



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO –
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



MATHEUS FELIPE CORRADE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE RISCO PARA OS EQUIPAMENTOS DO PROCESSO DE
BENEFICIAMENTO MINÉRIO DE FERRO: O CASO DE UMA
EMPRESA DO SETOR DE MINERAÇÃO**

**OURO PRETO - MG
2026**

MATHEUS FELIPE CORRADE OLIVEIRA

matheus.corrade@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE DE RISCO PARA OS EQUIPAMENTOS DO PROCESSO DE
BENEFICIAMENTO MINÉRIO DE FERRO: O CASO DE UMA
EMPRESA DO SETOR DE MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: DSc. Washington Luís Vieira da Silva.

**OURO PRETO – MG
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48a Oliveira, Matheus Felipe Corrade.

Análise de risco para os equipamentos do processo de beneficiamento minério de ferro [manuscrito]: o caso de uma empresa do setor de mineração. / Matheus Felipe Corrade Oliveira. - 2026.
76 f.

Orientador: Prof. Dr. Washington Luís Vieira da Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Beneficiamento de minério. 2. Equipamentos industriais - Análise de Risco. 3. Hazard and Operability Study (HAZOP). I. Silva, Washington Luís Vieira da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Felipe Corrade Oliveira

Análise de risco para os equipamentos do processo de beneficiamento minério de ferro: o caso de uma empresa do setor de mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 12 de Fevereiro de 2026

Membros da banca

DSc. Washington Luis Vieira da Silva - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc. Diogo Antônio de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)

MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Washington Luís Vieira da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Washington Luis Vieira da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/02/2026, às 19:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1062568** e o código CRC **547BE81C**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
meus pais, pelo apoio.

Gratidão a todos os encontros e pessoas
que me fazem o que sou hoje.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Dsc. Washington Luís, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

A Deus, pela força nos momentos difíceis.

A minha família, principalmente meus pais Manoel e Luziene, e também minhas irmãs Emanuelle e Maria Fernanda pelo o carinho, apoio e incentivo.

Aos meus amigos que estiveram comigo ao longo dessa jornada.

E ao EPO, em especial a Érica Domingos, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

A análise de risco aplicada ao processo de beneficiamento mineral constitui ferramenta essencial para garantir segurança operacional e confiabilidade dos equipamentos em plantas industriais de mineração. Este trabalho caracteriza-se como estudo de caso e investiga como estruturar e aplicar uma análise de risco eficaz aos equipamentos de uma usina de beneficiamento de minério de ferro em contexto de retomada operacional. A pesquisa justifica-se pela necessidade de identificar cenários capazes de comprometer a segurança das pessoas, a integridade dos ativos e a continuidade produtiva. O objetivo consiste em aplicar a metodologia HAZOP para identificar desvios operacionais, analisar suas causas e consequências e classificar os riscos nos cenários inerente, residual e projetado. O HAZOP (Análise de Perigos e Operabilidade) é uma técnica estruturada e sistemática de análise qualitativa de riscos, baseada na aplicação de palavras-guia a parâmetros de processo, permitindo a identificação organizada de falhas potenciais, suas causas, consequências e salvaguardas associadas por meio de equipe multidisciplinar. O método baseia-se em revisão bibliográfica, análise documental e aplicação sistemática da ferramenta aos equipamentos das etapas de britagem, peneiramento, classificação, concentração magnética, flotação, espessamento, filtragem e transporte. Os resultados apontam a identificação de 26 cenários de risco, com predominância de criticidade média (77%) e presença de 6 cenários classificados como muito alta no estágio inerente (23%). Após a consideração das salvaguardas existentes, observou-se redução de 66% dos riscos muito altos, permanecendo 2 cenários nessa classificação no estágio residual, além da redução de 20% dos riscos médios para baixa criticidade. No cenário projetado, considerando as recomendações propostas, ocorreu a eliminação total dos riscos classificados como muito altos, sendo estes reclassificados para alta criticidade, totalizando 6 riscos nessa categoria, enquanto as classificações média e baixa permaneceram estáveis. Conclui-se que a aplicação estruturada da análise de risco contribui para a priorização de ações técnicas, fortalecimento da cultura de segurança e aumento da confiabilidade operacional, configurando-se como instrumento estratégico para a gestão do beneficiamento mineral, devendo ser complementada por outras ferramentas de análise de risco para assegurar a retomada operacional segura e sustentável da usina.

Palavras-chave: Beneficiamento Mineral. Riscos. Análise de Risco. HAZOP. Equipamentos. Segurança.

ABSTRACT

Risk analysis applied to the mineral beneficiation process is an essential tool to ensure operational safety and equipment reliability in industrial mining plants. This work is characterized as a case study and investigates how to structure and apply an effective risk analysis to the equipment of an iron ore beneficiation plant in the context of operational resumption. The research is justified by the need to identify scenarios capable of compromising the safety of people, the integrity of assets, and productive continuity. The objective is to apply the HAZOP methodology to identify operational deviations, analyze their causes and consequences, and classify risks into inherent, residual, and projected scenarios. HAZOP (Hazard and Operability Analysis) is a structured and systematic technique for qualitative risk analysis, based on the application of guide words to process parameters, allowing the organized identification of potential failures, their causes, consequences, and associated safeguards through a multidisciplinary team. The method is based on bibliographic review, document analysis, and systematic application of the tool to equipment in the crushing, screening, classification, magnetic concentration, flotation, thickening, filtration, and transport stages. The results indicate the identification of 26 risk scenarios, predominantly of medium criticality (77%) and with 6 scenarios classified as very high in the inherent stage (23%). After considering existing safeguards, a 66% reduction in very high risks was observed, with 2 scenarios remaining in this classification in the residual stage, in addition to a 20% reduction in medium risks to low criticality. In the projected scenario, considering the proposed recommendations, there was a total elimination of risks classified as very high, which were reclassified as high criticality, totaling 6 risks in this category, while the medium and low classifications remained stable. It is concluded that the structured application of risk analysis contributes to the prioritization of technical actions, strengthening the safety culture and increasing operational reliability, configuring itself as a strategic instrument for the management of mineral processing, and should be complemented by other risk analysis tools to ensure the safe and sustainable operational resumption of the plant.

Key-words: Mineral processing. Risk. Risk analysis. HAZOP. Equipment. Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma Etapas do Processo de Beneficiamento Mineral do Ferro.....	1
Figura 2 – Diagrama típico de tratamento de minério	6
Figura 3 – Fluxograma típico de beneficiamento mineral	7
Figura 4 – Fluxograma de como realizar uma Análise de Risco	10
Figura 5 – Fluxograma conectando ferramentas e métodos de gerenciamento de risco.....	12
Figura 6 – Método aplicado para análise de risco.....	18
Figura 7 – Fluxograma Simplificado Usina de Beneficiamento Mineral.	22
Figura 8 – Organograma Empresa Pesquisada.....	23
Figura 9 – Britador Cônico	25
Figura 10 – Peneira	26
Figura 11 – Hidrociclone	27
Figura 12 – Hidrociclone	28
Figura 13 – Separador Magnético.....	29
Figura 14 – Separador Magnético.....	29
Figura 15 –Célula Flotação.....	31
Figura 16 – Célula Flotação (Funcionamento e Componentes).....	32
Figura 17 – Espessamento.....	33
Figura 18 – Componentes do Espessador	33
Figura 19 – Filtragem	35
Figura 20 – Filtro	35
Figura 21 – Transportador de Correia.....	37
Figura 22 – Fluxograma Metodologias Análise de Risco.....	38
Figura 23 – Fluxograma Aplicação das Metodologias Análise de Risco	39
Figura 24 – Modelo de Tabela para Aplicação do Método HAZOP	40
Figura 25 – Fluxograma HAZOP	41
Figura 26 – Tipos de Riscos	45
Figura 27 – Tipos de Cenários.....	46
Figura 28 – Matriz de risco.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e Indicadores	19
Tabela 2 – Perguntas para análise de risco.....	20
Tabela 3 – Dimensões das Categorias de Riscos	47
Tabela 4 – Probabilidade.....	48
Tabela 5 – Análise de Risco do Britador	51
Tabela 6 – Análise de Risco da Peneira.....	52
Tabela 7 – Análise de Risco do Hidrociclone.....	54
Tabela 8 – Análise de Risco do Separador Magnético	55
Tabela 9 – Análise de Risco do Circuito Rougher.....	56
Tabela 10 – Análise de Risco do Circuito Scavenger.....	58
Tabela 11 – Análise de Risco do Circuito Cleaner.....	59
Tabela 12 – Análise de Risco do Espessador.....	61
Tabela 13 – Análise de Risco do Filtro.....	62
Tabela 14 – Análise de Risco do Transportador de Correia	63
Tabela 15 – Tabela Resumo Análise de Risco.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Processo de mineração	5
2.2	Equipamentos.....	7
2.3	Análise de Risco	9
3	METODOLOGIA.....	16
3.1	Tipo de pesquisa	16
3.2	Materiais e métodos	18
3.3	Variáveis e indicadores	19
3.4	Instrumentos de coleta de dados	20
3.5	Tabulação dos dados	20
3.6	Considerações finais	21
4	RESULTADOS	22
4.1	Empresa	22
4.2	Equipamentos.....	25
4.3	Análise de Risco	39
4.3.1	Método HAZOP.....	41
4.3.2	Definição de Tipos de Riscos	45
4.3.3	Aplicação da Método	50
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	69
5.1	Conclusão.....	69
5.2	Recomendações.....	69
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los benefícios econômicos e sociais (IBRAM, 2016).

Com base em Alves *et al* (2020), existem várias etapas na mineração, a principal delas é o beneficiamento mineral, que consiste em preparar o mineral bruto (ROM) para uso industrial ou comercial. Essa fase é necessária pois o minério retirado vem agregado a materiais estéreis, sem valor de mercado. E ocorre da seguinte forma, o minério passa por processos físicos, físico-químico e químicos, inseridos nas de etapas de cominuição, quebra do minério; classificação, segregação pelo tamanho; e concentração, retira de impurezas/minério ganga. Como exemplo, tem-se a produção de minério de ferro, a hematita (ROM) escavada na mina passa pelos processos e se transforma em *pellet feed*, se separando do quartzo (minério ganga).

A figura 1 descreve as etapas do processo de beneficiamento mineral do minério de ferro:

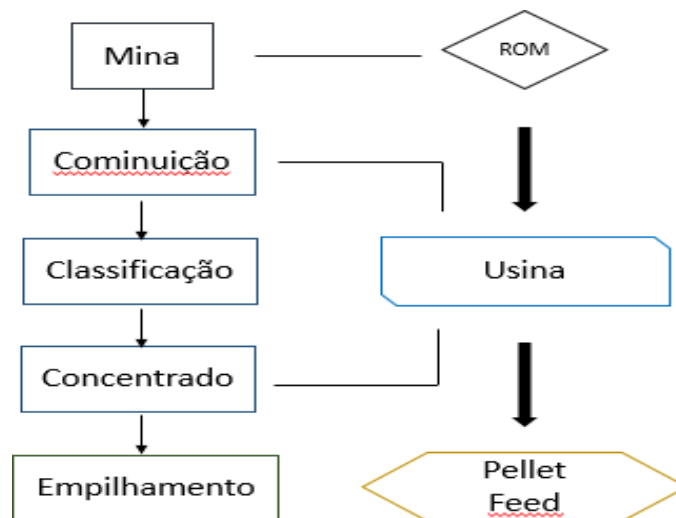


Figura 1 – Fluxograma Etapas do Processo de Beneficiamento Mineral do Ferro
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Tendo em vista que as etapas da figura 1 envolve diversos ativos operacionais e que cada um deles possuem equipamentos de caráter mecânico, elétrico e eletromecânico em sua

composição, cada um deles pode impactar de forma negativa a produção, o meio ambiente e as pessoas inseridas no processo ou em localidades próximas, que podem gerar riscos à saúde e segurança; operações e ecossistema.

De acordo com a norma ISO 31000 (2009, p.5), conceitua-se risco na modernidade como: “organizações de todos os tipos e tamanhos enfrentam influências e fatores internos e externos que tornam incerto se e quando elas atingirão seus objetivos. O efeito que a incerteza tem nos objetivos de uma organização denomina-se ‘Risco’”.

Desta maneira, com o viés de estabelecer o conceito na área de mineração, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) (2024, p.25) caracterizou risco sendo “combinação entre probabilidade e severidade de ocorrência de um evento que possa impactar negativamente pessoas, meio ambiente ou a continuidade do negócio”. Além disso, IBRAM (2024, p.21) também descreveu a atividade análise de risco como:

estudo ou uma análise de risco, associado a um conjunto de atividades ou à lista de cenários de acidentes potenciais. Uma análise de risco normalmente considera todos os três atributos do risco (O que pode dar errado? Quão grave pode ser? Com que frequência isso pode acontecer?). Uma análise de risco pode fornecer resultados qualitativos ou quantitativos.

Kerzner (2015) aborda alguns tipos de riscos como: risco operacional ligado as falhas em processos, sistemas e equipamentos; risco ambiental, fatores atrelados ao projeto com impacto no meio-ambiente, como: desmatamento e poluição do ar, rios, etc.; risco financeiro associados danos materiais e perda de produção; e risco ocupacional, vinculado a saúde e segurança dos trabalhadores.

Nas indústrias, principalmente do âmbito da mineração, essas 4 categorias de riscos (financeiro, operacional, ambiental e ocupacional) são os mais abortados durante a análise, muito se deve pelo momento atual vivido no mundo inteiro, onde se busca otimização do processo com foco na segurança e meio ambiente.

Dessa forma, o estudo propõe descrever as metodologias e a importância das análises de riscos nos ativos operacionais: britador, hidrociclone, peneiras, separador magnético, flotação, correia transportadora, espessamento e filtração, no processo de beneficiamento mineral na mineração de ferro, têm-se a seguinte problemática:

Como realizar análise de risco para os equipamentos do processo de beneficiamento do minério de ferro de uma empresa do setor de mineração?

1.2 Justificativa

Análise de risco é uma etapa fundamental para garantir a segurança, eficiência e sustentabilidade dos processos industriais, especialmente em setores como a mineração. Segundo Rocha (2019), essa ferramenta permite identificar, avaliar e mitigar possíveis eventos indesejados que possam comprometer a integridade dos trabalhadores, do meio ambiente e dos equipamentos. No contexto do beneficiamento mineral, a aplicação de uma análise de risco bem estruturada contribui para a tomada de decisões mais assertivas, reduzindo incertezas e prevenindo acidentes, o que reforça sua relevância em estudos acadêmicos e na prática profissional.

Diferentes tipos de risco exercem papéis distintos, mas complementares, dentro da gestão estratégica das organizações, pois os riscos ambientais evidenciam a importância do controle de emissões e resíduos e incentivam práticas sustentáveis em conformidade com a legislação, enquanto os riscos ocupacionais estimulam a criação de ambientes de trabalho mais seguros, protegendo a saúde dos colaboradores e reduzindo afastamentos, já os riscos financeiros permitem identificar vulnerabilidades econômicas e apoiar decisões mais sólidas, e os riscos operacionais expõem falhas em processos e sistemas, contribuindo para a eficiência e continuidade das atividades, conforme destacam Pletsch *et al.* (2020) ao relacionarem essas categorias de risco à sustentabilidade e ao desempenho organizacional.

Sendo assim, o intuito desse estudo é apresentar uma análise de risco para os seguintes equipamentos: britador, hidrociclone, peneiras, separador magnético, flotação, transportador de correia, espessador e filtragem de modo que possibilidade um ambiente mais seguro e eficiente em uma empresa de mineração.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver uma análise de risco para os equipamentos do processo de beneficiamento do minério de ferro de uma empresa do setor de mineração.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre: processo de mineração, equipamentos do processo de beneficiamento mineral e análise de riscos;

- Elaborar um procedimento metodológico para identificar os riscos inerentes aos equipamentos do processo de beneficiamento mineral, para realizar sua análise;
- Comparar os dados dos riscos identificados com a base teórica para realizar uma análise de risco para os equipamentos do processo de beneficiamento.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, cada um subdividido em seções específicas. O 1º capítulo apresenta a formulação e pergunta problema, a justificativa da realização do trabalho, objetivos geral e específicos, e estrutura.

O 2º capítulo aborda a fundamentação teórica, com conceitos e teorias a respeito do processo de beneficiamento mineral e riscos, além de apresentar métodos de análise de risco.

O 3º capítulo detalha-se a metodologia para desenvolvimento do trabalho, com subdivisões que contextualiza o tipo de pesquisa, materiais e métodos, variáveis e indicadores, e instrumento de coleta de dados.

O 4º capítulo está centrado os resultados obtidos a partir dos métodos aplicados, é descrito a empresa e o fluxograma adotado para análise de risco, bem como a metodologia aplicada e discussões sobre os riscos.

Por fim, o 5º e o último capítulo contempla as conclusões, com o objetivo de responder ao problema de pesquisa previamente levantado e também recomendações de temas para continuidade do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de mineração

Segundo Hartman & Mutmanský (2002), mineração é definida como: atividade, ocupação e indústria relacionada a extração de minerais. Neste sentido, Castro *apud* Curi (2017, p.29) afirma que “a mineração é processo de extração de minerais ou compostos minerais de valor econômico da crosta terrestre para benefício da sociedade”.

Logo, a mineração de ferro é a atividade de extração mineral do subsolo, e com base em Hartman e Mutmanský (2002), esse processo pode ser dividido em etapas, que compreendem desde a identificação de depósitos minerais até tratamento e destinação do final produto: prospecção mineral; avaliação econômica; lavra; ciclo de beneficiamento mineral e empilhamento.

Segundo Moon, Whateley e Evans (2006), a prospecção mineral envolve a aplicação integrada de métodos geológicos, geoquímicos e geofísicos com o objetivo de localizar, delimitar e compreender as características de depósitos minerais. A finalidade é avaliar a presença, o volume, a qualidade e a viabilidade econômica do minério (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002).

Após a etapa de prospecção, procede-se à avaliação econômica para confirmar a viabilidade da jazida, etapa em que, segundo Hartman e Mutmanský (2002), realizam-se estudos técnicos e financeiros que fundamentam o planejamento da mina, contemplando a seleção do método de extração, estimativas de recuperação, custos operacionais, impactos ambientais e a definição da vida útil do empreendimento.

Prosseguindo para a lavra, ocorre a retirada efetiva do minério do subsolo ou da superfície, processo que, conforme Hartman e Mutmanský (2002), pode ser executado a céu aberto ou em subsolo de acordo com a profundidade, o tipo de rocha e a geometria do corpo mineral, envolvendo ainda etapas de fragmentação, carregamento e transporte do minério até a usina de beneficiamento.

Com o material encaminhado à usina, inicia-se o beneficiamento mineral, etapa que busca aumentar o teor e o valor comercial do minério por meio da separação das impurezas, ideia alinhada ao que apresenta Chaves (2016) ao descrever os princípios gerais do processamento mineral. Esta etapa é composta por diversas operações unitárias, que visam

modificar as características físicas do material, sem alterar sua composição química (LUZ, 2010).

