

Pós-Graduação

Segurança de Processos



SEGURANÇA DE PROCESSO EM DUTOS: GESTÃO DE INTEGRIDADE EM REJEITODUTO/MINERODUTO NA MINERAÇÃO DE FERRO

Eduarda Campos, Mayumi Enju, Michele Duarte, Joabh Silva e Nubia Mapa

RESUMO

Grandes acidentes da indústria da mineração ocorreram nos últimos 10 anos, fazendo com que o setor redefinisse seus objetivos com relação a segurança de processo. Com base em boas práticas originadas em outras indústrias e a partir da estrutura de gestão de segurança de processo baseada em risco (RBPS) criadas pelo Centro de Segurança de Processos Químicos, o estudo em questão buscou estabelecer um plano de gerenciamento de integridade para um ativo crítico de várias mineradoras no Brasil, que é o mineroduto/rejeitoduto que transporta polpa de minério de ferro a longas distâncias. Identificou-se que quatro cenários de risco mapeados são capazes de gerar um evento central de liberação de descontrolada de polpa. O plano proposto abrangeu todo ciclo de vida do ativo, com proposições de responsabilidades e atividades necessárias.

Palavras-chave: Integridade; Dutos; Segurança de Processo; Mineração

ABSTRACT

Major accidents in the mining industry have occurred in the last 10 years, causing the sector to redefine its objectives regarding process safety. Based on good practices originating in other industries and from the risk-based process safety management structure (RBPS) created by the Center for Chemical Process Safety, the study in question sought to establish an integrity management plan for an asset critical issue for several mining companies in Brazil, mine pipeline, that transports iron ore pulp over long distances. It was identified that four mapped risk scenarios are capable of generating a central event of uncontrolled pulp release. The proposed plan covered the entire life cycle of the asset, with proposed responsibilities and necessary activities.

Keywords: Integrity; Pipeline; Process Safety; Mining

1. INTRODUÇÃO

As indústrias têm ampliado sua visão na busca por eficiência para além de apenas entregar produtos com qualidade. Elas têm incluído no *hall* de suas preocupações a segurança do processo, não apenas visando a redução de perdas econômicas, mas também a redução de perdas de vidas humanas e a redução de impactos ambientais. Para essas indústrias, a cultura de segurança de pessoas, de processos e ambiental se tornou prioridade na gestão organizacional (De SOUZA *et al.*, 2021).

Uma forma de garantir o objetivo de melhorar a eficiência das operações é fazer uma boa gestão de integridade de ativos, pois são eles que geram valor. Segundo Da Silva (2022), a gestão de ativos vai além de atuar sobre ativos ao longo do seu ciclo de vida, uma vez que visa também assegurar a agregação de valor e alcançar objetivos estratégicos. A gestão de ativos diz respeito a todos os aspectos envolvendo a capacidade e a habilidade de uma organização atingir seus objetivos, desde o momento da concepção do ativo, passando pela sua vida operacional até o descarte final (CCPS, 2014). Sendo assim, tem-se que o objetivo de um Sistema de Gerenciamento de Integridade de Ativos é garantir que os ativos físicos das instalações e do sistema de dutos sejam operados de maneira confiável, eficiente e segura.

A integridade de ativos consta como um dos elementos da segurança de processo baseado em risco (RPBS) criada pelo centro para segurança de processos químicos (CCPS). Esses elementos são diretrizes que fornecem orientação sobre como: (1) projetar um sistema de gestão de segurança de processo; (2) corrigir um sistema deficiente; ou (3) aprimorar as práticas de gestão de segurança de processo (CCPS, 2014).

Assim como a indústria química e a indústria de óleo e gás, que atuam fortemente com segurança de processos baseado em risco há alguns anos, a indústria de mineração está se estruturando e aprimorando na segurança de processos, sendo um dos principais pilares para expansão do setor mineral e de sua agenda ASG – Ambiental, Social e Governança (IBRAM, 2022). Essa mudança de paradigma se dá em função de eventos recentes envolvendo o setor, como o rompimento da barragem de rejeito da empresa Samarco Mineração em 2015 (CNDH, 2017), com 19 fatalidades e impactos ambientais na bacia do Rio Doce; e da empresa Vale S.A em 2019, com 272 fatalidades e impactos na bacia do Rio Paraopeba (Da COSTA *et al.*, 2020). Além de barragem, o setor convive com outros eventos críticos como o rompimento de mineroduto da empresa Anglo American em 2018, este último despejando mais de 500 toneladas de polpa de minério em curso d'água (G1, 2018) e mais recentemente o evento envolvendo a empresa Braskem em Alagoas, com impactos ambientais em três bairros e em uma lagoa nas proximidades, ocasionados pelo colapso da mina de salgema, operada pela empresa desde 1980 (GEOPORTAL, 2023). Esses eventos trouxeram desconfiança para a população devido seus impactos negativos, apesar dessa indústria ser reconhecida como atividade fundamental para a sociedade (GAVRONSKI, 2022).

O processo de produção de minério de ferro, foco deste estudo, basicamente, segue quatro etapas: (i) a extração do minério na fase mina; (ii) o beneficiamento na fase usina;

(iii) o manuseio dos materiais e, por fim; (iv) o escoamento para os clientes ou processos subsequentes. Historicamente, a produção de ferro gera grande quantidade de polpa em sua fase de beneficiamento de minério, principalmente nas etapas de deslamagem e flotação, o que demanda modais de transporte seguros e com custos competitivos, principalmente quando se trata de transporte em longas distâncias. Observa-se nessa indústria, a utilização de tubulações conhecidas como mineroduto ou rejeitoduto como principal modal de transporte hidráulico de polpas minerais (ALVES, 2022).

Os sistemas de tubulações para transporte de minérios - os chamados minerodutos - são utilizados em todas as partes do mundo (GOMES, 2012). No Brasil, existem cinco minerodutos em funcionamento com extensão de 1.336 Km e 601 dutos que totalizam 19 mil km. Os minerodutos com maior extensão citados estão distribuídos por três empresas, sendo elas: Anglo American, Samarco e Norsk Hydro (SILVA, SANTOS e SANTOS, 2020). No transporte, as polpas minerais são colocadas no duto na área da mina / planta de beneficiamento do minério e bombeadas, por longas distâncias, até estações de processamento próximas aos portos.

Apesar de ser um sistema considerado, por muitos, como confiável e seguro no que se refere à operacionalidade e aos impactos ambientais (GOMES, 2012), sua extensão territorial e os volumes transportados requerem cuidados na sua integridade a fim de garantir sua disponibilidade e minimizar impactos ao meio ambiente e à população em geral, uma vez que eventos com esse tipo de ativo já demonstraram que podem ocorrer falhas e trazer prejuízos, como visto em acidentes ocorridos. Diante do cenário atual de necessidade de aprimoramento da segurança de processos na indústria de mineração, o estudo em questão se justifica por contemplar um tipo de ativo importante para o setor mineral, que são os minerodutos/rejeitodutos.

