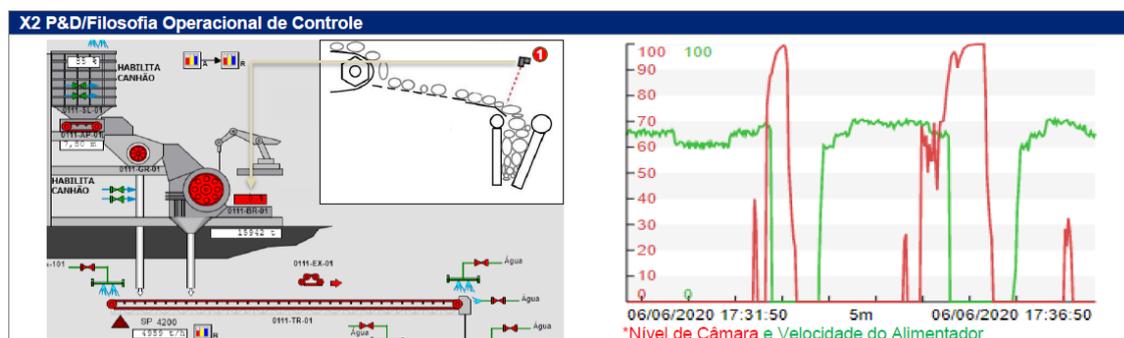
Quando o material granulado se acumula na grelha, o sensor de acúmulo de material na bica de alimentação é atuado, conforme ilustrado abaixo, na parte esquerda da Figura 12.

Ao ser atuado, o alimentador é parado durante um determinado tempo, até que o sensor não esteja mais atuando. Este tempo com o alimentador parado causa prejuízos na produção, assim como eleva o número de partidas do equipamento, fazendo com que o mesmo esteja mais sujeito à fadiga e tenha comprometida sua disponibilidade.

Já em relação ao nível da câmara do britador, um outro *input*, é importante pois é onde realmente ocorre o problema, uma vez que foi identificado em campo, que apenas o sensor de acumulação na bica não representa a medição da câmara, como mostra a localização do sensor atual, mediante britador, no esquema à esquerda da Figura 12.

Já a direita da Figura 12, é possível observar o comportamento da lógica atual em relação ao intertravamento com o sensor de bica, apontando os *gaps* de perda, produção mediante ocorrência destas paradas (curva verde sinaliza produção, curva vermelha sinaliza o nível do sensor de bica).

Figura 12 - Posição do sensor atual, à esquerda, e lógica atual de alimentação, à direita



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5. Etapa de Melhoria de Processos (DMAIC)

Nesta etapa serão justificadas, de maneira prévia, as ações tomadas visando reduzir a média das paradas por nível alto da câmara. Inicialmente será trazida a

fundamentação física para as ações tomadas. Ou seja, se elas fazem sentido do ponto de vista físico, pois a parada tem relação com o balanço de massas.

Além disso, nos próximos subtópicos serão colocadas também as justificativas operacionais que amparam as ações adotadas.

Por fim, serão tratadas as ações, propriamente ditas, vinculadas às três principais entradas selecionadas (Nível da Câmara dos britadores, Lógica de Alimentação dos Britadores e Partição Litológica Alimentada)

4.5.1. Embasamentos da Proposta de Solução

Apesar de não ser possível prever, com exatidão, a ocorrência do fenômeno de sobretaxa nos britadores primários, é possível compreender quando a parada está se iniciando, ou seja, seus mecanismos de ocorrência.

Mediante operação assistida (*gemba*), como parte dos métodos de avaliação e análise do cenário real, verificou-se que, quando ocorre excesso de material granulado, o minério preenche a câmara do britador de forma gradativa, em um tempo que depende inversamente da diferença entre a vazão volumétrica da alimentação e produto do equipamento.

Porém, atuar neste fenômeno a partir do conhecimento das vazões instantâneas nos britadores se mostra inviável, uma vez que, para saber exatamente qual é a taxa instantânea de alimentação do britador, deveríamos conhecer uma série de variáveis, que dependem tanto da natureza mecânica do minério, quanto da distribuição granulométrica gerada no plano de fogo, entre outras.

É necessário ressaltar que não é possível realizar a instalação de balanças dinâmicas para medir as massas direcionada aos britadores, devido as condições atuais estruturais/espaciais não permitirem.