A figura 2 descreve o processo de beneficiamento mineral:

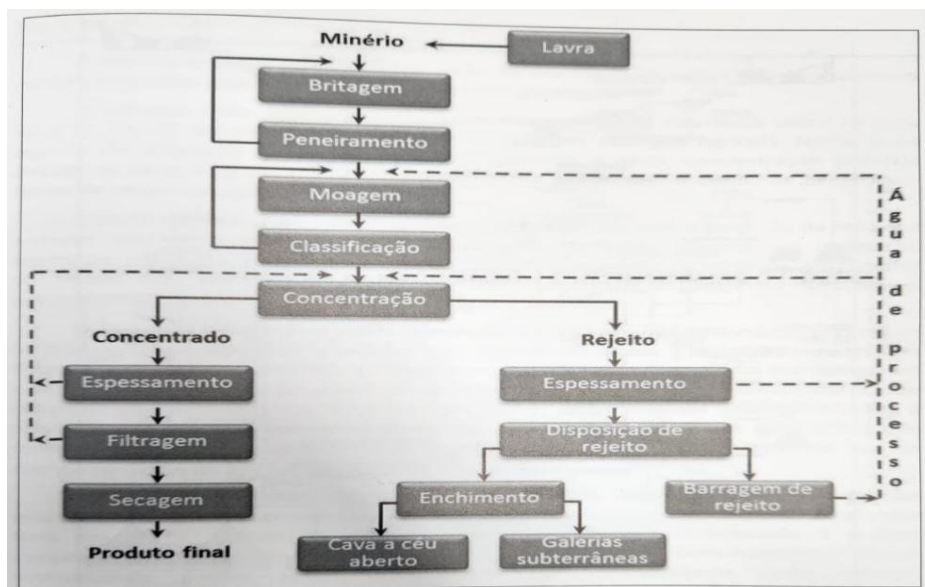


Figura 2 – Diagrama típico de tratamento de minério
Fonte: Luz (2018).

A figura 2 mostra que após processo de lavra inicia-se a primeira etapa do beneficiamento, que é o processo cominuição, redução do tamanho das partículas do minério. A cominuição começa pela britagem, em que blocos grandes são reduzidos com o uso de britadores, e segue para a moagem, que atinge granulometrias finas em moinhos (LUZ,2010).

A próxima fase é a classificação que separa as partículas em função do tamanho, com o uso de peneiras vibratórias e hidrociclones. Essa etapa garante que o material atenda às condições necessárias para a etapa de concentração (LUZ, 2010).

Na etapa de concentração, busca-se separar os minerais úteis dos rejeitos com base em propriedades como densidade, suscetibilidade magnética ou características de superfície, conforme discutido por Wills e Finch (2016). Os principais métodos são: separação gravítica, separação magnética e flotação (LUZ,2010).

Após a concentração, o produto geralmente contém água em excesso; dessa forma, o espessamento é aplicado para permitir a sedimentação e a separação da fase líquida, processo descrito de forma detalhada por Chaves (2016). E a filtragem reduz ainda mais a umidade, tornando o concentrado apto para transporte ou comercialização (LUZ, 2010).

A etapa final, é o empilhamento em que concentrado seco é então empilhado, armazenado ou transportado. Esse processo visa garantir estabilidade do material e logística adequada. Os rejeitos seguem para disposição em barragens ou pilhas filtradas (LUZ, 2010).

2.2 Equipamentos

De acordo com o CETEM (2004), o beneficiamento mineral compreende um conjunto de operações unitárias que envolvem britagem, moagem, peneiramento, classificação, concentração, desaguamento (espessamento e filtragem) e transporte, sendo cada etapa dependente de equipamentos específicos para otimizar o desempenho da planta, maximizar a recuperação do minério e controlar os rejeitos.

A figura 3 exemplifica o processo de beneficiamento de minério com alguns equipamentos que podem ser utilizados na produção de minério de ferro:

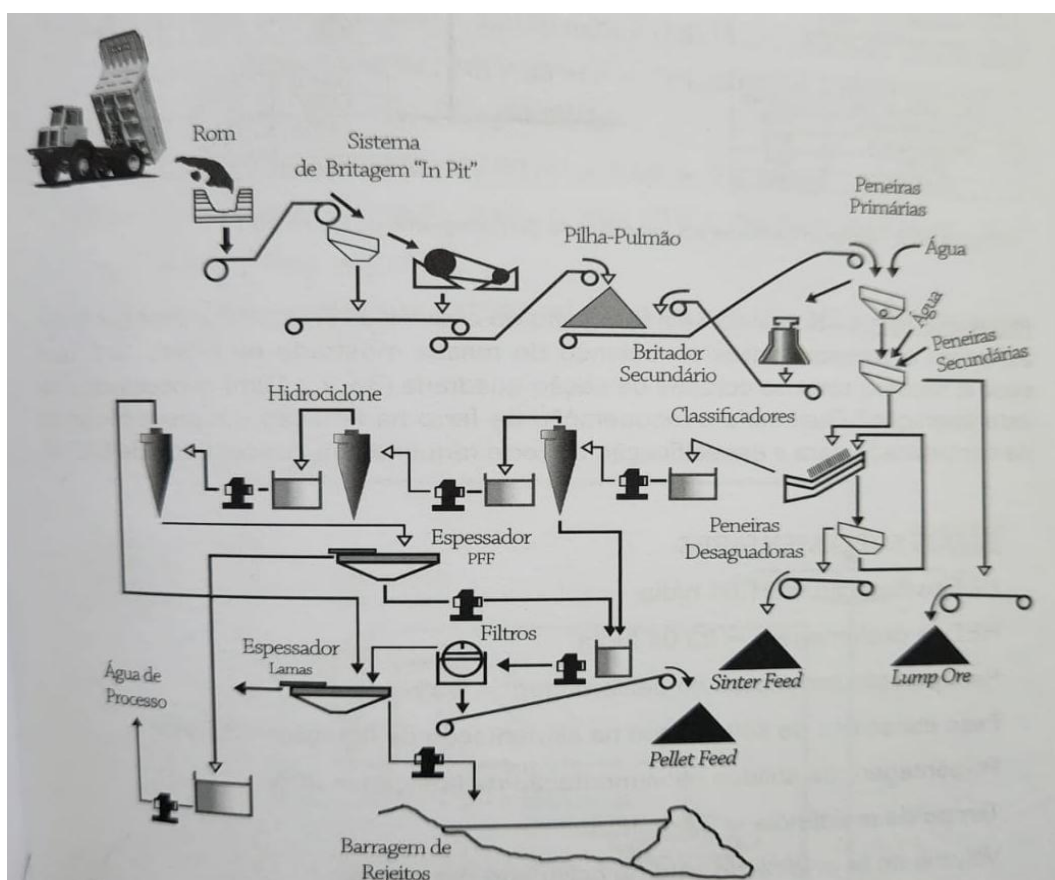


Figura 3 – Fluxograma típico de beneficiamento mineral
Fonte: Valadão e Araujo (2012).

Conforme a figura 3, o processo se inicia com o britador, que é o equipamento responsável pela fragmentação inicial do minério. Ele reduz o tamanho dos blocos extraídos

da mina, facilitando as etapas posteriores de processamento. Existem diversos tipos de britadores, como os de mandíbulas, giratórios, cônicos e de rolos. Segundo Chaves (2012, p.36), "a britagem é a primeira etapa da fragmentação do minério e visa à redução do tamanho das partículas, tornando-as adequadas ao transporte e ao processamento subsequente".

As peneiras são equipamentos utilizados para a classificação granulométrica, operando com telas de aberturas definidas para promover a separação de partículas por tamanho, existem peneiras vibratórias, rotativas e desaguadoras, cada uma aplicada conforme a etapa do processo e as características do minério, desempenhando papel essencial na preparação do material para as operações subsequentes (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002)

De acordo com Vasconcelos, Santos e D'Amelio (2019), o hidrociclone é um separador centrífugo cônico-cilíndrico, sem partes móveis, amplamente empregado para a separação sólido-líquido, utilizando a força centrífuga para deslocar partículas mais densas para as paredes e promover a classificação por tamanho, sendo comumente utilizado em processos de deslamagem e classificação de finos. Segundo, Peres e Araújo (2007, p.412), "o hidrociclone promove a separação sólido-líquido com base na diferença de tamanho e densidade das partículas, sendo amplamente utilizado na indústria mineral para melhorar a eficiência da moagem e flotação".

O separador magnético funciona gerando um campo magnético que cria gradientes de força capazes de desviar e reter partículas com maior suscetibilidade magnética enquanto as partículas não magnéticas seguem o fluxo do material, sendo aplicado tanto em circuitos úmidos quanto a seco e em diferentes configurações (drum, roll, induced roll e high-intensity) para otimizar a captura de frações magnéticas conforme granulometria e intensidade requerida, de modo que a eficiência do processo depende diretamente da susceptibilidade dos minerais, da velocidade de alimentação, da moagem e da configuração do campo magnético, permitindo elevar o teor do concentrado e reduzir o material a ser tratado nas etapas subsequentes (SAMPAIO; LUZ; FRANÇA, 2010).

A célula de flotação opera promovendo a separação seletiva de minerais por meio da adesão diferencial das partículas às bolhas de ar, processo no qual reagentes coletores tornam a superfície dos minerais alvo hidrofóbica enquanto espumantes estabilizam a camada de espuma responsável por concentrar o material valioso, sendo a eficiência diretamente influenciada pelo controle do tamanho das bolhas, da dispersão do ar, da dosagem de reagentes e da hidrodinâmica interna da célula, fatores que determinam a cinética de coleta e a recuperação metalúrgica global (LIMA; ARAUJO; PERES, 2005).

Segundo Luz, Sampaio e França (2004), o espessador é empregado na etapa de desaguamento para promover a sedimentação gravitacional de partículas sólidas em suspensão, resultando em um líquido clarificado na parte superior e um underflow mais concentrado. É amplamente empregado na etapa de tratamento de rejeitos e recirculação de água. Segundo Ribeiro e Holanda (2012, p.107), “os espessadores têm papel estratégico na gestão hídrica das plantas de beneficiamento, permitindo a recuperação de água e a redução do volume de rejeitos enviados às barragens”.

O filtro mineral é empregado na etapa final de desaguamento para remover a umidade remanescente dos concentrados ou rejeitos, operando por meio de pressão ou vácuo para forçar o escoamento do líquido através de um meio filtrante enquanto retém as partículas sólidas, de modo que sua eficácia depende da porosidade do filtro, da granulometria dos sólidos, da pressão aplicada e da taxa de filtração, garantindo a segurança do transporte e a estabilidade do material para empilhamento ou disposição final (SAMPAIO, 2001).

O transportador de correia é um sistema amplamente utilizado no beneficiamento mineral para movimentar grandes volumes de minério com eficiência, combinando correia, tambores motrizes e roletes de apoio para garantir um fluxo estável e baixa dissipação de energia, e seu desempenho é influenciado por variáveis como velocidade, tensão da correia, granulometria e condições de carregamento, aspectos destacados no design de transportadores em manuseio de sólidos a granel conforme descrito pela *Conveyor Equipment Manufacturers Association* (CEMA, 2002).

Luz, Sampaio e França (2004) destacam que o beneficiamento mineral consiste em um conjunto integrado de operações, desde a fragmentação inicial até as etapas de concentração e desaguamento, nas quais a seleção dos equipamentos e o controle operacional determinam a eficiência, a recuperação econômica e a redução de impactos ambientais. Segundo Chaves (2012, p. 33), “a integração eficiente das operações unitárias é essencial para maximizar o aproveitamento do recurso mineral e reduzir perdas ao longo do processo”.

2.3 Análise de Risco

A análise de riscos é uma prática essencial na indústria de mineração, especialmente na etapa de beneficiamento mineral, que envolve operações com potencial de causar impactos significativos sobre pessoas, meio ambiente e continuidade do processo produtivo, sendo a identificação, avaliação e controle desses riscos fundamentais para garantir segurança

operacional, proteção ambiental, viabilidade econômica e saúde ocupacional (TUBIS; WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA; WROBLEWSKI, 2020).

De acordo com o IBRAM (2020, p. 7), “a adoção de boas práticas de gestão de risco é indispensável para garantir a sustentabilidade e a resiliência operacional do setor mineral, reduzindo acidentes e perdas financeiras”. Com base em Lima (2019), a gestão de riscos na mineração moderna deve ser integrada, sistemática e fundamentada em metodologias reconhecidas internacionalmente.

A Figura 4 descreve o procedimento de uma análise de risco:

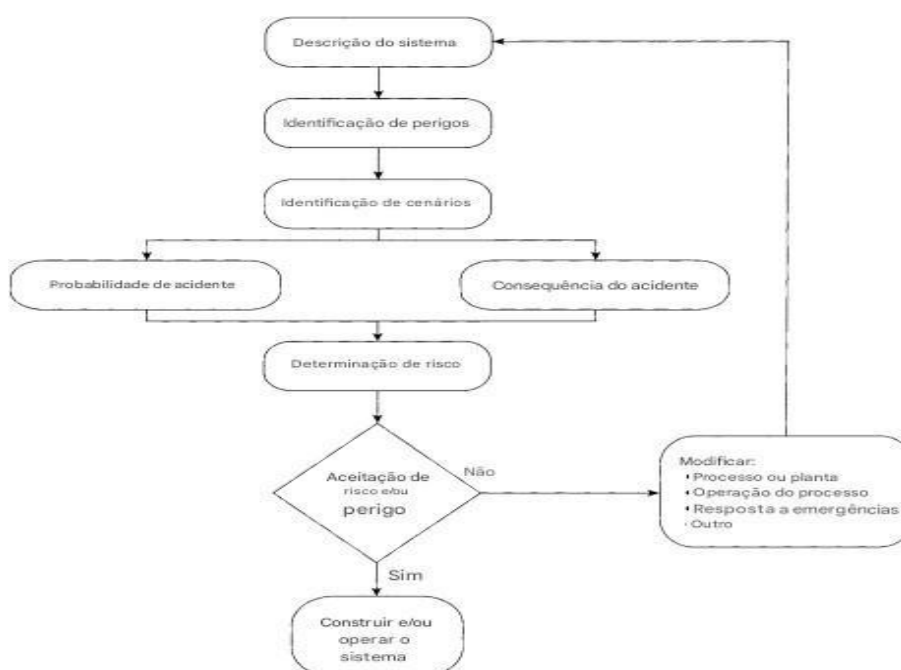


Figura 4 – Fluxograma de como realizar uma Análise de Risco
Fonte: Adaptado Crawl e Louvar (2002).

Conforme figura 4, uma das etapas da análise de risco é a determinação do risco e dentre os principais tipos de riscos presentes no beneficiamento mineral, destaca-se o risco ambiental, que se refere aos potenciais danos que as atividades industriais podem causar ao meio ambiente. Isso inclui a contaminação de solos e corpos d’água, emissão de partículas e gases, descarte inadequado de rejeitos, entre outros. Segundo Rodrigues e Almeida (2010, p. 147), os impactos ambientais mais relevantes nessa etapa são os relacionados ao uso intensivo de água, geração de rejeitos e alterações na paisagem natural. A mitigação desse tipo de risco exige o uso de tecnologias limpas, o reaproveitamento de recursos hídricos e a disposição

adequada de resíduos. Programas de monitoramento ambiental contínuo e sistemas de gestão ambiental, como a ISO 14001, são instrumentos fundamentais para esse controle.

O risco econômico na mineração envolve incertezas relacionadas aos custos operacionais, às oscilações do mercado de commodities e à possibilidade de interrupções produtivas, sendo fortemente influenciado pelo desempenho do processo e pela estabilidade do teor alimentado à planta. Silva (2014) destaca que variações na qualidade do minério e na eficiência dos equipamentos impactam diretamente a produtividade e os custos operacionais, o que reforça a importância de análises econômico-financeiras consistentes e de estratégias robustas de gestão de custos para mitigar esse tipo de risco.

O risco ocupacional na mineração envolve ameaças à saúde e à integridade física dos trabalhadores, especialmente pela exposição a poeira, ruído, substâncias químicas e equipamentos de grande porte, sendo reconhecido pela OIT (2011) que essas condições representam riscos significativos e exigem controles rigorosos. Nesse contexto, a NR-22 (2023, p.5) reforça a obrigatoriedade do monitoramento contínuo dos agentes nocivos, o que torna indispensáveis os treinamentos periódicos, o uso adequado de EPIs e as medidas de ergonomia para prevenir acidentes e doenças ocupacionais no beneficiamento mineral.

O risco operacional na mineração está associado a falhas em processos, sistemas e equipamentos capazes de interromper a produção e afetar a qualidade do minério, envolvendo desde paradas inesperadas e erros humanos até insuficiências na manutenção, o que torna indispensável o uso de ferramentas como manutenção preditiva e controle estatístico de processos para mitigar ocorrências e garantir maior eficiência operacional (CRUZ, 2013).

Ademais, a análise de riscos envolve a identificação sistemática de perigos e a avaliação da probabilidade e gravidade de consequências indesejadas. Para isso, diversas metodologias são empregadas, conforme o tipo de processo, o nível de complexidade e o estágio do empreendimento, dentre os métodos destacam-se: HAZOP, What If, PSSR, Checklist, APR, FMEA, AQR, Bow Tie, FTA e JSA (OSHA 3132, 2000). Segundo o CCPS (2008, p. 17), “a seleção adequada das ferramentas de análise de risco depende do tipo de instalação, da natureza dos riscos e do nível de detalhe necessário para a tomada de decisão”. De acordo com Crawl e Louvar (2011), a combinação de métodos qualitativos e quantitativos fortalece a gestão de segurança de processos em setor como o mineral.

A figura 5 mostra como algumas ferramentas e métodos se conectam na gestão de riscos:

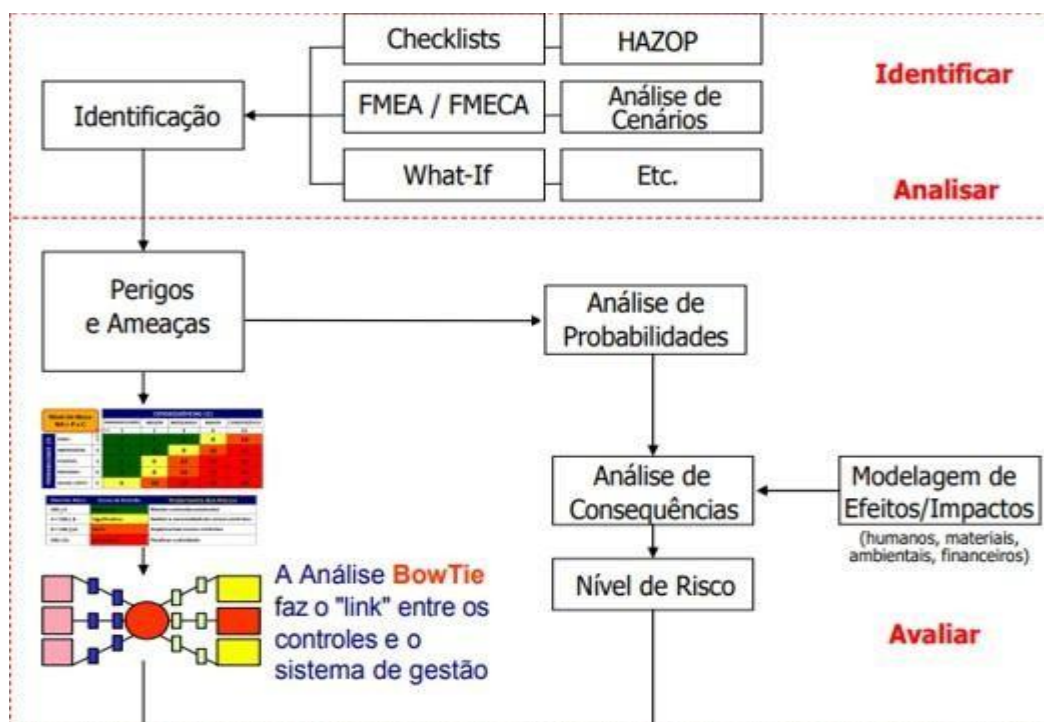


Figura 5 – Fluxograma conectando ferramentas e métodos de gerenciamento de risco
Fonte: Adaptado Cicco (2017).

