

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

JOYCE BRUNORO THOMÉ
VINICIUS DE OLIVEIRA POLEZ

**RECUPERAÇÃO DO ROLO DA PRENSA DE
ROLOS DA PELOTIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO**

VITÓRIA
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

JOYCE BRUNORO THOMÉ
VINICIUS DE OLIVEIRA POLEZ

RECUPERAÇÃO DO ROLO DA PRENSA DE ROLOS DA PELOTIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico, como requisito para a obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Professor Doutor Luciano de Oliveira Castro Lara.

VITÓRIA

2015

JOYCE BRUNORO THOMÉ
VINICIUS DE OLIVEIRA POLEZ

RECUPERAÇÃO DO ROLO DA PRENSA DE ROLOS DA PELOTIZAÇÃO: ESTUDO DE CASO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico, como requisito para a obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Professor Doutor Luciano de Oliveira Castro Lara.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano de Oliveira Castro Lara
Orientador

Eng. Chrystian Horsth Pereira

Eng. Letícia Costa Ribeiro

Dedicatória

À Deus, familiares e amigos, nossa gratidão.

RESUMO

Este Projeto de Graduação foi elaborado com o objetivo de analisar a falha de um equipamento crítico para a produção e sugerir possíveis ações de melhoria que garantam maior confiabilidade e aumento da disponibilidade operacional para uma planta industrial. Trata-se de uma ocorrência em uma prensa de rolos, etapa do processo de cominuição de minério, que gerou uma economia de pouco mais de 13,5 milhões de reais ao processo de manutenção. Tal fato foi identificado na Usina III da VALE (Complexo de Tubarão) em decorrência de uma manutenção preventiva programada para a *Prensa de Rolos 3PR7* e a observância de desvios no seu funcionamento, assim como desvios em suas características estruturais. Com a finalidade de identificar a causa raiz de tais problemas, foi realizado um estudo das falhas, seguindo a metodologia padrão de análise de falha adotada pela empresa em questão. Além da realização de uma análise específica e detalhada para a falha do equipamento objeto de estudo deste trabalho, tentou-se estabelecer uma correlação com falhas registradas para equipamentos similares, localizados em diferentes usinas da mesma empresa. Entretanto, não foram encontradas evidências de correlação com as falhas registradas para os demais equipamentos analisados, visto que a circunstância era inerente ao processo realizado somente na Usina III. A causa raiz obtida não se relaciona diretamente com a Prensa 3PR7, mas sim ao desvio de função da mesma e a não adequação do equipamento para as condições de trabalho requeridas, e diversos fatores que serão abordados em detalhe no presente Projeto. Por fim, foram apresentadas sugestões de melhoria para evitar, ou reduzir, o risco de recorrência das falhas observadas.

Palavras-chave: falha; análise de falha; recuperação de rolo; prensa de rolos; pelletização; VALE.

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CVRD – Companhia Vale do Rio Doce

LNA – Lado Não Acoplado

kW – *Kilowatt*

MG – Minas Gerais

mm – milímetros

MPa – mega pascal

NBR – Norma Brasileira

PRO – Procedimento Operacional da VALE

ton/h – toneladas por hora

3PR7 – Referente à Prensa de Rolos

5W2H – Referente ao Método dos Porquês

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos de mineração da Vale	13
Figura 2 - Do virador ao embarque: etapas do processo de pelotização da Vale	15
Figura 3 - Diagrama de Causa e Efeito (Ishikawa)	28
Figura 4 - Elementos básicos do FMEA	30
Figura 5 - Princípio da moagem	36
Figura 6 - Funcionamento da prensa de rolos de alta pressão	37
Figura 7 - Tipos de rolos: inteiriços (esq.), anel (centro), segmentados (dir.)	37
Figura 8 - Montagem eixo-rola	38
Figura 9 - Pinos utilizados nos rolos da prensa de Cerro Verde	39
Figura 10 - Desgaste do revestimento nas diferentes regiões do rolo	40
Figura 11 - Componentes da Prensa de Rolos de Alta Pressão	42
Figura 12 - Rolos da prensa 3PR7	43
Figura 13 - Rolamento com deficiência de lubrificação (esq.) e após limpeza (dir.)	47
Figura 14 - Distribuidor de lubrificação entre mancais e trilhos	48
Figura 15 - Painel de controle da prensa 3PR7 com as linhas Y21 (lubrificação do trilho do rolo móvel) e Y22 (lubrificação dos mancais de rolamento) já em posição correta	48
Figura 16 - Visão do acesso ao rolamento e seu estado desejável	49
Figura 17 - Queda de pinos em regiões aleatórias	50
Figura 18 - Regiões com perda de pinos e desgaste substancial da capa de rolo	51
Figura 19 - Eletrodo de acordo com o procedimento Polysius para recuperação de rolo	51
Figura 20 - Procedimento para furação e colagem de pinos em regiões mais afetadas	52
Figura 21 - Recuperação antes (esq.) e depois da furação e colagem (dir.)	53
Figura 22 - Circuito em que está inserida a prensa de rolos 3PR7	54
Figura 23 - Decaimento das propriedades da cola Loctite® 638 usada nos pinos	56
Figura 24 - Dados relacionados aos pinos	57
Figura 25 - Lado não acoplado (esq.) e lado acoplado (dir.)	57
Figura 26 - Região central (esq.) e pino com ancoragem de 12mm (dir.)	58
Figura 27 - Guia lateral original, conforme projeto	58
Figura 28 - Guia alternativa, conforme instalada	59
Figura 29 - Desgaste na capa superior ao esperado (região clara)	59
Figura 30 - Análise termográfica do rolo	61
Figura 31 - Demarcação do local de aplicação	63
Figura 32 - Princípio da cominuição na prensa de rolos	63
Figura 33 - Preparação da superfície do rolo: antes (esq.) e após (dir.)	64
Figura 34 - Rolo após a aplicação do prime	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Exemplo do Gráfico de Pareto	27
Gráfico 2 - Resultados de pressão hidráulica e torque	66
Gráfico 3 - Resultados de ganho de superfície	67
Gráfico 4 - Resultados de consumo de energia elétrica	67
Gráfico 5 - Resultados de Eficiência de Prensagem	68
Gráfico 6 - Participação do minério de Itabira	68
Gráfico 7 - Influência do minério de Itabira na Eficiência de Prensagem	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. A EMPRESA	13
2.1. PELOTIZAÇÃO	14
2.1.1. <i>PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA</i>	15
2.1.2. <i>FORMAÇÃO DE PELOTAS CRUAS</i>	17
2.1.3. <i>PROCESSAMENTO TÉRMICO</i>	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. MANUTENÇÃO	17
3.1.1. <i>TIPOS DE MANUTENÇÃO</i>	18
3.1.2. <i>ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO</i>	20
3.1.3. <i>CONCEITOS</i>	21
3.2. ANÁLISE DE FALHAS	22
3.2.1. <i>CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS</i>	23
3.2.2. <i>CAUSAS FUNDAMENTAIS DAS FALHAS</i>	25
3.2.3. <i>MÉTODOS PARA ANÁLISE DE FALHAS</i>	26
4. METODOLOGIA CORPORATIVA DE ANÁLISE DE FALHA	31
4.1. PRAZOS PARA TRATAMENTO DE OCORRÊNCIAS	32
4.2. GESTÃO DO PLANO DE AÇÃO	32
4.3. DIVULGAÇÃO E REGISTRO	33
4.4. MODIFICAÇÕES E MELHORIAS	33
5. PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO	34
5.1. REVESTIMENTO DOS ROLOS	38
5.2. PRINCIPAIS REGIÕES DE DESGASTE DOS ROLOS	39
5.3. FATORES DETERMINANTES PARA A VIDA ÚTIL	40
5.4. PRENSA DE ROLOS 3PR7	41
5.4.1. <i>SISTEMA MECÂNICO</i>	42
5.4.2. <i>SISTEMA HIDRÁULICO</i>	44
6. ESTUDO DE CASO	45
6.1. FATOS RELEVANTES	45
6.2. INSPEÇÃO E DESVIOS OBSERVADOS	46
6.2.1. <i>DEFICIÊNCIA DE LUBRIFICAÇÃO DO MANCAL</i>	47
6.2.2. <i>AVARIA DOS ROLOS FIXO E MÓVEL</i>	49
6.3. ANÁLISE DO PROBLEMA	53
6.3.1. <i>PERDA DE PROPRIEDADES DA COLA</i>	55
6.3.2. <i>ANCORAGEM DEFICIENTE</i>	56
6.4. TRATATIVA PÓS ANÁLISE	60
6.4.1. <i>MATERIAIS E MÉTODOS</i>	61
6.4.2. <i>PROCEDIMENTO</i>	62

6.5.	RESULTADOS	65
6.5.1.	<i>DESEMPENHO DA RESINA CERÂMICA</i>	65
6.5.2.	<i>PRESSÃO E TORQUE</i>	66
6.5.3.	<i>SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E CONSUMO DE ENERGIA</i>	66
6.5.4.	<i>EFICIÊNCIA E INFLUÊNCIA DO MINÉRIO</i>	67
6.5.5.	<i>RESUMO DOS RESULTADOS</i>	69
6.6.	SUGESTÃO DE MELHORIAS	70
7.	CONCLUSÃO	71
8.	REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o mundo corporativo e industrial encontra inúmeros dilemas a serem enfrentados em busca da excelência de suas operações e serviços. Com a escassez cada vez maior, seja de matéria-prima, mão de obra ou energia, é necessário otimizar todos os processos de uma planta industrial – produzindo mais, com melhor qualidade, e utilizando menos recursos – de forma a se manter competitiva no mercado. Uma grande preocupação no neste âmbito é a garantia de produção, é necessário garantir a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos de uma planta de forma a atenderem a demanda, respeitando prazos e padrões de qualidade; a ausência destas garantias pode acarretar dano econômico e social.

Todo processo que represente uma incerteza operacional deve ser avaliado minuciosamente; uma incompatibilidade às exigências no cumprimento da demanda – seja ela de qualidade, de volume, ou econômica – seria a perda da função de um item crítico em uma planta operacional, gerando danos não somente à capacidade produtiva, como expondo seus operadores e ambiente ao risco.

Em decorrência do que foi dito acima, percebe-se a importância do planejamento da manutenção tendo como base a criticidade dos processos e equipamentos de forma a garantir a missão produtiva.

Entretanto, apesar de um bom planejamento e manutenções realizadas periodicamente, ainda existe a possibilidade da ocorrência de falhas parciais ou globais em elementos críticos de um processo, fazendo-se necessária então a adoção de medidas suficientemente seguras e confiáveis a serem executadas em tempo hábil para a resolução do problema.

Como primeira medida faz-se uma análise de falha dos objetos de estudo a fim de detectar falhas de projeto para, a partir deste ponto, determinar um plano de ações de correção de desvio e de melhoria, prevenindo a ocorrência da repetição da falha em casos futuros.

A situação a ser examinada neste Projeto de Graduação terá como base o processo supracitado. Será feito um estudo de caso da recuperação de rolo da prensa de rolos da Usina III da empresa VALE.

O interesse no tema do presente trabalho é decorrente da possibilidade de proposição de sugestões de melhoria e visão sistêmica e pragmática das possíveis causas de falha, ocasionando uma economia substancial nos valores envolvidos na resolução do problema.

A estruturação do trabalho foi pensada de forma a se chegar naturalmente ao objetivo do presente Projeto, no segundo capítulo serão abordados aspectos gerais do ambiente em que o mesmo foi desenvolvido, a empresa Vale, o terceiro capítulo dará enfoque aos aspectos referentes à manutenção e à análise de falhas, suas definições, conceitos, tipos e métodos. O capítulo quarto detalhará criteriosamente o método corporativo da elucidação da análise de falhas. No quinto capítulo, abordaremos os aspectos relacionados ao equipamento prensa de rolos, assim como o equipamento fruto de estudo de maneira visual e sucinta, sua estrutura, componentes, características e funcionamento. Na sequência, temos no capítulo sexto, o estudo de caso referente à recuperação do rolo da prensa de rolos, nele também abordamos sugestões significativas de melhorias.

2. A EMPRESA

Criada através de decreto-lei pelo presidente Getúlio Vargas em junho de 1942, com controle acionário do governo federal, a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) foi organizada para impulsionar a exploração das riquezas minerais do subsolo brasileiro, principalmente o ferro.

Hoje não mais estatal e somente *Vale*, é uma empresa pioneira na mineração mundial, segunda maior mineradora do mundo e a maior empresa privada da América Latina; descobre e transforma os minerais que são matéria prima essencial para a confecção dos diversos produtos que usamos no dia-a-dia.

A Vale é líder na produção mundial de minério de ferro e níquel, e é uma grande produtora de manganês, caulim, alumínio, potássio, cobre e carvão (na figura 4, alguns dos principais produtos da empresa). Em seu primeiro ano, produziu 40 mil toneladas de minério de ferro, quantidade equivalente à que é embarcada por hora atualmente.



Figura 1 - Produtos de mineração da Vale
Fonte: VALE, 2014.

Além do seu negócio principal de mineração, a empresa também realiza pesquisa, logística, operações de distribuição e produz parte da energia que consome em suas operações.

A empresa busca, de forma incansável, oportunidades para alcançar novos padrões de excelência na indústria mineradora. Juntamente com funcionários, clientes, parceiros, acionistas e as comunidades das quais faz parte, a Vale se empenha em garantir um futuro melhor para o nosso mundo, através de forte comprometimento de responsabilidade socioambiental no desempenho de suas operações.

Com matriz situada no Rio de Janeiro, Brasil, a Vale emprega uma força global de trabalho de mais de 126 mil pessoas entre profissionais próprios e terceirizados e suas operações se estendem por mais de 30 países (VALE, 2014).

2.1. PELOTIZAÇÃO

A partir do principal produto da mineradora, o minério de ferro, é possível produzir *granulados* (material grosseiro peneirado), *sinter feed* (processo de aglomeração de sinter, produto que alimenta o alto forno), *pellet feed* (material super fino, de alta concentração de ferro e baixo teor de impurezas) e *pelotas* (pequenos aglomerados de minério de ferro utilizado como matéria-prima para a produção de aço) (ZORZANELLI; BOREL, 2010).

A Pelotização pode ser definida como processo de agrupamento da fração ultrafina gerada no beneficiamento do minério de ferro (abaixo de 0,15 mm) que, após tratamento térmico, é convertida em esferas de tamanhos que variam entre 8 a 18mm, com particularidades apropriadas para alimentação das unidades de redução (GARIGLIO; KLEIN, 1994).

A Pelotização na Vale é uma das etapas essenciais da cadeia produtiva por viabilizar economicamente uma parte da produção mineral que, por ser constituída de partículas muito finas, é inadequada para ser processada nas siderúrgicas.

De acordo com Gariglio e Klein (1994), o processo inclui os seguintes estágios:

- Preparação das matérias primas;
- Formação das pelotas cruas;
- Processamento térmico.

Ainda de acordo com Gariglio e Klein (1994), para garantir que a qualidade das pelotas esteja de acordo com os padrões de qualidade exigidos pelo mercado, é necessário que haja integração entre os processos supracitados, considerando ainda que os mesmos são interdependentes, visto que, para que o processo seja continuado, a etapa anterior influencia diretamente a posterior. Qualquer falha ocorrida em uma das etapas, dificilmente, poderá ser solucionada na seguinte e assim por diante.

Cabe destacar que “[...] a ordem mostrada dos processos pode ser diferente em algumas usinas, dependendo da disponibilidade física dos recursos do local” (GARIGLIO; KLEIN, 1994, p.3). Na figura 2 temos um fluxograma que exemplifica a ordem dos processos no Complexo de Tubarão.

A Vale possui um total de 11 Usinas de Pelotização, sendo 8 delas no Complexo de Tubarão (Espírito Santo/Brasil), 1 em Vargem Grande (Minas Gerais/Brasil), 1 em Fábrica (Minas Gerais/Brasil) e 1 no Complexo Industrial do Porto de Sohar (Sohar/Omã).