Mesmo não conseguindo medir estas vazões instantâneas, de alimentação e produto dos britadores, é notório que para que não haja “enchimento” da câmara, a vazão de entrada deve estar no máximo igual a vazão de saída do equipamento.

Conforme a primeira lei da termodinâmica, o fluxo de massa pode atravessar as fronteiras do sistema, desde que este seja aberto ou possua volume de controle (SILVEIRA e MARIANI, 2005). Uma vez que o minério realiza uma trajetória de escoamento unidimensional, em circuito aberto, possuindo como volume de controle a câmara de britagem, as paradas por nível alto da câmara dos britadores se enquadram neste cenário.

Sabendo-se que as paradas por nível alto da câmara se enquadram na primeira lei da termodinâmica da conservação das massas, as vazões nos britadores e volume de câmara, arranjados na equação 1, utilizam do conceito de conservação das massas para justificar a aplicação de um possível segundo sensor, que irá medir o nível da câmara de britagem, fornecendo uma indicação indireta da vazão de enchimento da câmara, a partir da leitura do volume interno da mesma, fornecendo indiretamente o resultado entre vazão de alimentação e vazão de produto nos britadores.

Ainda na Equação 1, pode-se obter outro fator importante para atuar, que é o tempo de enchimento da câmara. Aliado ao volume da câmara, tem-se ferramentas suficientes para alteração da nova filosofia de controle da alimentação dos britadores, já que possibilitará avaliar o tempo necessário gasto para encher ou esvaziar a câmara de britagem.

$$Eq. 1 \quad t = \frac{Vc}{(Ta - Pb)} \quad \therefore Vc = t \times (Ta - Pb) \quad \therefore VE = (Ta - Pb) \quad \therefore VE = t \times Vc$$

Sendo:

t = tempo necessário para preencher a câmara do britador (h).

Vc = Volume interno da câmara de britagem (m³).

Ta = Taxa de alimentação do britador (m³/h).

Pb = Produto de britador (m³/h).

VE = Vazão de Enchimento (m³/h).

Logo, como forma de medir a diferença entre as vazões de alimentação e produto dos britadores, ou seja, o “esvaziamento” ou “enchimento” da câmara, faz-se necessário a utilização de um segundo sensor, medindo o nível da câmara de britagem, de forma que possibilite atuar no “controle” da vazão mássica de alimentação dos britadores, considerando sua condição de nível de câmara.

Sendo assim, duas das entradas obtiveram justificativas para gerar planos de ação, sendo elas o Nível da Câmara e a Filosofia de Alimentação dos Britadores, justificadas acima.

A terceira entrada principal mapeada, Partição Litológica, já apresenta adoção de limites máximos para restrição de alimentação de minérios compactos, porém,

como descrito na etapa de definição, a correlação da parada por nível alto da câmara com os minérios compactos não só depende do *blend* horário, mas também dos basculamentos individuais, já que os britadores recebem a alimentação praticamente direto da mina.

Como foi justificado acima, as duas entradas principais detectadas para o problema e que serão objeto das ações (Nível da Câmara e Lógica de Alimentação dos Britadores) são inteiramente dependentes da aplicação de um segundo sensor, já que este segundo sensor será o responsável por “avaliar” o nível da câmara e, a partir do nível da câmara pode-se criar uma nova lógica operacional para alimentar os equipamentos.

Pensando de forma operacional, a aplicação de sensores para estas atividades é aconselhável e fornece inúmeros exemplos práticos. Os sensores são dispositivos que, sujeitos a alguma energia do ambiente, sofrem alterações e geram diferentes respostas, possibilitando a correlação entre grandezas (FIALHO, 2002). De acordo com o autor, os sensores tipo *laser* e tipo radar realizam medidas de nível, sendo aplicados na mineração devido a sua imunidade a ambientes extremos, fácil calibração e baixa manutenção.

4.5.2. Plano de Ação

Com o intuito de reduzir o número de paradas por nível alto da câmara de britagem, considerando as duas entradas principais já destacadas, um plano de ação foi estabelecido, conforme mostrado na Figura 13.

Após estruturadas, as ações receberam seus respectivos prazos para concretização, possibilitando o início da fase de testes em conformidade com a meta do trabalho.