A figura 5 exemplifica um sistema de gestão de risco que inclui o HAZOP (Análise de Perigos e Operabilidade), que é uma técnica estruturada e qualitativa que analisa os desvios de processo utilizando palavras-guia, como ‘mais’, ‘menos’, ‘parte de’, ‘inverso’, entre outras. Seu objetivo é identificar falhas potenciais nas variáveis operacionais. Segundo Oliveira (2015, p. 241), “o HAZOP é amplamente utilizado em processos contínuos e complexos, como os de beneficiamento mineral, por sua capacidade de prever interações perigosas entre equipamentos e sistemas de controle”.

O método *What If* é baseado em perguntas do tipo “E se?”, que exploram cenários possíveis de falha ou erro humano. É uma ferramenta flexível e eficaz em identificar riscos com base em brainstorming de especialistas. Essa técnica é considerada útil em projetos em fase inicial ou em ambientes onde não há dados suficientes para análises quantitativas mais complexas (Garcia, 2018).

O PSSR (Revisão de Segurança Pré-Operacional) é uma etapa essencial do sistema de gestão de segurança industrial, realizada imediatamente antes da entrada em operação definitiva de uma planta ou unidade de processo. Seu objetivo é garantir que todos os sistemas, equipamentos, procedimentos e treinamentos estejam em conformidade com os requisitos de segurança, ambientais e operacionais definidos no projeto. Trata-se de uma

auditoria técnica e multidisciplinar que atua como última barreira para a prevenção de falhas críticas no início da operação. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2020, p. 21), a PSSR “é um procedimento de verificação final que assegura que uma instalação esteja pronta para operar de forma segura, obedecendo aos requisitos técnicos, legais e de saúde ocupacional, minimizando riscos no comissionamento e na fase inicial de produção”.

O *checklist* de segurança funciona como uma técnica sistemática de avaliação de riscos, reunindo uma lista de verificação de itens relacionados a condições de trabalho, equipamentos e procedimentos, que permite identificar perigos de forma estruturada e registrar evidências para suporte em decisões de mitigação, como descrito na ISO/IEC 31010 (2019), na qual listas de verificação (“*checklists*”) são reconhecidas como uma das principais ferramentas para a identificação de riscos. Com base no CCPS (2008), o *checklist* é uma abordagem prática e amplamente utilizada para garantir o cumprimento das boas práticas operacionais.

A APR (Análise Preliminar de Risco) para Cardella (2011, p.133) é:

“A APR é uma técnica de identificação de perigos e análise de riscos que consiste em identificar eventos perigosos, causas e consequências e estabelecer medidas de controle. Preliminar, porque é utilizada como primeira abordagem do objeto de estudo. Num grande número de casos é suficiente para estabelecer medidas de controle de riscos. O objeto da APR pode ser área, sistema, procedimento, projeto ou atividade. O foco da APR são todos os perigos do tipo evento perigosos ou indesejável.”.

O IBRAM (2020) destaca a importância da APR para apoiar decisões gerenciais e planejar estratégias de controle de riscos em projetos minerários.

O FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos) é um método analítico estruturado aplicado para identificar modos potenciais de falha em componentes, processos ou sistemas, examinando de forma sistemática suas causas e consequências, a fim de priorizar ações preventivas que reduzam a probabilidade de falhas críticas, o método utiliza três parâmetros — severidade, ocorrência e detecção — para compor um índice de risco que apoia decisões de engenharia e gestão, permitindo que vulnerabilidades operacionais sejam tratadas antes que afetem a confiabilidade ou a continuidade da operação (STAMANTIS, 2003).

A AQR (Análise Quantitativa de Risco) é um método que estima numericamente a probabilidade e as consequências de eventos perigosos por meio de dados históricos, modelos matemáticos e simulações, permitindo projetar cenários acurados para suportar decisões de engenharia e gestão, esse tipo de análise é especialmente indicado para instalações de maior

complexidade e elevado potencial de danos, como barragens, unidades industriais e plantas químicas, onde a compreensão quantitativa dos riscos é indispensável para garantir a segurança operacional (CCPS, 2008).

O Bow Tie (Diagrama de Nó de Gravata) é uma ferramenta gráfica que estrutura a relação entre as causas de um evento perigoso e suas possíveis consequências, organizando de forma visual as barreiras preventivas e mitigadoras que controlam o risco, esse método permite identificar falhas potenciais nas camadas de proteção e aprimorar a tomada de decisão ao integrar elementos da análise de perigos e da gestão de barreiras em um único diagrama CCPS (2018). De acordo com o IBRAM (2020), o Bow Tie facilita a comunicação e compreensão dos riscos entre equipes técnicas e de gestão, contribuindo para o planejamento eficaz da segurança.

A FTA (Análise de árvore de falhas) é um método dedutivo que organiza logicamente, em formato de árvore, as combinações de falhas de componentes e ações humanas capazes de originar um evento indesejado, permitindo identificar causas básicas e avaliar a contribuição de cada uma para o risco geral; conforme descrito pela U.S. Nuclear Regulatory Commission (1981), a análise por árvore de falhas auxilia na compreensão estrutural dos sistemas e na definição de prioridades para ações de confiabilidade. Crowl e Louvar (2011, p. 209) indicam que a FTA é fundamental para a análise de sistemas complexos, permitindo detectar pontos vulneráveis e aprimorar sistemas de controle.

O JSA (Análise de Segurança do Trabalho) consiste na decomposição sistemática de uma tarefa em etapas, permitindo identificar perigos em cada fase e definir medidas preventivas para reduzir riscos potenciais Swartz (2001). A ISO 45001 (2018) recomenda o JSA para reduzir acidentes em atividades operacionais, promovendo a participação ativa dos trabalhadores na identificação e controle de perigos.

Portanto, a análise de riscos no beneficiamento mineral é essencial para garantir a continuidade operacional, a integridade dos trabalhadores, a sustentabilidade ambiental e a viabilidade econômica. Os diferentes tipos de risco exigem abordagens específicas, e o uso de ferramentas estruturadas como HAZOP, What If, PSSR, Checklist, APR, FMEA, AQR, Bow Tie, FTA e JSA são fundamentais para uma gestão eficaz. Como reforça o CCPS (2008, p. 11), “um sistema de gerenciamento de riscos bem estruturado é indispensável para mitigar eventos indesejados e proteger pessoas, ativos e o meio ambiente”.

De modo geral, o capítulo apresentou uma fundamentação ampla sobre o processo de mineração, evidenciando as etapas que conduzem desde a descoberta da jazida até o beneficiamento propriamente dito, destacando a lógica sequencial e a integração entre as operações unitárias. Também foram detalhados os principais equipamentos empregados na preparação, classificação, concentração e desaguamento do minério, enfatizando seu papel na eficiência global da planta. Além disso, discutiram-se os diferentes tipos de riscos inerentes ao setor mineral — ambientais, econômicos, ocupacionais e operacionais — e as ferramentas de análise aplicadas para sua identificação, avaliação e controle. A articulação desses três eixos demonstra que a compreensão técnica dos processos, a escolha adequada das tecnologias e a aplicação sistemática de métodos de gestão de riscos são elementos indissociáveis para garantir desempenho, segurança e confiabilidade, estabelecendo assim o embasamento teórico que sustenta as análises desenvolvidas nos capítulos seguintes.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

As pesquisas buscam explicações e soluções para problemas por meio de um estudo organizado e fundamento. De acordo com Köche (2011, p.71), “pesquisa é um processo decorrente da identificação de dúvidas e da necessidade de elaborar e construir respostas para esclarecê-las”.

As pesquisas científicas podem ser classificadas em qualitativa e quantitativas (CRESWELL, 2010). Sendo as definições:

- Método quantitativo: tem como objetivo compreender os fenômenos por meio de informações numéricas. Conforme Lakatos e Marconi *apud* Richardson (2008, p.269):

caracteriza-se pelo emprego da quantificação tanto nas modalidades de coleta de informações quanto no tratamento delas por meio de técnicas estatísticas, desde as mais simples como percentual, média, desvio-padrão, às mais complexas como coeficiente de correlação, análise de regressão.

- Método qualitativo: tem como objetivo compreender fenômenos a partir da coleta de dados descritivos. Segundo Lakatos e Marconi (2008, p.269):

a metodologia qualitativa preocupa-se em analisar e interpretar aspectos mais profundos, descrevendo a complexidade do comportamento humano. Fornece análise mais detalhada sobre investigações, hábitos, atitudes, tendências de comportamento etc.

Gil (2002) classifica as pesquisas em três tipos: exploratórias, descritivas ou explicativas.

- Pesquisas exploratórias: são desenvolvidas com o objetivo de proporcionar uma visão geral, de tipo aproximativo, acerca de determinado fato. Em conformidade com, Gil 2002, p.41):

Estas pesquisas têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições.

- Pesquisas descritivas: buscam descrever características, sem interferir no objeto estudado. Atendendo a Köche (2011, p.124) explicita que “a descritiva constata e

avalia essas relações à medida que essas variáveis se manifestam espontaneamente em fatos, situações e nas condições que já existem (...), não há manipulação a priori das variáveis”

- Pesquisas explicativas: buscam explicar as causas e consequências de um fenômeno, na tentativa de entender o motivo do fato. Em concordância com Gil (2002, p.42):

Essas pesquisas têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas.

Além disso, as pesquisas também são classificadas conforme o procedimento técnico. Tendo Gil (2002) como fundamento, esses são os tipos:

- Pesquisa bibliográfica: “utiliza fundamentalmente das contribuições dos diversos autores sobre determinado assunto” Gil (2002, p.45). Logo, é desenvolvida a partir de artigos científicos e livros.
- Pesquisa Documental: “vale-se de materiais que não recebem ainda um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados de acordo com os objetos da pesquisa” (GIL,2002, p.45).
- Estudo de Caso: “consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, tarefa praticamente impossível mediante outros delineamentos já considerados” (GIL,2002, p.54).

Com base nos conceitos apresentados neste capítulo, este trabalho pode ser classificado como pesquisa qualitativa pois busca interpretar de forma genérica sem necessidade de dados estáticos ou modelagem; exploratória porque tem como característica realização de uma análise de risco, sendo identificado os tipos de riscos constituintes nos equipamentos de mineração. Além disso, é considerada como bibliográfica por causa da utilização de livros e artigos como base para construção da pesquisa; como também documental, visto que faz uso dados e documentos da empresa, e por fim estudo de caso, pois busca compreender o contexto dos riscos presentes no processo de beneficiamento mineral.

3.2 Materiais e métodos

Método é o conjunto estruturado e lógico de procedimentos com a finalidade de alcançar um objetivo (LAKATOS e MARCONI, 2008). A figura 6 mostra o método aplicado neste estudo.

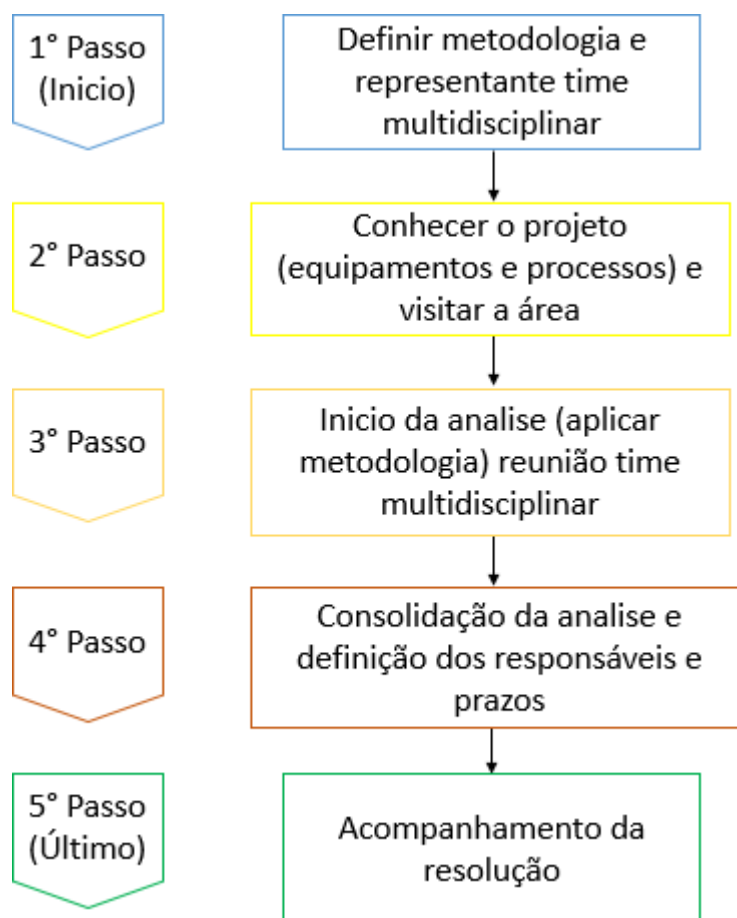


Figura 6 – Método aplicado para análise de risco
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Conforme a figura 6, descreve a metodologia empregada. Primeiramente, estabelece o tipo de análise de risco a ser empregada e o representante de cada disciplina responsável pela análise. Na etapa seguinte, busca-se compreender o projeto e seus riscos, a partir de visitas em campo e modelo 2D e 3D do processo e equipamentos. No passo 3, se reúne o time multidisciplinar e inicia aplicação da metodologia escolhida na etapa 1, seguindo a rota de início do beneficiamento e/ ou os ativos a serem analisados. Posteriormente, estágio 4 é feito a identificação e validação dos riscos utilizando novamente os modelos 2D e 3D, fluxogramas, diagramas elétricos e P&DI (Diagrama de Tubulação e Instrumentação), com os controles e

recomendações de mitigação dos perigos levantados no passo anterior, em que resulta no relatório e planilha de plano de ação com os responsáveis e prazos de execução. Por fim, o último passo 5 é o acompanhamento das implementações das soluções acordadas no item 4.

3.3 Variáveis e indicadores

Variável é qualquer característica, fator ou condição que possa assumir diferentes valores ou sofrer alterações, para Köche (2011, p.112) pode ser definida como “aspectos, propriedades, características individuais, ou fatores, mensuráveis ou potencialmente mensuráveis, através dos diferentes valores que assumem, discerníveis em um objeto de estudo, para testar a relação enunciada em uma posição”.

De acordo com Lakatos e Marconi (2008), indicadores são instrumentos de avaliação e controle de fenômenos, permitindo estudo sistemático e objetivo, divididos em elementos quantitativos ou qualitativos que possibilitam medir, direta ou indiretamente, variáveis relevantes para pesquisa científica.

A tabela 1 apresenta as variáveis e indicadores do estudo:

Tabela 1 – Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Análise de risco	Tipos de risco
	Metodologia
	Processos
	Equipamentos

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Verifica-se pela tabela 1 que para esta pesquisa, a variável estabelecida é a Análise de Riscos e os indicadores para identificação e resolução são os tipos de risco, metodologia, processo e equipamentos.

3.4 Instrumentos de coleta de dados

Para coleta de informações, foi realizado visita em campo, utilização de softwares 2D e 3D, respectivamente DWG e Navis Works, com o objetivo de responder as principais perguntas constituintes na análise de risco, conforme a seguinte Tabela 2:

Tabela 2 – Perguntas para análise de risco

Perguntas:
Qual o processo?
Qual o equipamento?
Qual parâmetro controlado pelo equipamento?
Quais os desvios?
Quais as causas?
Qual a consequência?
Qual a criticidade?
Qual a probabilidade?
Qual a severidade residual?
Quais as recomendações?
Qual criticidade após recomendações?
Qual probabilidade após recomendações?
Qual severidade residual após recomendações?

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A tabela 2 explicita o questionário para realização da análise de risco, sendo realizada conforme o normativo da empresa, assim como o questionário e que deve atender a 3 critérios, pessoas (segurança), meio ambiente e financeiro.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados coletados foram tabulados com o auxílio dos softwares Microsoft Excel e Microsoft Word. O Excel foi utilizado para organizar as informações em planilhas e facilitar a análise dos resultados. Em seguida, os dados foram inseridos no Word para registro e apresentação no corpo do trabalho.

3.6 Considerações finais

Este capítulo descreve a metodologia utilizada para este estudo, em que são apresentados a classificação quanto ao tipo de pesquisa, instrumentos, métodos, variáveis e indicadores mapeados conforme o objetivo de trabalho. O capítulo seguinte abrange a análise dos resultados quanto aos riscos presentes no processo de beneficiamento de uma empresa mineradora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentada a empresa objeto do estudo, bem como os principais equipamentos que compõem o processo de beneficiamento mineral, considerando o contexto de uma usina atualmente paralisada. Em seguida, é desenvolvida a análise de riscos voltada ao retorno seguro das operações, contemplando a aplicação do método adotado, a definição e classificação dos diferentes tipos de riscos envolvidos e, por fim, uma análise conjunta dos resultados, com foco na identificação de condições críticas e na mitigação de riscos operacionais, de segurança, ambientais e econômicos associados à retomada da usina.