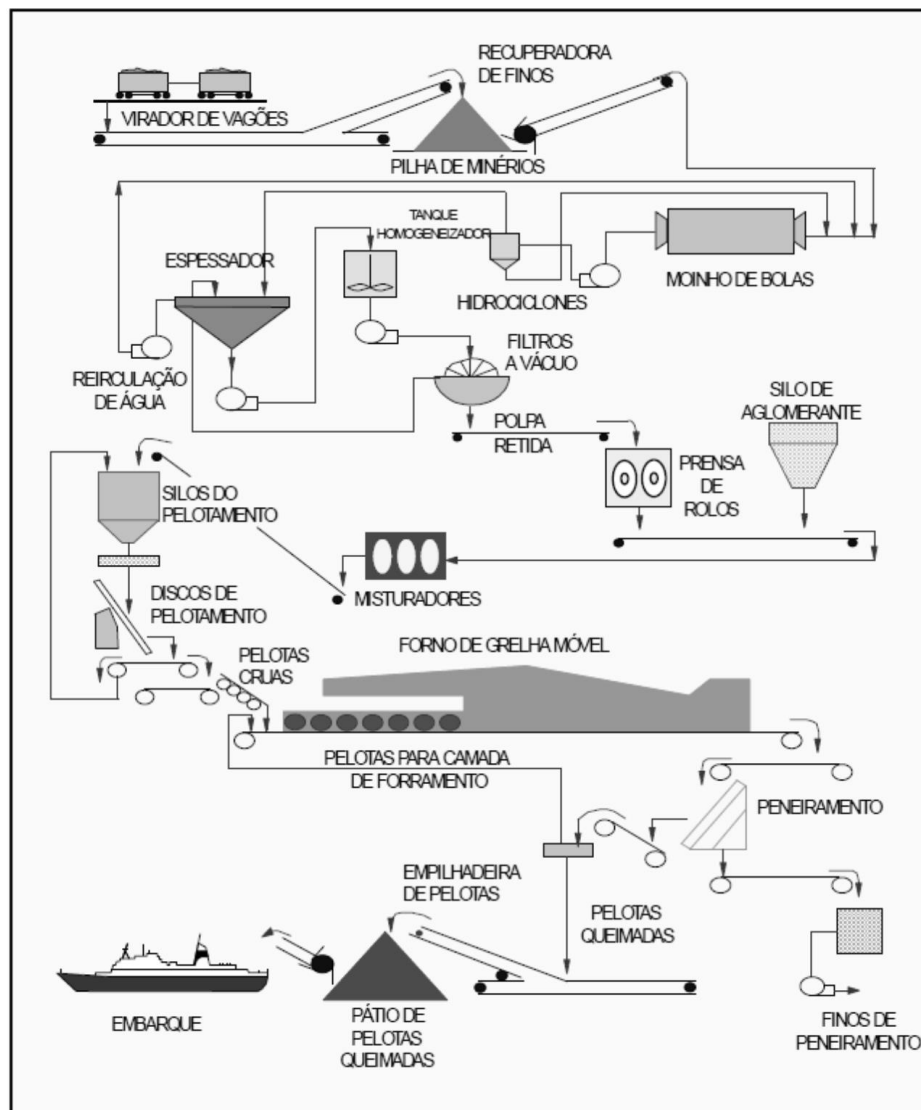


Figura 2 - Do virador ao embarque: etapas do processo de pelotização da Vale
Fonte: VALE, 2014.

2.1.1. PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

De acordo com Gariglio e Klein (1994), a matéria prima deve estar em condições adequadas para dar início ao processo de pelotização, e para tal, é necessária a sua preparação. Esta preparação consiste na separação de constituintes indesejados (contaminantes), aumento do teor de ferro (no caso de minérios de baixo teor deste

elemento), e adequação da granulometria dos materiais às faixas de distribuição de tamanhos e de superfícies específicas adequadas ao processo.

A matéria prima citada é composta por finos de minério de ferro, que após processo de pelletização torna-se produto nobre para ser utilizado em alto forno, onde se produz ferro gusa, e em forno de redução direta, para obtenção de ferro esponja (GARIGLIO; KLEIN, 1994).

Dependendo das exigências do cliente, podem ser acrescentados à mistura diferentes tipos “de minérios e aditivos, que modificarão a composição química e as propriedades metalúrgicas das pelotas” (GARIGLIO; KLEIN, 1994).

Ainda segundo os autores, constituem estágios de preparação as seguintes etapas:

- **Empilhamento de minério:** consiste na formação de pilhas, através de camadas de diferentes materiais, com o auxílio de uma empilhadeira, fazendo assim a homogeneização da matéria prima;
- **Recuperação de minério:** processo de recuperação da matéria prima homogeneizada, através da recuperadora de caçambas, que por intermédio da correia transportadora é transferida para a moagem;
- **Moagem:** processo de redução da superfície específica do minério para uma granulometria adequada;
- **Classificação:** processo pelo qual se separa o material que está ou não de acordo com a granulometria adequada. Caso o material não esteja adequado à especificação, é retornado ao processo de moagem;
- **Espessamento:** etapa de retirada do excesso de água para a adequação da densidade da polpa;
- **Homogeneização da polpa:** etapa em que se busca obter a estabilidade operacional e qualitativa do produto, economia de energia calorífica;
- **Filtragem:** etapa de retirada da umidade;
- **Prensagem:** processo subsequente filtragem, porém com características semelhantes ao processo de moagem, com o intuito de reduzir a superfície específica. Com a inserção da prensa é possível atingir maior produção e melhorar a qualidade do produto;

- **Mistura:** etapa em que serão adicionados os insumos necessários para o processo de pelotamento.

2.1.2.FORMAÇÃO DE PELOTAS CRUAS

Conforme Gariglio e Klein (1994), a formação de pelotas cruas, também intitulada *pelotamento*, tem como objetivo a produção de pelotas que tenham forma e tamanho apropriado, dentro de uma faixa, além de resistência mecânica capaz de suportar as etapas de transferência e transporte entre os equipamentos de pelotamento e de tratamento térmico.

2.1.3.PROCESSAMENTO TÉRMICO

O processamento térmico, ou *queima de pelota*, é um dos últimos processos pelo qual a pelota será submetida. Nesta etapa a mesma será queimada, adquirindo características físicas, químicas e metalúrgicas definitivas. Esta etapa requer cuidados pela irreversibilidade das propriedades adquiridas e também pelo fato de que

[...] os processos, envolvendo tratamento térmico com temperaturas elevadas, exigem atenção especial, para que não sejam expostos a riscos a qualidade do produto, a integridade dos equipamentos, bem como a segurança pessoal das pessoas que operam o sistema. (GARIGLIO; KLEIN, 1994, p.9).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MANUTENÇÃO

De acordo com Ferreira (1999), *Manutenção* são cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de motores e máquinas. E de forma complementar, de acordo com o dicionário Aurélio, *Manutenção* pode ser definida

como o conjunto de ações através das quais é possível garantir a permanência e a conservação de algo ou alguma situação.

O conceito de manutenção tem sofrido alterações de acordo com as gerações, inicialmente era entendida como o retorno de equipamentos ao estado original. Com as mudanças de conceito, passou-se a entender a manutenção como a forma de “[...] garantir a disponibilidade da missão dos equipamentos e instalações de modo a atender um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados.” (KARDEC; NASCIF, 2006, p.22).

De acordo com a Norma Brasileira 5462 (NBR 5462), uma outra definição acerca da temática seria a seguinte:

A combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Manutenção pode incluir como atividade e modificação de um item ou de um processo. (ABNT, NBR 5462, 1994).

Em Lafraia (2002), a definição é voltada para a permanência ou readequação de determinado item a um estado que o permita executar a função que lhe cabe.

A manutenção pode ser definida de diversas formas de acordo com a finalidade, dessa forma, Silva (1994) ao citar Mirshawka e Olmedo (1993) explica a manutenção da seguinte maneira:

[...] o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas e equipamentos, visando garantir a consecução de sua função dentro de parâmetros de disponibilidade, de qualidade, de prazo, de custos e de vida útil adequados. (MIRSHAWKA; OLMEDO, 1993 apud SILVA, 1994, p.13).

Nesta última definição é possível observar a inserção de uma nova preocupação na abrangência da definição, a influência da manutenção no processo em que se insere e na qualidade e custos do produto. Por ser uma definição completa e focar na visão sistêmica de processo, esta será a referência adotada para o presente Projeto de Graduação.

3.1.1. TIPOS DE MANUTENÇÃO

De acordo com Kardec e Nascif (2006), é possível dividir a manutenção em seis tipos: Manutenção Corretiva Não Planejada, Manutenção Corretiva Planejada, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva, Manutenção Detectiva e Engenharia de Manutenção.

E de acordo com Siqueira (2005), a manutenção pode ser subdividida quanto à programação: Manutenção Programada e Não-Programada (sendo esta última aperiódica ou periódica); e quanto ao objetivo: Manutenção Corretiva, Preventiva, Preditiva, Proativa, Produtiva e Detectiva.

Com base nos autores supracitados, vale abordar algumas definições de interesse dentro da nossa temática:

- **Manutenção Corretiva:** destina-se a corrigir falhas que já tenham ocorrido (SIQUEIRA, 2005).
- **Manutenção Preventiva:** tem como objetivo principal prevenir. Para sua aplicação leva-se em conta a finalidade do processo, geralmente a mesma é utilizada em locais cuja segurança seja preponderante (LIMA; CASTILHO, 2006).
- Acerca deste tipo de manutenção, tem-se o seguinte conceito: “[...] atuação realizada de forma a reduzir e evitar a falha ou a queda de desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos de tempo definidos.” (KARDEC; NASCIF, 2006, p.39).
- **Manutenção Preditiva:** tem como objetivo principal prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas a partir do acompanhamento de parâmetros para que o equipamento opere pelo maior tempo possível (LIMA; CASTILHO, 2006).

A manutenção preditiva é definida por Kardec e Nascif (2006) como a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

- **Manutenção Detectiva:** é a atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não-perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção (CAMARA, 2008).

- **Manutenção Produtiva:** objetiva garantir a melhor utilização e maior produtividade dos equipamentos (SIQUEIRA, 2005).
- **Manutenção Proativa:** a experiência é utilizada para otimizar o processo e o projeto de novos equipamentos, em uma atitude proativa de melhoria contínua (SIQUEIRA, 2005).
- **Engenharia de Manutenção:** é o suporte técnico da manutenção que está dedicado a consolidar a rotina e implantar melhoria (KARDEC; NASCIF, 2006).

3.1.2.ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

Praticar *Engenharia de Manutenção* é buscar as causas básicas das falhas de equipamentos, alterar as situações permanentes de mau funcionamento, extinguir problemas crônicos, elevar padrões e sistemáticas, desenvolver a manutenibilidade, dar *feedback* ao projeto, interferir tecnicamente nas compras (XAVIER, 2003, p. 5).

De acordo com Kardec e Nascif (2006), dentre as principais atribuições da Engenharia de Manutenção estão:

- Aumentar a confiabilidade;
- Aumentar a disponibilidade;
- Melhorar a manutenibilidade;
- Aumentar a segurança;
- Eliminar problemas crônicos;
- Solucionar problemas tecnológicos;
- Melhorar a capacidade do pessoal;
- Gerir materiais e sobressalentes;
- Participar de novos projetos (interface com a Engenharia);
- Dar suporte à execução;
- Fazer análise de falhas e estudos;

- Elaborar planos de manutenção e de inspeção e fazer sua análise crítica;
- Acompanhar os indicadores;
- Zelar pela documentação técnica.

3.1.3.CONCEITOS

Alguns conceitos ligados a manutenção são necessários para o bom entendimento do processo em si, tendo como base referências conceituadas e normas técnicas, seguem definições logo abaixo:

- **Falha:** de acordo com a NBR 5462 (1994) é possível definir falha como o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.
- **Pane:** de acordo com a NBR 5462 (1994) é possível entender pane como um estado proveniente da falha. Aqui é possível observar a diferença entre falha e pane, o primeiro é um evento, o segundo, um estado proveniente do primeiro. Ainda é possível definir o termo como parada acidental e repentina de um motor, por defeito de funcionamento.
- **Causa Raiz ou Causa Fundamental:** causa determinante da falha em última instância. Se tratada de maneira adequada deve evitar a reincidência da falha.
- **Modo de falha:** de acordo com a NBR 5462 (1994) é o conjunto de regras aplicáveis ao julgamento de tipos e gravidade de falhas, para determinação dos limites de aceitação de um item.
- **Classe de Falha:** a estrutura de classe de falha é desenvolvida por meio de um modelo de mapeamento de falhas, baseado nas relações entre elas. O que permite o agrupamento de problemas em diversos conjuntos de acordo com suas afinidades e relações naturais. Dessa forma, procura-se, inicialmente levantar as possíveis falhas nos equipamentos e agrupá-las aos respectivos itens. Essa combinação dá origem aos modos de falhas para cada classe falha analisada (SOUZA, 2010).

- **Evento:** ocorrências que tenham influência / impacto no desempenho de determinado sistema (PINTO, 2004).
- **Condição:** estado que tem a possibilidade de gerar impacto sobre o desempenho do sistema (PINTO, 2004).
- **Disponibilidade:** capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (NBR 5462,1994).
- **Confiabilidade:** capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. O termo *confiabilidade* é usado como uma medida de desempenho (NBR 5462,1994).

3.2. ANÁLISE DE FALHAS

Prevenir e corrigir falhas constituem os objetivos primários da manutenção. Para isto é necessário conhecer as formas como os sistemas falham (SIQUEIRA, 2005).

As situações de desvio de confiabilidade envolvem eventos, na maioria das vezes indesejáveis, usualmente chamados de falha. O primeiro passo é definir de forma clara e precisa o que vem a ser falha no processo em questão, por vezes, a falha é facilmente categorizável, no caso de falhas catastróficas por exemplo; no entanto, em determinadas situações, a criticidade da operação é quem determinará a categorização da falha.

De acordo com Colosimo e Freitas (1997), a prática mostra que produtos oriundos de uma mesma linha de produção, operando sob condições similares, podem apresentar tempo de falha distintos. Esta variabilidade impõe a necessidade da realização das análises de falha.

É de suma importância garantir o bom desempenho dos equipamentos e, em caso de ocorrência de estado de falha ou pane, que os desvios inerentes do processo sejam conhecidos e solucionados com primor.

Affonso (2005) destaca como principais objetivos da análise de falha os seguintes itens:

- Aumentar a confiabilidade operacional da planta, o que é feito aumentando-se a disponibilidade dos equipamentos;
- Reduzir os custos de manutenção;
- Reduzir os riscos de acidentes pessoais ou com equipamentos e de agressão ambiental.

Ainda de acordo com o autor, esta necessidade está vinculada à determinação das causas primárias da falha, que serão utilizadas na resolução do problema, através de ações corretivas e para que sejam evitadas situações recorrentes.

Analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar porque ele não mais executa sua função com segurança. Uma análise de falhas que não serve de subsídio para um conjunto de ações corretivas tem utilidade nula. Por outro lado, se não for possível determinar as causas básicas da falha não será possível introduzir melhorias no sistema (AFFONSO, 2005, p.14).

É importante dizer que, a profundidade da análise de falha deve ser adequada ao tipo de falha e às possíveis consequências ocasionadas pela mesma.

3.2.1.CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS

Conforme Siqueira (2005), de maneira geral, uma falha consiste na interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar uma função requerida ou esperada. As falhas podem ser classificadas sob vários aspectos, tais como origem, extensão, velocidade, manifestação, criticidade ou idade.

- **Quanto à origem:** podem ter origem primária, quando decorrem de deficiências próprias de um componente, dentro dos limites normais de operação; ou origem secundária, se derivam de operação fora dos limites normais, tais como sobrecarga, descargas atmosféricas, etc. Falhas de comando se originam de ordens errôneas do operador ou uso inadequado pelo usuário.

- **Quanto à extensão:** podem ser parciais, quando resultam do desvio de alguma característica funcional do item, além dos limites especificados, mas sem perda total de sua funcionalidade; ou completas, quando provocam a perda total da função requerida do item.
- **Quanto à velocidade:** são as falhas graduais, quando podem ser percebidas ou previstas por uma inspeção antes que ocorram; e falhas repentinas, em caso contrário.
- **Quanto à manifestação:** pode ocorrer por degradação, quando ocorre simultaneamente de forma gradual e parcial, podendo tornar-se completo ao longo do tempo, ao contrário das falhas catastróficas, que ocorrem simultaneamente de forma repentina e completa. Existem também as falhas intermitentes, que persistem por tempo limitado, após o qual o item se recupera aparentemente sem qualquer ação externa.
- **Quanto à criticidade:** falhas críticas, seriam aquelas que produzem condições perigosas ou inseguras para quem as usa, mantém ou depende do item, ou que podem causar grandes danos materiais ou ambientais. As falhas não-críticas seriam aquelas que não provocam estes efeitos.
- **Quanto à idade:** os equipamentos já estão sujeitos a falhas quando sob regime de trabalho para o qual foi projetado por seu fabricante, à medida em que o tempo passa. Caso este equipamento seja submetido a um período de funcionamento além do projetado, acarretará a redução de sua vida útil (PEREIRA, 2009).

As falhas aleatórias estão sujeitas às cargas externas, a referência à carga quer dizer tensão mecânica (peça forçada até quebrar) ou elétrica (relâmpago, que gera sobrecarga). Para que um equipamento esteja protegido deste tipo de falha, é necessário que se limite o aumento anormal destas tensões (PEREIRA, 2009).

Uma maior complexidade de componentes significa estabelecer ou reduzir dimensões, melhorar interfaces, durabilidade ou ainda aumentar a confiabilidade das informações, o que também aumenta a possibilidade de falhas, um exemplo seria o caso das falhas eletroeletrônicas que envolvem conexões entre componentes. De acordo com Pereira (2009), quanto mais conexões, maior será o número de falhas. Ainda de acordo Pereira (2009) é indispensável a atenção do Engenheiro de

Manutenção em relação à gestão de ativos, através de figuras de controle e outros indicadores. Na observância de desvio, é necessário fazer uma análise mais minuciosa. Medidas corretivas, preventivas e melhorias podem ser algumas soluções.

3.2.2.CAUSAS FUNDAMENTAIS DAS FALHAS

De acordo com Affonso (2006), as causas básicas de quaisquer falhas observadas são as falhas de projeto, as falhas na seleção de materiais, imperfeições no material, deficiências de fabricação, erros de montagem ou de instalação e condições de operação ou de manutenção inadequadas.