Figura 13 - Plano de ação para atacar as entradas principais selecionadas

Pontos Principais do Plano de Ação					
(X's)	ID	Ação	Data	Respons.	Status
X11	Medição do nível de câmara	Especificar e instalar o 2º Sensor de Medição do Nível de Câmara	15/07/20		Concluída
X2	P&D/Filosofia de controle alimentadores de placas	Definir e alterar P&D da britagem primária	20/07/20		Concluída
X2 e X11	Medição do Nível de Câmara e P&D	Avaliar e implantar ações para mitigar riscos operacionais	30/07/20		Concluída
X2 e X11	Medição do Nível de Câmara e P&D	Caso seja comprovado ganhos a L2 deverá ser padronizada conforme a L1	31/12/20		Concluída

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por meio da identificação dos fluxos de massa que ultrapassam o volume de controle, estes sensores, amarrados ao alimentador de placas por meio de uma lógica de funcionamento, visam tornar dinâmica a alimentação do britador, de forma a adequá-la a capacidade instantânea do equipamento.

Logo, com a instalação do novo sensor, espera-se conseguir medir o nível interno da câmara de britagem, criando uma nova lógica de alimentação que irá reduzir a velocidade do alimentador quando o sensor de nível da câmara atingir um determinado valor, possibilitando que o britador finalize a cominuição do minério sem que a alimentação seja cortada para tal.

O sensor de acúmulo, já existente, continuará com a mesma lógica de funcionamento mediante filosofia de operação. Logo, a alimentação continuará sendo cortada caso o sensor de acúmulo direcionado na bica seja atuado, já que sua função é proteger os equipamentos contra acúmulo de minério granulado sobre os mesmos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O novo sistema de medição e filosofia de operação teve seus testes iniciados no dia 03/08/2020, na Linha 01 da Britagem Primária da Mina do Sapo, em Conceição do Mato Dentro (MG).

Os resultados obtidos são discutidos nos próximos tópicos, e representam o período de testes do novo sistema, compreendido entre agosto até dezembro do ano de 2020. Neste tópico, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a implementação do plano de ação, citado no tópico anterior, incorporando a etapa de controle do DMAIC.

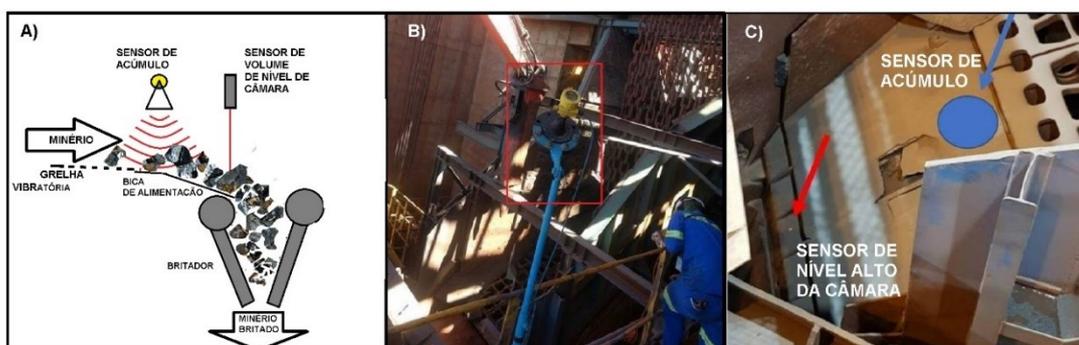
5.1. Instalação do Novo Sensor

Mediante ações do plano, na Figura 14, é possível observar na porção A o desenho esquemático do posicionamento do novo sensor e do sensor preexistente. Na porção B, da mesma figura, o novo sensor instalado na linha 01 da britagem primária.

Já na porção C, é possível observar posição da leitura do novo (sensor de nível de câmara) e do sensor preexistente. O sensor de acúmulo continua posicionado sobre a bica, enquanto que o sensor de nível da câmara (novo sensor), foi posicionado na parte superior da mandíbula fixa.

Como já dito nos tópicos anteriores, o objetivo do novo sensor é possibilitar a medição do nível da câmara de britagem, e então, realizar a manobra de redução da alimentação. Logo, a medição do nível da câmara de britagem, uma das entradas potenciais do problema, teve a implementação de sua ação correspondente dentro do prazo estabelecido no plano de ação, com instalação efetuada com êxito pelas equipes de engenharia, elétrica e automação.

Figura 14 - Esquema de funcionamento e posicionamento do novo sensor, à direita, e fotos em campo do novo sensor instalado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2. Nova Filosofia Operacional de Alimentação dos Britadores

A segunda ação do plano seria atuar na nova filosofia operacional de alimentação dos britadores, visto que o novo sensor já estava instalado em campo, como mostra o esquema à esquerda da Figura 15, sendo o sensor 1 o novo sensor.