4.1 Empresa:

A empresa em estudo é uma organização de grande porte do setor de mineração, voltada à extração e beneficiamento de minério de ferro. Suas operações integram desde a lavra a céu aberto até o embarque do produto final nos portos, passando por etapas de beneficiamento que visam elevar o teor de ferro e adequar o material às especificações de mercado, conforme a figura 7:

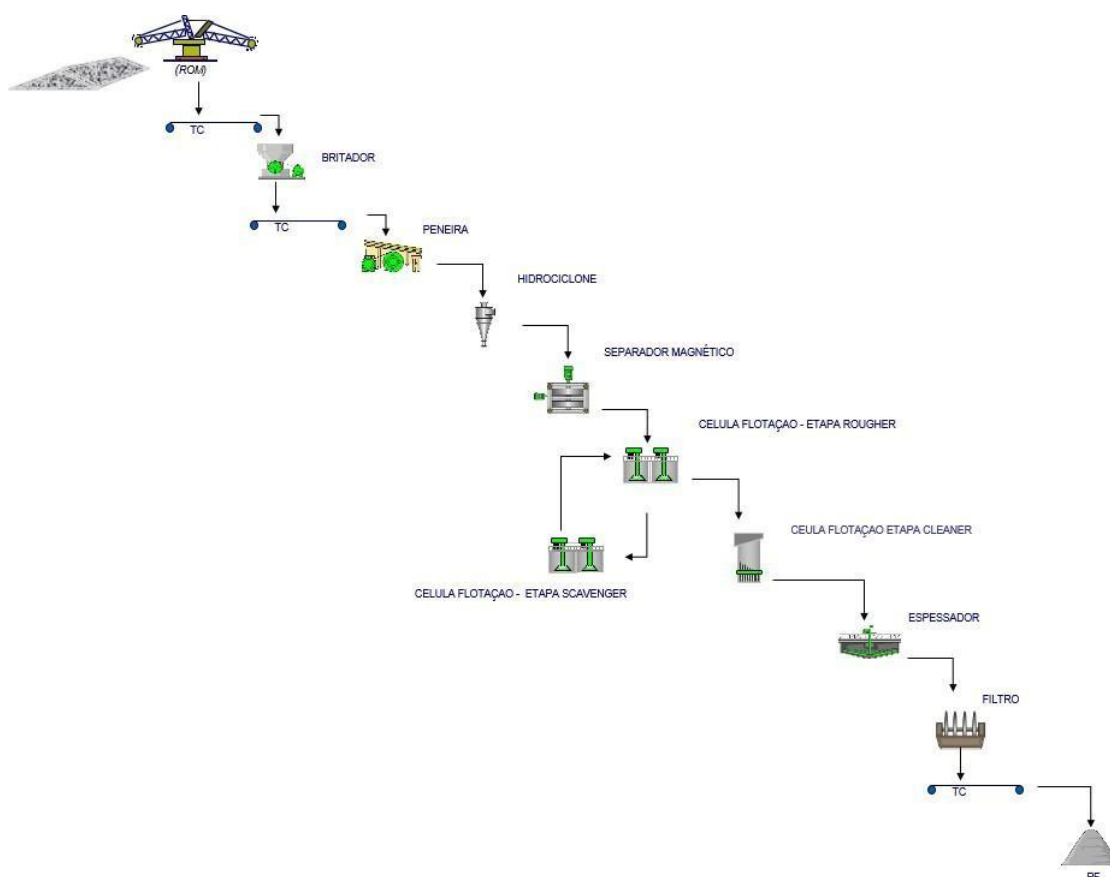


Figura 7 - Fluxograma Simplificado Usina de Beneficiamento Mineral
Fonte: Adaptado da Empresa (2026)

A figura 7 representa de forma resumida o processo de beneficiamento mineral a úmido, com início considerado a partir da britagem terciária. Nessa etapa, o minério já passou pelas fases iniciais de lavra e britagem primária e secundária, chegando ao circuito com granulometria reduzida e mais adequada para as operações de classificação e concentração. O material proveniente do estoque intermediário é coletado pela retomadora e transportado via transportador de correia para alimentar o britador, onde ocorre a fragmentação complementar, garantindo maior uniformidade do tamanho das partículas.

Após a britagem, o minério britado é conduzido por transportadores de correia até a peneira, responsável pela classificação granulométrica. Nessa operação, as partículas dentro da faixa desejada seguem no processo, enquanto eventuais partículas fora de especificação podem ser recirculadas ou direcionadas conforme o arranjo do circuito. Em seguida, o material classificado é encaminhado ao hidrociclone, equipamento que promove a separação das partículas com base em tamanho e densidade, gerando uma fração mais grossa e outra mais fina, ajustando a alimentação das etapas subsequentes.

O produto adequado segue para o separador magnético, onde ocorre a concentração por meio da resposta das partículas ao campo magnético. Nessa etapa, os minerais portadores de ferro são separados da ganga não magnética, elevando o teor do material e preparando-o para a flotação. A flotação é realizada em etapas sequenciais, iniciando-se pela etapa rougher, cujo objetivo é promover a separação inicial dos minerais de ganga, principalmente o quartzo. O concentrado rougher segue para a etapa cleaner, onde ocorre o refinamento do concentrado, elevando o teor de ferro e reduzindo impurezas. O rejeito rougher é direcionado à etapa scavenger, que tem como função recuperar partículas de ferro ainda presentes, aumentando a eficiência global do processo.

Após a flotação, o concentrado final é encaminhado ao espessador, onde ocorre a separação sólido-líquido por sedimentação, elevando o teor de sólidos da polpa e permitindo a recuperação de água para recirculação no processo. A polpa espessada segue então para o filtro, onde a remoção final de umidade é realizada, resultando em um produto sólido com teor de umidade adequado para manuseio e transporte.

Por fim, o concentrado obtido ao término do beneficiamento corresponde ao *pellet feed*, um produto de minério de ferro com granulometria fina, elevado teor de ferro e baixo conteúdo de impurezas, além de umidade controlada após a filtração. Essas características

tornam o material adequado para transporte, estocagem e uso industrial, sendo empregado principalmente como matéria-prima no processo de pelotização, no qual é aglomerado e transformado em pelotas utilizadas na produção de ferro-gusa e aço pela indústria siderúrgica.

A estrutura organizacional da empresa é baseada em um modelo funcional, com áreas interligadas que garantem a integração entre produção, manutenção, segurança, meio ambiente e engenharia. A seguir, a figura 8 apresenta-se a hierarquia de forma descritiva:

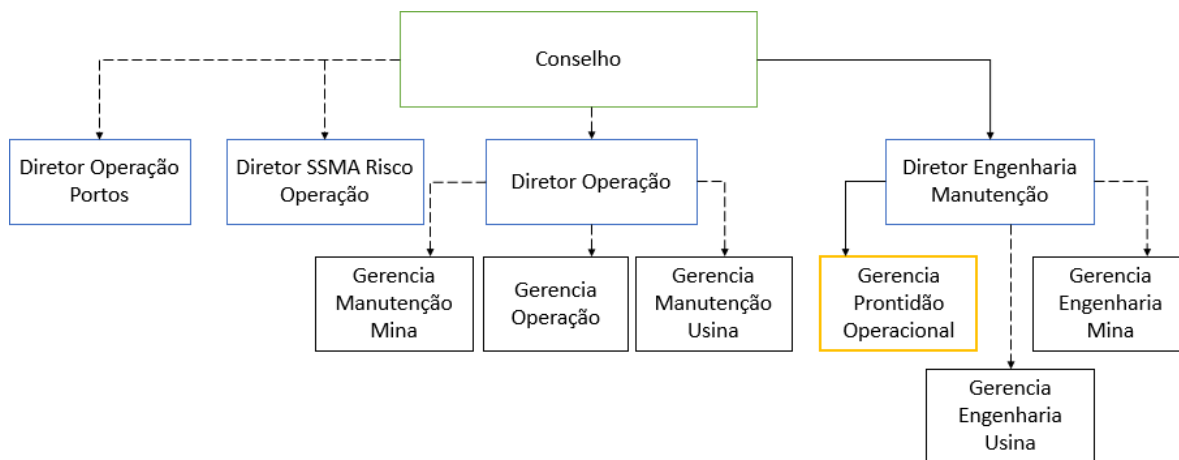


Figura 8 – Organograma Empresa Pesquisada
Fonte: Pesquisa Direta (2026)

A figura 8 mostra o organograma da empresa organizada sob um Conselho, que direciona várias diretorias responsáveis por áreas estratégicas: Operação, Engenharia e Manutenção, SSMA/Risco Operacional e Operação de Portos. Cada diretoria coordena gerências específicas ligadas às atividades de mina, usina, manutenção e engenharia, formando uma cadeia clara de responsabilidade e suporte às operações. A pesquisa foi direcionada na gerência de prontidão operacional, responsável pela análise de risco da retomada operacional da usina.

Dentro desse modelo, a Gerência de Prontidão Operacional se destaca dentro da Diretoria de Engenharia e Manutenção. Sua função é garantir que novos ativos, sistemas e processos entrem em operação de forma segura, confiável e eficiente. Essa gerência atua na fase que antecede a operação, realizando validações técnicas, inspeções, revisões de engenharia, alinhamento com manutenção e operação e preparação dos times com procedimentos e treinamentos.

Em termos simples, a Prontidão Operacional funciona como o elo que assegura que tudo esteja realmente pronto para operar, sem riscos e com todos os requisitos de desempenho

atendidos. Isso reduz retrabalhos, aumenta a confiabilidade das plantas e garante uma transição suave entre projeto e operação.

4.2 Equipamentos

Neste tópico são apresentados e descritos os principais equipamentos macros que compõem o processo de beneficiamento mineral, detalhando suas funções e aplicações ao longo do fluxo produtivo, seguindo a rota conforme imagem 7.

- Britador

O britador cônico é empregado principalmente na britagem secundária e terciária e tem como função reduzir ainda mais o tamanho das partículas obtidas na etapa anterior, preparando o material para a classificação e, quando necessário, para a moagem. Ele atua sobre um material já previamente britado, garantindo fragmentação mais fina e granulometria mais homogênea. Essa etapa é essencial para garantir que o minério avance no processo dentro da especificação desejada, melhorando o desempenho das peneiras e aumentando a eficiência geral do circuito de cominuição.

A aplicação do britador cônico é indicada para minérios de dureza elevada, como o minério de ferro, devido à sua capacidade de trabalhar com alta taxa de redução e boa cubicidade do produto. Instalado após o britador de mandíbulas, ele recebe um material de granulometria controlada, permitindo operação mais estável e com menor incidência de impactos bruscos. O britador cônico contribui para a uniformização do fluxo de alimentação dos equipamentos seguintes, evitando sobrecargas e garantindo qualidade no material que segue para o peneiramento ou para outras etapas do beneficiamento.

Seu funcionamento baseia-se na compressão contínua do minério entre um manto cônico móvel e uma carcaça fixa denominada camisa. O movimento excêntrico do eixo central faz com que o manto se aproxime e se afaste da camisa em ciclos sucessivos, fragmentando o material à medida que é alimentado na parte superior e desce pela câmara de britagem. A granulometria final é controlada pela abertura de descarga, que pode ser ajustada conforme as necessidades operacionais. A operação estável depende de alimentação contínua e bem distribuída, mantendo pressão adequada na câmara e evitando desgaste prematuro dos revestimentos. A figura 9 exemplifica um modelo de britador cônico empregado as operações:



Figura 9- Britador Cônico
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A figura 9 ilustra um modelo de britador cônico, em que os principais componentes do britador cônico incluem a carcaça superior e inferior, o eixo principal, o conjunto excêntrico, o manto e a camisa de desgaste, além do sistema de ajuste da abertura e do sistema de proteção contra sobrecarga. Equipamentos modernos incluem sistemas hidráulicos para regulagem rápida da abertura e liberação automática em caso de materiais não britáveis. O conjunto é completado por motores, polias, sistema de lubrificação e sensores de monitoramento que garantem operação segura, contínua e eficiente. Com essa composição robusta, o britador cônico oferece elevada capacidade, boa qualidade do produto britado e confiabilidade operacional essencial ao circuito de beneficiamento.

- Peneira

O peneiramento é uma operação fundamental no beneficiamento mineral, responsável por separar partículas sólidas com base no tamanho por meio de telas com aberturas definidas. A peneira utiliza vibração para promover o transporte do material sobre a tela e permitir que as partículas menores atravessem suas aberturas, enquanto as maiores seguem para a descarga. Essa operação garante que o material avance no processo dentro da granulometria adequada, influenciando diretamente a eficiência de etapas como britagem, moagem e concentração.

Quando instalada logo após o britador, a peneira atua principalmente na forma de escalpe, cujo objetivo é remover rapidamente partículas muito grossas, blocos fora de

especificação e materiais estranhos que possam causar danos ou sobrecarga nas etapas seguintes. Essa remoção precoce evita engaiolamentos e estabiliza o fluxo de alimentação do circuito. Além disso, o material passante já apresenta granulometria adequada, o que reduz retrabalho e melhora a eficiência global do processo. A imagem 10 identifica um modelo de peneira:



Figura 10 – Peneira
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A figura 10 ilustra uma peneira utilizada no processo de beneficiamento, em que para funcionamento adequado, depende de seus componentes principais. A caixa vibratória sustenta o conjunto e transmite o movimento, enquanto as telas — metálicas ou em materiais sintéticos — realizam a classificação conforme o tamanho de abertura. O sistema vibratório, composto por motores ou excêntricos, gera o movimento que impulsiona o material ao longo da superfície de peneiramento. A amplitude e a frequência da vibração são ajustadas conforme o tipo de material, e no caso do escalpe, privilegia-se a robustez e a capacidade de suportar impactos.

Os chutes de alimentação e descarga completam o conjunto, garantindo entrada uniforme do material e direcionamento adequado do passante e do retido. Em síntese, a peneira instalada após a britagem exerce papel essencial na proteção do circuito e na regularização do fluxo, assegurando que apenas material dentro da especificação prossiga no processo. Sua atuação direta na remoção de oversize e na preparação da alimentação contribui para maior segurança operacional, menor desgaste dos equipamentos e maior confiabilidade do beneficiamento como um todo.

- Hidrociclone:

O hidrociclone é um equipamento utilizado para realizar a classificação hidráulica de partículas presentes em uma polpa, separando-as conforme seu tamanho e densidade por meio

da força centrífuga. Ele atua promovendo a divisão do fluxo em duas correntes: o underflow, composto por partículas mais grossas e pesadas, e o overflow, formado por partículas finas e água. Esse processo de classificação é essencial no beneficiamento de minério de ferro, pois permite controlar com precisão a granulometria das etapas subsequentes, garantindo melhor desempenho em operações como moagem, separação magnética e flotação.:

Sua aplicação é fundamental em circuitos fechados de moagem e em etapas de deslamagem. No primeiro caso, o hidrociclone retorna o material grosso para ser novamente moído, assegurando que somente partículas dentro da especificação sigam no processo. Já na deslamagem, ele remove partículas ultrafinas que poderiam prejudicar a eficiência de equipamentos de concentração, melhorando a qualidade do concentrado final. Em plantas de minério de ferro, essa operação é decisiva para aumentar a eficiência metalúrgica e reduzir o consumo energético, uma vez que controla rigorosamente a distribuição granulométrica da polpa.

O funcionamento do hidrociclone, baseia-se na alimentação tangencial da polpa sob pressão, o que gera um campo de forças centrífugas no interior do equipamento. As partículas maiores são lançadas para a parede interna e descem em espiral até a saída inferior (underflow), enquanto as partículas finas permanecem no centro do ciclone e são arrastadas para a saída superior (overflow). A eficiência do processo depende de variáveis como pressão de alimentação, densidade da polpa, diâmetro do ciclone, velocidade do vórtice e geometria interna. Esses parâmetros influenciam diretamente o ponto de corte, isto é, o tamanho das partículas separadas entre as duas correntes. As imagens 11 e 12 ilustram o equipamento:



Figura 11 – Hidrociclone
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

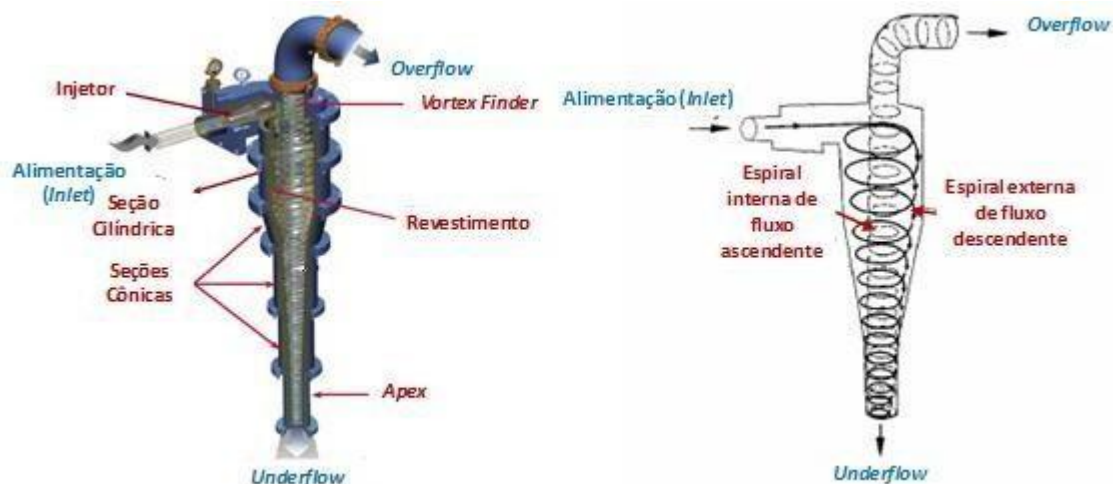


Figura 12 – Hidrociclone
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A composição do hidrociclone, conforme ilustrado as figuras 11 e 12, inclui elementos projetados para suportar abrasão e garantir precisão na classificação. Entre os principais componentes estão a alimentação tangencial, responsável por introduzir a polpa sob pressão; a câmara cilíndrica superior, onde se forma o vórtice inicial; o cone inferior, que conduz o fluxo para o underflow; o apex, que define o comportamento do fluxo grosso; e o vortex finder, responsável pela retirada controlada do overflow. Revestimentos internos em materiais resistentes à abrasão, como borracha ou cerâmica, aumentam a vida útil do equipamento e mantêm sua eficiência.

- Separador magnético:

O separador magnético carrossel de alta intensidade é utilizado para concentrar partículas finas de minério de ferro que apresentam comportamento paramagnético, como a hematita. Seu papel é recuperar minerais que não respondem a campos de baixa intensidade, permitindo separar seletivamente o material útil da ganga silicatada presente na polpa. Essa etapa é fundamental em plantas que trabalham com minérios finos, pois garante elevação do teor de ferro, remoção de contaminantes e melhora da eficiência metalúrgica antes das operações de espessamento e filtragem. A figura 13 exemplifica um modelo separador magnético:



Figura 13 – Separador Manético
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

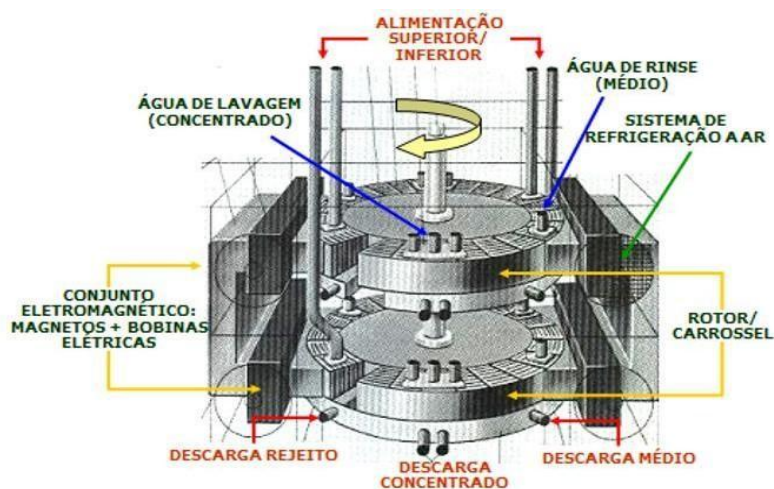


Figura 14 – Separador Manético
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A aplicação do equipamento, ilustrado pelas figuras 13 e 14, se destaca por combinar campo magnético de alta intensidade com matrizes ferromagnéticas ranhuradas, capazes de produzir gradientes elevados e capturar partículas muito pequenas. Ele é utilizado tanto para concentração primária quanto para etapas de limpeza do concentrado, podendo operar com polpas diluídas para maximizar a seletividade. Em circuitos de minério de ferro, o carrossel atua recuperando a fração paramagnética que ainda contém ferro aproveitável, reduzindo

perdas metalúrgicas e melhorando o rendimento global do processo. Além disso, é capaz de remover minerais prejudiciais à flotação.