- **Falhas de Projeto:** é originado de detalhes de projeto sujeitos a problemas. Provém do desenho do equipamento e é muito comum em equipamentos específicos de indústrias de processo, por não poderem ser testados em uma situação real de operação.
- **Falhas na Seleção de Materiais:** causada, principalmente, pela seleção inadequada do material de construção, gerando uma incompatibilidade das propriedades do material com aquelas que o serviço necessitará.
- **Imperfeições no Material:** estão ligadas diretamente com o processamento durante a fabricação da matéria-prima, aonde defeitos internos e externos virão a diminuir as propriedades do material.
- **Deficiências de Fabricação:** comumente se confunde este tipo de falha com o anteriormente descrito, porém esta falha é advinda da fabricação do equipamento.
- **Erros de Montagem ou de Instalação:** as falhas oriundas da montagem ou de instalação muitas vezes estão ligadas a erros humanos. Este tipo de erro pode ser impedido com treinamentos, elaboração de procedimentos adequados e auditorias.
- **Condições de Operação ou Manutenção Inadequadas:** o equipamento, quando sujeito a operação fora daquela para a qual foi projetado, é de grande

importância para acarretar este tipo de falha, bem como um plano de manutenção e inspeção mal elaborado e a falta de monitoramento do equipamento.

3.2.3.MÉTODOS PARA ANÁLISE DE FALHAS

Para que as falhas sejam analisadas em sua integralidade, alguns métodos são utilizados, a saber:

- Gráfico de Pareto;
- Diagrama de Causa e Efeito;
- Método dos “5 Porquês”;
- FMEA
- FTA

Para melhor entendimento, as respectivas descrições serão vistas a seguir.

3.2.3.1. GRÁFICO DE PARETO

O gráfico de Pareto tem seu surgimento ligado à identificação dos itens que são responsáveis pela maior parcela de perda. De acordo com autores como Pereira (2009), quase sempre são poucas as “vitais” e muitas as “triviais”. Poucas vitais, pois, representam um pequeno número de problemas, mas que, no entanto, resultam em grandes perdas para a empresa. Triviais no sentido de que são um grande número de problemas que resultam em perdas pouco significativas.

Sua base é demonstrar que “a maior parte de um resultado é devida a uma parcela mínima de fatores, dentre muitos que influenciam”. Ainda de acordo com o autor, em se tratando de Manutenção Industrial, o gráfico de Pareto é muito utilizado para comparar “tipos de falha *versus* ocorrência”.

Sua estrutura é formada por um gráfico de barras que ordena as frequências das ocorrências, da maior para a menor, permitindo a priorização dos problemas. Mostra ainda a curva de percentagens acumuladas. Sua maior utilidade é a de permitir uma fácil visualização e identificação das causas ou problemas mais importantes, possibilitando a concentração de esforços sobre os mesmos. Esta estrutura pode ser observada no gráfico 1 abaixo:

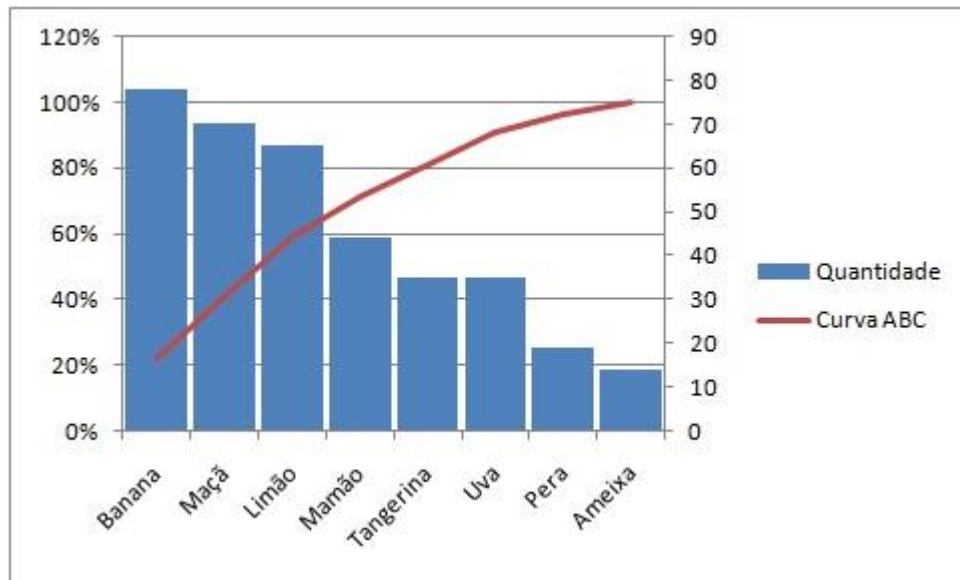


Gráfico 1 - Exemplo do Gráfico de Pareto
Fonte: Gouveia, 2010.

3.2.3.2. DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO

Tem por objetivo representar a relação entre o efeito de uma falha e as prováveis causas da mesma. Com este diagrama é possível demonstrar, visualmente, separados por categorias, a relação entre a falha e suas possíveis causas.

De acordo com Pereira (2009), e complementando com o raciocínio de Nascif e Dorigo (2009), é possível classificar várias categorias de causas, cujas principais podem ser agrupadas nas categorias a seguir:

- Método (padrões de trabalho, procedimentos);
- Mão de obra (qualificação, treinamento, condições físicas);
- Material (de origem interna ou externa);
- Máquina (estado físico – deterioração);

- Medidas (instrumentos);
- Meio ambiente (oficinas, clima organizacional, aspectos ambientais);

Este diagrama (ilustrado na figura 3) também é conhecido como “Diagrama de Ishikawa”, ou “Diagrama de Espinha de Peixe”, em referência ao seu idealizador Kaoru Ishikawa¹.

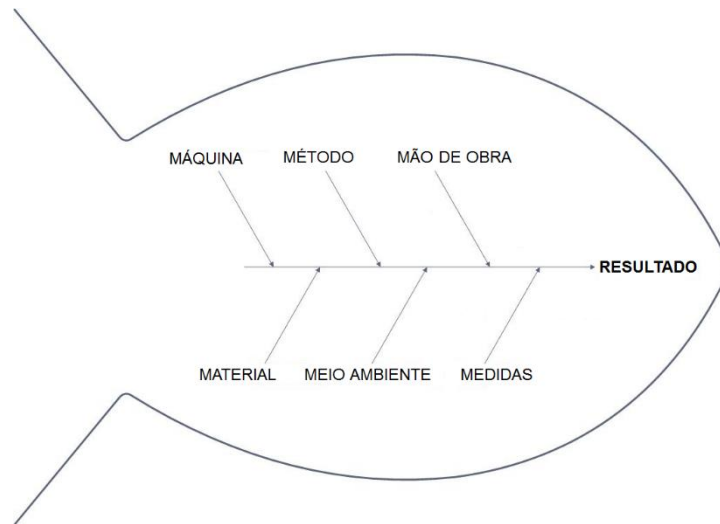


Figura 3 - Diagrama de Causa e Efeito (Ishikawa)
Fonte: NASCIF; DORIGO, 2009.

3.2.3.3. MÉTODO DOS 5 PORQUÊS

Aplicado quando são definidas previamente as causas potenciais do problema a ser analisado. Este método define uma das raízes possíveis do problema e tenta explicá-la por meio das respostas dadas aos “porquês” questionados por uma equipe formada por membros de diversas áreas que estão envolvidas no problema (PEREIRA, 2009).

A partir de sua aplicação os técnicos envolvidos no processo terão cinco respostas para elucidar o problema e, assim, indicar a melhor forma de conhecer a “causa raiz”

¹ Diagrama de Causa e Efeito, Diagrama Espinha de Peixe ou Diagrama de Ishikawa é uma das sete ferramentas da qualidade.

Kaoru Ishikawa (1915-1989), engenheiro químico, foi a figura mais importante no Japão na defesa do Controle de Qualidade. Foi o primeiro a utilizar a expressão Controle de Qualidade Total (*Total Quality Control*) e desenvolveu as “Sete Ferramentas”, de modo que qualquer trabalhador poderia utilizar no dia a dia.

(PEREIRA, 2009). Definida a causa raiz, será gerado um plano de ação, utilizando a técnica “5W2H”², baseada em 7 perguntas simples:

Tabela 1 - Método dos 5 Porquês

WHAT?	O quê?	Define as tarefas que serão executadas.
WHEN?	Quando?	Define o prazo para a conclusão das tarefas
WHO?	Quem?	Define a pessoa responsável pela tarefa.
WHERE?	Onde?	Define o local onde a tarefa será realizada.
WHY?	Por quê?	Define a razão de execução da tarefa.
HOW?	Como?	Define a forma como a tarefa será executada. Uma descrição clara e objetiva é necessária para avaliar a
HOW MUCH?	Quanto?	Define os recursos financeiros necessários para a execução da tarefa.

3.2.3.4. FMEA

A Análise do Modo e Efeito de Falhas (FMEA³) começou a ser utilizada no final dos anos 50 e tem como objetivo identificar todos os modos de falha em potencial dentro de um projeto (de produto ou de processo), todas as probabilidades de falhas catastróficas e críticas, de tal maneira que elas possam ser eliminadas ou minimizadas através da correção do projeto, o mais breve possível.

Conforme diz Palady (1997), o desenvolvimento e a execução do FMEA geram custos, entretanto, se feitos de forma eficaz, podem resultar em um retorno significativo de qualidade e confiabilidade.

O FMEA é altamente subjetivo e requer um trabalho de suposição em relação as possibilidades e à sua prevenção. Essas suposições são feitas por especialistas no processo, que tem acumulada experiência no projeto, processo ou serviço; também deve ser utilizada uma base de dados históricos de desempenho caso ela exista.

Basicamente, existem dois tipos de FMEA, como afirma Palady (1997):

- FMEA de projeto (DFMEA – Design Failure Mode and Effect Analysis)

² Do inglês: “5 What 2 How”.

³ Do inglês: “Failure Mode and Effect Analysis”.

- FMEA de processo (PFMEA – Process Failure Mode and Effect Analysis)

Dentro desses dois tipos existem diversas versões de formulários, no entanto, compartilham os mesmos objetivos e exigem elementos básicos em comum; as variações de formulários existem devido a interpretação do FMEA.

São 5 os elementos básicos de todo FMEA (figura 4) para garantir a sua eficácia:

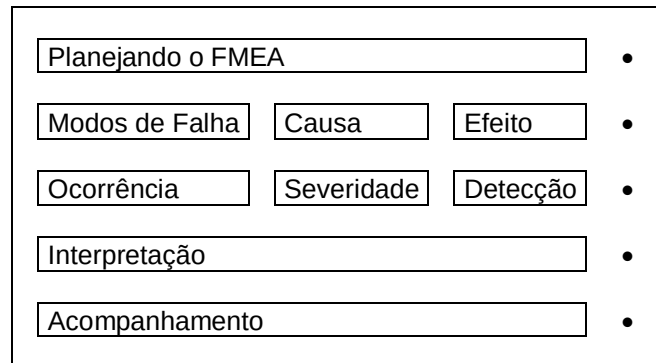


Figura 4 - Elementos básicos do FMEA
Fonte: Palady, 1997.

O objetivo principal dos dois tipos de FMEA, seja de processo ou projeto, é o de responder as duas perguntas abaixo:

- Como esse projeto/processo pode deixar de fazer o que deve fazer?
- O que deve ser feito para prevenir essas falhas potenciais de projeto/processo?

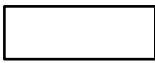
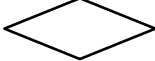
3.2.3.5. FTA

Siqueira (2005) explica que a Análise de Árvore de Falha (FTA⁴) é uma ferramenta de cima para baixo (*top-down*), que se inicia pela identificação de um evento indesejável, chamado de evento raiz, tal como uma falha funcional, prosseguindo pela determinação de todas as maneiras possíveis dela ocorrer. A análise é conduzida determinando-se como o evento raiz pode ser causado por eventos individuais ou combinação de falhas em níveis inferiores.

⁴ Do inglês: “Fault Tree Analysis”.

Para a construção do diagrama, diversos conectores e eventos podem ser utilizados, como exemplificado na tabela 2:

Tabela 2 - Elementos de Árvores de Falha

Símbolo	Nome	Descrição
	Retângulo	Eventos de saída de portas lógicas.
	Círculo	Eventos associados a falhas básicas.
	Diamante	Eventos não realizados (omitidos).
	Casa	Parâmetro associado a um evento que deve ser monitorado.
	Oval	Evento condicional, usado em conectores de inibição.
	Triângulo	Conexão com outro símbolo ou evento, possivelmente em outra página.
	E	Evento de saída que só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem.
	Ou	Evento de saída que só ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrerem.
	Inibição	Evento de entrada só é transmitido ao evento de saída se o evento condicional ocorrer.
	E prioridade	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrerem na ordem da esquerda para a direita.
	Ou exclusiva	Evento de saída ocorre se um, mas não ambos, dos eventos de entrada ocorrerem.
	M em N	Evento de saída ocorre se M em N dos eventos de entrada ocorrerem.

Fonte: Siqueira, 2005.

Os seis primeiros símbolos representam eventos, e os restantes são conectores para interligação de eventos.

4. METODOLOGIA CORPORATIVA DE ANÁLISE DE FALHA

A metodologia para o tratamento de falha consiste em processos para remoção de sintomas, investigação das causas fundamentais e ações de bloqueio de forma sistematizada e padronizada. Segundo rege o Manual de Procedimentos (VALE, 2010) de especificações e critérios para abertura de análise de falhas na VALE, os passos desta metodologia são:

- Detectar o problema e relatar a falha;
- Tomar ação corretiva/contingencial para remoção do sintoma (Fluxo Execução Corretiva);
- Analisar o modo de falha, determinando o modo de falha funcional;
- Identificar a causa raiz (espinha de peixe e/ou cinco porquês);
- Elaborar o Plano de Ação para bloqueio da causa raiz;
- Executar o Plano de Ação e fazer a sua gestão;
- Avaliar os resultados e tratar os desvios, caso ocorram;
- Analisar periodicamente os registros de falhas, avaliando se o critério foi atingido.

4.1. PRAZOS PARA TRATAMENTO DE OCORRÊNCIAS

Conforme Manual de Procedimentos, o tratamento corretivo/contingencial deve ser efetuado imediatamente após a ocorrência (quando aplicável).

A elaboração de um plano de ação deve ser efetuada em até 25 dias úteis a partir da ocorrência da falha. Em caso de análise que envolva laudo externo, devem ser acrescentados 20 dias úteis a esta elaboração.

4.2. GESTÃO DO PLANO DE AÇÃO

A gestão do plano de ação do tratamento de falhas tem como finalidade garantir a implementação das ações por seus respectivos responsáveis, conforme prazos previamente definidos.

De modo a alcançar este objetivo é recomendável realizar o acompanhamento do plano de ação elaborado com periodicidade mínima mensal, ou em prazos inferiores conforme necessidade, além de efetuar o cancelamento de ações que não sejam necessárias (se for o caso), e definir ações alternativas caso convenha.

As ações provenientes das análises e tratamento de falhas são acompanhadas em reuniões de desempenho mensal de manutenção das áreas, de acordo com o responsável pelo tratamento da falha, o que garante maior visibilidade e gerenciamento no cumprimento dos prazos estabelecidos.

4.3. DIVULGAÇÃO E REGISTRO

A divulgação das análises e tratamento de falhas pode ser feita nas reuniões de desempenho mensal das áreas de manutenção ou, quando solicitado, em outras reuniões de rotina relativas à manutenção, como por exemplo a reunião da Gerência Geral ou da própria Diretoria.

4.4. MODIFICAÇÕES E MELHORIAS

A necessidade de melhorias e modificações tem sua origem na identificação de problemas e/ou oportunidades de melhoria em ativos e processos. As oportunidades de melhoria devem ser mapeadas e registradas de acordo com os critérios estabelecidos para cada uma de suas fontes e devem ser abrangentes o suficiente para englobar os diversos aspectos e temas relevantes na Diretoria de Pelotização.

A proposição deve ser suficiente para entendimento e avaliação conceitual por parte do responsável por sua aprovação preliminar. O responsável pela aprovação poderá ser o Supervisor ou o Gerente de área proponente ou empregado das áreas de Não Rotina ou Engenharia.

Após avaliação, o responsável pela aprovação preliminar define se a melhoria/modificação deverá seguir para etapa seguinte ou não, justificando sua decisão. As proposições aprovadas deverão ter a definição prévia do responsável pela gestão da melhoria/modificação, que será considerado a partir deste ponto o seu Gestor.

O processo, portanto, é registrado e encaminhado para a área de Engenharia e/ou gestora, que serão responsáveis por estudos e análises detalhadas da proposição, complementando as informações iniciais com informações diversas, como fonte de recursos financeiros e a abrangência do projeto. A análise de viabilidade, ganhos e retorno deverá ser executada, pelo Gestor, sobre os aspectos de Saúde e Segurança, Meio Ambiente, Técnico, Qualidade, Requisitos Operacionais e Custo. Tendo conhecimento das proposições de melhoria/modificação e analisando as informações da mesma, a Engenharia, através de empregados do seu quadro, poderá, de acordo com as características da melhoria/modificação, emitir parecer sobre a continuidade do processo, justificando sua decisão.