Como mostram os gráficos à direita da Figura 15, a filosofia anterior de alimentação contava apenas com o sensor 2 (sensor de acúmulo), e realizava então o corte quando o mesmo era atuado. Com a nova filosofia de operação, o sensor 1 (novo sensor), quando atuado, reduz a velocidade do alimentador enquanto aguarda o britador finalizar a cominuição com menor taxa, elevando a taxa novamente quando o sensor não está mais atuado.

Perante o comportamento da nova filosofia de operação em conjunto com o segundo sensor, é possível observar que os cortes de alimentação foram evitados, evidenciado no comportamento da taxa, nos gráficos à direita da figura 15. A curva em verde representa a taxa e a curva em vermelho, o nível da câmara, o gráfico na parte superior da figura 15 representando o comportamento antes da nova filosofia operacional e o gráfico na parte inferior da figura 15 o comportamento após a nova filosofia operacional de alimentação dos britadores.

Figura 15 - Análise do novo sistema de sensoriamento e alimentação da britagem primária.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3. Interferência Litológica

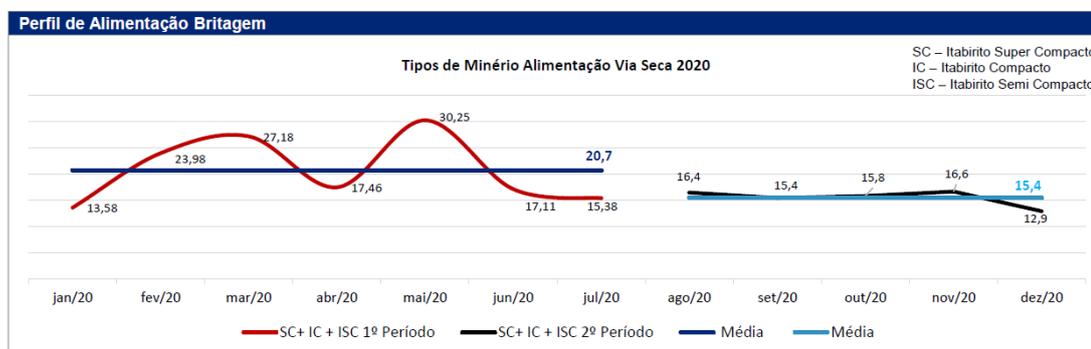
A fim de avaliar os ganhos obtidos, faz-se necessária também a avaliação do percentual de minérios compactos que alimentaram a britagem antes e durante o período dos testes.

Como pode ser visto na Figura 16 em relação ao período anterior aos testes (janeiro até agosto do ano de 2021), houve uma redução de 5% na quantidade de minérios compactos que alimentaram a planta.

De acordo com as médias dos períodos, antes do novo sistema, 20,7% de minério compacto esteve compondo a alimentação da britagem, enquanto que durante os períodos de testes do novo sistema, esta média foi reduzida para 15,4%. Porém, o novo sistema foi colocado em teste apenas para uma das linhas da britagem.

Logo, mesmo com o cenário de alimentação mais favorável à ocorrências das paradas por nível alto da câmara dos britadores, como as duas linhas são idênticas, pode-se avaliar não só a diferença entre antes e após o período da instalação do novo sistema, mas também comparar os resultados das duas linhas durante a fase de teste, mediante as paradas por nível alto da câmara.

Figura 16 - Cenário litológico de minérios compactos alimentados na britagem primária da *Anglo American* (Minas-Rio), no ano de 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Etapa de Controle (DMAIC)

Tendo em vista que as ações implementadas tiveram por objetivo a redução das paradas por nível alto da câmara dos britadores, considerando também que existe a influência do minério alimentado, conforme salientado no tópico anterior, o sistema foi instalado apenas na Linha 01 da britagem primária, visando minimizar os erros de análise causados pelas variáveis do minério, uma vez que a Linha 02 é idêntica e permite a comparação.