O funcionamento ocorre quando a polpa é alimentada no interior das matrizes montadas em rotores que giram continuamente dentro de um campo magnético intenso. As partículas paramagnéticas são atraídas e se alojam nas ranhuras das matrizes, enquanto as partículas não magnéticas são carregadas pelo fluxo hidráulico e descartadas como rejeito. À medida que o rotor gira, as matrizes passam por zonas externas ao campo, onde sprays de lavagem removem o material retido, formando o concentrado. O processo depende de variáveis como intensidade do campo, taxa de polpa, velocidade do rotor, número de matrizes e pressão da água de lavagem, que influenciam diretamente a recuperação e a qualidade do produto final.

A composição do separador inclui bobinas eletromagnéticas responsáveis por gerar o campo de alta intensidade, rotores dispostos em carrossel que suportam as matrizes ferromagnéticas, sistema hidráulico de alimentação da polpa, conjunto de sprays para lavagem do material magnético, calhas de descarga para concentrado e rejeito, além de sistemas de refrigeração e controle elétrico. As matrizes, geralmente constituídas por chapas ranhuradas ou fios de aço inox, são os elementos-chave do processo, pois amplificam o gradiente magnético e aumentam a eficiência de captura das partículas finas. Todo o conjunto é projetado para operar de forma contínua, garantindo alta recuperação, boa seletividade e estabilidade operacional em condições de alta abrasão.

- Célula Flotação:

A flotação é uma etapa fundamental no beneficiamento de minério de ferro, empregada para separar seletivamente minerais de ganga, principalmente o quartzo, dos minerais portadores de ferro. O processo se baseia em diferenças nas propriedades de superfície das partículas, tornando-as hidrofóbicas ou hidrofílicas por meio de reagentes apropriados. Assim, minerais de ganga são aderidos a bolhas de ar e removidos na espuma, enquanto as partículas de ferro permanecem na polpa. Esse mecanismo depende da liberação adequada dos minerais, da modificação química das superfícies e da separação dinâmica entre as fases sólida, líquida e gasosa.

Em operações industriais de minério de ferro, a flotação é geralmente realizada em células mecânicas, que podem ser convencionais, tanque ou pneumáticas. Essas células devem manter partículas em suspensão, promover boa dispersão do ar e proporcionar contato

eficiente entre partículas e bolhas. O desempenho operacional depende da velocidade periférica do rotor, da vazão de ar, das características da polpa e da cinética de flotação. O tamanho das bolhas e o padrão de mistura influenciam diretamente a seletividade e a recuperação do processo.

O circuito de flotação é organizado em etapas com funções distintas, começando pela etapa rougher, responsável pela captura inicial da maior parte do quartzo presente na alimentação. Nessa fase, busca-se maximizar a recuperação das partículas hidrofóbicas sem preocupação imediata com a pureza do concentrado. O concentrado rougher, geralmente de qualidade intermediária, segue para a etapa cleaner, onde ocorre a limpeza e o refinamento, reduzindo o arraste hidráulico e melhorando o teor final de ferro. O rejeito rougher, por sua vez, é direcionado ao estágio scavenger, que tem a função de recuperar partículas de ferro ainda presentes, evitando perdas metálicas e aumentando a eficiência global do processo.

Os fluxos entre as etapas são definidos de forma a manter equilíbrio entre recuperação e seletividade, podendo incluir recirculações conforme comportamento mineralógico. Para que essas etapas funcionem corretamente, são necessários ajustes constantes de parâmetros como densidade de alimentação, dosagem de coletor e depressor, pH, regime de aeração e controle da espuma. As imagens 15 e 16, exemplificam as células de flotação:

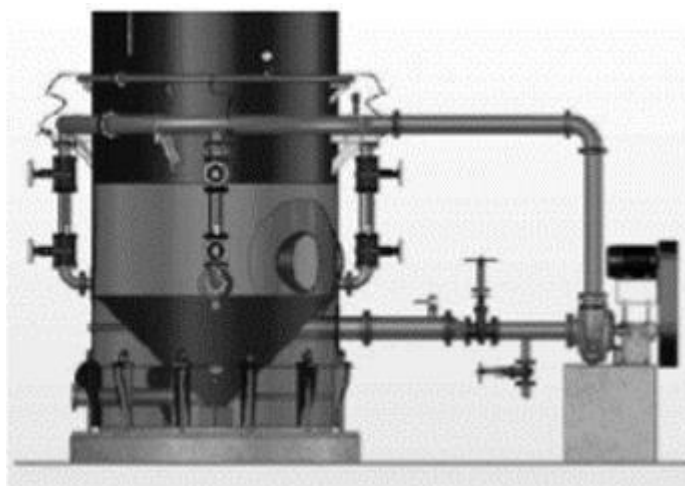


Figura 15 – Célula Flotação
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

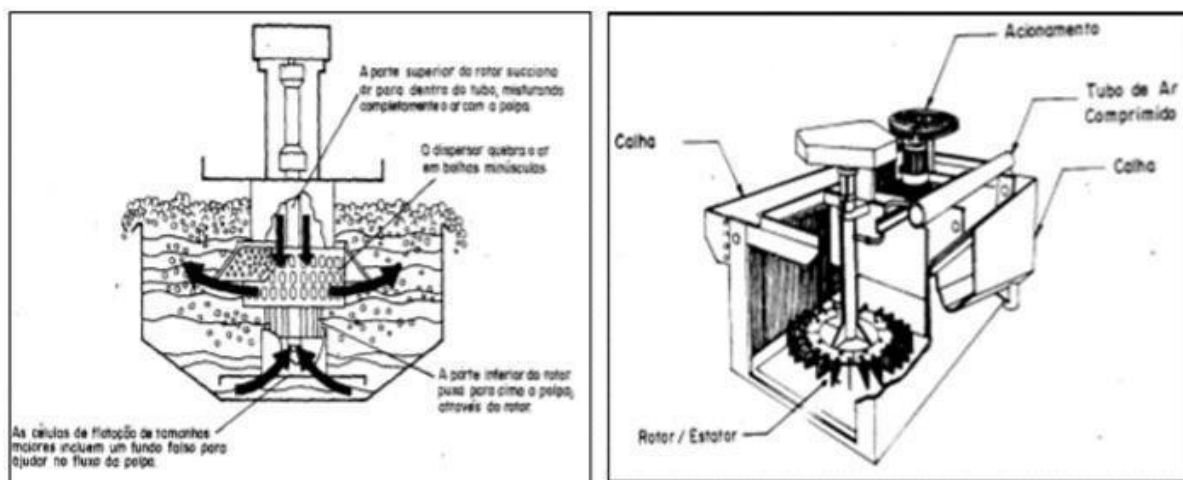


Figura 16 – Célula Flotação (Funcionamento e Componentes)
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

As células de flotação, ilustradas pela imagens 15 e 16, são constituídas por um tanque equipado com rotor e estator, responsáveis pela suspensão das partículas e dispersão do ar. A entrada da polpa ocorre geralmente pela base ou lateral do tanque, sendo misturada ao fluxo turbulento gerado pelo rotor. O ar é incorporado ao sistema de forma forçada ou autoaspirada, dependendo do tipo de célula. A espuma formada na superfície é removida por calhas coletoras, enquanto a polpa não flotada transborda ou é descarregada pela parte inferior da célula, dependendo do modelo. A eficiência da separação depende do equilíbrio entre aeração, agitação, estabilidade da espuma e cinética das reações superficiais.

- Espessador:

O espessamento é uma operação unitária fundamental nos processos de beneficiamento mineral, especialmente no tratamento de minério de ferro, em que se busca promover a separação sólido-líquido por meio da sedimentação gravitacional. Essa operação baseia-se na diferença entre a velocidade de queda das partículas em suspensão e a ascensão do líquido clarificado, resultando na formação de uma polpa mais densa na região inferior do equipamento.

O espessador tem como principal objetivo gerar um underflow com maior concentração de sólidos, ao mesmo tempo em que recupera água limpa no overflow, que pode ser recirculada para as etapas anteriores do processo, reduzindo o consumo de água fresca e os custos operacionais associados. Dessa forma, o espessador atua simultaneamente como equipamento de separação física e como dispositivo de otimização hídrica dentro da planta.

No contexto do minério de ferro, a aplicação do espessamento se mostra essencial em diferentes etapas da cadeia produtiva. O equipamento é empregado tanto na recuperação de água proveniente de polpas contendo rejeitos ou concentrados quanto na preparação de polpas com concentrações de sólidos mais elevadas, aumentando a eficiência de operações subsequentes, como filtragem de pellet feed ou alimentação de etapas de concentração e moagem. Além disso, os espessadores desempenham papel significativo na preparação de rejeitos para descarte, seja para disposição em barragens, pilhas ou sistemas de filtragem de rejeitos. A densificação da polpa facilita seu transporte, reduz volumes a serem manejados e contribui para maior estabilidade nas rotas de disposição. As imagens 17 e 18 ilustram emprego do equipamento e sua estrutura:



Figura 17 – Espessamento
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

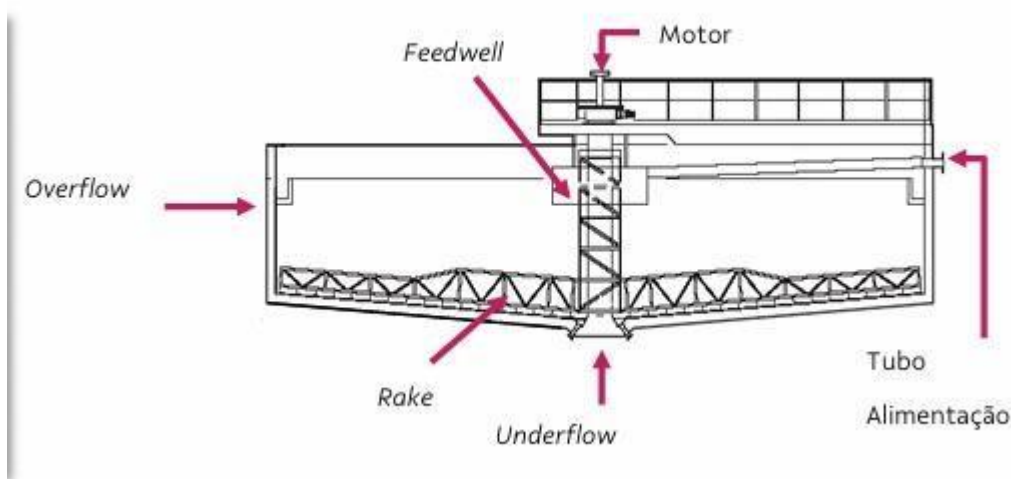


Figura 18 – Componentes do Espessador
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

As figuras 17 e 18 ilustram o espessador e seu componentes, de forma que o equipamento é estruturado por meio de diferentes regiões internas, cada uma desempenhando um papel no processo de separação. A zona superior corresponde à região de clarificação, onde se acumula a água já separada dos sólidos. A espessura dessa camada, que normalmente varia entre 0,6 m e 2 m, é controlada por aditivos químicos, como coagulantes ou floculantes, cuja função é favorecer a agregação das partículas e acelerar o processo de sedimentação. Abaixo da zona de clarificação situa-se a zona de sedimentação, onde as partículas descem sob ação da gravidade. A velocidade de sedimentação, usualmente entre 1 e 3 cm/min, depende de fatores como granulometria, densidade das partículas, viscosidade do meio, forma das partículas, concentração de sólidos e características da superfície, influenciadas pelo potencial zeta. À medida que a concentração de sólidos aumenta, forma-se uma zona intermediária, denominada zona de transição ou consolidação, na qual os flocos começam a se aproximar, reduzindo o volume de água intersticial e preparando a massa para a etapa final. Na base do espessador localiza-se a zona de compactação, onde as partículas se encontram densamente agrupadas e a polpa apresenta alto teor de sólidos. Nessa região, a resistência ao movimento aumenta significativamente e a eficiência do equipamento depende da capacidade do rake em arrastar o material sedimentado em direção à descarga central.

A estrutura do espessador é composta por elementos mecânicos e hidráulicos que atuam de maneira integrada para garantir a eficiência da operação. O feedwell, ou caixa de alimentação, é responsável por receber a polpa de processo e distribuir o fluxo de maneira uniforme, minimizando turbulências que poderiam prejudicar a sedimentação. É também nesse componente que ocorre a mistura inicial entre a polpa e os reagentes floculantes, etapa essencial para promover a formação de flocos maiores e mais pesados, que sedimentam mais rapidamente. O rake, localizado na parte inferior e acionado por um motor, gira lentamente para arrastar os sólidos sedimentados em direção ao centro do espessador. Esse movimento deve ser contínuo e controlado, uma vez que o esforço requerido para movimentar o rake é monitorado por sensores de torque, e aumentos significativos podem indicar presença de partículas grossas, excesso de sólidos ou dosagem inadequada de floculante. O underflow, localizado no cone central, é responsável pela retirada da polpa densificada resultante do processo, enquanto o overflow, situado na borda superior, coleta a água clarificada para recirculação.

- Filtragem:

O filtro de disco a vácuo é utilizado na etapa final do beneficiamento mineral para realizar a remoção de água da polpa concentrada, produzindo um sólido úmido com menor teor de umidade e adequado para manuseio, transporte e estocagem. Sua função principal é transformar a polpa resultante das etapas de concentração em um produto filtrado, permitindo que o *pellet feed* seja enviado para empilhamento, transporte ou diretamente para a pelotização. Como opera de forma contínua, ele garante alta taxa de produção, essencial em plantas de minério de ferro que trabalham com grandes volumes de material.

Sua aplicação ocorre logo após o espessamento, recebendo uma polpa com maior teor de sólidos e distribuindo-a sobre os discos rotativos parcialmente submersos. À medida que os setores do disco passam pela polpa, o vácuo aplicado no interior gera um gradiente de pressão que succiona a água através do meio filtrante, formando uma torta sobre a superfície. Essa torta, de espessura controlada, é posteriormente desidratada em etapas sucessivas, garantindo que o produto final atinja a umidade adequada para o transporte em correias e para a estocagem sem riscos de instabilidade. As imagens a seguir exemplificam os filtros:



Figura 19 – Filtragem
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

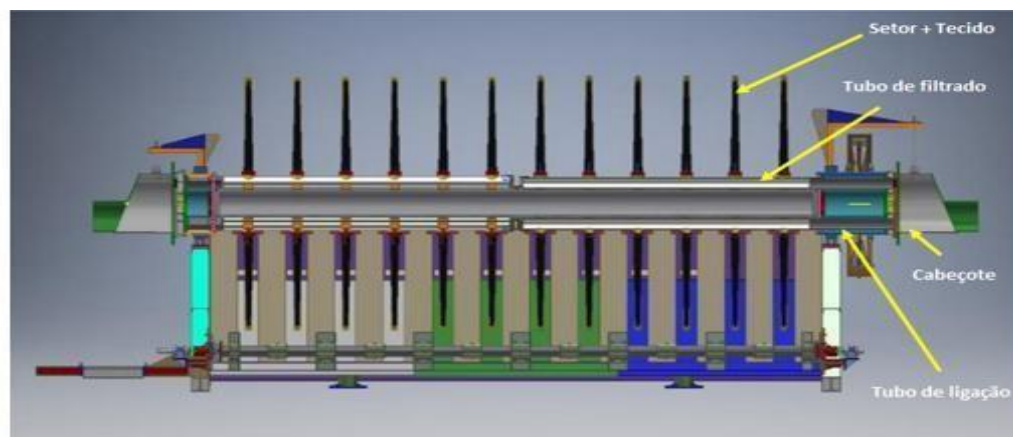


Figura 20 – Filtro
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

As figuras 19 e 20 são modelos do equipamento utilizado, cujo o funcionamento baseia-se na rotação contínua dos discos, que passam por três zonas principais: submersa, de secagem e de descarga. Na zona submersa ocorre a formação da torta por sucção; na zona de secagem, o vácuo continua extraindo umidade da torta; e na zona de descarga, raspadores removem o sólido filtrado, direcionando-o ao transportador de correia responsável por levar o pellet feed até o pátio de empilhamento. A eficiência do processo depende de parâmetros como nível de vácuo, rotação dos discos, espessura da torta, densidade da polpa e qualidade do meio filtrante, todos ajustados para maximizar a taxa de filtração e garantir umidade estável do produto.

A composição do filtro de disco a vácuo inclui o conjunto de discos rotativos divididos em setores, a cuba de polpa onde parte dos discos é submersa, o sistema de vácuo com bombas dedicadas, válvula rotativa que alterna a aplicação do vácuo entre os setores, raspadores mecânicos para remoção da torta, tubulações de drenagem e a malha filtrante fixada sobre os setores. Cada setor do disco funciona como uma célula independente, permitindo formação e secagem eficientes da torta ao longo do ciclo. A estrutura é complementada por sistemas de vedação, acionamento mecânico, controle de nível de polpa e lavagem do meio filtrante, garantindo operação contínua, baixa umidade final e alta confiabilidade, essenciais para o processamento de pellet feed.

- Transportador de correia:

O transportador de correias é o principal equipamento utilizado para o transporte contínuo de materiais a granel nas plantas de beneficiamento mineral. Sua função é deslocar o minério de um ponto a outro do processo de forma estável, segura e com baixo custo

operacional, garantindo fluxo contínuo entre etapas como britagem, peneiramento, classificação e concentração. Por trabalhar com grande capacidade de carga e longas distâncias, ele reduz a necessidade de transporte por caminhões internos, diminuindo custos logísticos, impactos ambientais e riscos operacionais.

A aplicação desse equipamento é essencial em circuitos de minério de ferro, pois assegura alimentação uniforme para os equipamentos subsequentes e evita interrupções no processo. Após a britagem, por exemplo, a correia transporta o material britado até a peneira de escalpe. Sua operação contínua permite controle preciso da taxa de alimentação e contribui diretamente para a estabilidade de toda a linha de beneficiamento. A imagem a seguir exemplifica o equipamento:

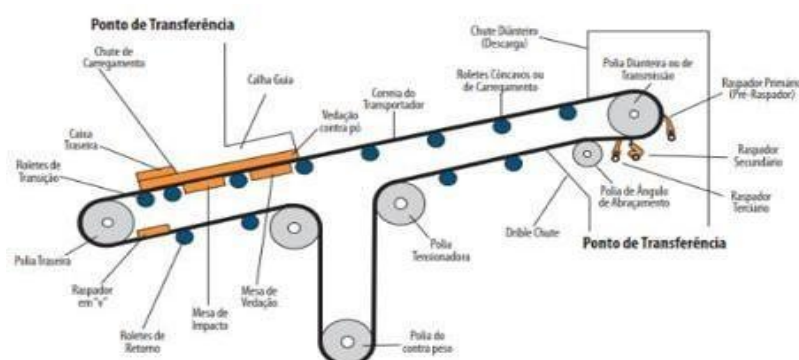


Figura 21 – Transportador de Correia
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A figura 21 identifica o equipamento cujo o funcionamento baseia-se no movimento de uma correia em loop contínuo, impulsionada por tambores de acionamento conectados a motores elétricos. O minério é depositado sobre a correia através de chutes ou alimentadores e segue transportado até o ponto de descarga, onde é lançado por gravidade para chutes, silos ou outros equipamentos. Durante o transporte, roletes de carga e de retorno suportam e estabilizam a correia, garantindo operação suave mesmo sob altas cargas e longos percursos. A velocidade da correia e o fluxo de material são ajustados conforme a necessidade da planta, mantendo eficiência e reduzindo desgaste.