A partir do parecer da Engenharia, se aplicável, deverá ser feita a aprovação final de Desenvolvimento e Implementação da melhoria/modificação. Esta aprovação deverá ser feita pela área proponente em conjunto com a área gestora com orientações da Engenharia. Tanto a Engenharia, quanto a área proponente poderão solicitar informações adicionais, questionar informações ou anexar documentos necessários para subsidiar ou ratificar a sua decisão.

A melhoria/modificação deverá, então, ser desenvolvida e implantada por meio de recursos próprios ou contratados. Após a entrega do projeto, ocorre o acompanhamento dos resultados previstos, com o intuito de comparar os resultados atingidos com os resultados esperados, justificar as diferenças e, caso necessário, definir plano de ação para a correção de desvios.

5. PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO

A prensa de rolos de alta pressão (HPGR⁵), é um equipamento relativamente novo e eficiente nos quesitos energéticos. Existem diversas configurações de circuitos de cominuição que consideram a prensa de rolos. No Brasil, as aplicações que mais se destacam são a substituição da moagem, a substituição de etapas de britagem/pré-moagem e a geração de superfície em etapa que antecede a pelotização.

A prensa de rolos é um equipamento utilizado para realizar a cominuição. O princípio de funcionamento do equipamento nasceu da realização da ideia de que, se pressão suficiente fosse aplicada a um leito de partículas, vantagens poderiam ser atingidas em termos de eficiência operacional e energética. A lenta aplicação de carga sobre as partículas causa colapso estrutural dos grãos, de modo que a energia perdida em calor e ruído é minimizada. As prensas de rolos de alta pressão são hoje, do ponto de vista energético, os mais eficientes equipamentos de cominuição.

A cominuição, palavra derivada do latim *comminuere*, é o conjunto de redução de tamanhos de partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado. Isto inclui as exigências de controlar o tamanho máximo dos produtos e de evitar a geração de quantidades excessivas de finos. (CHAVES; PERES, 2003).

A cominuição faz-se necessária nas operações de tratamento de minérios para duas finalidades principais:

- Liberar as partículas dos minerais úteis dos minerais de ganga e permitir a sua separação, através dos processos de concentração, em: concentrados, rejeitos e produtos intermediários;
- Reduzir o tamanho da partícula mineral, seja para o transporte do minério a granel, seja para permitir a utilização do minério em alguma aplicação específica, ou, simplesmente para atender os requisitos de tamanho solicitado pelo cliente.

A atual tecnologia da prensa de rolos de alta pressão foi introduzida inicialmente na briquetagem de carvão, no começo do século XX. Nos meados da década de 80 ela passou a ser utilizada nas aplicações de cominuição, quando foi aplicada na indústria de cimento, tratando materiais relativamente fáceis de serem cominuídos.

⁵ Do inglês: “High Pressure Grinding Rolls”.

Em 1987 começou a ser utilizada na moagem de kimberlito⁶, em 1994 a prensa de rolos começou a traçar o seu caminho na indústria de minério de ferro, tornando-se difundida em seu processamento, especialmente na preparação do pellet feed, desde então, a prensa de rolos tem sido progressivamente aplicada a materiais considerados duros e abrasivos.

A prensa de rolos precisou evoluir muito nos últimos anos para atingir maiores capacidades de processamento, maior confiabilidade e redução de custos de implantação e operação. Atualmente, a tecnologia utilizada pela prensa de rolos amadureceu a ponto de estar presente nos projetos em desenvolvimento para a indústria mineral e também operando em plantas que processam diferentes tipos de minério.

O princípio de funcionamento (figura 5) da prensa de rolos se dá através da aplicação de pressão a um leito de material por um par de rolos que giram em sentido contrário, montados em um quadro rígido. Um rolo é fixo e o outro se desloca sobre guias, sendo posicionado por cilindros hidráulicos. As pressões aplicadas pelos cilindros hidropneumáticos podem extrapolar 250Mpa, dependendo do tamanho da máquina.

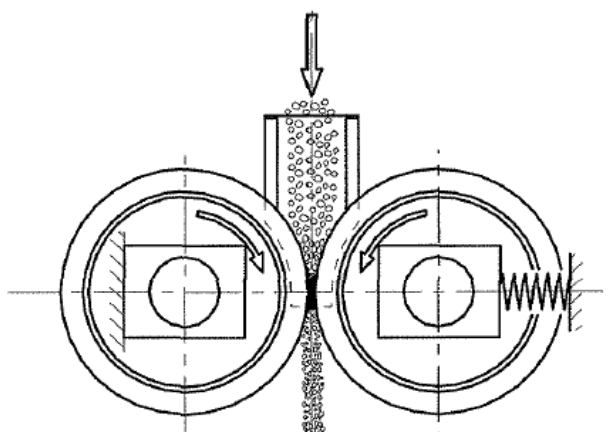


Figura 5 - Princípio da moagem
Fonte: Polysius, 2011.

Na figura 6 podemos ver um esquema simplificado com uma vista lateral dos principais componentes atuantes na prensa de rolos: os rolos são suportados por

⁶ *Kimberlito*: Rocha matriz do diamante. É um grupo de rochas ricas em voláteis (dominante CO₂), potássicas, ultramáficas híbridas com uma matriz fina e macrocristais de olivina e outros minerais como: ilmenita, granada, diopsídio, flogopita, enstatita, cromita.

mancais compactos (1) e a pressão que atua sobre o leito do material fica confinada em uma estrutura robusta (2); a área de pressão é selada na lateral do rolo por placas de desgaste de aço responsáveis por conter o minério nas bordas dos rolos (3); o silo de alimentação (4) é representado no topo do equipamento.

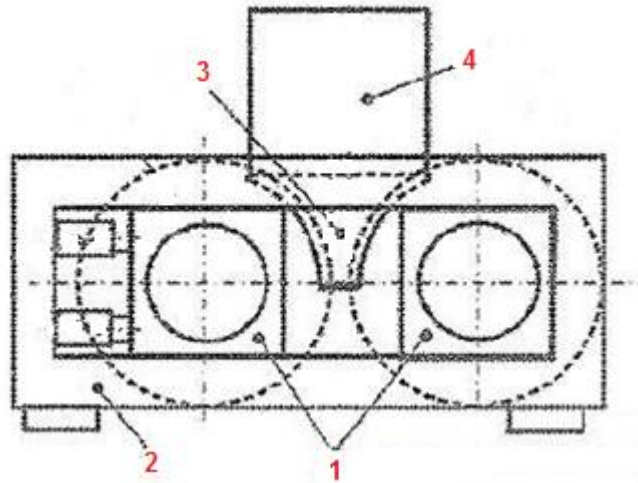


Figura 6 - Funcionamento da prensa de rolos de alta pressão
Fonte: Pyke et al, 2006.

Existem diferentes tipos de rolos para a prensa, conforme figura 7, mas a maioria dos equipamentos utilizados na indústria de cimento possui rolos inteiriços, esse tipo de rolo é feito de aço soldável e são forjados em sua forma final, com o intuito de obter boas propriedades mecânicas. Diferentes tipos de ligas são utilizados como revestimento extra para prover melhor proteção ao desgaste. O remodelamento dos rolos inteiriços é uma prática bastante usual, que, realizada através de uma simples resoldagem na superfície, permite que o rolo seja remodelado diversas vezes antes de ser substituído.



Figura 7 - Tipos de rolos: inteiriços (esq.), anel (centro), segmentados (dir.)
Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005.

O eixo é inserido ao rolo com o auxílio de um equipamento de elevação de carga. A montagem acontece através do encolhimento térmico do rolo, causado pelo

aquecimento. A figura 8 ilustra o processo de aquecimento do rolo e montagem do conjunto.



Figura 8 - Montagem eixo-rolo
Fonte: Reis, 2007.

5.1. REVESTIMENTO DOS ROLOS

Ao longo dos últimos anos, progressos significativos foram obtidos nos revestimentos aplicados na superfície dos rolos. Este ponto tem deixado a aplicação da prensa de rolos bastante atrativa para rochas mais duras e abrasivas. O desenvolvimento dos pinos de carboneto de tungstênio, conhecidos também como prisioneiros ou *studs*, foi de fundamental importância e, atualmente, a evolução chegou ao ponto de haver adequação da resistência mecânica dos pinos ao longo do rolo. No centro dos rolos, região de maior desgaste, a resistência mecânica dos *studs* é maior do que nas bordas que possuem menor desgaste em função do fluxo de material estar concentrado no centro e haver alívio da pressão nas bordas dos rolos.

A variação na resistência mecânica dos pinos à medida que se afastam do centro do rolo evita o seu desgaste desigual, côncavo à medida que se afasta das extremidades.

A figura 9 representa o rolo da prensa de Cerro Verde, ainda na fábrica da Polysius, o rolo é do tipo anel e revestido com pinos, neste caso os pinos foram pressionados em furos de sustentação presentes na superfície do rolo.

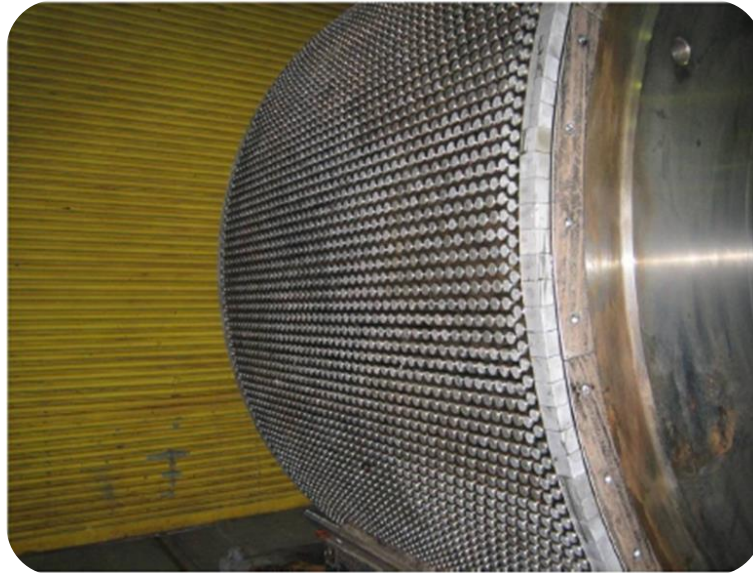


Figura 9 - Pinos utilizados nos rolos da prensa de Cerro Verde
Fonte: Reis, 2007.

5.2. PRINCIPAIS REGIÕES DE DESGASTE DOS ROLOS

O desgaste do revestimento acontece de maneira diferente em duas regiões, conforme figura 10. Na região I, antes do ângulo que delimita o início da cominuição interparticular ou simplesmente ângulo crítico, há incidência do movimento tangencial entre a superfície dos rolos e as partículas do material. Já na região II, após o ângulo crítico, não há incidência de movimento tangencial.

Como consequência das diferentes regiões de desgaste, a superfície dos rolos na região I desgasta pelo cisalhamento do material com a superfície do rolo. Na região II, acontece a fadiga do revestimento causada pela compressão do material contra a superfície dos rolos. Pode-se dizer que quanto mais competente e abrasivo for o minério a ser cominuído, maior o desgaste.

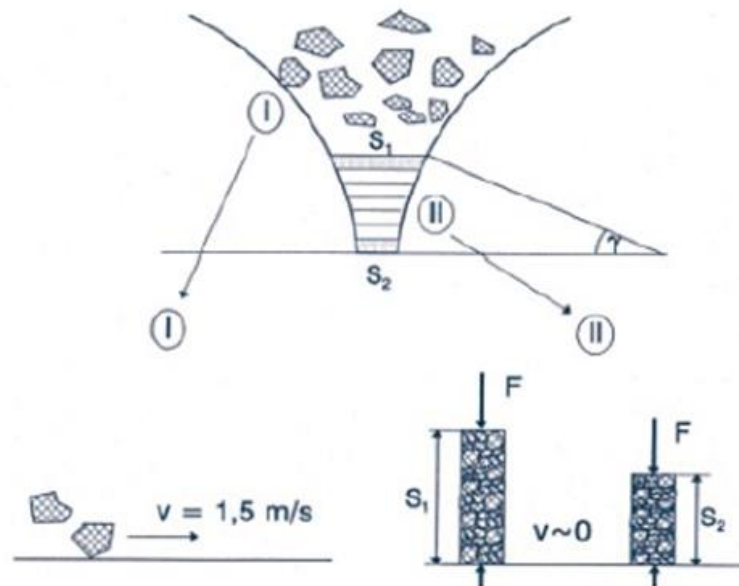


Figura 10 - Desgaste do revestimento nas diferentes regiões do rolo
 Fonte: Broeckmann e Gardula, 2005.

5.3. FATORES DETERMINANTES PARA A VIDA ÚTIL

- **Característica abrasiva e composição do material:** a taxa de desgaste dos pinos é, primeiramente, função do índice de abrasividade e da competência do mineral. Já a quebra dos pinos ocorre fortemente em função do *top size*⁷ do material que alimenta a prensa. (Morley, 2006-b)
- **Tamanho da partícula, dureza e força específica de moagem:** a resistência compressiva do minério, em combinação com as partículas de maiores tamanhos presentes na alimentação e a força específica de moagem, vai determinar o nível de danos ao revestimento (Morley, 2006-b) e, por conseguinte, sua durabilidade.
- **Umidade:** o revestimento composto por pinos parte do princípio da proteção autógena, onde o controle correto da umidade do material de alimentação da prensa de rolos é muito importante, pois ajuda a formar uma camada de material entre os pinos, o que irá reduzir o desgaste do revestimento. Já a

⁷ *top size*: tamanho máximo aceitável na alimentação.

umidade em excesso acarreta um alto desgaste na superfície dos rolos, pela remoção da camada autógena.

- **Velocidade dos rolos:** o aumento da velocidade dos rolos está relacionado ao aumento da turbulência na alimentação, fato causador do escorregamento do material de alimentação contra a superfície dos rolos, que acarreta elevado desgaste do revestimento dos rolos.
- **Forças horizontais causadas pelo regime intermitente da prensa:** a taxa de desgaste no rolo móvel da prensa é um pouco maior do que a taxa de desgaste do rolo fixo. Uma explicação para o fenômeno é que uma força cinética horizontal extra é gerada durante o movimento do rolo móvel. A força criada pelo sistema hidráulico cria desgaste adicional ao componente móvel. Embora o movimento horizontal não seja grande, o desgaste ocorre em função dos picos de pressão adicionais atuantes na superfície do rolo móvel.
- **Extrusão:** fenômeno no qual o produto emerge da zona de compressão, em função da diferença da velocidade tangencial do rolo e da velocidade do material na sua superfície (Morley, 2006-b). A extrusão normalmente aumenta em função do diâmetro do rolo, da pressão aplicada e da umidade da alimentação. É mais notável em rolos com revestimento mais macio e diminui notoriamente nos rolos que possuem pinos na superfície.

5.4. PRENSA DE ROLOS 3PR7

Os blocos dos mancais do rolo fixo estão aparafusados com o quadro de base do moinho de rolos. A pressão necessária para a cominuição é transferida ao material a ser moído pelo rolo móvel. O rolo móvel adapta-se continuamente às características do material por mudança de posição.

As forças de moagem necessárias são produzidas por um sistema hidráulico e transmitidas ao rolo móvel por cilindros hidráulicos. Cada rolo de moagem é acionado em separado por um sistema de redutores planetários, com número de rotações constante ou regulável empregando-se motores de corrente contínua ou motores com inversores de frequência.

A 3PR7 tem capacidade para 1200 ton/h, está sendo operada com capacidade máxima de alimentação de 750 ton/h, e é constituída dos seguintes componentes (figura 11):

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 2: Unidade de rolos | 8: Sistema central de lubrificação |
| 3: Unidade do rolo móvel | 9: Unidade de acionamento |
| 4: Unidade do rolo fixo | 10: Sistema hidráulico |
| 5: Quadro do rolo | 11: Dispositivo de medição do desgaste |
| 6: Carcaça do rolo | 12: Dispositivo de içamento e montagem |
| 7: Sistema de alimentação do material | |

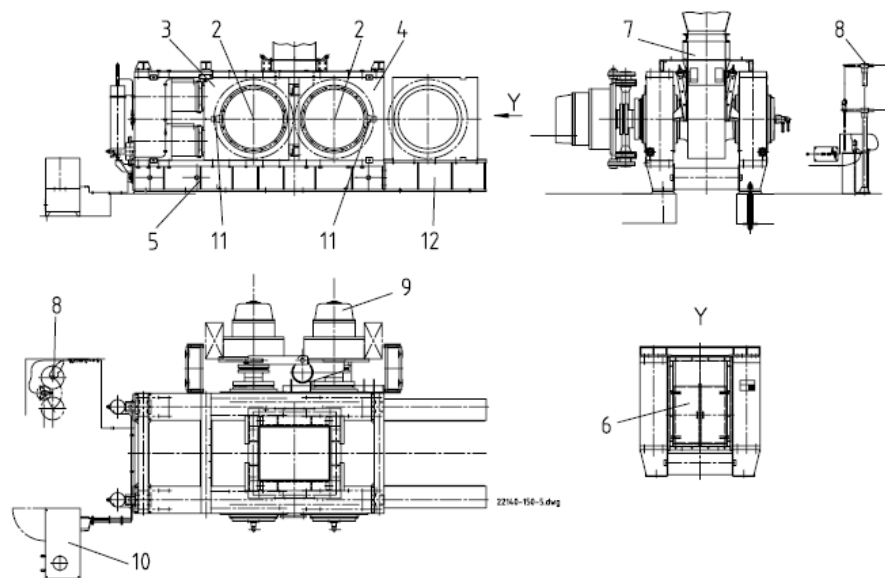


Figura 11 - Componentes da Prensa de Rolos de Alta Pressão
Fonte: POLYSIUS, 2001.