O estudo tem por objetivo geral desenvolver um plano de gerenciamento de integridade de ativos voltado para dutos usados na mineração à luz da segurança de processo, mais especificamente, rejeitoduto/mineroduto. Como objetivos específicos visa-se identificar as principais normas voltadas para integridade de dutos para servir de referência para determinação dos aspectos que devem ser considerados no plano; enumerar os principais riscos e ameaças de dutos na mineração; e por fim, esboçar as linhas gerais de um plano de gerenciamento de integridade de ativos voltado para rejeitoduto/mineroduto a partir das normas consultadas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Segurança de Processo baseada em risco (*Risk Based Process Safety*)

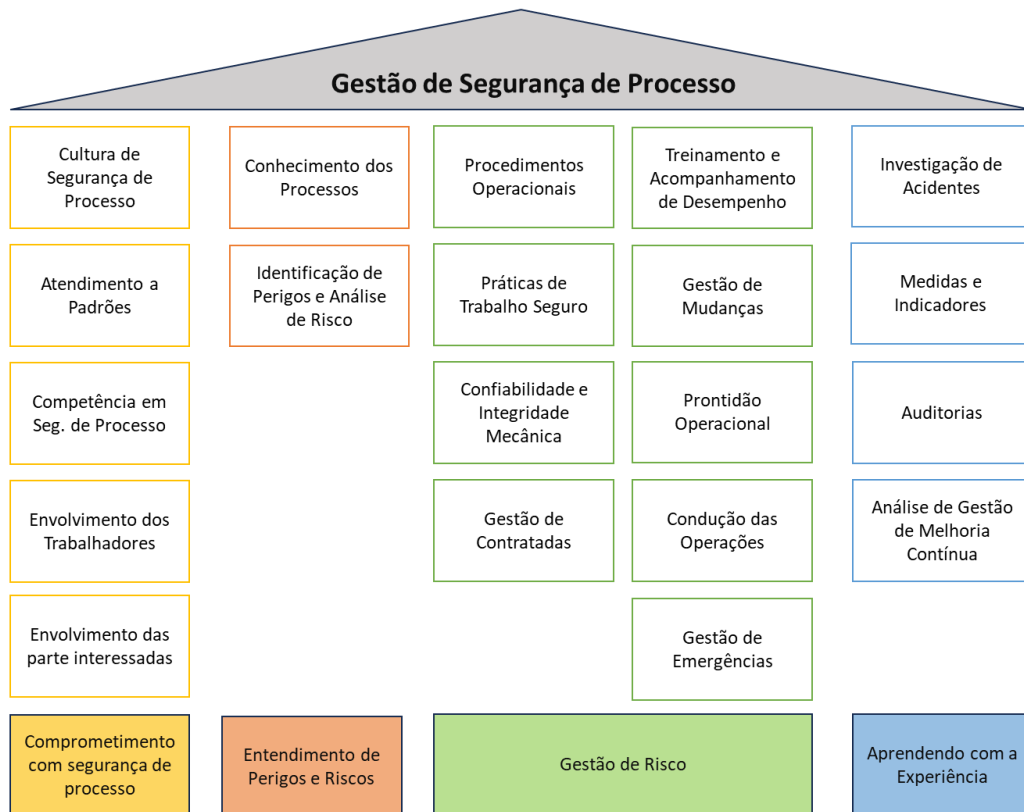
Práticas de segurança de processo e sistemas de gestão de segurança de processo (PSM) existem há anos em diversas empresas. A esta última é creditado a redução de grandes riscos de acidentes (CCPS, 2014). O principal objetivo de um sistema de gerenciamento e risco de segurança de processo é melhorar o desempenho de segurança a partir da identificação de materiais e energias perigosas inerentes ao processo, propondo medidas para gerenciar efetivamente os riscos associados.

No intuito de promover a excelência da PSM e melhoria contínua das indústrias de processamento, o *Center for Chemical Process Safety* (CCPS) desenvolveu um modelo para implantação de um sistema de gestão de segurança de processos denominado RBPS – *Risk Based Process Safety* (Segurança de Processo Baseada em Riscos), cujas diretrizes fornecem ferramentas para construir e operar sistemas de segurança de processos mais efetivos. As diretrizes fornecem orientações sobre como: a) projetar um sistema de gestão de segurança de processo; b) corrigir sistemas deficientes; ou c) aprimorar as práticas de gestão de segurança de processo. Fundamentalmente esse sistema tem como base quatro pilares: comprometimento com segurança de processos, entendimento de perigos e riscos, gestão de riscos e lições aprendidas a partir da experiência. (CCPS, 2014).

Adicionalmente, a abordagem baseada em risco auxilia a evitar lacunas, inconsistências, trabalho excessivo ou falta de trabalho que venham a gerar falhas no sistema. De acordo com as diretrizes do PSM, para trabalhar de forma efetiva as empresas deverão integrar a as práticas de segurança de processo baseada em risco (RBPS) a outras sistema de gestão, como qualidade, confiabilidade, meio ambiente e segurança.

Ao todo 20 elementos integram as práticas do RBPS a partir de mais de 15 anos de experiência com implantação de PSM originais. A Figura 1 traz de forma gráfica os 20 elementos.

Figura 1: Pilares e elementos associados que constituem um completo sistema de gestão RBPS



Fonte: Adaptado de CCPS (2014)

Segundo CCPS (2014), para se implantar um sistema de gestão baseado em risco deve-se basear em uma sólida compreensão dos riscos atuais da empresa no que diz respeito ao processo ao qual o sistema de gestão será aplicado. Dessa forma, cada empresa deve decidir quais áreas físicas e etapas do ciclo de vida do processo estarão sujeitas à aplicação do RBPS e, assim, identificar o nível de detalhamento a ser usado para atender sua necessidade e apetite para o risco.

Deve-se considerar as seguintes questões técnicas na decisão de sua implantação:

- a) **Ciclo de Vida:** Os 20 elementos de RBPS aplicam-se a todo ciclo de vida do processo, podendo alguns elementos não estarem ativos em todo ciclo.
- b) **Instalação fixa, não de transporte:** O sistema de RBPS foi desenvolvido para instalações fixas. A aplicação das diretrizes a etapas de transporte fica condicionada à adaptação das diretrizes.
- c) **Processos, e não produtos:** O sistema de RBPS foi desenvolvido para situações de segurança de processo e não para questões relacionadas a produtos. Alguns elementos podem ser relevantes para produtos, mas não foram pensados para este fim.

d) Áreas técnicas relacionadas: O sistema de RBPS pode ser integrado a outros sistemas. No entanto, deve-se considerar que o sistema de gestão RBPS foca nas questões de segurança de processo e reconhece as possíveis sobreposições. Suas diretrizes foram concebidas para tratar de segurança de processo de forma independente.

A gestão da integridade baseada em riscos dos equipamentos estáticos e tubulações novas ou existentes, é um processo contínuo e integrado que cumpre algumas etapas como a definição e identificação dos componentes aplicáveis, análise do risco qualificado, controle e acompanhamento da integridade ao longo de todo o ciclo de vida do ativo, bem como da evolução do risco e ajuste da estratégia de gerenciamento da integridade aplicada em função desta evolução. O plano de gestão de integridade (PGI) deve considerar a gestão de documentação, prontuário, conjunto de informações dos equipamentos, acompanhamento da fabricação, montagem e pintura e o planejamento das inspeções, de capacitações e certificações necessárias (JORDAN, 2017).

Para desenvolvimento deste estudo e para atingir seus objetivos, três elementos do RBPS são fundamentais: 1) compreensão dos perigos e riscos; 2) cumprimentos de normas e 3) integridade e confiabilidade de ativos.