A composição do transportador inclui vários elementos essenciais: a correia, geralmente em borracha reforçada para suportar abrasão; tambores de acionamento e de retorno, responsáveis pela tração; roletes de carga, impacto e retorno; estrutura metálica de suporte; sistema de esticamento para manter a tensão adequada; motores, redutores e

acoplamentos; e sistemas de limpeza, como raspadores e direcionadores. Chutes de alimentação e descarga completam o conjunto, garantindo transição suave do material entre etapas. Esses componentes trabalham em conjunto para oferecer transporte confiável, alta disponibilidade operacional e mínimo risco de paradas, sustentando o desempenho global da planta de beneficiamento.

4.3 Análise de Risco

As Análises de Riscos de Processo englobam várias técnicas para avaliar e controlar perigos e níveis de risco associados a liberações não planejadas e não controladas de materiais perigosos e energia das operações de processos industriais. Elas ajudam a avaliar a adequação e a eficácia das barreiras de segurança e a determinar se são necessárias barreiras adicionais ou medidas de redução de risco. A identificação dos perigos e a análise dos riscos devem utilizar um método adequado ao processo estudado e ser tão completa quanto necessário. Metodologias apropriadas de identificação de perigos e análise de riscos devem ser empregadas dependendo dos objetivos do estudo, tipo e complexidade do processo que está sendo analisado, disponibilidade de informações e estágio do ciclo de vida da instalação.

Sendo parte de um processo sistemático de gestão de riscos que compreende quatro etapas: identificação, avaliação, tratamento e controle/monitoramento dos riscos. Elas devem ser realizadas de forma prospectiva para identificar perigos e avaliar riscos de acordo com os seguintes princípios:

- Perigo: o que pode dar errado?
- Severidade das consequências: quão ruim poderia ser?
- Probabilidade de ocorrência: com que frequência isso pode acontecer?

O objetivo é identificar, avaliar e compreender os riscos associados ao processo, atividade ou sistema, de modo a prevenir falhas, acidentes e perdas antes que a operação ocorra. No contexto de retomada operacional de uma usina que se encontra parada, a análise de risco tem como finalidade principal garantir que o retorno às operações aconteça de forma segura, controlada e confiável, reduzindo a probabilidade de eventos indesejados que possam comprometer a segurança das pessoas, o meio ambiente, os ativos e o desempenho do processo.

Dessa forma são utilizadas ferramentas de análise, conforme fluxogramas, durante desenvolvimento do projeto para mapear os riscos e desenvolver planos de ação com medidas mitigatórias.

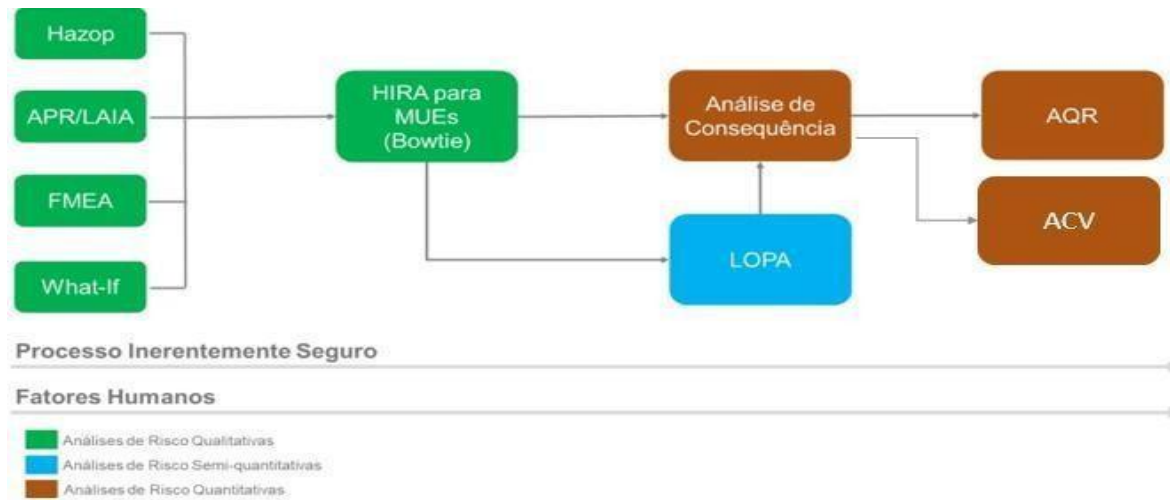


Figura 22: Fluxograma Metodologias Análise de Risco
Fonte: Adaptada empresa (2026)



Figura 23: Fluxograma Aplicação das Metodologias Análise de Risco
Fonte: Empresa pesquisada (2026)

Os fluxogramas 22 e 23 estabelecem as metodologias utilizadas para realização da análise, como também os níveis para aplicação. Dessa forma, estabelece que o método inicial deve ser *Checklist*, *What if*, APR, HAZOP ou FMEA, pois tratam-se de metodologias qualitativas de primeiro estágio e se necessário durante as etapas do projeto pode ser utilizado outras ferramentas de análise para identificação e mitigação dos demais riscos.

4.3.1 Método HAZOP

Para aplicação da análise de risco foi definido a metodologia do HAZOP (Análise de Perigos e Operabilidade), pois o método atende as diretrizes da empresa sendo uma análise qualitativa e de nível 1, além de ser particularmente útil na identificação de pontos fracos em sistemas (existentes e propostos) envolvendo fluxo de materiais, pessoas ou informações, ou um número de eventos ou atividades em uma sequência planejada ou procedimentos que controlem tais sequências. Sendo apropriado para sistemas de processamento complexos como o processo de beneficiamento mineral.

O principal objetivo de um HAZOP é revisar, de forma profunda e metódica, cada segmento de um processo para encontrar todos os possíveis desvios das condições normais de operação, identificando suas causas e consequências. Uma vez verificadas as causas e consequências para cada tipo de desvio, a metodologia propõe recomendações para eliminar ou controlar o perigo. A figura 24 exemplifica o modelo de tabela do HAZOP:

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)																								
Empresa:					Sistema:					Nó:					Intenção:					Data:				
Elaborado por:										Referência dos desenhos:														
ID N°	ID Desvio	Desvio	Causas	Efeitos	Categoria Severidade Inerente			Categoria Probabilidade e Inerente	Categoria Prioridade do Risco Inerente	Controles/ Salvaguardas	Categoria Severidade Residual			FRR-Fator de redução de Probabilidade e (Opcional)	Categoria Probabilidade reduzida (RESIDUAL)	Categoria Prioridade do Risco Residual	Recomendações/ Ações	Categoria Severidade Residual Projetada			Categoria Probabilidade e Residual Projetada	Categoria Prioridade do Risco Residual Projetada	#Num Cenário	Notas/ Observações
					PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO				PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO					PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO				

Figura 24: Modelo de Tabela para Aplicação do Método HAZOP
Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A figura 24 apresentada exemplifica o modelo de planilha utilizado no Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP), evidenciando como a metodologia é estruturada de forma sistemática e organizada. O procedimento baseia-se na geração de questionamentos orientados por palavras-guia de desvio, aplicadas aos parâmetros do processo, com o objetivo de estimular a análise crítica sobre possíveis falhas, suas causas e consequências. A estrutura da planilha contempla a descrição do nó, desvio, causas e consequências, seguida da

classificação da severidade, probabilidade e criticidade no cenário inerente. Em seguida, são registradas as salvaguardas existentes, possibilitando a reavaliação no cenário residual, e posteriormente as recomendações propostas, responsáveis e prazos, culminando na análise do cenário projetado. Essa organização garante rastreabilidade, padronização e consistência na avaliação dos riscos, permitindo comparar a evolução da criticidade ao longo das etapas analisadas e apoiar tecnicamente a tomada de decisão no processo de gestão de riscos.

Para aplicar a ferramenta do HAZOP é necessário seguir um passo a passo conforme o fluxograma a seguir:

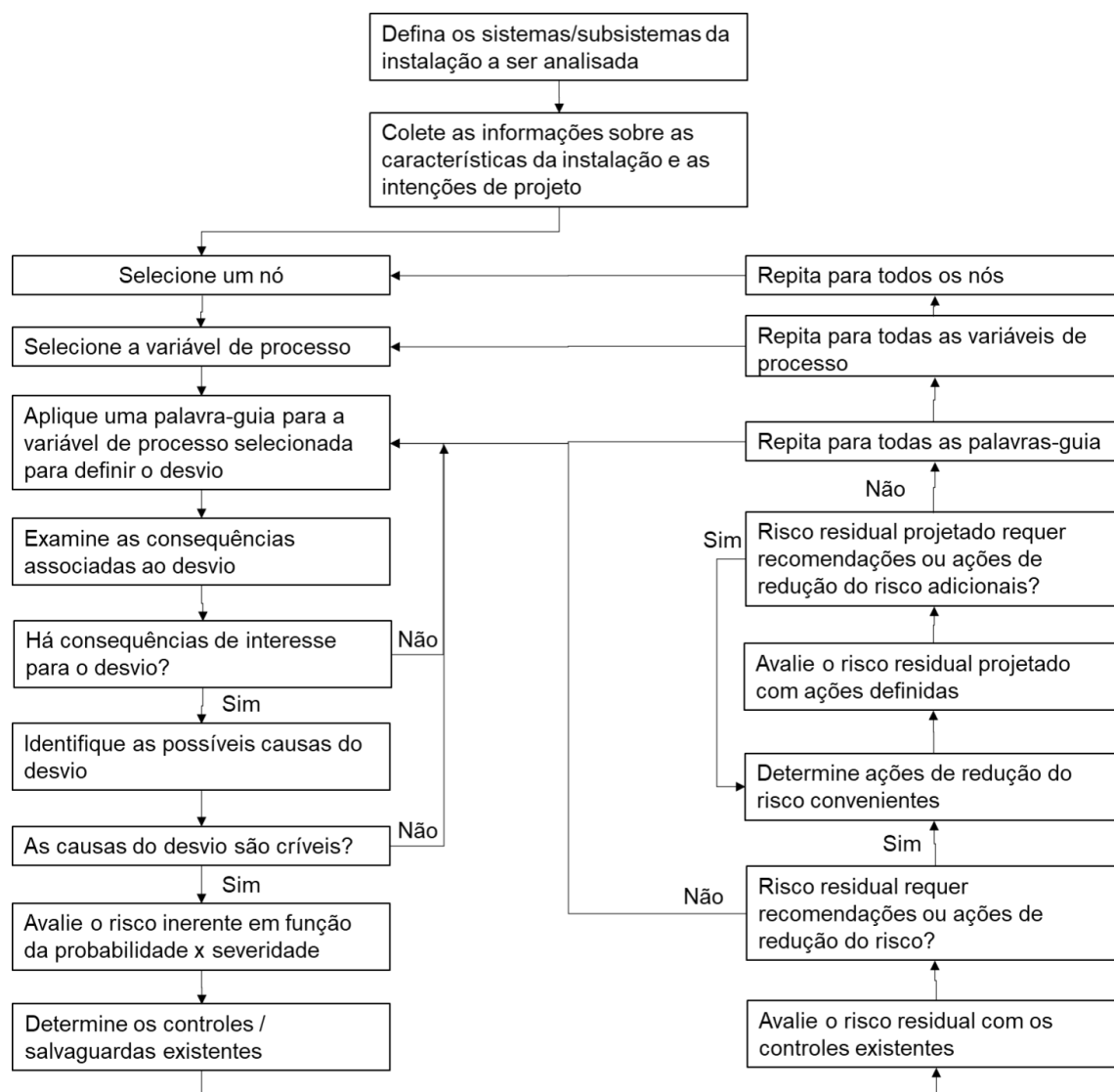


Figura 25 - Fluxograma HAZOP
Fonte: Empresa pesquisada (2026)

Conforme a figura 25, a utilização da ferramenta da HAZOP para realização da análise de risco segue por etapas e de forma sequencial sendo:

- Preparação para a realização do HAZOP

A etapa de preparação é determinante para a qualidade e a efetividade do estudo HAZOP. Nessa fase, são definidos o escopo, os objetivos e a forma de condução da análise, bem como reunidas todas as informações necessárias para subsidiar as discussões técnicas.

Inicialmente, é realizado o planejamento do estudo, no qual se estabelecem os limites do sistema a ser analisado, os estados operacionais considerados (partida, operação normal, paradas e situações de emergência) e o nível de detalhamento desejado. Em seguida, procede-se à coleta e organização da documentação técnica pertinente, como fluxogramas de processo, diagramas de processo e instrumentação, descrições operacionais, especificações de equipamentos, requisitos de projeto e procedimentos operacionais e de manutenção.

Outro aspecto fundamental dessa fase é a formação da equipe de HAZOP, que deve ser multidisciplinar, envolvendo profissionais das áreas de operação, manutenção, engenharia, segurança, meio ambiente e automação. A equipe é conduzida por um líder de HAZOP, responsável por orientar a aplicação da metodologia, estimular a participação dos membros e garantir o correto registro das informações, com o apoio de um escriba, encarregado da documentação formal dos resultados.

- Definição dos nós de estudo

Após a preparação inicial, o processo analisado é subdividido em trechos denominados nós de estudo. Cada nó corresponde a uma parte específica do sistema na qual existe uma intenção clara de projeto, como uma linha de processo, um equipamento ou uma interface entre sistemas.

A correta definição dos nós é essencial para garantir uma análise abrangente e eficiente. De modo geral, os nós são estabelecidos em pontos onde ocorrem mudanças relevantes nas condições de processo, como variações de pressão, temperatura, vazão ou composição, bem como em equipamentos críticos, interfaces com outros sistemas e regiões que concentram maiores inventários de materiais potencialmente perigosos.

Para cada nó, é descrita detalhadamente a intenção de projeto, que representa a condição normal e esperada de operação. Essa intenção serve como referência para a identificação dos desvios analisados durante o estudo.

- Aplicação das palavras-guia e identificação dos desvios

A identificação dos desvios constitui o núcleo da metodologia HAZOP. Para isso, são combinadas palavras-guia com os parâmetros de processo associados a cada nó. As palavras-guia representam variações sistemáticas em relação à intenção de projeto e incluem expressões como “não”, “mais”, “menos”, “parte de”, “bem como”, “reverso” e “outro que”.

Os parâmetros de processo mais comumente analisados incluem vazão, pressão, temperatura, nível, composição, reação e mistura, embora possam variar de acordo com as características do sistema estudado. A combinação entre palavras-guia e parâmetros resulta na formulação de desvios, tais como “nenhum fluxo”, “pressão alta”, “temperatura baixa” ou “composição incorreta”.

Cada desvio é analisado individualmente pela equipe, de forma estruturada, buscando responder às questões: o que pode causar esse desvio, quais seriam suas consequências e quais controles já existem para preveni-lo ou mitigá-lo.

- Identificação das causas e consequências

Para cada desvio identificado, são levantadas as possíveis causas, que podem estar associadas a falhas de equipamentos, problemas de instrumentação, erros humanos, falhas de procedimento ou eventos externos. A análise considera causas plausíveis e individualizadas, de modo a permitir uma avaliação clara dos cenários de risco.

Em seguida, são avaliadas as consequências potenciais decorrentes de cada desvio, considerando seus impactos sobre pessoas, meio ambiente e aspectos financeiros e operacionais. As consequências devem ser descritas de forma detalhada, permitindo compreender a evolução do cenário acidental e a possibilidade de efeitos secundários ou em cadeia.

- Avaliação do risco e salvaguardas existentes

Com base na identificação das causas e consequências, cada cenário é avaliado quanto à sua severidade e probabilidade de ocorrência, resultando na classificação do risco inerente, ou seja, aquele considerado na ausência de quaisquer salvaguardas.

Na sequência, são identificadas as salvaguardas existentes no sistema, que podem ser de natureza técnica, como dispositivos de proteção, intertravamentos e alarmes, ou de natureza administrativa, como procedimentos operacionais e treinamentos. A presença dessas salvaguardas permite a reavaliação do risco, agora denominado risco residual, refletindo a condição real de segurança da instalação.

- Recomendações e reavaliação do risco

Quando o risco residual é considerado elevado ou inaceitável, a equipe de HAZOP propõe recomendações destinadas à redução adicional do risco. Essas recomendações podem envolver melhorias de projeto, implementação de novos sistemas de proteção, revisões de procedimentos ou ações de capacitação.

Após a proposição das recomendações, é realizada uma nova estimativa do risco, denominada risco residual projetado, que considera a implementação das medidas sugeridas. Essa etapa permite avaliar a eficácia das ações propostas e subsidiar a tomada de decisão quanto à necessidade de análises complementares.

- Registro e consolidação dos resultados

Todo o desenvolvimento do estudo HAZOP é registrado em planilhas (excel), nas quais constam a identificação dos nós, desvios, causas, consequências, classificações de risco, salvaguardas e recomendações. Esse registro sistemático assegura a rastreabilidade das decisões tomadas e constitui um importante documento de apoio à gestão de riscos e à melhoria contínua do processo.

Dessa forma, o HAZOP se apresenta como uma metodologia robusta e estruturada para a identificação e análise de riscos, contribuindo significativamente para o aumento da segurança, da confiabilidade operacional e da sustentabilidade das instalações industriais.

4.3.2 Definição de Tipos de Riscos

A identificação e a classificação dos tipos de riscos são etapas essenciais do gerenciamento de riscos de processo, conforme estabelecido nas diretrizes corporativas de segurança, saúde, meio ambiente e riscos operacionais. No contexto industrial, especialmente em instalações de mineração e beneficiamento mineral, os riscos estão associados à liberação não controlada de energia ou materiais perigosos, falhas de processo, condições operacionais inadequadas e deficiências nos sistemas de controle e gestão.

Os principais tipos de riscos considerados nas análises de riscos de processo, em conformidade com as diretrizes de gestão de riscos e de segurança de processos aplicáveis ao ciclo de vida dos ativos industriais. A classificação adotada permite uma visão estruturada dos riscos, servindo de base para a aplicação da metodologia HAZOP.

Para a empresa configura-se risco como “a chance de algo acontecer que terá um impacto em objetivos; é o efeito da incerteza sobre os objetivos organizacionais, que se manifesta de muitas formas e com potencial impacto sobre todas as dimensões dos negócios. Geralmente é medida em termos de probabilidade e consequências do evento”. Os riscos mapeados são:

Categorias	Riscos de Origem Operacional			Riscos de Origem Não Operacional					
	Geotécnico	Operação	Produção	Cibernético	Estratégico	Financeiro	Pessoas	Sustentabilidade e Comunicação	Conformidade e Rel. Institucional
Temas de Risco • 31 temas • 12 prioritários	Barragens e estruturas de armazenamento de rejeitos	Segurança de processo	Licenças, concessões, recursos, reservas e direitos minerários	Segurança Cibernética	Geopolítico e Demanda	Liquidez e Crédito de contrapartes	Cultura e gestão de talentos	Mudanças climáticas	Corrupção de agente público
	Minas Subterrâneas	Saúde e Segurança Ocupacional	Área para disposição de estéril e rejeitos	Transformação tecnológica	Gestão de portfólio, projetos e parcerias	Câmbio, juros e preço de commodities	Práticas abusivas e discriminatórias	Comunidades	Mudanças Legislativas e Regulatórias & Rel. Institucionais
	Pilhas	Meio Ambiente	Capacidade operacional e logística		Inovação e ambiente competitivo	Reporte financeiro e contábil & Tributário	Relações Trabalhistas	Direitos Humanos	Compliance legal sanções & regulatório
	Cavas							Reparação	Contencioso
	Aterros, cortes, taludes e túneis							Comunicação e divulgação	

Figura 26 – Tipos de Riscos
Fonte: Empresa pesquisada (2026)

A figura 26 mostra os tipos de riscos que podem existir, eles são divididos a partir da sua origem: operacional, têm sua origem dentro da empresa ou dentro de uma área de abrangência pré-estabelecida destinada às atividades de mineração, beneficiamento, processamento, produção e transferência/transporte de produtos, materiais e transporte aéreo, marítimo e ferroviário de pessoas. Normalmente estão associados a falha de integridade física de ativos utilizados nos processos produtivos, podendo ser caracterizados pela liberação não planejada ou não controlada de material ou energia perigosos; e risco não operacional, que não decorrem diretamente do nosso processo produtivo, estando associados a áreas de apoio, incluindo os riscos estratégicos, que são influenciados por fatores externos.