5.4.1. SISTEMA MECÂNICO

O sistema mecânico da prensa de rolos é formado pelos seguintes componentes: rolo, mancais de rolos e redutores.

5.4.1.1. ROLO

O rolo da prensa (figura 12) é composto de um cilindro de aço maciço, encamisado com um anel revestido de pinos de tungstênio e sustentado por dois mancais de rolamento, o rolo tem diâmetro de 2250mm e 1500mm de comprimento. A superfície do anel é revestida de material de alta dureza, intercalado com pinos cravados da superfície do rolo.

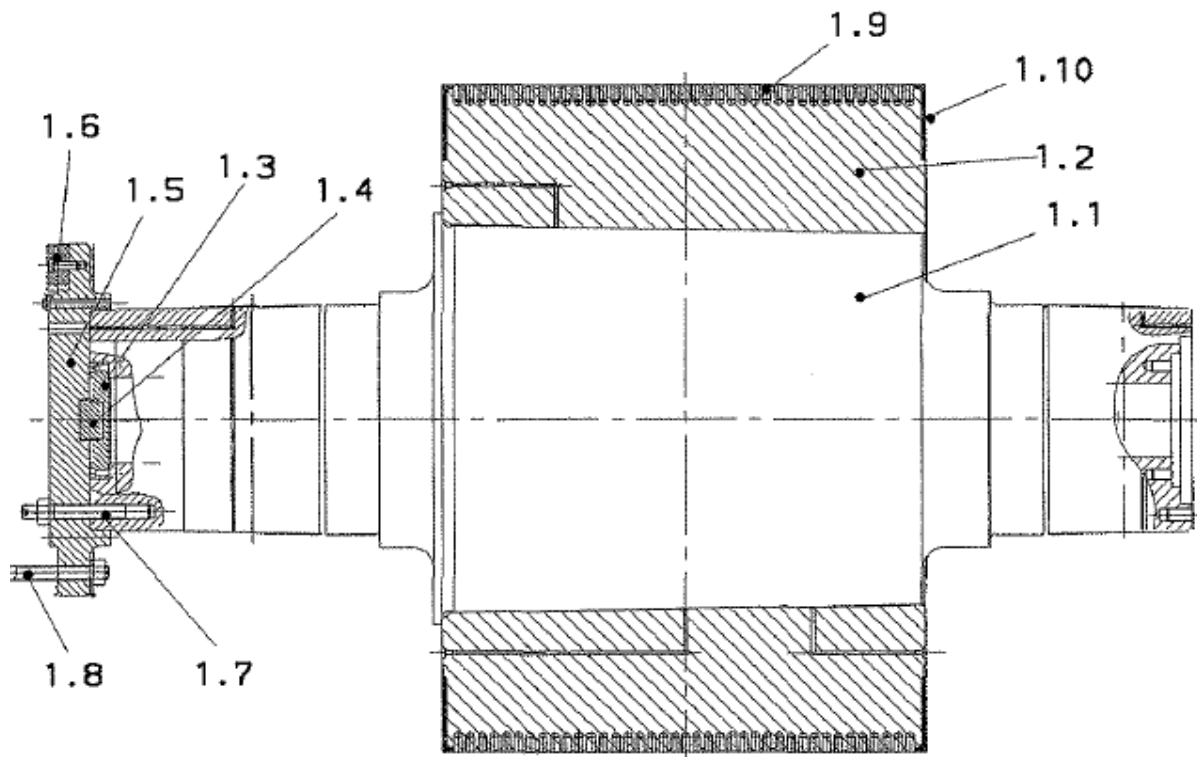


Figura 12 - Rolos da prensa 3PR7
Fonte: POLYSIUS, 2001.

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1.1 Eixo do rolo | 1.6 Chaveta |
| 1.2 Corpo do rolo | 1.7 Parafuso de fixação |
| 1.3 Tampa do orifício de arrefecimento | 1.8 Parafuso de fixação |
| 1.4 Chaveta transversal | 1.9 Prisioneiro |
| 1.5 Flange intermediário | 1.10 Soldadura frontal por encargo |

5.4.1.2. MANCAIS DE ROLOS

Temperatura de funcionamento: 50 °C

Temperatura de alarme: 55 °C

Temperatura de desarme da prensa: 60 °C

Lubrificação: 35 pulsos/h

Refrigeração: água 7600 l/h (30 °C)

5.4.1.3. REDUTORES

Peso: 22.000 kg

Tipo: Flender PZF 470

Lubrificação: Temperatura do óleo normal = 60 °C

Temperatura de alarme: 80 °C

Temperatura de desarme: 90 °C

5.4.2.SISTEMA HIDRÁULICO

Os componentes principais do sistema hidráulico são os cilindros, acumuladores, tanques de canalização e unidade hidráulica. A pressão gerada no rolo móvel é absorvida pelo cilindro e transmitida como pressão de óleo aos acumuladores. Sempre que a pressão de óleo excede à pressão da válvula reguladora (pressão máxima do sistema) o óleo é descarregado no cilindro canalizador.

A função do tanque de canalização é facilitar um alívio rápido da pressão dos cilindros. Após o alívio, a bomba de óleo é acionada rapidamente retornando o cilindro à sua posição de trabalho. Este procedimento de alívio pode ser iniciado por qualquer um dos dois cilindros, porém os dois retornam simultaneamente.

A função dos acumuladores é para evitar a resposta prematura do sistema de alívio, sua função é absorver pequenos picos de pressão, protegendo o sistema de alívio rápido contra um excesso de sensibilidade.

6. ESTUDO DE CASO

Embora seja importante manter o foco no primeiro componente a falhar, nem sempre esse primeiro componente a falhar é o ponto mais importante do problema. (AFFONSO, 2006)

Neste capítulo será abordado um estudo de caso real, realizado após acompanhamento de inspeções e serviços, pesquisas de campo, banco de dados e históricos de projetos e manutenções, objetivando obter embasamento para elucidação das prováveis causas que levaram à ocorrência de falha na prensa de rolos 3PR7, assim como para a escolha mais adequada de correção dos desvios encontrados.

6.1. FATOS RELEVANTES

Algumas observações foram consideradas importantes inicialmente e não poderiam deixar de serem mencionadas com o intuito de tornar nossas suposições mais fidedignas, quanto maior a quantidade e qualidade de fatos verídicos e informações técnicas, maior a eficiência das correções de desvios.

- A prensa de rolos 3PR7 não foi projetada para trabalhar na condição atual, se trata de uma prensa projetada para trabalhar com cobre e não minério de ferro, materiais com propriedades mecânicas e metalúrgicas distintas;
- A 3PR7 possui capacidade de 1200 ton/h, sendo que hoje ela trabalha no máximo com 750 ton/h. Inicialmente a 3PR7 seria utilizada nas Usinas I e II devido sua capacidade, porém depois foi decidido utilizá-la na Usina III;
- A 3PR7 hoje não trabalha com coluna, devido a não possibilidade de se reduzir mais a rotação dos rolos, quando esta é reduzida em demasia, ocorre aquecimento do inversor do motor e desarme do equipamento. Um trabalho anterior foi conduzido para diminuir a rotação da prensa, no entanto, devido aos inúmeros desarmes que implicavam em perda de produção e qualidade, o trabalho foi suspenso.

6.2. INSPEÇÃO E DESVIOS OBSERVADOS

Inspeção é toda atividade de análise de um item (peça, equipamento ou instalação) verificando seu estado real comparado à um padrão especificado ou esperado, seu principal objetivo é antecipar-se a um efeito indesejado, ou seja, a uma falha no item inspecionado, há de se ter uma maior atenção aos seguintes itens:

- Detritos, sujeiras, aderências de matérias-primas;
- Atritos, desgastes, folgas e vazamentos;
- Corrosões, deformações, estragos e rachaduras;
- Anormalidades em termos de temperatura, vibração e ruído;
- Outros.

É necessária uma boa manutenção preventiva, sobretudo inspeções de qualidade, para que se detectem as falhas ocultas e se adotem as medidas eficazes para eliminá-las ou reduzi-las a um grau mínimo afim de que se evitem quebras ou colapsos.

No dia 01/04/2014 em Parada de Usina (PU), foi realizada inspeção nos rolos da prensa e não foi observada nenhuma avaria nos mesmos.

No dia 02/06/2014, em virtude de uma parada programada de 36h para manutenção preventiva, foram observados então dois desvios críticos no equipamento:

- a. Deficiência de lubrificação no mancal do rolo móvel (LNA);
- b. Rolo móvel com presença de “buracos” e rolo fixo com ausência de pinos.

Cabe ressaltar que o procedimento realizado na primeira inspeção não seguiu a mesma linha de execução da segunda inspeção.

A prensa de rolos 3PR7, diferentemente das demais prensas existentes na empresa, não permite inspeção com a mesma em operação devido aos seguintes fatores:

- Grande quantidade de vapor gerado, impedindo a visualização;

- Grande quantidade de material que cai próximo as portas, dificultando abertura;
- Laterais dos rolos não ficam com pinos brilhando, impedindo a visualização, para visualizar é necessário limpar com escova de aço.

6.2.1.DEFICIÊNCIA DE LUBRIFICAÇÃO DO MANCAL

Na inspeção realizada na manutenção preventiva, para verificação da condição das vedações e rolamentos (figura 13), foi identificado que o mancal do rolo móvel (LNA) estava com deficiência de lubrificação, como o rolo trabalha em baixa rotação e existe um trocador de calor, não era percebido aquecimento no mancal, dificultando a possibilidade de detectar desvios com a prensa em funcionamento.

Após a realização de limpeza e medição do rolamento, foi encontrada uma folga de 2,5mm, onde o máximo desejável seria de 0,8mm.



Figura 13 - Rolamento com deficiência de lubrificação (esq.) e após limpeza (dir.)
Fonte: VALE, 2014.

Analisando o desvio, chegou-se à conclusão de que uma das linhas, responsável por lubrificar o rolamento (Y22), estava lubrificando o trilho do rolo móvel (Y21) e vice-versa, o distribuidor de lubrificação (figura 14) dos mancais e trilhos são um do lado do outro, havia uma saída invertida entre trilho e mancal; as linhas foram invertidas para a posição correta (figura 15) e foi realizado o teste e batimento de graxa, o mancal foi lubrificado manualmente com 220kg e fechado (figura 16), após,

a prensa foi posta em funcionamento e foi feito o acompanhamento da temperatura do mancal, que estava então trabalhando dentro da temperatura padrão estabelecida de 50°C.



Figura 14 - Distribuidor de lubrificação entre mancais e trilhos
Fonte: VALE, 2014.

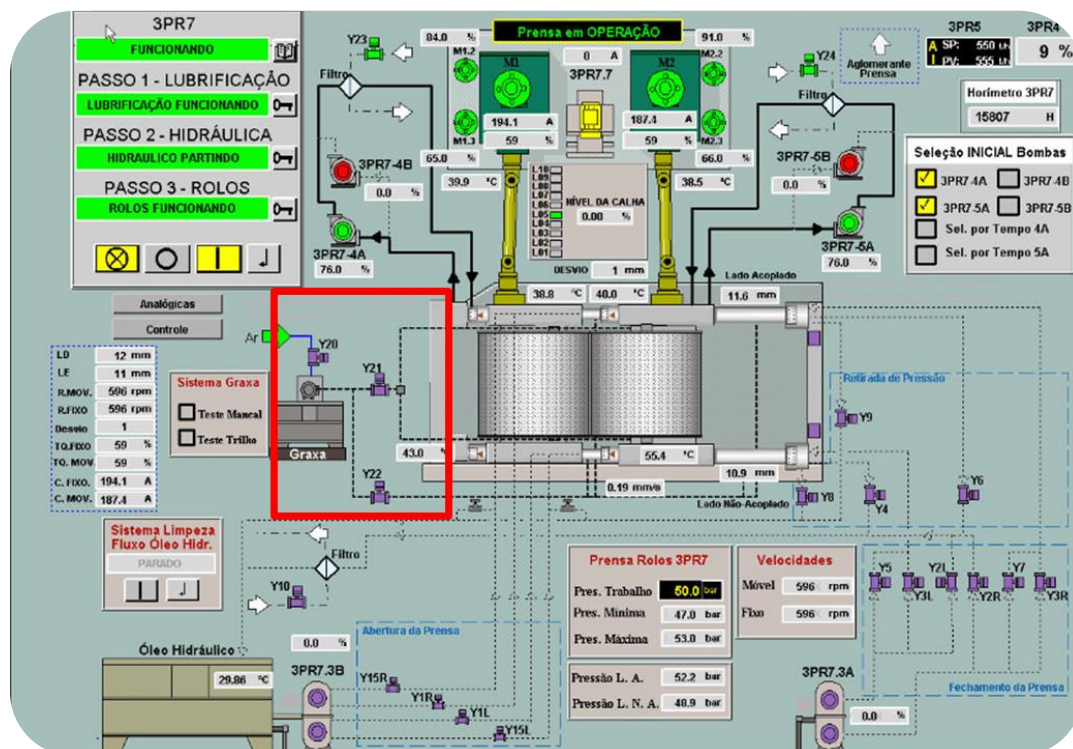


Figura 15 - Painel de controle da prensa 3PR7 com as linhas Y21 (lubrificação do trilho do rolo móvel) e Y22 (lubrificação dos mancais de rolamento) já em posição correta
Fonte: VALE, 2014.



Figura 16 - Visão do acesso ao rolamento e seu estado desejável
Fonte: VALE, 2014.

6.2.2.AVARIA DOS ROLOS FIXO E MÓVEL

Na inspeção realizada na manutenção preventiva, foram identificadas diversas avarias no rolo móvel e também a ausência de pinos no rolo fixo, ao todo, faltava um total de 14 pinos.

No rolo móvel foram observadas 6 regiões de desgaste dos rolos (buracos) devido à queda de vários pinos nessas regiões, e também regiões com queda de pinos isolados.

Em conjunto com a Engenharia, a proposta para recuperação das regiões onde não havia grande desgaste da capa dos rolos era a de reparar as regiões (buracos) com preenchimento de solda, furação e colagem de novos pinos, as regiões com desgaste considerável receberiam tratamento particular, que receberá enfoque adiante e tratará da recuperação do rolo propriamente dita.

Definiu-se então o procedimento de solda a ser realizado por uma empresa especializada, após a realização da solda, uma segunda empresa especializada em usinagem realizou as furações para recolocação dos pinos (680 furos ao todo). Após a furação e colagem dos pinos, foi feita inspeção completa em ambos os rolos e a prensa foi posta em funcionamento para testes com produção.

6.2.2.1. ROLO FIXO

No rolo fixo foram encontrados 14 pinos que se soltaram, como se desprenderam de diferentes regiões (figura 17) e não em uma região concentrada, não houve desgaste substancial da capa, sendo necessário apenas a recuperação com preenchimento de solda, furação e colagem de novos pinos.

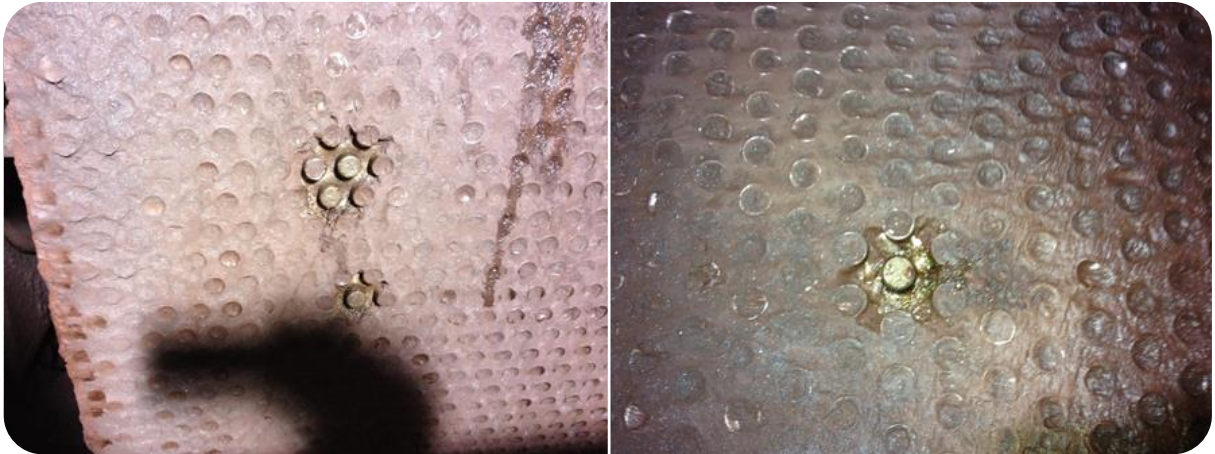


Figura 17 - Queda de pinos em regiões aleatórias
Fonte: VALE, 2014.

6.2.2.2. ROLO MÓVEL

No rolo móvel foram encontradas 6 regiões de intenso desgaste devido à queda de vários pinos próximos em uma mesma região (figura 18); também foram encontradas regiões onde alguns pinos se soltaram aleatoriamente, como no rolo fixo, e sem desgaste considerável da capa do rolo.