2.1.1 Compreensão de Perigos e Riscos

Segundo o CCPS (2014), estrategicamente a segurança de processo baseada em risco parte da compreensão de quais níveis de detalhes são apropriados para cada propósito. Para tanto, há que se considerar três fatores: 1) compreensão suficiente do risco associado ao processo foco; 2) o nível de demanda da atividade de segurança de processo e, por fim, 3) a cultura de segurança. A partir da utilização dessa abordagem, práticas podem ser projetadas e implantadas sob diferentes níveis de rigor, o que leva a uma otimização do desempenho e eficácia do sistema de gestão de segurança de processo e minimização do risco de acordo com a categorização estabelecida.

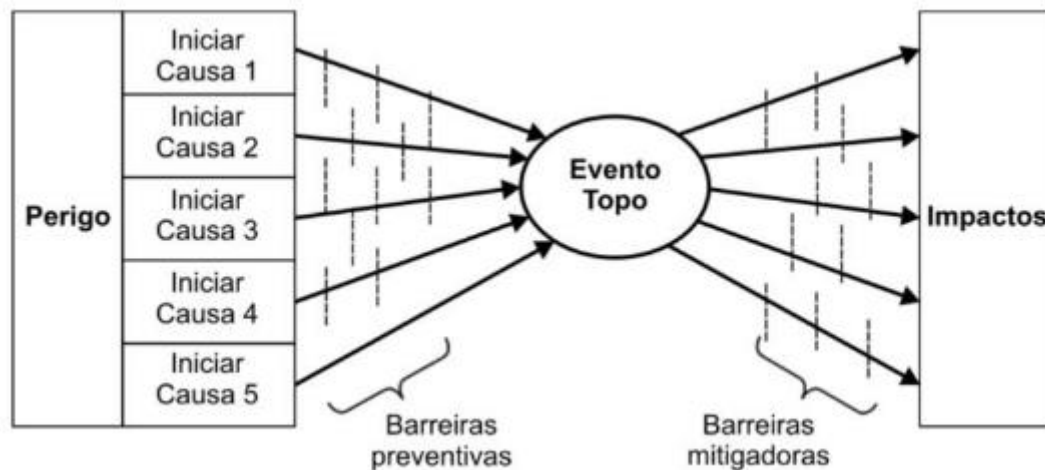
O pilar em questão está amparado por dois elementos do RBPS: a) conhecer o processo e identificar os perigos e os riscos inerentes (CCPS, 2014).

Segundo Jordan (2017), o risco de falha é algo que a empresa tem que conviver quando há operação envolvida, sendo necessário conhecer os limites e aceitação.

No caso específico deste estudo, adota-se como metodologia de gerenciamento de risco o bow-tie, que é uma técnica proativa baseada em abordagem sistêmica. Segundo CCPS

(2023), o bow-tie é uma técnica de gerenciamento de perigo qualitativa ideal para análise inicial de um processo existente ou aplicação durante estágios intermediários de um projeto de processo. Sua representação se assemelha a uma gravata borboleta, uma vez que os perigos e causas iniciadoras de um lado e em seu lado oposto os impactos, tendo o evento topo na sua região central, conforme figura 2.

Figura 2: Diagrama genérico do Bow-tie



Fonte: CCPS (2023)

A partir dela é possível efetuar a gestão de risco e a sua comunicação de forma simples e visual e ainda oferece recursos para o entendimento da relação entre os riscos e os eventos de uma organização. Essa metodologia é utilizada em grandes empresas de mineração do Brasil.

Schmitz et. al (2020) apontam que a técnica bow-tie facilita o mapeamento de cenários. O seu design simples, que lembra o queijo suíço, pode ter vários cenários que levam ao evento central.

2.1.2 Cumprimento de Normas

Esse elemento do RBPS tem a função de orientar para identificação. Desenvolvimento, aquisição, avaliação, divulgação e fornecimento de normas, códigos e regulamentos e leis aplicáveis a um processo e que afetam a sua segurança, abrangendo tanto normas internas quanto externas aplicáveis, sejam eles de abrangência nacionais ou internacionais (CCPS, 2014).

Ao se aplicar esse elemento, tem-se como produto um conjunto acessível, completo e atualizado de documentos, dados e informações que auxiliarão nas etapas e ciclo de vida de um processo.

2.1.3 Integridade e Confiabilidade de Ativos

A integridade de ativos e a confiabilidade são dois conceitos interligados e críticos. Ambos estão relacionados com a garantia de que os ativos (como equipamentos, sistemas e infraestruturas) funcionem de maneira segura e eficiente ao longo do tempo (JORDAN, 2017).

A integridade de ativos diz respeito à capacidade de um ativo, como equipamentos, instalações ou sistemas, de desenvolver sua função de maneira segura e eficaz durante toda a sua vida útil. Isso inclui aspectos como projeto adequado, instalação correta, manutenção regular e monitoramento contínuo para garantir que os ativos permaneçam em boas condições. Ela visa prevenir falhas, vazamentos, quebras ou outros problemas que possam resultar em danos pessoais ambientais ou financeiros (JORDAN, 2017).

A confiabilidade deve ser identificada como uma “competência” que um projeto deve conter para ser considerado completo e implica que os elementos funcionem sem falhas, tomando-se como base um tempo predeterminado, e que se mantenha em operação considerando parâmetros de projeto (JORDAN, 2017).

A falha de equipamentos pode resultar em um alto número de acidentes e a incapacidade de detectar as condições que indicariam a probabilidade de perda de contenção podem resultar em grandes desastres (CCPS, 2014).

A visão do elemento integridade de ativos do RBPS ajuda a garantir que o equipamento esteja projetado de maneira adequada, sua instalação seja realizada de acordo com as especificações e que esse permaneça ajustado para seu uso até a próxima reforma ou manutenção. Esse elemento consiste em implantar sistemáticas das atividades para garantir que equipamentos importantes estejam adequados ao uso para o qual foi destinado ao longo de sua vida útil. Assim o foco desse elemento concentra-se em: 1) prevenir a liberação catastrófica de material perigoso, ou a liberação repentina de energia e 2) garantir a alta disponibilidade (ou segurança) dos sistemas de segurança críticos ou utilitários que previnem ou minimizam o efeito dos eventos tipo.

De acordo com CCPS (2014), um bom programa de integridade de ativos depende que a gestão garanta que: a) equipamentos e sistemas sejam adequadamente projetados, fabricados e instalados; b) operação da unidade dentro dos limites dos equipamentos; c) tarefas de inspeção, testes e manutenção preventiva sejam realizadas por pessoal qualificados e treinados; c) reparos sejam feitos de acordo com especificações de projeto,

normas de engenharia e recomendações do fabricantes; d) medidas sejam tomadas para abordar deficiências em quaisquer circunstâncias.

Adicionalmente, o CCPS (2014) preconiza que alguns princípios-chaves devem ser abordados durante o desenvolvimento, a avaliação ou melhoria de um sistema de gestão de integridade de ativos. São eles: manter uma prática confiável, identificação de equipamentos e sistemas que estejam dentro do programa de integridade e das tarefas de inspeção e manutenção, desenvolvimento de conhecimento e habilidades, além de procedimentos e ferramentas, garantir a adequação contínua aos propósitos, abordar falhas e deficiência dos equipamentos e a análise de informações.