Além disso são divididos em categorias, que são utilizadas como critérios durante a análise, para o modelo HAZOP, todos os riscos estão relacionados a operação e as categorias que influenciam na análise são: pessoas, financeiro e meio ambiente. Dessa forma ao mapear o risco é levado em consideração o quanto ele pode impactar a vida dos funcionários e comunidade ali presente, dano ao investimento (valor) e a fauna e flora na região. Sendo estabelecido critérios conforme a tabela a seguir:

Tabela 3 – Dimensões das Categorias de Riscos

DIMENSÃO	LEVE	MODERADO	SIGNIFICATIVO	CRÍTICO	MUITO CRÍTICO
PESSOAS	Comunidade: Efeitos leves reversíveis à integridade física; Empregados Próprios ou Terceiros: Eventos que resultem em primeiros socorros;	Comunidade: Efeitos severos reversíveis à integridade física ou sequelas não incapacitantes; (e/ou) Sequela incapacitante cuja causa seja relacionada a processos não operacionais; Empregados Próprios ou Terceiros: Eventos que resultem em lesões / doenças com afastamento do trabalho ou com tratamento médico ou restrição ao trabalho;	Comunidade: Efeitos irreversíveis à integridade física, com sequelas incapacitantes permanentes, cuja causa seja relacionada a processos operacionais; Empregados Próprios ou Terceiros: Eventos que resultem em lesões / doenças com vida mudada ou 1 fatalidade;	Comunidade: 1 fatalidade cuja causa seja relacionada a processos operacionais; (e/ou) Fatalidade(s) cuja causa seja relacionada a processos não operacionais; Empregados Próprios ou Terceiros: Eventos que resultem em múltiplas fatalidades;	Comunidade: Múltiplas fatalidade(s), cuja causa seja relacionada a processos operacionais.
MEIO AMBIENTE	Impacto ambiental de baixa magnitude, com abrangência pontual que demanda medidas simples de controle para minimizar os efeitos negativos. O ambiente afetado não perde a sua integridade (composição, estrutura e funções).	Impacto ambiental de média magnitude, com abrangência local que demanda medidas simples de controle e/ou mobilização de recursos internos para minimizar os efeitos negativos. O ambiente afetado restabelece sua integridade em até 1 semana após evento.	Impacto ambiental de média magnitude, com abrangência adjacente que demanda medidas simples de controle e mobilização de recursos internos para mitigar os efeitos negativos. O ambiente afetado restabelece sua integridade de 1 semana até 5 anos após evento.	Impacto ambiental de alta magnitude, com abrangência municipal que demanda mobilização de recursos internos e/ou externos, medidas de reparação e/ou compensação para mitigar os efeitos negativos. O ambiente afetado restabelece sua integridade de 5 a 10 anos após evento.	Impacto ambiental de alta magnitude, com abrangência municipal ou regional que demanda mobilização de recursos internos e/ou externos, medidas de reparação e/ou compensação que pouco contribuem para mitigar os efeitos negativos. O ambiente afetado restabelece sua integridade em tempo superior a 10 anos ou não restabelece sua integridade.
FINANCEIRO	≤ US\$ 100 MM	> US\$ 100 MM - US\$ 300 MM	> US\$ 300 MM - US\$ 1 BI	> US\$ 1 BI - US\$ 3 BI	> US\$ 3 BI

Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A tabela 3 apresentada estabelece os critérios de classificação da criticidade dos riscos a partir de três dimensões principais: pessoas, meio ambiente e impacto financeiro, organizadas em cinco níveis crescentes de severidade: leve, moderado, significativo, crítico e muito crítico. Na dimensão pessoas, a classificação evolui desde efeitos leves e reversíveis que demandam apenas primeiros socorros, até cenários envolvendo múltiplas fatalidades relacionadas a processos operacionais. Na dimensão ambiental, a gradação considera a magnitude do impacto, sua abrangência (pontual, local ou regional), a necessidade de mobilização de recursos para mitigação e o tempo necessário para restabelecimento da integridade do meio afetado, podendo variar de efeitos mínimos sem perda de integridade até danos de grande proporção, com recuperação superior a dez anos ou irreversível. Já na dimensão financeira, os níveis são definidos por faixas de perdas estimadas, iniciando em valores inferiores a US\$ 100 milhões e alcançando montantes superiores a US\$ 3 bilhões nos casos muito críticos. Dessa forma, a tabela fornece parâmetros objetivos para avaliação da severidade das consequências, servindo como base estruturante para a aplicação da matriz de risco e para a padronização da classificação dos cenários analisados.



Figura 27- Tipos de Cenários
Fonte: Empresa pesquisada (2026)

A figura 27 exemplifica os três cenários de risco: inerente, inexistência de controles preventivos e mitigatórios, o cenário é considerado em seu máximo grau de severidade; residual, considera-se os controles preventivos e mitigatórios definidos na documentação de engenharia conforme a fase de execução da análise de riscos de processo; e projetado * considera-se os controles preventivos e mitigatórios definidos na documentação de engenharia conforme a fase de execução da análise de riscos de processo e a inclusão das recomendações elaboradas nas análises de riscos de processos.

Além disso é analisado a probabilidade do risco, que é a medida da chance ou possibilidade de ocorrência de um evento, indicando o quanto é provável que determinado fato aconteça, com base em incertezas, experiências passadas ou condições conhecidas, conforme tabela:

Tabela 4 – Tabela de Probabilidade

PROBABILIDADE (CATEGORIA)	TÍPICA DESCRIÇÃO DA CATEGORIA (USO ANÁLISES QUALITATIVAS DE RISCO) Horizonte de 1 ano
MUITO REMOTO	Erro Humano: - Múltiplas falhas humanas devem ocorrer em condições adequadas à realização da atividade, com treinamento e procedimento. Histórico: - Nenhum histórico conhecido de ocorrências na empresa ou ocorrido em outra empresa e mudanças implementadas em tecnologia e segurança. - Não existe histórico de ocorrência de eventos iniciadores (causas), nem histórico de falha preventiva de Elementos Críticos de Controle (barreiras). Aplicável a operação ou projeto: - Ruptura por falha mecânica de equipamentos sob pressão com existência de inspeção e manutenção; sem histórico de sobrecarga de pressão, temperatura ou vibração, sem histórico de comprometimento por trincas ou perda de espessura. - Evento ou cenário em que seja necessária a falha de vários sistemas de proteção (número maior ou igual a 3 barreiras preventivas). Desempenho - Aplicável a estruturas geotécnicas: - Não há deficiências físicas e nenhum histórico de ocorrência de eventos iniciadores para o modo de falha nesta estrutura. - Existem vários controles de engenharia preventivos implementados para o modo de falha e nenhum histórico de falha desses controles na instalação ou em qualquer outro lugar da Vale. Falhas nunca ocorreram na indústria para modos e condições de falha semelhantes.
REMOTO	Erro Humano: - Dupla falha humana em condições adequadas, com treinamento e procedimento. Histórico: - Histórico de ocorrência conhecido em outra empresa, porém nunca ocorrido na Vale. Aplicável a operação ou projeto: - Falha dupla de barreiras de segurança (Elementos Críticos de Controle) ou equipamentos; - Ruptura de equipamentos estáticos, linhas e acessórios sujeitos a inspeção - Em cenários com produtos perigosos, presença de poucos elementos sujeitos a vazamento¹, com condições e inspeções adequadas. Desempenho - Aplicável a estruturas geotécnicas: - Não há deficiências físicas e nenhum histórico de ocorrência de eventos iniciadores para o modo de falha na estrutura. - Há pelo menos um controle de engenharia preventivo e um controle baseado em sistema implementados para o modo de falha e nenhum histórico de falha desses controles na estrutura ou em qualquer outro site da Vale, no entanto, falhas ocorreram na indústria para modos e condições de falha semelhantes.
POSSÍVEL	Erro Humano: - Cenários que dependem de falha humana única em condições adequadas, com treinamento e procedimento. Histórico: - Histórico de ocorrência na empresa, mas nunca ocorrido nesta unidade. - Existe histórico de ocorrência de eventos iniciadores (causas), mas não há histórico de falha de elementos críticos de controle preventivo (barreiras). Aplicável a operação ou projeto: - Falha única de barreiras de segurança (ECC) ou de equipamento (não relacionados com vazamentos em equipamentos estáticos sujeitos à inspeção) - Em cenários com produtos perigosos, presença de poucos elementos sujeitos a vazamento¹, equipamentos não degradados, mas com inspeção deficiente. Desempenho - Aplicável a estruturas geotécnicas: - Sabe-se que existe uma deficiência ou defeito físico, no entanto, o defeito não é grave. Não há histórico de ocorrência de eventos iniciadores significativos para modos de falha associados à deficiência e nenhuma evidência de progressão dos modos de falha. - Há pelo menos um controle de engenharia preventivo implementado para o modo de falha ou vários controles baseados em sistema e nenhum histórico de falha desses controles na instalação, no entanto, falhas ocorreram

PROVÁVEL	Erro Humano: - Inexistência de treinamento e procedimento, em presença de condições de trabalho adequadas. Histórico: - Histórico de ocorrência nessa unidade uma vez ao ano. - Existe histórico de ocorrência de eventos iniciadores (causas) mais de uma vez ao ano, e existe histórico de falha dos elementos críticos de controle (barreiras) com frequência menor que 1 vez ao ano. Aplicável a operação ou projeto: - Histórico de ocorrência menor que 1 por ano ou situação que já esteve próxima de ocorrer e nenhuma alteração feita no sistema. - Ruptura ou quebra de equipamentos reconhecidamente degradados ou com inspeção deficiente. - Em cenários com produtos perigosos, presença de vários elementos sujeitos a vazamento¹, condições degradadas, ou inspeção deficiente. Desempenho - Aplicável a estruturas geotécnicas: - Sabe-se que existe uma deficiência ou defeito físico significativo. - Existe um histórico de ocorrência de eventos iniciadores significativos até uma vez por ano e alguma evidência indireta de pequena progressão do modo de falha. - Existem controles de engenharia e controles baseados em sistema limitados para o modo de falha ou há histórico de falha frequente dos controles implementados na instalação para o modo de falha.
MUITO PROVÁVEL	Erro Humano: - Atividade frequente com inexistência de treinamento e procedimento, em presença de condições de trabalho adversas Histórico: - Histórico de ocorrência nesta unidade da Vale mais de uma vez por ano. - Existe histórico de ocorrência de eventos iniciadores mais de uma vez ao ano, e existe histórico de falha dos elementos críticos de controle (barreira) mais de uma vez ao ano. Aplicável a operação ou projeto: - Histórico de uma ou mais ocorrências por ano e nenhuma alteração feita no sistema. - Histórico de uma ou mais ocorrências por ano em plantas similares. Desempenho - Aplicável a estruturas geotécnicas: - Sabe-se que existe uma deficiência ou defeito fundamental grave. - Há histórico de ocorrência de eventos iniciadores significativos uma ou várias vezes por ano e evidência direta de progressão do modo de falha. - Não há controles projetados ou controles eficazes implementados na instalação para o modo de falha.

Fonte: Empresa Pesquisada (2026)

A tabela 4 apresentada estabelece os critérios de classificação da probabilidade de ocorrência dos eventos de risco, organizando-os em cinco categorias crescentes: muito remoto, remoto, possível, provável e muito provável, considerando um horizonte de análise de um ano. A definição das categorias baseia-se em aspectos como falha humana, histórico de ocorrência na unidade ou em outras plantas, frequência de eventos iniciadores, existência de falhas em elementos críticos de controle (barreiras), condições operacionais e integridade dos equipamentos. A categoria muito remoto refere-se a eventos sem histórico conhecido na empresa ou no setor, associados a falhas improváveis e ausência de evidências de degradação ou deficiência de controles. A classificação remoto contempla ocorrências raras, com registros externos ou eventos isolados, mas com controles adequados implementados. Na categoria possível, considera-se a existência de histórico interno ou eventos iniciadores ocasionais, ainda que sem falhas recorrentes de barreiras críticas. A classificação provável caracteriza situações com ocorrência mais frequente, registros repetidos ou falhas associadas a deficiências nos controles preventivos. Por fim, a categoria muito provável representa cenários com repetição anual ou múltiplas ocorrências, histórico de falhas em barreiras e evidências claras de fragilidade sistêmica. Dessa forma, a tabela fornece parâmetros técnicos e padronizados para estimar a frequência dos eventos, permitindo maior consistência na aplicação da matriz de risco e na determinação do nível de criticidade dos cenários analisados.

Por fim a combinação entre a severidade das suas categorias com a probabilidade classificará o seu cenário de risco conforme a matriz de risco:

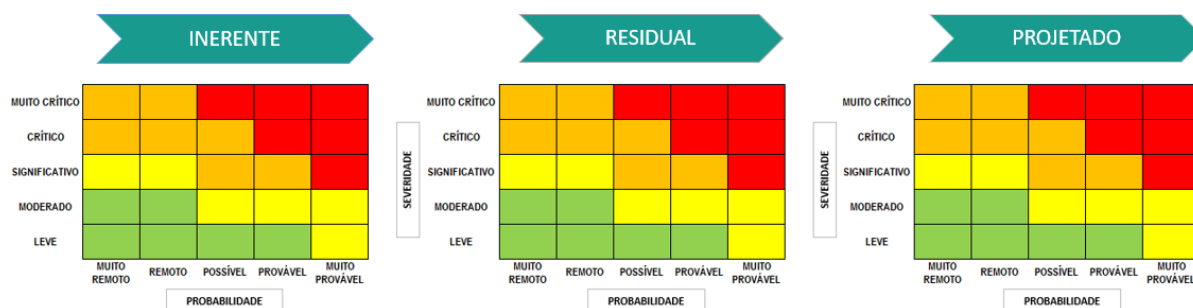


Figura 28- Matriz de risco
Fonte: Empresa pesquisada (2026)

A Figura 28 apresenta a matriz de risco utilizada para a classificação dos cenários identificados na aplicação do método HAZOP. A matriz é estruturada a partir da combinação entre probabilidade de ocorrência e severidade das consequências, permitindo a determinação do nível de criticidade de cada evento analisado. Essa ferramenta possibilita a priorização dos riscos de acordo com seu potencial de impacto sobre a segurança das pessoas, meio ambiente, ativos e continuidade operacional.

A matriz é representada por diferentes faixas de cores, cada uma correspondente a um nível de criticidade. A cor verde representa risco baixo, indicando situações com baixa probabilidade e/ou consequências de impacto limitado, sendo aceitáveis sob controle operacional rotineiro. A cor amarela corresponde ao risco médio, caracterizando cenários que demandam acompanhamento e controle gerencial, a fim de evitar sua evolução para níveis superiores. A cor laranja indica risco alto, representando eventos com potencial significativo de impacto, que exigem ações corretivas prioritárias, reforço de salvaguardas e monitoramento sistemático. Por fim, a cor vermelha representa risco muito alto, associada a cenários críticos, com elevada severidade e/ou probabilidade, que requerem intervenção imediata e tratamento prioritário antes da continuidade ou retomada plena da operação.

A utilização da matriz de risco permite padronizar a classificação dos cenários analisados, conferindo maior objetividade ao processo decisório e estabelecendo critérios claros para a definição das prioridades de mitigação no contexto da retomada operacional da usina.

4.3.3 Aplicação da Método

A aplicação do HAZOP foi dividida em duas partes planejamento e execução.

- Planejamento

Foi definido a equipe multidisciplinar, responsável pela execução da análise, estabelecendo representantes de cada área, manutenção mecânica, elétrica, instrumentação, automação, engenharia, segurança ocupacional, meio ambiente, processo, etc. Com a definição do time, foram realizados levantamentos dos documentos de projeto e NR (fluxogramas de processos, modelo 2D e 3D, lista de instrumentos e equipamentos, diagramas elétricos, declaração de escopo do projeto e manuais) com intuito de apoiar a atividade. Por fim, foram definidas as agendas (dia e horário) para execução da análise de risco.

- Execução

A etapa de execução se inicia a partir do mapeamento dos nós pelo time multidisciplinar formado, seguindo a rota de processo, conforme a imagem 7, na qual cada equipamento presente representa um nó, em que foi considerado como primeiro o britador e finaliza no transportador de correia.

Com os nós definidos, a partir do uso de parâmetros e palavras guias são levantados os riscos pertinentes para cada nó, que resultam no preenchimento da causa e efeito relacionado ao equipamento. Posteriormente é classificado a severidade inerente, probabilidade e categoria e prioridade, ressalva-se que para o cenário inerente não é considerado medidas de controle ou salvaguardas.

Em seguida é realizada análise da severidade residual, seguindo o mesmo processo da inerente, porém nesta etapa são apontados e considerados os controles existentes de mitigação do risco. Na próxima etapa são propostas recomendações que possam reduzir o risco, a partir disso é classificado o cenário de severidade projetado, que leva as mesmas considerações de categoria, probabilidade e prioridade. Assim chega ao resultado final da análise HAZOP, e os resultados foram os seguintes:

- Britador:

Na análise de risco do britador, foram considerados desvios relacionados principalmente ao nível elevado no chute de alimentação, à composição inadequada do material processado, incluindo presença de material não britável, e a falhas no sistema hidráulico, como o desengate de mangueiras. Esses desvios podem resultar em transbordamento de material, danos à câmara de britagem, paradas não programadas e exposição de pessoas a riscos mecânicos e hidráulicos, impactando diretamente a segurança operacional e a continuidade do processo.