A maior região com perda de pinos formou um buraco de 390 x 260 x 75mm de dimensão.

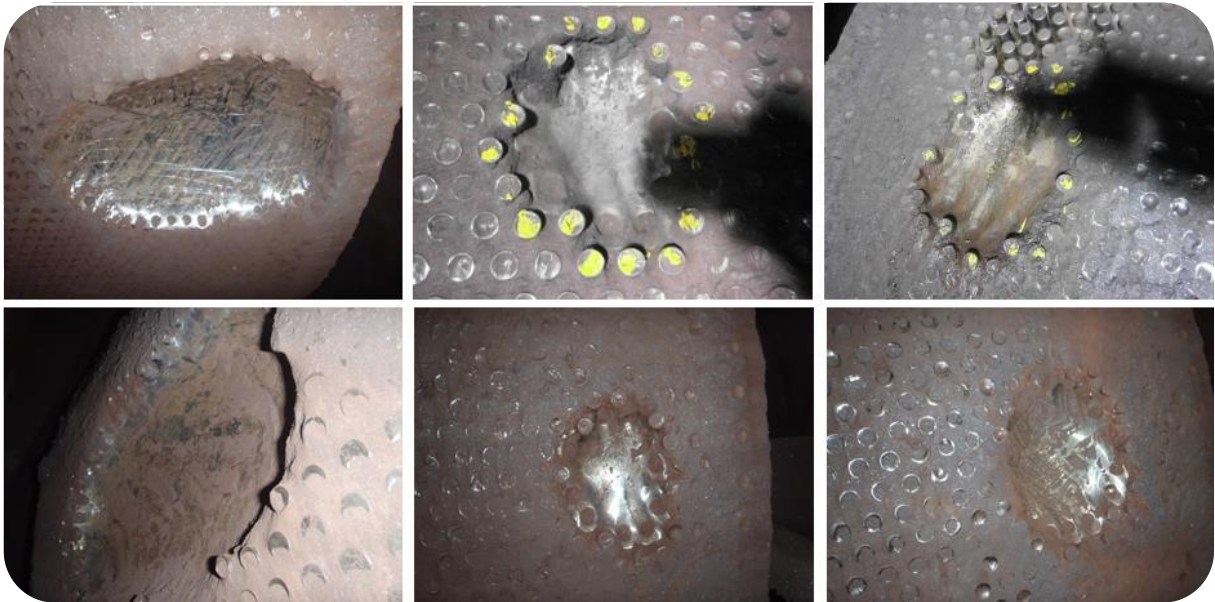


Figura 18 - Regiões com perda de pinos e desgaste substancial da capa de rolo
Fonte: VALE, 2014.

Para recuperação do rolo em conformidade com o procedimento da Polysius (figura 19), foi contratada uma empresa especializada em solda e capacitada a executar o procedimento, no total, foram depositados 108,5kg de metal no rolo móvel.

Filler metals for damage to the buffer / base metal (on-the-spot repairs)					
Hand-manipulated welding electrodes may be used according to the following specification:					
• DIN 8575	E Cr Mo 1 B 20+				
• AWS/ASME	E 8018-B2				
• Yield point	510–600 N/mm2				
• Tensile strength	620–720 N/mm2				
• Expansion	20–25 %				
• Electrode diameter:	4 to 5 mm				
For example	C	Si	Mn	Cr	Mo
Krupp Hera 335 Kb	0.07	0.3	0.7	1.1	0.5
OK 76.12	0.06	0.3	0.7	1.0	0.5
Attention! For welding, note the details given by the electrode manufacturer on the packing.					

Figura 19 - Eletrodo de acordo com o procedimento Polysius para recuperação de rolo
Fonte: VALE, 2014.

Já com as regiões preenchidas com o metal especificado pelo fabricante, foi contratada uma empresa especializada em usinagem para a etapa de furação e colagem dos pinos, foram feitas medições para a fabricação de dispositivo com gabarito, a fim de diminuir o tempo de furação e garantir a simetria e distanciamento dos furos/ pinos (figura 20).



Figura 20 - Procedimento para furação e colagem de pinos em regiões mais afetadas
Fonte: VALE, 2014.

Na figura 21 podemos comparar o serviço como era realizado até então, onde somente era feito o preenchimento de solda, e atualmente com a furação e colagem dos pinos de carbeto de tungstênio.



Figura 21 - Recuperação antes (esq.) e depois da furação e colagem (dir.)
Fonte: VALE, 2014.

6.3. ANÁLISE DO PROBLEMA

Analizando as avarias, foram feitas as seguintes suposições à causa raiz do problema:

- a. Queda de corpo estranho entre os rolos;
- b. Pinos se soltando.

Apesar de parecer mais óbvio devido ao tamanho das cavidades observadas no rolo móvel, a queda de corpo estranho entre os rolos foi logo descartada devido aos seguintes fatores:

- O circuito possui extrator de sucata (3PR22EX) na correia 3PR3TC, foram feitos testes e os componentes estavam funcionando dentro do padrão de normalidade;
- O circuito também possui detector de metais (3PR24DX) na correia 3PR6TC, onde, quando detectado material metálico, é feita reversão automática da correia despejando o material no by-pass; depois da realização de testes, foi constatando que este sistema também operava dentro do padrão de normalidade;
- Nas regiões onde havia apenas um pino solto, não foi constatada a quebra de pinos adjacentes, o material do pino (carbeto de tungstênio) é bastante duro,

portanto, se tivesse cominuído algum metal, os pinos adjacentes estariam quebrados.

Na figura 22 temos o circuito onde a prensa 3PR7 está inserida, desde a filtragem até o nosso equipamento de estudo, em destaque os equipamentos em vermelho, o extrator de sucata (3PR22EX) e o detector de metais (3PR24DX), ambos testados e funcionando dentro do padrão de operação.

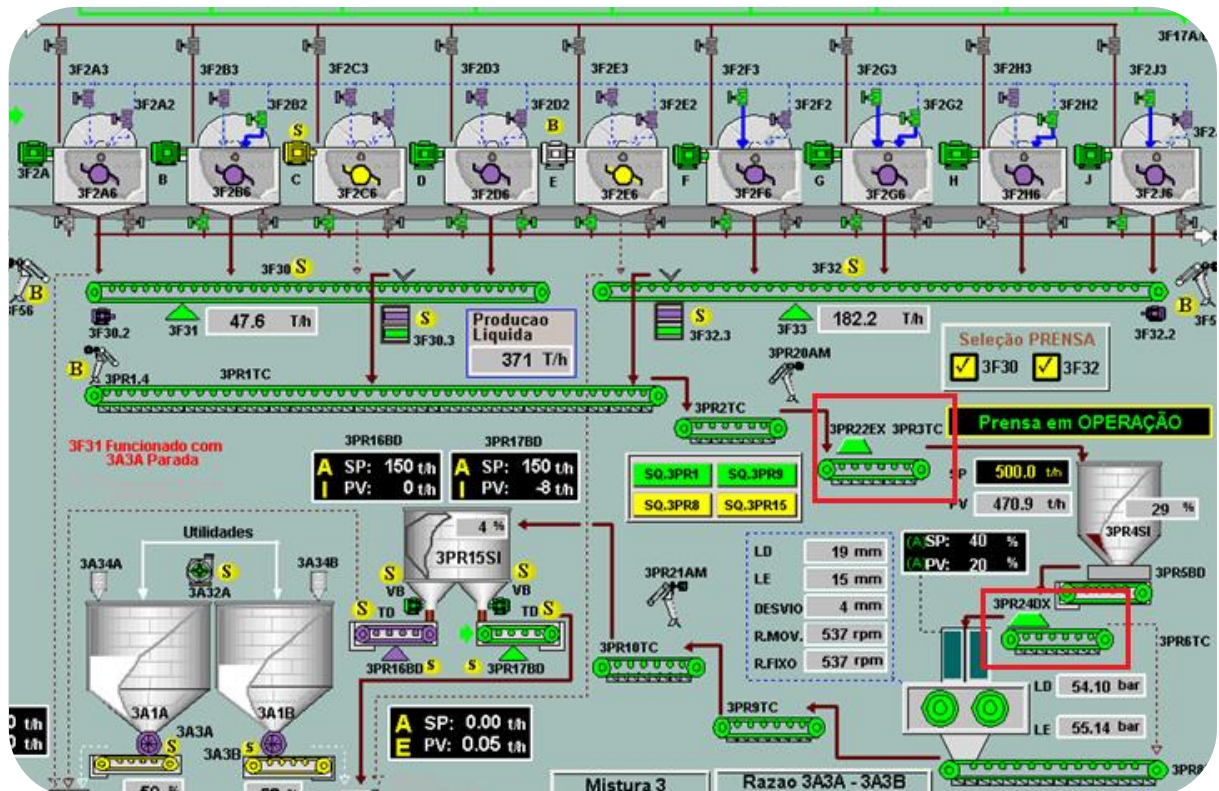


Figura 22 - Circuito em que está inserida a prensa de rolos 3PR7
Fonte: VALE, 2014.

Análise em andamento, foram encontrados fatores que justificassem a avaria devido à segunda suposição feita, de termos pinos se soltando dos rolos, o que foi confirmado e originou o estudo que será mostrado logo adiante. Dentre os fatores:

- Em regiões onde havia apenas um pino solto, não havia quebra de pinos adjacentes, pela mesmo critério utilizado para desqualificar a primeira suposição;
- A prensa foi liberada para produção no dia 13/06/14, foi realizada inspeção no dia 27/06/14 através da limpeza do rolo com escova de aço, onde foram

identificados 19 pinos que se soltaram, todos os pinos que estavam soltos eram pinos originais, distante da região onde foi realizado o trabalho anterior;

- No dia 04/07/14 foi realizada uma nova inspeção através da limpeza do rolo com escova de aço, onde foram identificados outros 6 pinos faltantes, a saber, os pinos que estavam soltos também eram originais.

Com o intuito de aprofundar nosso estudo, se faz necessário discutir a respeito dos motivos plausíveis para os pinos dos rolos se soltarem, afim de atuar de maneira mais eficiente.

Dentre os possíveis motivos para os pinos se soltarem dos rolos foram postos:

- a. Perda de propriedades da cola após determinado período de utilização;
- b. Ancoragem deficiente dos pinos.

6.3.1.PERDA DE PROPRIEDADES DA COLA

É possível verificar na folha de dados técnicos do Loctite® 638 (figura 23, subtraída do ANEXO A), que existe perda de propriedade da cola em relação ao tempo, temperatura e ambiente de trabalho, no entanto, não é o suficiente para se afirmar que o conjunto desses fatores na condição dos rolos nesta conjuntura foi o bastante para que a cola perdesse sua propriedade e permitisse que os pinos se soltassem.

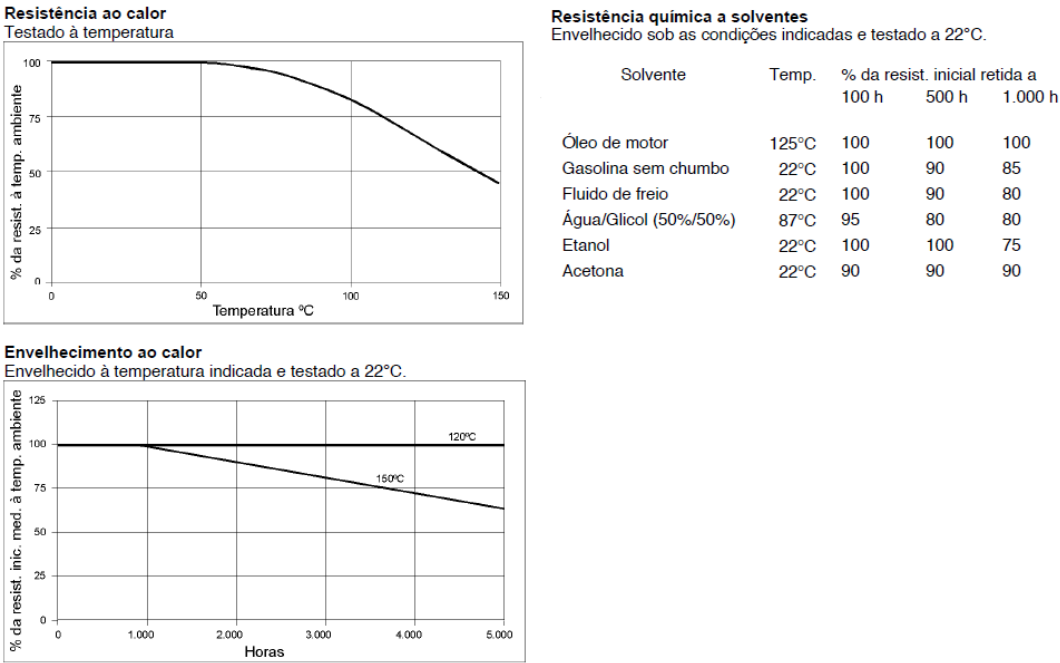


Figura 23 - Decaimento das propriedades da cola Loctite® 638 usada nos pinos
Fonte: LOCTITE.

6.3.2.ANCORAGEM DEFICIENTE

Foi verificado na área operacional por meio de medição, que os pinos estão com ancoragem – parte do pino que está para dentro da capa – entre 12 e 14mm nas extremidades dos rolos.

Conforme os dados apresentados no capítulo de manutenção do Manual da Máquina da Polysius (figura 24), tem-se que, a espessura da camada de desgaste máxima permitida “a” é de 23mm. Como os pinos têm 35mm de comprimento inicial e $a_{máx}=23mm$, podemos dizer que os pinos estão se soltando por falta de ancoragem, em alguns pontos com apenas 12mm.

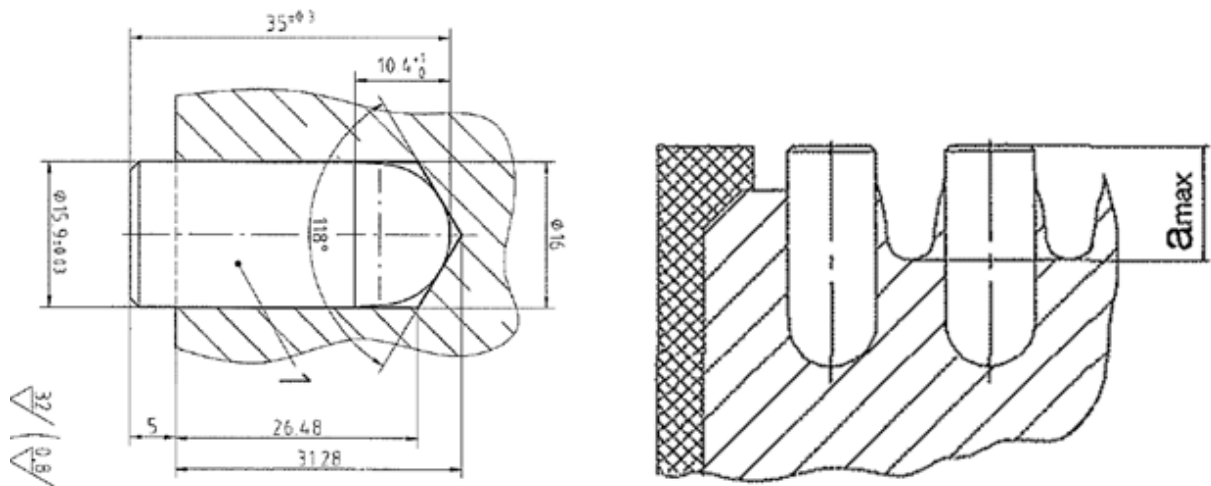


Figura 24 - Dados relacionados aos pinos
Fonte: POLYSIUS.

Na inspeção realizada no dia 04/07/2014 foi retirado material compactado entre os pinos, nas laterais e na parte central do rolo, onde foi identificado que nas laterais dos rolos houve um desgaste superior da bandagem em relação ao desgaste na região central.

A figura 25 ilustra, à esquerda o lado não acoplado (com 11mm de pino fora da capa) e à direita o lado acoplado (com 10mm de pino fora da capa).

A figura 26 ilustra à esquerda a região central do rolo, onde praticamente não há diferença entre capa e comprimento dos pinos, e à direita um pino que se soltou com ancoragem de 12mm.



Figura 25 - Lado não acoplado (esq.) e lado acoplado (dir.)
Fonte: VALE, 2014.



Figura 26 - Região central (esq.) e pino com ancoragem de 12mm (dir.)
Fonte: VALE, 2014.

De acordo com o manual da 3PR7 da Polysius, para o seu correto funcionamento, a prensa deve trabalhar com coluna, no entanto, conforme dito anteriormente no tópico 6.2, a mesma trabalha sem coluna devido aos fatores já citados acima a mesma trabalha sem coluna.

Para o funcionamento correto do POLYCOM® é necessário que o POLYCOM® seja alimentado com material de modo uniforme. Para poder garantir esta alimentação uniforme, a guia de alimentação de material deverá possuir por cima uma reserva de material[...] A guia de alimentação de material apoia-se no quadro superior do POLYCOM®. As chapas de guia laterais cobrem a folga de moagem e impedem que o material possa sair lateralmente da folga de moagem. (POLYSIUS, 2001, p.313)

Quando do início de operação da prensa, foi instalado um modelo alternativo, que pega apenas a parte superior dos rolos e não a parte lateral conforme modelo original (figuras 27 e 28).