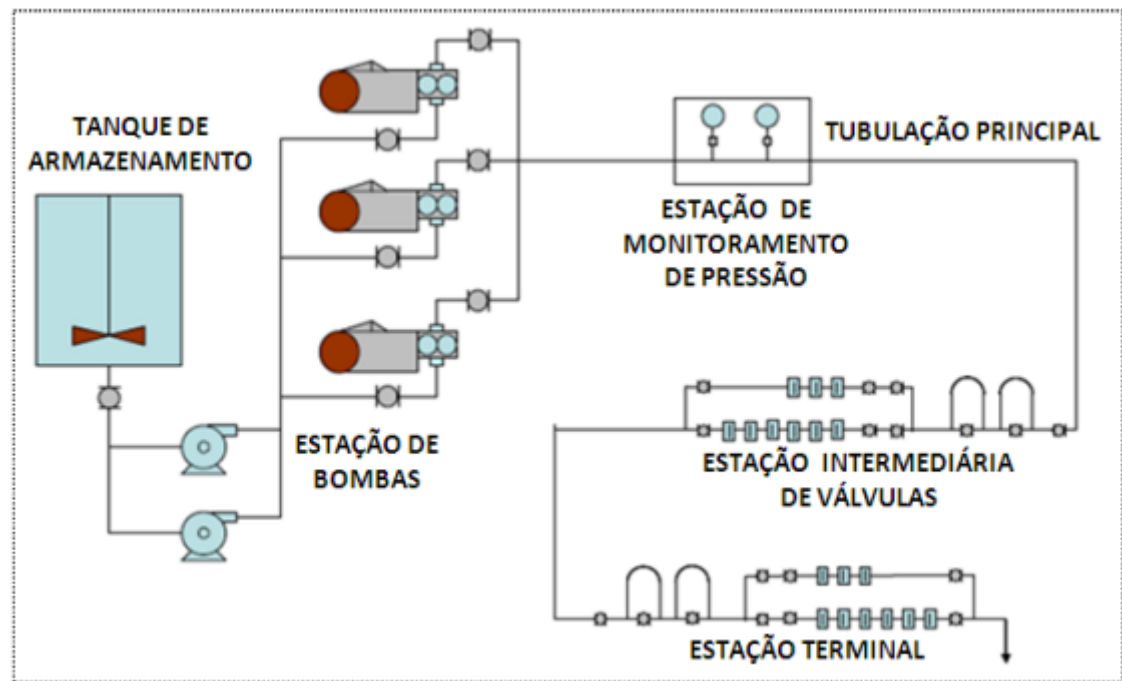
2.2 Aplicação de Dutos na Mineração

A utilização de dutos como meio de transporte para polpa de minério, petróleo e outras substâncias teve início na América do Norte, por volta de 1865 e atualmente é empregado em nível mundial, inclusive no Brasil, tornando-se fundamental para a economia (GOMES, 2012).

Desde a década de 1950 a mineração usa dutos para transporte de polpas em suas operações. Uma técnica que é empregada para o transporte dos materiais sólidos por via hidráulica através de tubulações cuja nomenclatura recebida é mineroduto ou rejeitoduto. A polpa transportada é essencialmente uma mistura de sólidos e líquidos e, mais especificamente, ela é composta por um fluido, geralmente água, que transporta partículas sólidas mantidas em suspensão (TORRES, 2021). No Brasil, existe atualmente uma malha instalada de minerodutos que perfaz mais de 2400 km (TORRE, 2021) e é responsável pelo transporte de mais de 75 milhões de toneladas de minério por ano (BRUM, 2017).

Segundo Alves (2022), em projetos de dutos de média/longa distância transportando minerais no estado de polpa, o custo da tubulação e da respectiva infraestrutura, equivale a aproximadamente 85% do custo total do empreendimento. A Figura 3 apresenta os componentes típicos de um mineroduto.

Figura 3: Principais componentes de um mineroduto/rejeitoduto



Fonte: BRASS Engineering, 2008 Apud GOMES (2012)

Brum (2017) lista algumas condições para transporte de mistura sólido-líquida por meio de tubulações. São elas: a) O sólido deve misturar-se e separar-se facilmente; b) O sólido a ser transportado não deve reagir nem com o fluido carreador nem com a tubulação; c) Não deve haver riscos, como por exemplo, a obstrução da tubulação devido às interações entre partículas, trazendo como consequência aglomeração delas; d) O desgaste e ruptura a que se submetem as partículas durante o transporte não devem ter efeitos adversos para o seu processo.

2.2.1 Aspectos técnicos relacionados aos dutos e transporte de polpa minerais

Brum (2017) aponta que o fluxo de mistura sólido-líquido por tubulações depende de uma grande quantidade de variáveis e parâmetros, dentre eles: granulometria, densidade, forma, dureza, diâmetro interno da tubulação, comprimento, desnível, rugosidade interna, ângulos de inclinação da tubulação, singularidades (estreitamentos, curvas, válvulas, registros e outros), concentração de sólidos em volume e peso, densidade da mistura, toneladas de sólido a transportar, velocidade de fluxo, perda de carga.

2.2.1.1 Reologia

Segundo Alves (2022), a polpa mineral pode adquirir diversos comportamentos dependendo das proporções de água e de partículas sólidas presentes na mistura. Esse comportamento dos fluidos sob estado de tensão é estudado pela ciência por meio da

reologia pela definição da relação entre a força cisalhante, tensão de cisalhamento e deformação contínua experimentada pelo fluido. Fatores como temperatura, granulometria, forma das partículas, interações interpartículas e a natureza do meio fluido, são fatores que influem nas condições reológicas da polpa.

2.2.1.2 Velocidade de Deposição

Segundo Alves (2022), trata-se da velocidade mínima que o escoamento deve imprimir para que os sólidos presentes na polpa sejam mantidos em suspensão.

2.2.1.3 Queda de Pressão em sistemas bifásicos

Alves (2022) argumenta que para possibilitar o escoamento contínuo de fluidos por tubulações é necessário manter um suprimento constante de energia que se manifesta por intermédio de um gradiente de pressão.

2.2.1.4 Corrosão

De acordo com Torres (2021), a corrosão em minerodutos, em geral, é um processo eletroquímico que depende do tempo e do ambiente dentro da tubulação ou nas proximidades dela. O fenômeno normalmente aparece de forma generalizada ou localizada nos dutos, podendo ser percebida nas superfícies externas e internas. A primeira pode ser induzida por microrganismos gerada por correntes parasitas ou induzida por outros fatores agressivos. Já a segunda, pode ser observada pela redução da espessura da tubulação do mineroduto, ao longo do tempo de operação, devido a associação desta com a erosão.

Torres (2021) traz ainda que na operação de minerodutos, a associação de processos corrosivos e erosivos (erosão-corrosão) causam maior dano às tubulações e que devem ser considerados no projeto.

3. METODOLOGIA

Para este trabalho, optou-se por uma pesquisa exploratória, que segundo Marconi e Lakatos (2003), tem por objetivo obter maior familiaridade com o objeto em estudo, que neste caso trata-se da temática gestão de Integridade e Confiabilidade de Minerodutos/Rejeitodutos. Do ponto de vista de sua abordagem, trata-se de pesquisa qualitativa, pois a partir da interpretação do referencial teórico os autores buscam recolher informações para desenvolvimentos dos objetivos almejados. Quanto ao procedimento,

trata-se de uma pesquisa bibliográfica, a partir de um levantamento de diversos tipos de fontes como publicações oficiais, livros, artigos, sítios especializados, meios eletrônicos, dentre outros.

A metodologia empregada será a de estudo de caso, que é usado em muitas situações para contribuir para o conhecimento dos fenômenos individuais, grupais, organizacionais, sociais, políticos e relacionados (YIN, 2014).