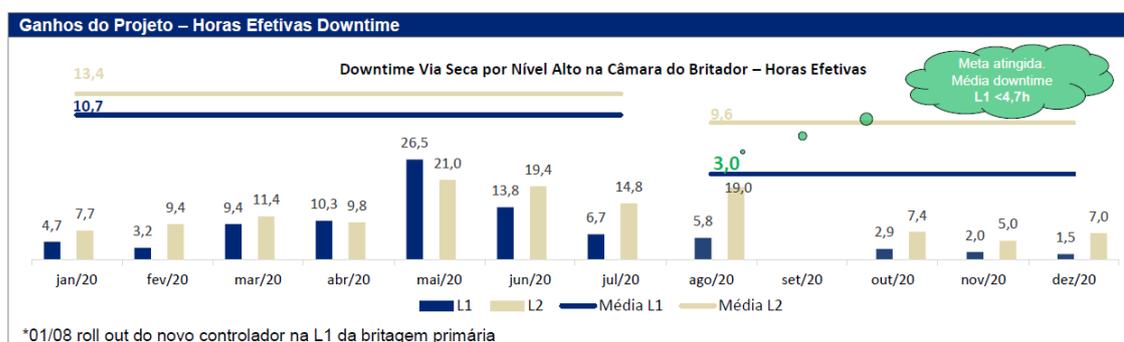
Nos tópicos seguintes, serão abordados tanto os resultados obtidos com o projeto quanto das ações tomadas para que as melhorias se mantenham no novo patamar alvo de quantidade de tempo parado por nível alto da câmara.

5.4.1. Ganhos do Projeto

Como pode ser visto na Figura 17, o projeto obteve durante a fase de teste, correspondente ao período entre agosto e dezembro de 2020, uma média de horas de parada por nível alto da câmara de britagem de 9,6h/mês na linha 02 da britagem (linha na qual não foi instalado o novo sistema) e 3,0h/mês na linha 01 da britagem (linha na qual o novo sistema foi implementado).

Em relação ao período antes e pós teste, foi possível identificar uma redução de 3,8h/mês na 02 da britagem (linha que não recebeu a melhoria) e 7,7h/mês na linha 01 da britagem primária (linha na qual foi instalado o novo sistema para teste).

Figura 17 - Ganhos obtidos com o novo sistema, em redução de horas efetivas de parada da britagem primária por nível alto da câmara de britagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

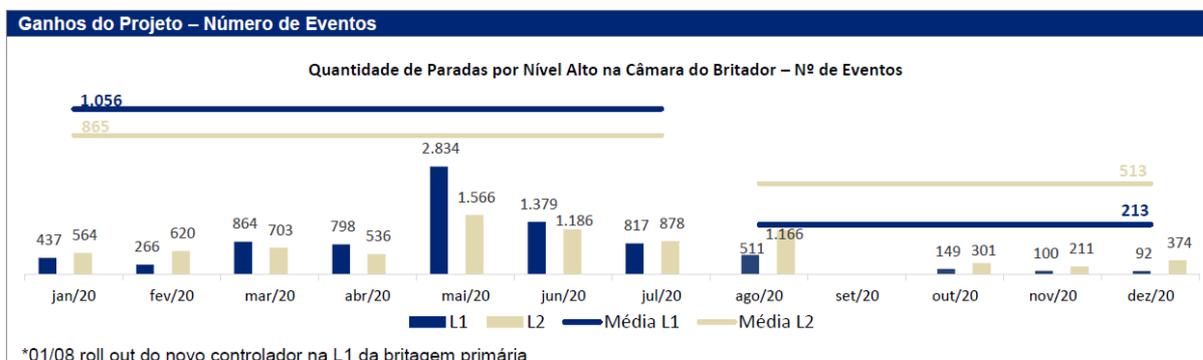
Logo, em relação à quantidade de horas paradas por nível alto da câmara dos britadores (sobrecarga de material granulado), fica evidente a influência da menor quantidade de minério compacto alimentada no período pós teste, uma vez que houve redução da quantidade de horas paradas por nível alto da câmara em ambas as linhas.

Entretanto, em relação ao período de testes, a linha 01 da britagem obteve 6,6h/mês a menos que a linha 02, demonstrando que a melhoria foi efetiva mesmo com a menor quantidade de minério compacto favorecendo ambas as linhas.

De acordo com a Figura 18, em relação às paradas por nível alto da câmara dos britadores, no que tange ao número de ocorrências, o projeto obteve, durante a fase de testes, uma média de 213 ocorrências/mês na linha 01 da britagem (linha que recebeu a melhoria), contra 513 ocorrências/mês na linha 02 (linha que não recebeu a melhoria).

É possível identificar pelo gráfico que a linha 01 da britagem (linha que recebeu a melhoria) encontrava-se com média mensal de 1.056 ocorrências/mês, superior à média da linha 02 (linha que não recebeu a melhoria), que operava com 865 ocorrências/mês.