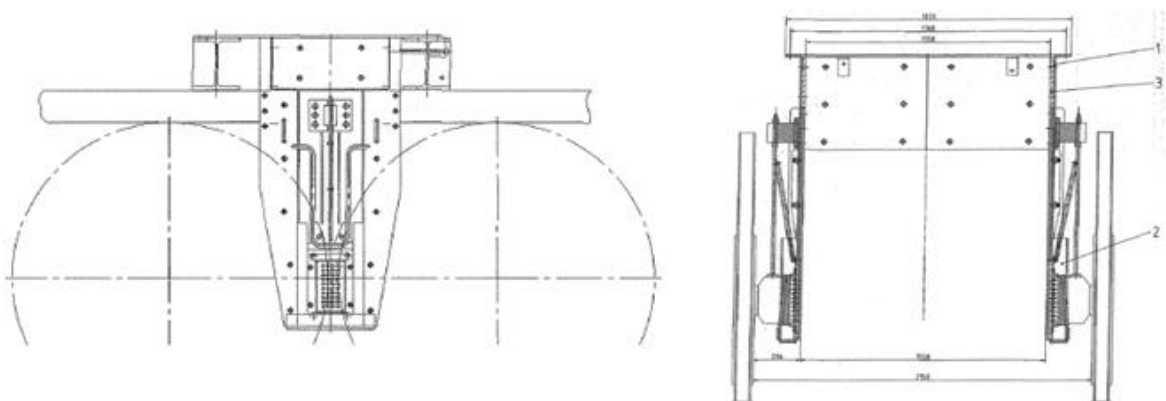


Figura 27 - Guia lateral original, conforme projeto
Fonte: POLYSIUS, 2001.

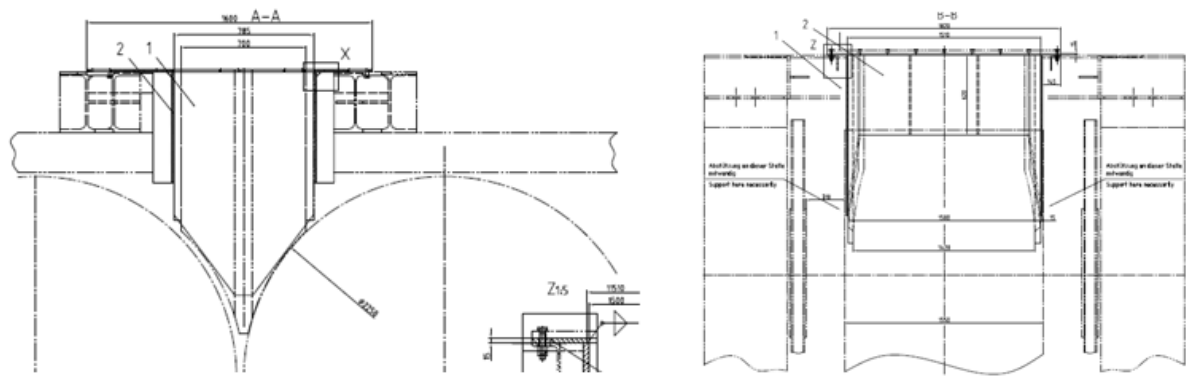


Figura 28 - Guia alternativa, conforme instalada
Fonte: POLYSIUS, 2001.

Na inspeção realizada no dia 18/07/2014, foi feita a limpeza dos rolos utilizando alta pressão; na sequência, foi possível observar que, praticamente toda a região dos rolos está com desgaste da capa muito superior ao esperado (figura 29).

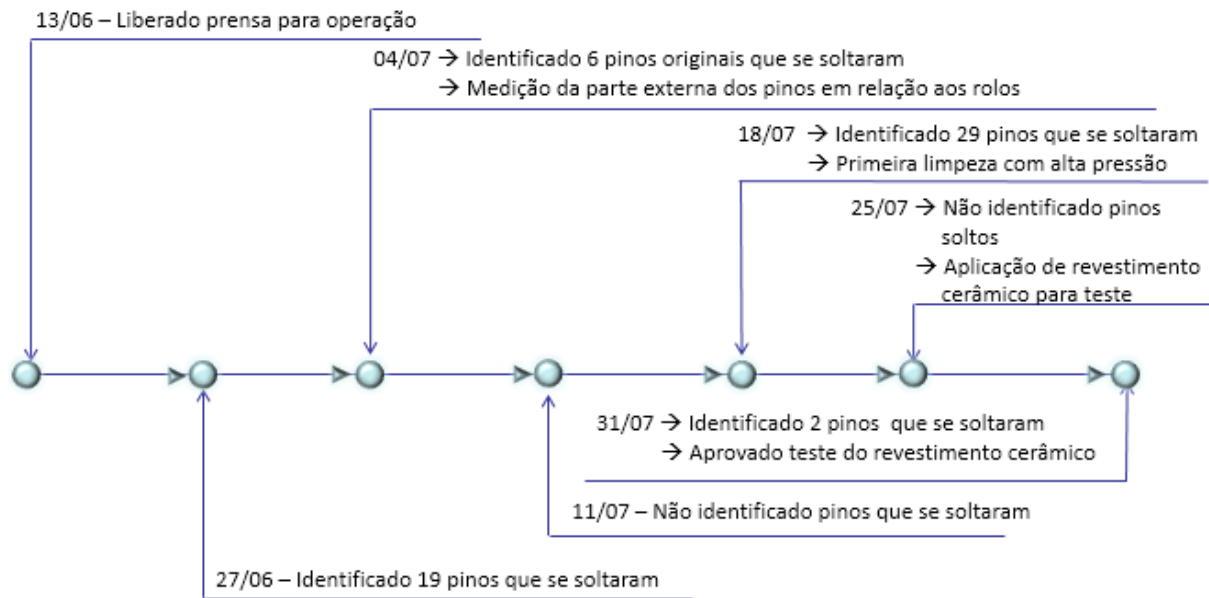


Figura 29 - Desgaste na capa superior ao esperado (região clara)
Fonte: VALE, 2014.

Com estas informações, conclui-se que existe desgaste prematuro da capa, que diminui a ancoragem dos pinos, permitindo que os mesmos se soltem. A diferença esperada era de no máximo 5mm, e a encontrada flutua entre 11 e 14mm.

Conhecendo o problema e sua causa, assim como os fatores relevantes para que gerassem o desvio, foi feito um estudo multidisciplinar para que se estabelecesse um método de redução de desgaste e desprendimento de pinos, que será tratado no tópico a seguir.

No fluxograma 1, temos o cronograma da realização dos serviços.



Fluxograma 1 - Cronograma de serviços realizados
Fonte: VALE, 2014.

6.4. TRATATIVA PÓS ANÁLISE

Foi verificado que na prensa de rolos 3PR7 estava ocorrendo escorregamento do minério entre os pinos, ocasionando um desgaste excessivo no rolo e desprendimento dos pinos. Tal fato mostrou a necessidade do desenvolvimento de uma solução que eliminasse o problema para contenção do desgaste e prolongamento da vida útil do rolo, sem comprometer a performance da prensa. Após a execução, foram analisados os resultados antes e depois da aplicação do produto.

Alguns fatores como pressão excessiva, elevação da umidade e alimentação deficiente podem fazer com que haja um escorregamento do minério a ser prensado tendendo este a fluir e ser extrudado entre os pinos causando desgaste prematuro e acentuado na bandagem do rolo. A presença deste fenômeno acarreta em queda de pinos dos rolos, e conseqüentemente temos um desgaste muito acentuado na bandagem, provocando buracos nos rolos, sendo necessário o reparo ou até mesmo a sua substituição.

6.4.1.MATERIAIS E MÉTODOS

Afim de eliminar os efeitos do fenômeno já mencionado e evitar a queda de pinos e posterior avaria dos rolos, foram realizados levantamentos de campo e estudos. Para que um produto fosse considerado adequado ao nosso propósito, seriam necessárias 4 características principais:

- Alta resistência a abrasão, para não haver o desgaste prematuro do produto;
- Alta resistência a compressão, para que não houvesse a quebra do produto;
- Grande aderência na bandagem dos rolos, para não haver desprendimento do produto aplicado;
- Não interferir na performance da prensa após aplicação.

Para saber qual compressão o produto teria que resistir, era necessário saber qual a maior pressão exercida nos rolos. Através de uma filmagem termográfica, foi identificado que a região central é onde tem o maior trabalho, conforme mostra a figura 30; o fabricante foi consultado e a informação obtida foi de que a pressão máxima seria de 300Mpa quando a prensa trabalha com o hidráulico em sua pressão máxima, como a pressão do hidráulico de trabalho atual da prensa é 1/3 da pressão máxima, o produto teria que resistir a uma compressão superior a 100Mpa.

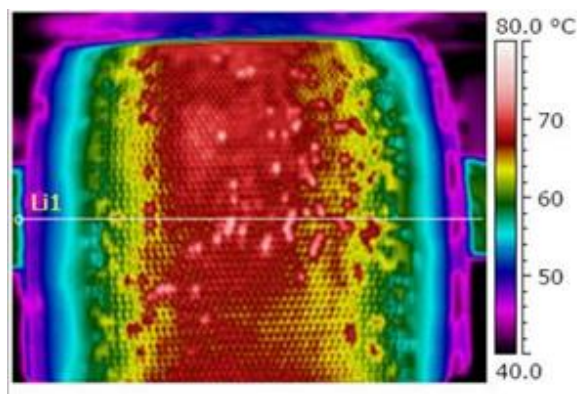


Figura 30 - Análise termográfica do rolo
Fonte: VALE, 2014.

De posse da informação da compressão necessária que o material deveria resistir, foi feita uma segunda consulta, agora com diferentes fabricantes, para que fornecessem a folha de dados (“datasheet”) de seus produtos recomendados para

tal aplicação. Após análise dos dados, decidiu-se então realizar o teste com um produto de uma aplicação mais simples e menor custo (tabela 3).

Tabela 3 - Dados técnicos do produto escolhido

Technical Data			
Composition	Matrix	A modified epoxy resin with na aliphatic amine curing agent	
	Reinforcement	Proprietary blend of high purity Al ₂ O ₃ and SiC, pretreated with polymeric coupling agent	
Cured Density		2.7g/cc	168lb/cu.ft
Compressive Strength	(ASTM D 695)	1125 kg/cm ³ (110.3 Mpa)	16000 psi
Flexural Strength	(ASTM D 790)	485 kg/cm ³ (47.6 Mpa)	6900 psi
Tensile Adhesion	(ASTM D 4541)	224.8 kg/cm ³ (22.1 Mpa)	3200 psi
Tensile Strength	(ASTM D 638)	211 kg/cm ³ (20.7 Mpa)	3000 psi
Impact Resistance (Reverse)	(ASTM D 2794)	9.0 N.m	80 in-lbs
Shore D Durometer Hardness	(ASTM D 2240)	89	
Vertical Sag Resistance, at 21°C (70°F) and 6mm (1/4")		No Sag	
Maximum Temperature (Dependent on service)	Wet Service	95°C	203°C
	Dry Service	205°C	400°C
Shelf Life (unopened containers)	2 Years [stored between 10°C (50°F) and 32°C (90°F) in dry, covered facility]		

Fonte: VALE, 2014.

Após a definição do material foi necessário seguir um método de aplicação do produto, que consistiu basicamente em 4 etapas, na respectiva ordem:

- Demarcação do local a ser aplicado;
- Preparação da superfície;
- Mistura e aplicação de prime;
- Mistura e aplicação do produto.

A resina é fornecida pelo fabricante, em suas devidas proporções para a aplicação, em um recipiente lacrado que consiste em 5 produtos: prime A+B, produto A+B e cerâmica.

6.4.2.PROCEDIMENTO

Os rolos da 3PR7 apresentavam desgaste prematuro considerável apenas nas extremidades dos rolos, cada rolo possui um comprimento de 1550mm, no entanto, o produto foi aplicado apenas em 500mm de cada extremidade, conforme figura 31.



Figura 31 - Demarcação do local de aplicação
Fonte: VALE, 2014.

A aplicação da resina cerâmica ocorre entre os pinos na região responsável por direcionar o material para a zona de compressão (figura 32).



Figura 32 - Princípio da cominuição na prensa de rolos
Fonte: VALE, 2014.

Antes da aplicação do produto, foi necessária a preparação da superfície, limpa, livre de contaminantes e com rugosidade de perfil angular de 75 a 125µm. Inicialmente os rolos foram lavados com jato de água e depois jateado com abrasivo, em atendimento à necessidade de rugosidade para aderência. Na figura 33 temos a comparação do rolo antes e depois da preparação da superfície para receber a resina.

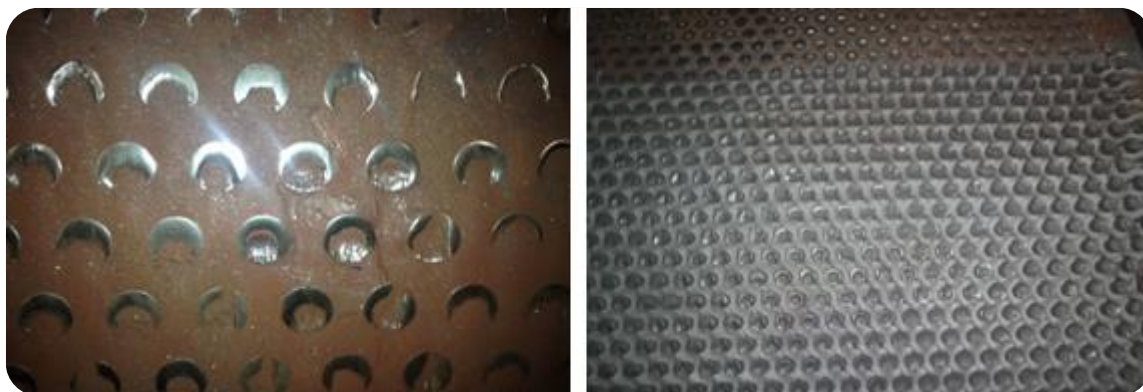


Figura 33 - Preparação da superfície do rolo: antes (esq.) e após (dir.)
Fonte: VALE, 2014.

Para melhor aderência da resina cerâmica a ser aplicada, primeiramente foi aplicado o *prime*⁸ na superfície do rolo (figura 34). O *prime* é um produto bi-componente, deve-se misturar parte A à parte B de forma homogênea e aplicar sobre a área a ser revestida com pincel ou rolo, com tempo limite de 15 minutos para começar a aplicar o revestimento, considerando uma temperatura de 32°C.

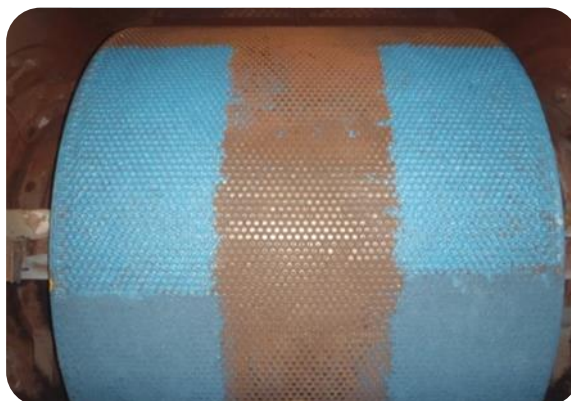


Figura 34 - Rolo após a aplicação do *prime*
Fonte: VALE, 2014.

Após a aplicação do *prime* foi feita a mistura de 3 componentes, parte A somada à parte B e à cerâmica, com o auxílio de um misturador elétrico, até que se obtivesse uma consistência uniforme; com a mistura homogênea, foi aplicada de imediato, considerando o tempo de aplicação de 15 minutos para temperatura de 32°C, espalhando e compactando a resina sobre a área aplicada, usando uma placa

⁸ O *prime* desempenha o papel de formar uma camada de ligação para receber o produto seguinte. Eles podem ser desenvolvidos de modo a maximizar propriedades de enchimento, aderência e proteção anti-corrosiva com o substrato. Isto pode ser alcançado através da química ou através do controle das propriedades físicas, como porosidade e higroscopia.

plástica e um martelo de borracha, uma espátula foi usada para retirar o excesso do produto. Após o tempo de cura de 3 horas o equipamento foi liberado.

6.5. RESULTADOS

Após a aplicação da resina cerâmica, foi necessária a verificação do desempenho do produto diante da problemática, afim de elucidar se foi obtido o resultado esperado em relação a evitar o desgaste da bandagem dos rolos e ao desprendimento de pinos, assim como verificar se foi gerada alguma interferência na performance da prensa. Para esta análise, foi realizado um levantamento com dados de performance comparando-se os resultados antes e depois da aplicação da resina, a saber, foram considerados os seguintes indicadores:

- Geração de Superfície Específica – cm^2/g ;
- Consumo de Energia – kwh/t ;
- Torque - %;
- Pressão de trabalho – MPa;
- Velocidade dos rolos – rpm;
- Eficiência – $\text{cm}^2/\text{g} / \text{kwh/t}$;
- Como informação complementar foi avaliada também a participação do minério de Itabira, por ter menor índice de moabilidade.