Para atingir o primeiro objetivo, que é identificar as principais normas voltadas para integridade de dutos que servirão como referência para determinar os principais aspectos que devem ser considerados no plano, foi realizada pesquisa em sites das principais instituições nacionais e internacionais relacionadas à segurança de processo na indústria química e outras indústrias, como: ISO - *International Organization for Standardization*, API - *American Petroleum Institute*, ASME - *American Society of Mechanical Engineers*, ASTM – *American Society of Testing Materials*, ANSI - *American National Standards Institute*, AWWA - *American Water Works Association*, dentre outros.

Para atingir o segundo objetivo, que é gerenciar os principais riscos e ameaças de dutos na mineração, foram realizadas entrevistas estruturadas com especialistas da área de projetos, operação e manutenção e conhecimento do próprio grupo para identificar as principais causas de perdas de contenção primária, possíveis barreiras preventivas e mitigadoras, além dos possíveis danos que podem ocorrer. Além disso será utilizado como referência o trabalho de Schmitz *et. al.* (2020), que utilizou a ferramenta bow-tie para demonstrar cenários que levam ao evento principal.

Para alcançar o terceiro e último objetivo da pesquisa, que é esboçar as linhas gerais de um plano de gerenciamento de integridade voltado para rejeitoduto/mineroduto, foram consultadas as principais normas levantadas anteriormente e relacionadas e estabelecidos os direcionadores do plano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Normas aplicadas a dutos

No Brasil, a Norma Regulamentadora número 13 estabelece os requisitos mínimos para a gestão da integridade estrutural de caldeiras, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando a segurança e saúde dos

trabalhadores. Apenas a título de orientação, pois essa norma é prescritiva para fluidos de classe A e B, não se aplicando a minerodutos/rejeitodutos.

No âmbito internacional foram identificadas outras normas aplicáveis a dutos conforme quadros 1 a 6 a seguir, que devem ser consultadas para elaboração do plano de gestão de integridade.

Quadro 01: Normas ISO

ISO 1082:1990	Unidades de conectores tipo manilha para transportadores de corrente
ISO 2531:2009	Tubos, conexões, acessórios e suas juntas de ferro dúctil para aplicações de água
ISO 4427-1:2019	Sistemas de tubulação de plástico – Tubos e conexões de polietileno (PE) para abastecimento de água – Parte 1: Geral
ISO 8501-1:2007	Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos relacionados – Avaliação visual da limpeza da superfície – Parte 1: Graus de ferrugem e graus de preparação de substratos de aço não revestidos e de substratos de aço após remoção geral de revestimentos anteriores
ISO 9080:2012	Sistemas de tubulações e dutos de plástico – Determinação da resistência hidrostática a longo prazo de materiais termoplásticos em forma de tubo por extrapolação
ISO 9712:2014	Ensaio não destrutivo – Qualificação e certificação de pessoal de NDT
ISO 10803:2011	Método de projeto para tubos de ferro dúctil

Fonte: Elaboração Própria:2024

Quadro 02: Normas ANSI

ANSI HI 6.1-6.5:2015	Bombas de potência alternativas para nomenclatura, definições, aplicação e operação
ANSI HI 9.6.1:2017	Bombas Rotodinâmicas – Diretriz para Margem NPSH
ANSI HI 9.6.3:2018	Bombas Rotodinâmicas (Centrífugas e Verticais) – Diretriz para Região Operacional Permitida
ANSI HI 9.8:2018	Bombas Rotodinâmicas para Projeto de Admissão de Bombas
ANSI HI 12.1-12.6:2016	Bombas centrífugas rotodinâmicas de polpa
ANSI / MSS SP-44:2019	Flanges de tubulação de aço

Fonte: Elaboração Própria:2024

Quadro 03: Normas API

API RP 576:2017	Inspeção de dispositivos de alívio de pressão
API RP 1102:2017	Tubulações de aço que cruzam ferrovias e rodovias Armazenamento
API RP 1110:2013	Prática recomendada para teste de pressão em dutos de aço para transporte de gás, gás de

	petróleo, líquidos perigosos, líquidos altamente voláteis ou dióxido de carbono
API RP 1130:2007	Monitoramento computacional de pipeline para líquidos
API RP 1169:2013	Inspetor de construção de dutos
API RP 1175:2015	Deteção de vazamento em dutos – gerenciamento de programas
API STD 520-1:2014	Dimensionamento, Seleção e Instalação de Dispositivos de Alívio de Pressão Parte I – Dimensionamento e Seleção
API STD 650:2013	Tanques soldados para armazenamento de óleo
API STD 1104:2013	Soldagem de Tubulações e Instalações Relacionadas
API STD 2350:2012	Proteção contra transbordamento para tanques de armazenamento em instalações petrolíferas

Fonte: Elaboração Própria:2024

Quadro 04: Normas ASME

ASME BPVC:2019	Seção VIII, Divisão 1 - Código de Caldeiras e Vasos de Pressão, Seção VIII, Divisão 1: Regras para Construção de Vasos de Pressão
ASME B 16.5:2017	Flanges de tubo e acessórios flangeados
ASME B 16.9:2018	Acessórios para soldagem de topo forjados feitos na fábrica
ASME B 16.11:2016	Acessórios forjados, soldáveis e roscados
ASME B 16.47:2017	Flanges de aço de grande diâmetro
ASME B 31.G:2012	Manual para determinar a resistência restante de tubulações corroídas
ASME B 31.4:2019	Sistemas de transporte por dutos para líquidos e lamas
ASME CA 1:2014	Requisitos de avaliação de conformidade
ASME IX:2019	Código de caldeiras e vasos de pressão: Um código internacional - Seção IX
ASME PCC 1:2019	Diretrizes para montagem de junta de flange aparafusada com limite de pressão
ASME V:2019	Código de caldeiras e vasos de pressão: Um código internacional

Fonte: Elaboração Própria:2024

Quadro 05: Normas ASNT

ASNT-TC-1A:2016	Qualificação e certificação de pessoal em ensaios não destrutivo fora do Brasil. Norma é pouco utilizada como referência pelas grandes empresas de óleo e Gás e indústria química. Nota: No Brasil a ABENDI possui certificações voltadas para ensaios não destrutivos - Norma ABENDI nº 1. Qualificação e Certificação de Pessoal em Ensaios Não Destrutivos
ASTM A 105:2018	Especificação padrão para peças forjadas de aço carbono para tubulação: Formulários

ASTM D 4541:2017	Método de teste padrão para resistência à remoção de revestimentos usando testadores de adesão portáteis
ASTM D 7602:2017	Prática padrão para instalação de revestimentos de borracha vulcanizada

Fonte: Elaboração Própria:2024

Quadro 06: Normas AWWA

AWWA C210:2008	Revestimentos e revestimentos de epóxi líquido para tubos e conexões de água de aço
AWWA C213:2008	Revestimentos e revestimentos epóxi ligados por fusão para tubulações de água de aço e conexões
AWWA C222:2018	Revestimentos de poliuretano para o interior e exterior de tubulações e conexões de água de aço
AWWA C606:2015	Juntas ranhuradas e com ombros
AWWA M11:2017	Tubo de água de aço – um guia para projeto e instalação
AWWA M51:2016	Liberação de ar, ar/vácuo, American Water Works Association e válvulas de ar combinadas - MANUAL AWWA