Figura 18 - Ganhos obtidos com o novo sistema, em redução de número de ocorrências de paradas da britagem primária por nível alto da câmara de britagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

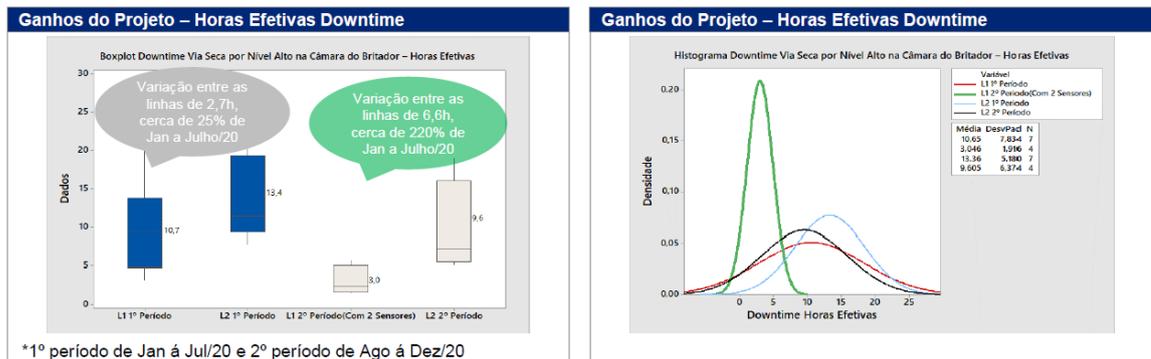
Desta forma, a diferença encontrada nos resultados antes e após o novo sistema foi ainda mais nítida, visto que na linha 01 da britagem o número de ocorrências era maior que na linha 02, e após projeto houve redução de aproximadamente 80%, saltando de 1.056 ocorrências/mês para 213 ocorrências/mês.

Em paralelo à discussão a respeito da redução da quantidade de compacto alimentada, a linha 02, que antes demonstrava 865 ocorrências/mês, reduziu para 513 ocorrências/mês, mesmo sem a melhoria. Logo, houve redução de 40% na linha dois, enquanto que na linha 01 a redução do número de ocorrências foi de 80%.

Como mostrado na Figura 19, no que diz respeito ao controle estatístico dos resultados obtidos durante a fase de testes, o gráfico à direita mostra que a curva de distribuição mensal de horas paradas por nível alto na câmara de britagem na linha 01 (em verde), após a melhoria, obteve média de 3h/linha/mês, com desvio padrão de 2h/linha/mês. Enquanto que a linha 02 da britagem (não recebeu a melhoria), obteve média de 9,6h/linha/mês, com desvio padrão de 6,4h/linha/mês, durante o período de testes.

No gráfico à esquerda, da Figura 19, pode-se observar que a linha 1, durante fase de testes, obteve distribuição das paradas mensais com menor média e maior controle.

Figura 19 - Comportamento estatístico das linhas, antes e após novo sistema.



Fonte: elaborado pelo autor.

5.5. Confiabilidade e Ajustes do Novo Sistema

Assim como concluíram em seus testes de compressão, o itabirito friável contido na Serra do Sapo apresenta natureza pulverulenta, ocasionando erros na leitura dos sensores quando este tipo de minério é britado, pois seus fragmentos geram muita “poeira” (TURRER e MAZZINGHY, 2015).

Com relação as interferências de leitura dos sensores, é necessário pontuar a relação entre os períodos chuvosos e o aumento dos erros de leitura, uma vez que a cidade de Conceição do Mato Dentro (MG) apresenta períodos chuvosos bem definidos com presença de cerração e neblina. As gotículas de água presentes no ar, nestes períodos do ano, interferem na reflexão dos sinais emitidos e recebidos pelos sensores, ocasionando erros de leitura e, portanto, ineficiência dos mesmos.

Para reduzir os efeitos de erro de leitura do sensor de nível alto da câmara a partir das interferências dos particulados sólidos, um sistema de aspersão temporário foi montado e testado durante alguns momentos, não demonstrando eficiência na redução da interferência dos particulados na leitura do segundo sensor instalado.