O período de análise foi compreendido entre 07/08/2014 a 27/01/2015 sendo: de 07/08/2014 a 26/10/2014 (antes da aplicação da resina), de 27/10/2014 a 31/10/2014 (aplicação da resina), de 01/11/2014 a 27/01/2015 (após a aplicação da resina).

6.5.1.DESEMPENHO DA RESINA CERÂMICA

Foram feitas inspeções para verificar se a resina forneceu um bom resultado, foi observado que a resina se encontrava em bom estado, sem quebras ou desprendimento desta, da bandagem dos rolos, e também foi constatado que não houve desprendimento de pinos, qualificando este quesito como positivo na intenção de solucionar a deficiência de ancoragem dos pinos.

6.5.2.PRESSÃO E TORQUE

A prensa continuou a responder ao trabalho realizado após a aplicação da resina cerâmica, pois houve uma elevação do torque com elevação de pressão, a elevação do torque indica que não está havendo escorregamento do material prensado.

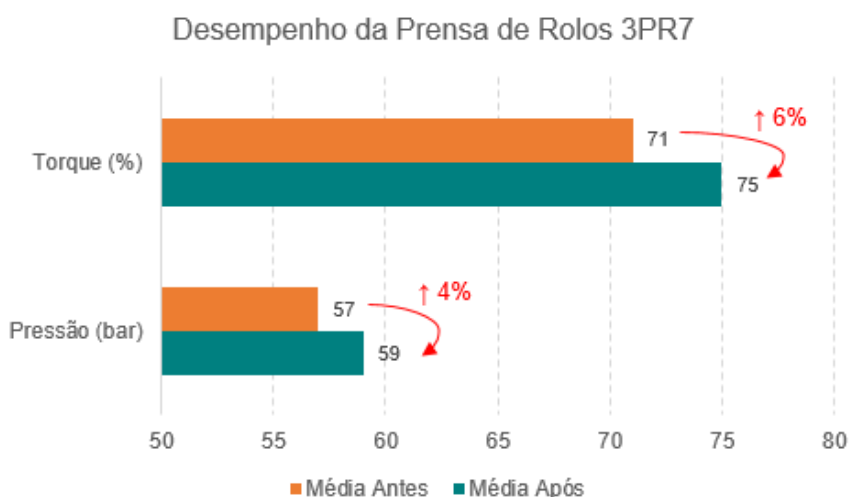


Gráfico 2 - Resultados de pressão hidráulica e torque
Fonte: VALE, 2014.

6.5.3.SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E CONSUMO DE ENERGIA

Foi possível observar um comportamento de ganho de superfície específica (cm^2/g) de 6% após a aplicação da resina cerâmica, consequentemente, por realizar mais trabalho, também houve elevação no consumo de energia elétrica. O esperado era que o aumento de consumo fosse proporcional a elevação do ganho de superfície específica, no entanto, os resultados mostram uma elevação maior no consumo em relação ao ganho de superfície.

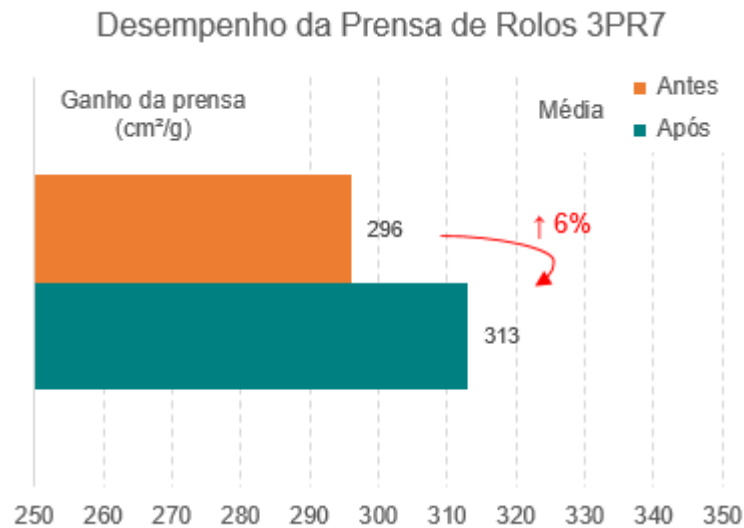


Gráfico 3 - Resultados de ganho de superfície
Fonte: VALE, 2014.

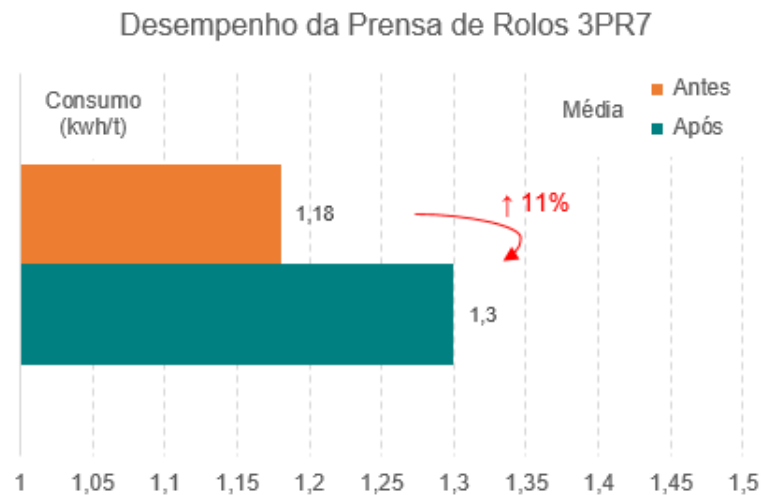


Gráfico 4 - Resultados de consumo de energia elétrica
Fonte: VALE, 2014.

6.5.4.EFICIÊNCIA E INFLUÊNCIA DO MINÉRIO

O indicador *Eficiência de Prensagem* (expresso em cm²/g por kwh/t), é uma forma de comparar as informações de quanto a prensa está elevando a superfície específica (cm²/g) do minério para cada kwh/t de energia consumida.

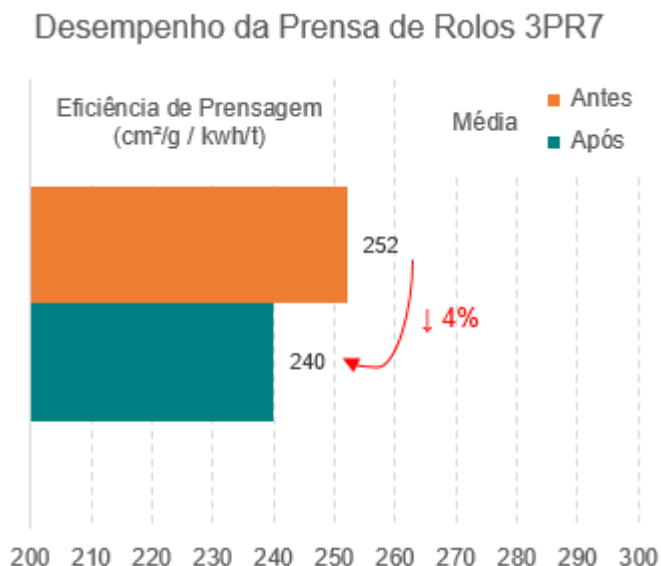


Gráfico 5 - Resultados de *Eficiência de Prensagem*
 Fonte: VALE, 2014.

A princípio, verifica-se que houve perda de eficiência da prensa após a aplicação da resina cerâmica, no entanto, como se trata de um resultado oposto ao desejado, foi necessário avaliar a possibilidade de interferência externa nos resultados.

É sabido que dentre os minérios utilizados nas usinas de pelotização, aquele proveniente das minas de Itabira se destacam pela dificuldade de geração de superfície específica, a partir desta informação foi feito um levantamento da participação deste minério no período de análise supracitado. É possível observar um aumento relevante na participação deste minério após a aplicação da resina.

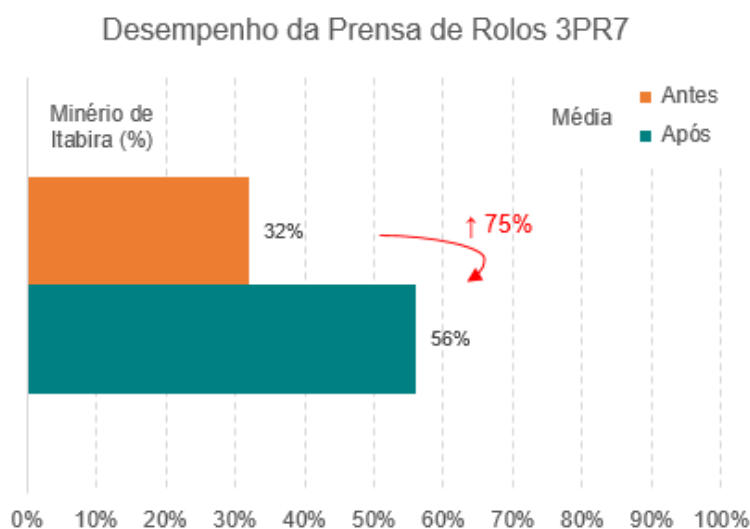


Gráfico 6 - Participação do minério de Itabira
 Fonte: VALE, 2014.

A maior participação do minério de Itabira foi a responsável pela elevação do consumo específico de energia, o que impactou na perda de eficiência da prensa. Esta afirmação foi comprovada através dos resultados de eficiência de prensagem obtidos posteriormente ao período analisado (fevereiro de 2015), onde, ao retornar o uso do minério de Itabira aos patamares padrões do mix, houve aumento da *Eficiência de Prensagem* em 3,2% quando comparado ao período anterior à aplicação da resina.

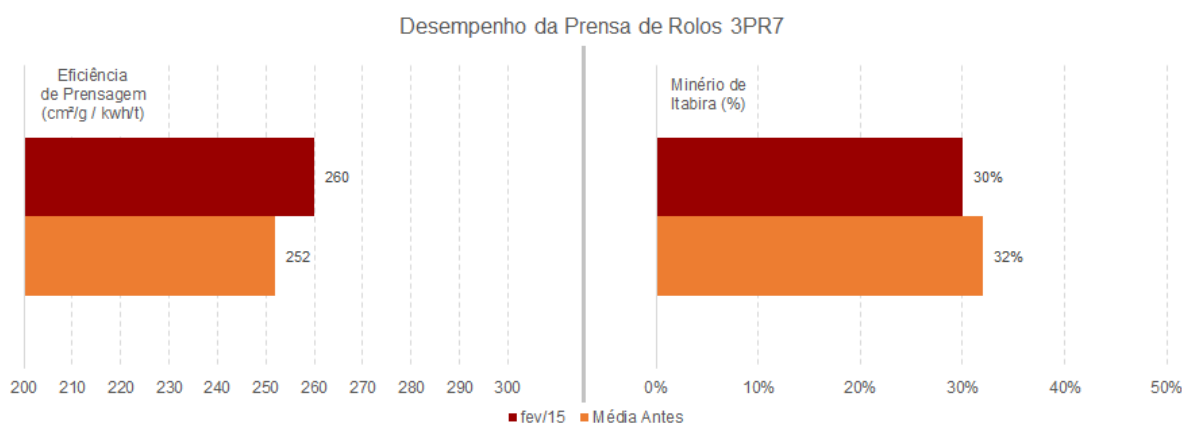


Gráfico 7 - Influência do minério de Itabira na *Eficiência de Prensagem*
Fonte: VALE, 2014.

6.5.5.RESUMO DOS RESULTADOS

As inspeções realizadas mostram que o desgaste da bandagem dos rolos e desprendimento dos pinos foram controlados e a resina cerâmica está cumprindo o desejado quanto ao desgaste, compressão e aderência na superfície do rolo, podendo prolongar sua vida útil.

Em relação ao processo, os dados coletados indicam que não houve prejuízo na performance da prensa, ao contrário, foi observado aumento no ganho de superfície específica de 6% e aumento de 3,2% na eficiência de prensagem.

Continuando, pôde-se notar que um maior percentual de minério de Itabira no mix de minérios influencia negativamente a performance da prensa.

Devido a recente aplicação da resina cerâmica, ainda não é possível deliberar a respeito da durabilidade da aplicação.

6.6. SUGESTÃO DE MELHORIAS

A prensa 3PR7 necessita de algumas ações para melhorar seu desempenho, como a usinagem dos rolos e modificação do schut de alimentação de modo que se proporcione a formação de coluna.

Ainda como sugestão de melhoria, é válida a utilização de scanner a laser para medição do desgaste, com possibilidade de leitura 3D e gráfico real da superfície do rolo.

Melhores resultados podem ser obtidos com a maximização do torque, utilizando lógica já existente na usina de Vargem Grande/MG.

7. CONCLUSÃO

A busca pela otimização do tempo de operação e dos custos é comum na indústria, acostumada a um ambiente constantemente competitivo e inovador. A eficácia da manutenção tem papel primordial nesta tarefa, a indisponibilidade de equipamentos de regimes contínuos de funcionamento pode representar paradas ou uma diminuição da capacidade do processo produtivo e, conseqüentemente, perda significativa de capital.

Nesta linha, o estudo de caso feito da Recuperação de Rolo da Prensa de Rolos 3PR7 busca trazer a luz uma alternativa para a solução de um problema vivenciado no pátio operacional, por se tratar de um equipamento crítico e de altíssimo custo. A princípio, somente a compra de um rolo novo como o da 3PR7, custaria ao financeiro um valor em torno de R\$14 milhões; ao estudar a possibilidade de recuperação e aplicá-la, o gasto total foi de R\$348 mil, uma economia substancial e que por si só já justificaria a preocupação de gerar o estudo, que também será apresentado na ABM Week 2015, cujo tema central será “Tecnologia e inovação para a competitividade”.

A título de informação, vale dizer que o mesmo método de recuperação foi aplicado em sequência na prensa 4PR3 da Usina IV também do Complexo de Tubarão/ES, um equipamento de menor porte, e os dados de desempenho seguem uma linha positiva como os observados na 3PR7; a prensa agora está agendada com Manutenção Preventiva e tem a aplicação de resina cerâmica realizada mensalmente, ela é parada, limpa, jateada, passa por inspeção visual para recolocação de pinos e aplicação de resina cerâmica.

Com a apresentação dos valores, performance e sabendo que existem outras prensas em funcionamento nos diferentes sites da empresa, a recuperação de rolos se torna uma alternativa extremamente viável; após a verificação da durabilidade da resina cerâmica, e atrelado a todos os fatores apresentados neste projeto, haverá embasamento suficiente que motive a confecção de um novo PRO, cumprindo o objetivo de elevar a vida útil do equipamento, e reduzindo o custo em milhões por cada rolo recuperado.

Em suma, o presente estudo de caso dá enfoque ao fato de que os problemas detectados em equipamentos não devem ser analisados isoladamente, e sim a partir

da realidade como um todo, levando em consideração todas as consequências que o mesmo poderá acarretar. A partir da queda de pinos e de buracos observados nos rolos, a cerne do problema não ficaria evidente nos processos posteriores se não ocorresse uma boa inspeção e observância dos indicadores de eficiência.

8. REFERÊNCIAS

AFFONSO, Luiz Otávio Amaral. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BROECKMANN, C.; GARDULA, A. **Reprint of: Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors**. Ottawa, 2005.

CAMARA, João Luiz. **Manutenção Elétrica Industrial**. Rio Grande do Norte: UFRN, 2008.

CHAVES, P.; PERES, A. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Brasil, 2003.

COLOSIMO, Enrico Antônio; FREITAS, Marta Afonso. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.

GARIGLIO, E; KLEIN, M. **Pelotização de Minérios de Ferro**. Apostila de treinamento interno. Vitória: CVRD, 1994.

GOMES, Frederico Bomtempo. **A prensa de rolos como alternativa para os circuitos de cominuição nas atividades de mineração e a viabilidade de sua aplicação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

KARDEC, A; NASCIF, N. **Manutenção Função Estratégica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.

LAFRAIA, J.R.B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

LIMA, F. A.; CASTILHO, J. C. N. **Aspectos da Manutenção de Equipamentos Científicos da Universidade de Brasília**. Dissertação de Especialização, Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Ciência da Informação e Documentação, DF, 2006.

LOCTITE. **Folha de Dados Técnicos – Loctite ® 638**. São Paulo, 2014

MORLEY, C.; **High Pressure Grinding Rolls - A Technology Review**, in **Advances in Comminution**. Editado por Kawatra, S. K., SME, Littleton, CO, USA, 2006-b.

NASCIF, Júlio; DORIGO, Luiz Carlos. **Manutenção Orientada para Resultados**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

PALADY, Paul. **FMEA: Análise dos Modos de Falha e Efeitos: prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram**. São Paulo: IMAM, 1997.

PEREIRA, M. J. **Engenharia de Manutenção: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2009.

PINTO, L. H. T. **Análise de falhas: tópicos de engenharia de confiabilidade**. 2004.

POLYSIUS. **Manual da Máquina: Prensa de Rolos de Alta Pressão**. 2001.

SILVA, W. C. **Manutenção Predial no Banco Central do Brasil**. Monografia. Brasília: Faculdade de Estudos Sociais Aplicados. Universidade de Brasília, 1994.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2005.

VALE. **Manual de Procedimentos**. Material para treinamento interno. Vitória, 2010.

VALE. **Guia Vale Começar**. Vitória, 2014.

ZORZANELLI, R.F; BOREL, V.G. **Análise e solução do problema do ventilador de resfriamento da pelletização: Estudo de Caso**. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.