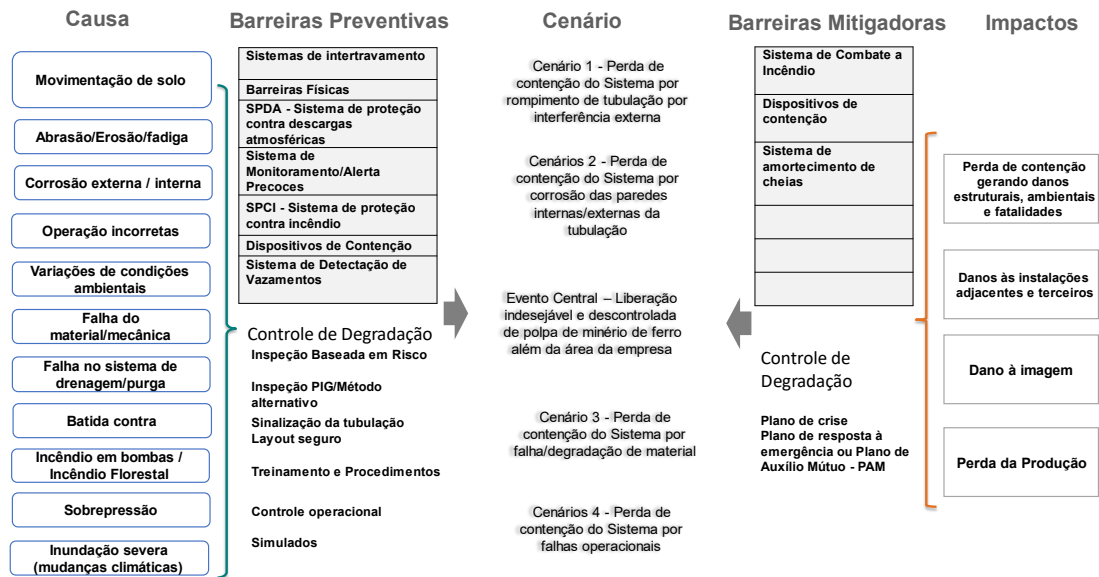
Fonte: Elaboração Própria:2024

4.2 Bow-tie Síntese para dutos de Mineração

Para identificar as principais causas de perdas de contenção primária, possíveis barreiras preventivas e mitigadoras, além dos possíveis danos que podem ocorrer, foi realizada consulta com cinco especialistas oriundos de empresa de mineração. A partir das entrevistas realizadas com os especialistas, foi construído o *Bow-tie* síntese para gerenciamento com quatro eventos topo de perda de contenção primária (i) por rompimento de tubulação por interferência externa; (ii) por corrosão das paredes internas/externas da tubulação; (iii) por falha/fadiga de material; (iv) por falhas operacionais. Foram identificadas 11 causas iniciadoras, 7 barreiras preventivas e 6 controles de degradação, 3 barreiras mitigadoras e 2 barreiras de degradação pós evento e 4 impactos, destacando-se a possibilidade de perdas de vidas e danos ao meio ambiente. A Figura 4 a seguir apresenta a síntese dessa análise.

Figura 4: Bow-tie Síntese para dutos de mineração – Mineroduto/Rejeitoduto

BOW-TIE SÍNTESE



Fonte: Elaboração própria adaptado de Schmitz *et. al* (2020) e CPPS (2023)

4.3 Plano Macro de Gerenciamento Integridade Mineroduto/Rejeitoduto

O plano macro de Gestão de Integridade de mineroduto/rejeitoduto aqui apresentado destina-se à linha tronco (tubulação principal), ou seja, da saída da estação de bombeamento até a entrada dos tanques da estação terminal, excluindo-se as bombas de deslocamento positivo, os tanques de armazenamento de polpa e outros equipamentos. Usando-se como referência a API 1160 – “Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines” e o Bow-tie síntese elaborado a partir da consulta com especialistas para este ativo, os riscos e ameaças a serem gerenciados foram resumidos conforme Quadro 07 para melhor entendimento do plano.

Quadro 07: Integração entre causa e tema do plano macro de gestão de integridade

Causa	Tema
Corrosão interna/externa, abrasão, erosão, fadiga de material	Corrosão/Erosão/Fadiga de Material
Operação incorretas, Sobrepresão, Batida contra, falha no sistema de drenagem/purga, Incêndio em bombas, falha mecânica.	Falhas Operacionais
Falha no sistema de drenagem/purga, Incêndio em bombas, Falha do material	Defeitos de fabricação ou instalação
Movimentação de solo, Inundação severa, Incêndio Florestal, Variações de condições ambientais	Geotecnia e fenômenos naturais
Interferência externa / interna	Danos oriundos de terceiros, sejam ele intencionais ou não

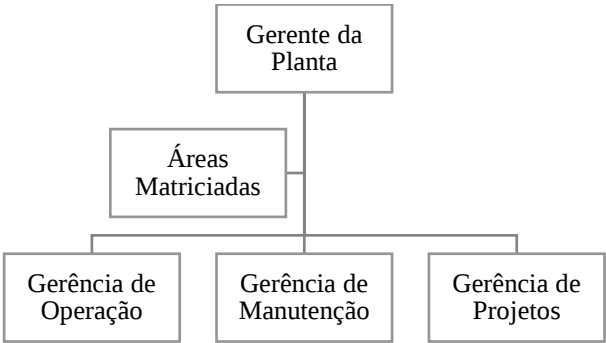
Fonte: Elaboração Própria:2024

Após o estudo das normas levantadas na primeira parte do trabalho (item 4.1), foi possível propor Planos de Gestão para os ativos estudados, conforme serão apresentados nos Quadros 08 a 07.

4.3.1 Organograma

Um organograma e uma matriz de responsabilidades devem ser definidos a fim de caracterizar o papel de cada área no plano de gerenciamento de integridade. Para este estudo, foi definido um organograma (Figura 05) e uma matriz de responsabilidade (Quadro 02) simplificados a fim de ilustrar a aplicação dessa atividade.

Figura 5: Fluxograma Simplificado



Fonte: Elaboração Própria: 2024

Após o estudo das normas levantadas na primeira parte do trabalho (item 4.1), foi possível propor Planos de Gestão para os ativos estudados, conforme serão apresentados nos Quadros 09 a 13.

Quadro 08: Matriz de Responsabilidade

Área	Responsabilidade
Gerente Planta	Disponibilizar Recursos
Gerência de Operação	Operar de acordo com critérios de projetos, procedimentos operacionais, de segurança e meio ambiente, relatar e tratar anomalias
Gerência de Manutenção (elétrica, mecânica, automação)	Garantir as manutenções preventivas e Corretivas, inspecionar, relatar e tratar anomalias. Podem ser equipes diferentes para realizar as diversas atividade de manutenção, inspeção e automação
Gerência de Projetos	Desenvolver projetos e atualizações de projetos conforme normas e melhores práticas.
Áreas Matriciais	Apoiar matricialmente as demais áreas conforme especificidade, padronizar, auditar, avaliar performance.

Fonte: Elaboração Própria:2024

4.3.2 Corrosão/Erosão/Fadiga de Material

Para gerenciamento desse tema propõe-se algumas atividades a serem executadas ao longo da vida útil do equipamento conforme Quadro 09.