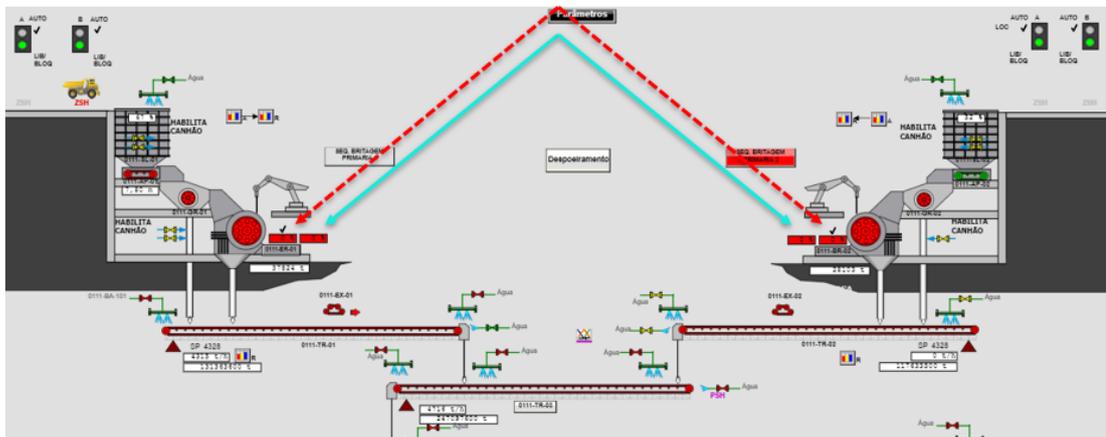
Além da umidade adicionada ao minério, que poderia causar complicações nas etapas subsequentes do processo a seco, o sistema de aspersão gera partículas de água em suspensão, o que também causa erros de leitura.

A solução encontrada foi a implementação de comandos no supervisório, acionados pelo operador da sala de controle, para que fosse possível habilitar e desabilitar o novo sensor e a lógica de alimentação que dele utiliza as leituras, à medida que as condições operacionais não estivessem favoráveis para uso do mesmo, como mostram as setas pontilhadas vermelhas, na Figura 20.

As setas azuis, da figura 20, indicam o *status* do sensor preexistente (sensor de acumulo de minério na bica). Com isso, o novo sensor pode ter sua ação na lógica de alimentação interrompida, caso as condições operacionais causem distúrbios da leitura do mesmo, impedindo que ele reduza a velocidade do alimentador por erro de leitura, ou até mesmo por falha no instrumento.

Estas ações vão de encontro ao controle do processo e garantia da permanência da melhoria implementada.

Figura 20 - Sistema para desabilitar segundo sensor a depender do número de indicações falsas de sinal, com retorno automático do sistema em duas horas, caso não seja reabilitado pela sala de controle.



Fonte: Imagem do supervisório, adaptado pelo autor.

6. CONCLUSÕES

Para a linha 02, após queda de 5% na participação dos minérios compactos na alimentação (20% para 15%), entre antes e após agosto, do ano de 2020, observou-se uma redução de aproximadamente 4 horas na quantidade de paradas mensais da linha 02, que saiu de média 13,4 h/mês para 9,6 h/mês.

A primeira conclusão deste trabalho é que a causa Partição Litológica do minério alimentado se mostrou muito relevante para a ocorrência das paradas por sobrecarga dos britadores como já era estimado nas análises do trabalho, evidenciado pelo comportamento da linha 02 da britagem, que mesmo sem receber a melhoria demonstrou queda nas paradas mensais por sobrecarga.

Comparando a diferença entre as linhas 01 e 02 da britagem, antes e após o período de início dos testes, a fim de que não haja interferência do minério na análise, é possível afirmar que a diferença entre as quantidades médias de horas paradas pelas linhas saiu de 25% (antes do início dos testes) para 220% (durante a fase de testes). Logo, é a diferença entre a quantidade de horas paradas por nível alto foi elevada em aproximadamente 200%, demonstrando eficácia das soluções adotadas para atacar as duas entradas selecionadas (Nível da Câmara e Lógica de Operação).

Após implementação do novo sistema, a linha 01 (linha que recebeu a melhoria) parou 3h/linha/mês por nível alto da câmara de britagem. A meta do projeto foi baseada no terceiro quartil da distribuição de frequência média mensal destas paradas, sendo traçado como 4,7h/mês/linha, mostrando que a proposta de solução foi adequada para o cenário do problema, já que a meta foi superada em 1,7h/mês/linha, possivelmente devido à menor participação de compactos.

Cabe ainda comentar sobre possíveis ganhos intangíveis, já que o número de eventos ocorridos na linha 01 representou praticamente a metade do número de eventos ocorridos na linha 02 (linha que não recebeu a melhoria).