Quadro 09: Plano de Gestão para prevenção de corrosão/Erosão/Fadiga do Material

Atividade	Periodicidade Sugerida	Área responsável
Realização de flushing do Mineroduto (após os batches de polpa) para remoção de agentes prejudiciais a partículas sólidas e água	Diária	Operação
Tratamento químico da água e da polpa (evitar formação de incrustações e corrosão)	Diária	Operação
Monitoramento através de PIGs instrumentados (visualização de incrustações)	Entre 2 e 5 anos	Inspeção Mecânica
Cumprimento do plano de trocas e do plano de reparo (garantia)	Conf. Plano	Execução Mecânica
Monitoramento através de medição de espessura por ultrassom (nas galerias de inspeção) medição de espessura das paredes	Semestral	Inspeção Mecânica
Manutenção geral dos retificadores, leito de anodos e juntas de isolamento	Anual	Execução Elétrica
Inspeção sensitiva da condição dos retificadores, leito de anodos e juntas de isolamento – integridade de componentes	Quinzenal	Inspeção Elétrica
Inspeção de integridade e de medição de voltagem das juntas de isolamento - integridade de componentes	Mensal	Inspeção Elétrica
Medição de potencial ON nos pontos de teste	Trimestral	Inspeção Elétrica
Medição do potencial OFF nos pontos de teste	Anual	Inspeção Elétrica
Medição do potencial tubo-solo	Semestral	Inspeção Elétrica
Inspeção do revestimento - integridade de componentes	Semestral	Inspeção Elétrica
Definição/Revisão de Criticidade de Instrumentação - priorização	Pré-Operação	Manutenção
Realizar a passagem de PIGs de limpeza e fazer a análise do índice de incrustação do material removido (indicador de incrustação)	Anual	Inspeção Mecânica

Fonte: Elaboração Própria:2024

4.3.3 Falhas Operacionais

As falhas operacionais caracterizam-se por manobras operacionais que colocam em risco a integridade do ativo, por exemplo, fechamento indevido de válvulas, operação fora dos parâmetros de pressão, de granulometria ou de reologia estabelecidos em projeto. Para o gerenciamento desse tema propõe-se algumas atividades conforme Quadro 10.

Quadro 10: Plano de Gestão para falhas operacionais

Atividade	Periodicidade Sugerida	Área responsável
Realizar testes em laboratório de granulometria e de reologia da polpa de minério – manutenção das condições de projeto	Diária	Operação
Inspeção sensitiva das placas de orifício e do disco de ruptura - integridade do sistema	Quinzenal	Inspeção Mecânica

Inspeção sensitiva eletromecânica do sistema – integridade do sistema	Quinzenal	Inspeção Elétrica
Revisão da lógica de intertravamento do sistema – integridade do sistema	Semestral	Execução Elétrica
Calibração dos transmissores de pressão - integridade do sistema	Anual	Execução Elétrica
Reciclagem de treinamentos dos operadores -	Anual	Operação
Realizar análise dos alarmes falsos do sistema e simulados de vazamentos para teste de funcionamento do sistema de alarmes	Semestral	Inspeção Mecânica
Treinamento em procedimentos de partida e parada segura	Anual	Operação

Fonte: Elaboração Própria:2024

4.3.4 Defeitos de Fabricação e Instalação

São caracterizados como anomalias oriundas dos processos construtivos do mineroduto, tais como trincas, defeitos geométricos etc. Para o gerenciamento desse tema propõe-se algumas atividades conforme Quadro 11.

Quadro 11: Plano de Gestão de Defeitos de Fabricação e Instalação

Atividade	Periodicidade Sugerida	Área responsável
Monitoramento através de PIGs instrumentados	Entre 2 e 5 anos	Inspeção Mecânica
Construção de novos trechos seguindo as normas vigentes e as boas práticas da indústria	No projeto	Projetos
Auditoria de Implantação da Obra	Mensal	Projetos
Testes Pré-Partida	Pré-Partida	Projetos/Operação
Gerenciamento de Fornecedor	Anual	Área Matricial

Fonte: Elaboração Própria:2024

4.3.5 Geotecnia e Fenômenos Naturais

Eventos geológico-geotécnicos ocorridos na faixa ou nas proximidades da faixa de servidão podem comprometer a integridade estrutural do mineroduto. Os principais eventos geotécnicos e fenômenos naturais que podem influenciar a integridade do duto são: erosões, deslizamentos de terra, incêndios, inundações severas etc. Para o gerenciamento desse tema propõe-se algumas atividades conforme Quadro 12.

Quadro 12: Plano de Gestão para geotecnia e fenômenos naturais

Atividade	Periodicidade Sugerida	Área responsável
Realizar inspeção sensitiva civil da faixa de servidão	Quinzenal	Inspeção mecânica
Realizar inspeção geotécnica da faixa de servidão	Trimestral	Área Matricial
Realizar avaliação geológica-geotécnica da faixa (Carta Geotécnica)	Quinquenal	Área Matricial
Construção de Aceiros	Anual	Área Matricial
Definir regime de chuvas do projeto	Início de Projeto	Projetos

Fonte: Elaboração Própria:2024

4.3.6 Interferência Interna/Externa

Ação caracterizadas como anomalias causadas por ações (voluntárias ou não) de primeiras/segundas/terceiras partes que estejam atuando próximo ao duto. Para o gerenciamento desse tema propõe-se algumas atividades conforme Quadro 13.

Quadro 13: Plano de Gestão para interferência interna/ externa

Atividade	Periodicidade Sugerida	Área responsável
Realizar inspeção sensitiva civil da faixa de servidão	Quinzenal	Inspeção Mecânica
Comunicar aos stakeholders internos todas as atividades a serem feitas na faixa de servidão (HSE, Meio ambiente etc.)	freq.. acordada com Stakeholder	Operação
Inspeção e Correção da sinalização da faixa de servidão com placas e pontaletes	Trimestral	Execução Mecânica
Inspeção e limpeza de vegetação da faixa de servidão	Semestral	Execução Mecânica
Inspeção e Avaliação da pavimentação asfáltica da faixa de servidão	Anual	Integridade Estrutural
Inspecionar a área de passagem segura	Mensal	Operação
Simulados de Emergência	Anual	Área Matricial

Fonte: Elaboração Própria:2024

Adicionalmente, um Programa de Gestão de Integridade de Ativos deve ser guiado por uma contínua identificação, análise e avaliação dos riscos, gestão de documentação, robusta análise de incidentes, elementos de gestão de mudança, capacitação técnica e atividades inerentes ao descomissionamento de ativos.

4.3.7 Gestão de Documentação

Durante todo o ciclo de vida do ativo deve ser realizada a gestão efetiva de documentos através de um sistema informatizado, de forma a manter o conteúdo atualizado e disponível para todos os empregados.

4.3.8 Análise de Risco

As Avaliações de Risco devem ser realizadas e atualizadas através de metodologia com nível de detalhamento e frequência adequados ao grau de complexidade dos ativos, considerando o ciclo de vida do ativo. As fases de projeto devem prever a refletir uma operação segura.

4.3.9 Análise de Incidentes

A análise de incidentes é essencial para identificar as causas raízes e estabelecer ações para eliminar a recorrência de tais eventos. Devendo ser adotados procedimentos específicos que garantam a análise adequada dos incidentes e a implementação de medidas para eliminar a sua recorrência.

4.3.10 Gestão de Mudanças

Modificações podem introduzir novos modos de falha no processo que podem resultar em eventos não planejados. Para cada modificação, é necessário adotar procedimentos específicos que garantam a identificação dos riscos e a implementação das medidas de prevenção e mitigação.

4.3.11 Descomissionamento

Esta etapa envolve a desativação e a desmontagem de ativos estabelecendo medidas para garantir segurança e a integridade destes.