Com isso, sabendo-se que a fadiga é um mecanismo de falha que gera e perpetua trincas, tendo em vista que a fadiga é resultado da taxa de variação dos esforços submetidos nos corpos, pode-se concluir também que os alimentadores de placas são equipamentos sujeito à fadiga, principalmente quanto expostos a um número maior de acionamentos e desligamentos. (MOREIRA *et al.*, 2018).

Desta forma, de maneira intangível, pode-se dizer que a solução também reduz a probabilidade de falhas mecânicas por mecanismos de fadiga nos alimentadores de placas.

Por fim, faz-se necessário sugerir possíveis melhorias futuras no sistema, do ponto de vista da operação da usina. Primeiramente o desenvolvimento de uma linha de testes voltadas à avaliação de diferentes sensores de nível, a fim de elevar a robustez e confiabilidade dos sinais. Segundo ponto seria avaliar lógicas com diferentes modelos de rampa de redução de velocidade do alimentador a depender de algoritmo que avalie a média móvel dos últimos minutos, possivelmente obtendo reduções mais condizentes com as características dos materiais alimentados nas porções que estão sendo lavradas e transportadas para a britagem.

Em âmbitos externos à britagem, culminando em um trabalho de geometurgia, a última sugestão seria atacar a entrada “Partição Litológica”, por meio de painéis de controles dedicados à atividade de monitoramento das frentes e caminhões que estão transportando materiais mais problemáticos, possivelmente negociando formas estratégicas para alimentar estes minérios.

7. REFERÊNCIAS

ABREU, P. A. et al. **Estratigrafia, faciologia e tectônica do Supergrupo Espinhaço na região do Serro e Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, Brasil.** Zbl. Geol. Paleont., Teil I H, v. 5, p. 857-873, 1989.

AMORIM JÚNIOR, M. B. et al. **Aplicação do FMEA para melhoria da gestão da manutenção de uma empresa de britagem no estado de Pernambuco.** 2017.

BARROS, M. S. **Estudo de estabilidade de taludes Step 2 Sul Mina Serra do Sapo Conceição do Mato Dentro/MG.** 2017.

CNI, 2012, **The Steel Industry in Brazil**, Confederação Nacional da Indústria e Instituto Aço Brasil, Brasília. p.50, 2012.

DE SALES, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu.** p.20, 2012.

DE SOUZA, N. A. F. **Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos.** UFRJ/Escola Politécnica, 2010.

FERNANDES, F. C. J.; CASTRO, C.; BIGOGNO, N. G. **Aumento da utilização do circuito de britagem da usina de beneficiamento da Votorantim Metais, unidade de mirai-mg.** 2015.

FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises.** Saraiva Educação SA. 2002.

HORNBURG, S. et al. **Método para eventos Gemba kaizen.** 2009.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M.; BRAGA, P. F. A. **Cominuição: Britagem e moagem.** (CETEM, cap 4.2 6ª edição, 2018).

MORAIS, J. L. ; GRIPP, M. F. A. **Fundamentos para simulação dos desmontes de rocha por explosivos.** Rem: Revista Escola de Minas. v. 57, n. 4, p. 241-248, 2004.

MOREIRA, W. L. et al. **Estudo da propagação de trincas por fadiga em caçambas de recuperadoras de minério.** p.25, 2018.

PERES, A. E. C. et al. **Beneficiamento de minério de ouro.** p. 17, 2002.

REIS, L. A.; SANTANA, A. C.; EUZÉBIO, T. A. M. **Aplicação de dmaic seis sigma na melhoria de desempenho de malhas de controle em uma planta de processamento de minério de ferro.** Conference Paper, p. 4, 2017.

SILVEIRA, M. R.; MARIANI, V. C. **Investigação das equações de Navier-Stokes e conservação da massa.** In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. 2005.

SORDAN, J. E. et al. **Condução de um projeto Seis Sigma para a redução dos custos da não qualidade no processo de produção de balas.** Revista de Engenharia de Produção, v. 2, n. 1, p. 34-46, 2020.

TURRER, H. D. G. et al. **Desempenho no processamento mineral de dois tipos de itabiritos da Serra do Sapo.** 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, ABM, 9p, 2015.

VIEIRA, L. et al. **Considerações práticas sobre controle avançado de processos aplicado a moinho de bolas.** In: Anais do XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology. 2013.