4.3.12 Capacitação Técnica

Trata-se das competências técnicas mínimas para que um colaborador esteja devidamente qualificado a realizar determinada tarefa crítica, visando a segurança e integridade dos ativos. As certificações e qualificações necessárias devem ser listadas e aplicadas individualmente. Uma matriz de competência deve ser estabelecida.

5. CONCLUSÕES

A segurança de processo nas indústrias químicas, petroquímicas e de óleo e gás é uma das grandes referências no mercado, sendo observado uma evolução constante em procedimentos e práticas, redução de acidentes e geração de diversas lições aprendidas, que podem ser utilizadas por outros segmentos, como é o caso mais recente da indústria da mineração no Brasil.

Em função de vários eventos catastróficos ocorridos, a indústria mineral foi obrigada a mudar seu direcionamento quanto à segurança de processo. Vale ressaltar que outras indústrias, como a Nuclear, também possuem uma maturidade elevada no quesito de boas práticas de segurança de processo e também poderão ser abordadas em trabalhos futuros.

O estudo em questão buscou abordar a aplicação da Segurança de Processo Baseada em Risco (RBPS) criada pelo Centro de para Segurança de Processos Químicos (CCPS) em um ativo da indústria da mineração de ferro a partir do entendimento que as sistemáticas do RBPS podem ser aplicadas com êxito também na mineração. Como proposta do estudo, objetivou-se desenvolver um plano de gerenciamento de integridade de ativos voltado para rejeitoduto/mineroduto e como objetivos menores buscou-se identificar as principais normas voltadas para integridade de dutos para servirem de referência para construção de um plano de gestão de integridade bem como a identificação de cenários dos principais riscos, com suas causas, barreiras preventivas, mitigatórias e consequências.

Pode-se verificar pelos resultados obtidos, que além da Norma Regulamentadora número 13, voltada a dutos no Brasil, mas não aplicável a minerodutos/rejeitodutos, existem mais 18 normas internacionais que podem ser consultadas para desenvolvimento de um plano de gerenciamento de integridade de dutos na mineração.

Outro ponto a ser destacado a partir do estudo é o conhecimento já embarcado sobre segurança de processos nos especialistas consultados para desenvolvimento do bow-tie síntese. A partir da consulta a especialistas e a partir do conhecimento técnico do grupo, foi possível identificar 4 cenários de risco de perda de contenção com o evento central relacionada a liberação indesejável e descontrolada de polpa de minério de ferro. Pode-se verificar ainda as possíveis causas, as barreiras preventivas e mitigadoras, assim as consequências esperadas. O bow-tie pode servir de referência para empresas do setor que possuem esse tipo de ativo.

De posse das normas e do bow-tie síntese, foi possível estabelecer um plano de gerenciamento de integridade voltado para mineroduto/rejeitoduto. Esse plano trouxe elementos de gestão possíveis de serem aplicados em qualquer empresa do ramo que possua o referido ativo.

Por fim, vale destacar que o presente estudo buscou fornecer um caminho e um modelo útil de aplicação para a indústria de mineração que tenha interesse em avançar no assunto, e implantar um modelo de gerenciamento de integridade baseado em risco aprimorando os conceitos atuais utilizados pelas empresas.

Como trabalhos futuros, sugere-se o confronto dos planos de gestão de integridade aplicados por empresas detentoras de minerodutos/rejeitodutos em operação para comparar desde as referências normativas, os riscos e ameaças e a estrutura proposta para o plano de gestão de integridade.

REFERÊNCIAS

ABENDI. **Qualificação e Certificação de Pessoas em Ensaios Não Destrutivos – NA 001. 31 de Agosto** de 2023. Disponível em <file:///C:/Users/01967331/Downloads/NA-001%20Rev%2031.pdf>. Acesso em: 03 de Mar 2024.

BRASIL. Portaria N° 1.082, de 18 de dezembro de 2018. **NR-13 Caldeiras, Vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento.**, Brasília,DF, 18 dez 2018. Disponível em:
<https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-13.pdf>.

ALVES, Maycon Silva. **Avaliação de transientes hidráulicos em dutos utilizados para transporte de rejeito de mineração.** Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2022.

BRUM, Sebastião Martins. **Influência da granulometria, concentração de sólidos e composição mineralógica nas propriedades reológicas e variáveis de transporte de polpa de bauxita por mineroduto.** Tese de Doutorado. UFPA, 2017.

CCPS. **Diretrizes para segurança de processos baseada em risco.** Center for Chemical Process Safety, 1. ed. Rio de Janeiro: Interferência, 2014.

CCPS. **Bow Tie in Risk Management: A Concept Book for Proccess Safety.** New York: Wiley-AIChE, 2018

SAFETY, Ccps - Center For Chemical Process. **Diretrizes para elaborar procedimentos para avaliação de perigos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2023. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 12 out. 2023.

CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS(CNDH). **Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o vale do rio doce.** Brasília/DF, 2019.

DA COSTA, Giulia Balbi Rodrigues et al. **Rompimento da barragem em Brumadinho: um relato de experiência sobre os debates no processo de desastres.** Saúde Debate. RIO DE JANEIRO, V. 44, N. ESPECIAL 2, P. 377-387, JULHO 2020.

DE SOUZA, G. F. M. et al. **Reliability analysis and asset management of engineering systems.** 1. ed. Amsterdã: Elsevier, 2021.

DA SILVA, Renan Favarão. **Estrutura de gerenciamento de manutenção para gestão de ativos.** Tese de Doutorado. USP, 2022.

G1. **Anglo American diz que segundo rompimento em mineroduto atingiu ribeirão e fazenda em MG..** Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/anglo-american-diz-que-segundo-rompimento-em-mineroduto-atingiu-ribeirao-e-fazenda-em-mg.ghtml>. Acesso em 13 Ago de 2023

GAVRONSKI, Jorge. **Fundamentos de Segurança na Mineração**. [Recurso eletrônico] / Jorge Gavronski – 2.ed. – UFRGS: Porto Alegre, 2023

GEOPORTAL. **Consequência da exploração de salgema em Maceió**. Disponível em: <https://www.geoportalufjf.com/post-unico/consequ%C3%A2ncias-da-explora%C3%A7%C3%A3o-de-sal-gema-em-macei%C3%B3>. Acesso em: 14 já. 2024.

GOMES, Helder Alves. **Dimensionamento de Mineroduto**. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Eng. de Recursos Minerais. UFMG, 2012.

IBRAM. **Especialistas debatem sobre segurança de processos na EXPOSIBRAM 2022**. Acesso em: 13 Ago de 2023. Disponível em

<https://ibram.org.br/noticia/seguranca-de-processos-na-exposibram-2022/>.

SILVA, Maria. M. SANTOS, Monique Sarah Silva. SANTOS, Edson Neves.

Utilização de Mineroduto como transporte de minério alternativo. V CONAPESC. 2020. Acesso em 13 Ago de 2023. Disponível em:

https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2020/TRABALHO_EV138_MD1_SA26_ID1031_31102020200145.pdf

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003

JORDAN, P. R. **Processos de confiabilidade na indústria de óleo e gás**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2017. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 08 out. 2023.

SCHIMTZ, Peter; SWUSTE, Paul; RENIERS, Genserik; van Nunen, Karolien.

Mechanical integrity of process installations: Barrier alarm management based on bowties. Process Safety and Environmental. ELSEVIER 2020.

TORRES, Ayron Silva Guimarães. **Inertização de minerodutos para mitigação de sua corrosão interna**. Dissertação de Mestrado. UFMG, 2021.