Tabela 5 – Análise de Risco Britador

ID N.º	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N1	Britador	NÍVEL	MAIOR	Nível maior na ante-câmara (chute de alimentação do britador)	Entupimento da ante-câmara, causado por: Característica do material (granuloquímica) ou umidade Desprendimento de revestimentos	Perda de contenção de minério dos britadores	Transbordamento do chute (piso é em concreto)
N1	Britador	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Granuloquímica divergente da condição de projeto	Granuloquímica divergente da condição de projeto	Parada operacional	Sobrecarga do britador Alterações da composição gera impactos operacionais nos equipamentos a jusante
N1	Britador	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Presença de material não metálico não britável (material orgânico)	Presença de material não metálico não britável (material orgânico)	Parada operacional	Rompimento da correia do britador devido a obstrução pela presença de material não metálico não britável
N1	Britador	FLUXO	DESCONTROLADA (O)		Desengate da mangueira	Atingidos por chicoteamento de mangueira com óleo hidráulico dos britadores	Atingidos por chicoteamento de mangueira com óleo hidráulico (confirmar temperatura e pressão de operação)

SEVERIDADE INERENTE					
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO	PROBABILIDADE E INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
Leve	Leve	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
Significativo	Moderado	NA	Muito Provável	Significativo	Muito Alta

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Sensor de nível alto intertravado parando os alimentadores (e o circuito a montante)	Leve	Leve	Leve	Provável	Leve	Baixa
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	Significativo	Moderado	NA	Muito Provável	Significativo	Muito Alta

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	Leve	Leve	Leve	Provável	Leve	Baixa
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
Instalar sistema anti-chicoteamento das mangueiras do circuito hidráulico do britador	Significativo	Moderado	NA	Provável	Significativo	Alta

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Conforme a tabela 5, os cenários analisados apresentaram, na condição inerente, probabilidade elevada, com severidades variando de leve a significativa, resultando em prioridades de risco entre média e muito alta. A presença de sensor de nível alto intertravado, responsável por interromper os alimentadores e o circuito a montante, promoveu redução do risco em alguns cenários. Contudo, o desvio associado ao chicoteamento de mangueiras do circuito hidráulico manteve risco residual elevado, sendo definida como ação a implementação de sistema anti-chicoteamento, o que reduziu a probabilidade do evento e resultou em risco projetado classificado como alto, representando ganho relevante para a segurança operacional.

- Peneira:

Para a peneira, foi considerado o desvio associado à composição descontrolada do material, caracterizado por granulometria divergente da condição de projeto. Esse desvio pode

resultar em sobrecarga da peneira e partição inadequada nos decks de peneiramento, ocasionando parada operacional e impactos operacionais nos equipamentos a jusante do circuito.

Tabela 6 – Análise de Risco Peneira

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N2	Peneira	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (0)	Granulométrica divergente da condição de projeto	Granulométrica divergente da condição de projeto	Parada operacional	Sobrecarga da peneira / partição inadequada nos decks de peneiramento Alterações da composição gera impactos operacionais nos equipamentos a jusante Cegamento dos módulos de peneira

SEVERIDADE INERENTE					
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO	PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
NA	Leve	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	NA	Leve	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	NA	Leve	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

De acordo com a tabela 6, o cenário apresenta, na condição inerente, alta probabilidade de ocorrência, com severidade classificada como leve, resultando em prioridade de risco média. Considerando que não há salvaguardas nem ações adicionais associadas a esse desvio, a classificação do risco permanece inalterada nas condições residual e projetada, evidenciando a criticidade operacional associada ao controle da alimentação do peneiramento.

- Hidrociclone:

Na sequência do processo, na etapa de classificação, foi avaliado o desvio relacionado ao parâmetro pressão, com condição maior que a de projeto, caracterizado pela operação do hidrociclone acima da pressão especificada. Esse cenário decorre da pressão acima da condição de projeto e pode resultar na projeção de componentes e material, ocasionando rompimento de elementos do hidrociclone, perda de contenção e riscos significativos à integridade física das pessoas e ao equipamento.

Tabela 7 – Análise de Risco Hidrociclone

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N3	Hidrociclone	PRESSÃO	MAIOR	Obs.: cenário identificado considerando que a pressão de operação esteja acima da condição de projeto permitindo projeção de componentes e material	Pressão acima da pressão de projeto	Projeção de componentes / material do hidrociclone	Rompimento de componentes devido a sobrepressão com perda de contenção (danos a pessoas e ao equipamento)

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
Significativo	Moderado	Leve	Muito Provável	Significativo	Muito Alta

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Controle de pressão via válvula (2 válvulas automáticas e 4 manuais) Instrumento monitorando a pressão no distribuidor do hidrociclone	Significativo	Moderado	Leve	Provável	Significativo	Alta

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	Significativo	Moderado	Leve	Provável	Significativo	Alta

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Com base na tabela 7, esse cenário apresenta, na condição inerente, probabilidade muito provável e severidade significativa, configurando prioridade de risco muito alta. A existência de controles de pressão por meio de válvulas automáticas e manuais, associados à instrumentação de monitoramento da pressão no distribuidor do hidrociclone, reduz a probabilidade de ocorrência, resultando em risco residual classificado como alto. Na ausência de ações adicionais, o risco projetado permanece no mesmo patamar do residual, reforçando a necessidade de controle rigoroso das condições operacionais de pressão ao longo da classificação.

- Separador Magnético:

Continuando o processo de concentração, foi identificado o desvio associado ao parâmetro granulometria, em condição superior à especificada, caracterizado pela presença de material contaminante na alimentação do separador magnético de alta intensidade. Esse desvio decorre da entrada de partículas fora da faixa granulométrica adequada e pode resultar no entupimento das matrizes internas do equipamento, em função do reduzido espaçamento entre elas, ocasionando parada operacional.

Tabela 8 – Análise de Risco Separador Magnético

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N4	Separador magnético de alta intensidade	GRANULOMETRIA	MAIOR	Presença de material contaminante	Presença de material contaminante	Parada operacional	Entupimento das matrizes dentro do separador magnético (espaçamento entre 1 e 2 mm)

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Inserir peneira linear antes do equipamento	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Tendo referência a tabela 8, o cenário apresenta, na condição inerente, probabilidade muito provável e severidade classificada como leve, resultando em prioridade de risco média. Na ausência de salvaguardas específicas, a classificação do risco permanece inalterada na condição residual. Com a implementação da ação recomendada, correspondente à instalação de peneira linear a montante do equipamento, o risco projetado mantém a severidade, porém passa a apresentar maior controle da alimentação, reduzindo a recorrência do entupimento e contribuindo para o aumento da confiabilidade operacional do separador magnético de alta intensidade.

- Célula Rougher Flotação:

Avançando para a etapa de classificação, no circuito rougher, foram avaliados desvios relacionados ao aumento do nível, à composição descontrolada da polpa, ao fluxo inadequado de ar para flotação e à perda de mistura no tanque. O aumento de nível está associado à falta de saída pelas tubulações de rejeito ou concentrado, decorrente do fechamento indevido da válvula dardo, podendo resultar em transbordamento de polpa contendo reagentes do circuito. Os desvios de composição e fluxo decorrem de dosagem inadequada de reagentes e de alimentação incorreta de ar, enquanto a perda de mistura está relacionada a falhas elétricas ou eletromecânicas, com efeitos concentrados na perda de rendimento operacional e em problemas de qualidade e produção.

Tabela 9 – Análise de Risco Célula Rougher

ID Nº	Equipamento / Ação	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
NS	Circuito Rougher de flotação	NÍVEL	MAIOR	Aumento do nível causado pela falta de saída pelas tubulações de rejeito 20" ou concentrado 20" com redução para 14"	Fechamento indevido da válvula dardo (controle operacional da interface)	Transbordamento de polpa com reagentes do circuito Rougher de flotação	Transbordamento de polpa com reagentes (diluídos)
NS	Circuito Rougher de flotação	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Excesso ou falta de dosagem de reagentes (soda, amido, aminas)	Dosagem inadequada de reagentes (soda, amido, aminas)	Perda de rendimento operacional	Problemas de qualidade e produção
NS	Circuito Rougher de flotação	FLUXO	DESCONTROLADA (O)	Excesso ou falta de alimentação de ar para flotação	Alimentação inadequada de ar para flotação	Perda de rendimento operacional	Problemas de qualidade e produção
NS	Circuito Rougher de flotação	MISTURA	NENHUM(A)	Parada da agitação no tanque	Falta de energia elétrica ou problema eletromecânico	Perda de desempenho operacional	Problemas de qualidade e produção

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
Leve	Moderado	Leve	Muito Provável	Moderado	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Canaleta do sistema de drenagem de piso flotação mecânica (caixas de contenção com bomba submersa - caixas de coleta de água industrial apenas)	Leve	Moderado	Leve	Possível	Moderado	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	Leve	Moderado	Leve	Possível	Moderado	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Em consonância com a tabela 9 na condição inerente, os cenários apresentam probabilidade muito provável, com severidades classificadas entre leve e moderada, resultando em prioridade de risco média. A presença do sistema de drenagem de piso da área de classificação, com canaletas e caixas de contenção, reduz parcialmente os efeitos do transbordamento, promovendo a redução da probabilidade para possível nesse cenário específico e mantendo o risco residual classificado como médio. Para os demais desvios, a classificação permanece inalterada nas condições residual e projetada, evidenciando que o circuito rougher demanda controle operacional contínuo para evitar perdas de desempenho e impactos na qualidade do processo.

- Circuito Scavenger Flotação:

De forma análoga ao circuito rougher, no circuito scavenger foram avaliados desvios associados ao aumento do nível, à composição descontrolada da polpa, ao fluxo inadequado de ar para flotação e à perda de mistura no tanque. O aumento de nível está relacionado à falta de saída pelas tubulações de rejeito, em função do fechamento indevido da válvula dardo, podendo resultar em transbordamento de rejeitos do circuito scavenger. Os desvios de composição, fluxo e mistura decorrem de dosagem inadequada de reagentes, alimentação incorreta de ar e falhas elétricas ou eletromecânicas, impactando diretamente o desempenho do circuito.

Tabela 10 – Análise de Risco Célula Scavenger

ID N6	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N6	Circuito Scavenger	NÍVEL	MAIOR	Aumento do nível causado pela falta de saída pelas tubulações de rejeito 16" ou concentrado 8"	Fechamento indevido da válvula dardo (controle operacional da interface)	Transbordamento de rejeito do circuito Scavenger 1 045 CF-03	Transbordamento de rejeitos
N6	Circuito Scavenger	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Excesso ou falta de dosagem de reagentes	Dosagem inadequada de reagentes (opção de dosagem de amido)	Perda de rendimento operacional	Problemas de qualidade e produção na recuperação de rejeitos
N6	Circuito Scavenger	FLUXO	DESCONTROLADA (O)	Excesso ou falta de alimentação de ar para flotação	Alimentação inadequada de ar para flotação	Perda de rendimento operacional	Problemas de qualidade e produção na recuperação de rejeitos
N6	Circuito Scavenger	MISTURA	NENHUM(A)	Parada da agitação no tanque	Falta de energia elétrica ou problema eletromecânico	Perda de desempenho operacional	Problemas de qualidade e produção

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
Leve	Moderado	Leve	Muito Provável	Moderado	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Canaleta do sistema de drenagem de piso flotação mecânica (caixas de contenção com bomba submersa - caixas de coleta de água industrial apenas)	Leve	Moderado	Leve	Possível	Moderado	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	Leve	Moderado	Leve	Possível	Moderado	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Dessa forma, conforme a tabela 10, assim como no rougher, os cenários apresentam probabilidade muito provável na condição inerente, com severidades variando entre leve e moderada, resultando em prioridade de risco média. A presença do sistema de drenagem de piso da flotação mecânica atua na mitigação dos efeitos de transbordamento, reduzindo a probabilidade desse evento específico para possível e mantendo o risco residual classificado como médio. Na condição projetada, a classificação de risco permanece inalterada, evidenciando que o principal ganho da análise está na padronização do controle operacional, garantindo estabilidade do circuito scavenger e redução de perdas na recuperação de rejeitos.

- Circuito Cleaner Flotação:

Em continuidade ao processo de classificação, no circuito cleaner foram avaliados desvios associados ao aumento do nível, à composição descontrolada da polpa e ao fluxo inadequado de ar para flotação. O aumento de nível está relacionado à falta de saída pelas tubulações de rejeito ou concentrado, decorrente do fechamento indevido da válvula mangote, podendo resultar em transbordamento de polpa contendo reagentes do circuito cleaner. Os desvios de composição e fluxo decorrem de dosagem inadequada de reagentes (soda, amido e opção de aminas) e de alimentação incorreta de ar para flotação, ocasionando perda de rendimento operacional e problemas de qualidade e produção.

Tabela 11 – Análise de Risco Célula Cleaner

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N7	Circuito Cleaner de Flotação	NÍVEL	MAIOR	Aumento do nível causado pela falta de saída pelas tubulações de rejeito ou concentrado	Fechamento indevido da válvula mangote (controle operacional da interface)	Transbordamento de polpa com reagentes do Circuito Cleaner de flotação 045-CF-07	Transbordamento de polpa com reagentes (diluídos)
N7	Circuito Cleaner de Flotação	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Excesso ou falta de dosagem de reagentes (soda, amido, e opção de aminas)	Dosagem inadequada de reagentes (soda, amido, e opção de aminas)	Perda de rendimento operacional	Problemas de qualidade e produção
N7	Circuito Cleaner de Flotação	FLUXO	DESCONTROLADA (O)	Excesso ou falta de alimentação de ar para flotação	Alimentação inadequada de ar para flotação	Perda de rendimento operacional	Problemas de qualidade e produção

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
Leve	Moderado	Leve	Muito Provável	Moderado	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Canaleta do sistema de drenagem de piso flotação em colunas (caixas de contenção com bomba submersa - caixas de coleta de água industrial apenas)	Leve	Moderado	Leve	Possível	Moderado	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	Leve	Moderado	Leve	Possível	Moderado	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média
	NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Conforme apresentado a tabela 11, diferentemente dos circuitos rougher e scavenger, não foi identificado desvio associado à mistura no circuito cleaner, uma vez que esta etapa opera com configuração de flotação em colunas, nas quais a homogeneização da polpa ocorre predominantemente por regime hidráulico e contato gás-líquido, não dependendo de sistemas de agitação mecânica dedicados. Dessa forma, não há cenário de parada de mistura associado a falhas eletromecânicas, como ocorre nos tanques de flotação mecânica.

Sendo assim, na condição inerente, os cenários avaliados apresentam probabilidade muito provável, com severidades entre leve e moderada, resultando em prioridade de risco média. A existência do sistema de drenagem de piso da flotação em colunas contribui para a mitigação dos efeitos de transbordamento, reduzindo a probabilidade desse evento específico para possível e mantendo o risco residual classificado como médio. Na condição projetada, a

classificação de risco permanece média, evidenciando que o desempenho do circuito cleaner está diretamente associado ao controle operacional do nível, da dosagem de reagentes e do fornecimento de ar.

- Espessador:

Na sequência do processo, na etapa de espessamento, o espessador de concentrado apresenta como principal desvio a composição descontrolada, caracterizada pela saída de concentrado pelas bombas em vazão inferior à alimentação, ocasionando aumento da densidade do material no interior do equipamento. Esse cenário decorre de falha nas bombas de descarga, podendo resultar em assoreamento do material, sobrecarga mecânica do rake e, conseqüentemente, parada operacional.

Tabela 12 – Análise de Risco Espessador

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N8	Espessador de concentrado	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Saída de concentrado (via bombas Bombas) menor do que alimentação causando aumento na densidade do material no espessador	Falha nas bombas (saída de concentrado menor do que alimentação)	Parada operacional	Saída de concentrado (via bombas Bombas) menor do que alimentação causando aumento na densidade do material no espessador, podendo causar danos no rake devido ao assoreamento do material no espessador, e consequente parada operacional

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Indicação e controle de torque do rake do espessador via unidade hidráulica (conforme Descritivo da lógica de funcionamento para os espessadores) Intertravamento do rake com a elevação da densidade e torque (para evitar danos ao rake)	NA	NA	Leve	Possível	Leve	Baixa

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	NA	NA	Leve	Possível	Leve	Baixa

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

De acordo com a tabela 12, na condição inerente, o cenário apresenta probabilidade muito provável e severidade leve, resultando em prioridade de risco média. A existência de indicação e controle de torque do rake via unidade hidráulica, associada ao intertravamento do sistema em função do aumento de densidade e torque, reduz a probabilidade de ocorrência para possível, resultando em risco residual classificado como baixo. Na condição projetada, a classificação de risco permanece baixa, evidenciando a efetividade dos controles existentes para a mitigação do cenário analisado.

- Filtro:

Na sequência do processo, na etapa de filtragem, foram identificados dois desvios principais: umidade maior no produto (pellet feed) e pressão/vácuo menor no sistema de filtragem. O aumento da umidade está relacionado a falhas no sistema de vácuo, obstrução do meio filtrante ou variações na densidade da alimentação, resultando em perda de desempenho operacional e produto fora de especificação. Já a condição de vácuo insuficiente decorre de vazamentos no sistema, falhas em tubulações ou na bomba de vácuo, ocasionando perda de eficiência de filtragem e impacto na capacidade operacional.

Tabela 13 – Análise de Risco Filtro

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Cenário de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N9	Filtro	PRESSÃO	MEIOR	Vácuo insuficiente no sistema de filtragem	Vazamento no sistema, tubulação e mangas do filtro de disco / falha bomba de vácuo	Perda de eficiência de filtragem	Produto fora de especificação, perda na capacidade de filtragem
N9	Filtro	UMIDADE	MAIOR	Umidade no produto	Falha no sistema de vácuo / obstrução do meio filtrante / variação na densidade de alimentação	Perda de desempenho operacional	Produto fora da especificação

SEVERIDADE INERENTE			PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO			
NA	NA	Moderado	Muito Provável	Moderado	Média
NA	NA	Leve	Muito Provável	Leve	Média

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Pressões de água de selaem diferenciadas para as bombas. Para este controle de pressão é previsto usar válvulas PCV operadas por piloto	NA	NA	Leve	Provável	Leve	Baixa
Pressões de água de selaem diferenciadas para as bombas. Para este controle de pressão é previsto usar válvulas PCV operadas por piloto	NA	NA	Leve	Provável	Leve	Baixa
Este filtro deverá ser equipado com transmissor de pressão diferencial (PDIT) para monitoramento de entupimentos de filtro						

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
	NA	NA	Leve	Provável	Leve	Baixa
	NA	NA	Leve	Provável	Leve	Baixa

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Com base na tabela 13, na condição inerente, ambos os cenários apresentam probabilidade muito provável, com severidade classificada como leve a moderada, resultando em prioridade de risco média. A adoção de pressões diferenciadas de água de selagem nas bombas, por meio de válvulas PCV operadas por piloto, associada ao monitoramento por transmissor de pressão diferencial (PDIT) para identificação de entupimentos, reduz a probabilidade de ocorrência para provável, mantendo a severidade em leve e reclassificando o risco como baixo nas condições residual e projetada. Dessa forma, observa-se que os controles previstos são suficientes para mitigar os desvios identificados e garantir a estabilidade operacional da etapa de filtragem.

- Transportador de Correia:

Na etapa de transporte, o transportador de correia apresenta desvios associados ao fluxo acima da capacidade, à velocidade inferior à condição operacional, à composição descontrolada do material e ao fluxo desalinhado. O aumento de fluxo decorre da variabilidade na retomadora, que pode elevar a taxa acima da capacidade de projeto, enquanto a baixa velocidade da correia contribui para o acúmulo de material. A presença de material não britável pode provocar rasgos na correia, ocasionando perda de contenção de minério, e a alimentação descentralizada pode gerar desalinhamento da correia, resultando em queda de material. Adicionalmente, o acúmulo de material com travamento de roletes pode elevar a temperatura local, criando condições para incêndio no transportador de correia. Esses cenários podem levar ao colapso estrutural do transportador, com parada operacional prolongada e impactos financeiros significativos.

Tabela 14 – Análise de Risco Transportador de Correia

ID N°	Equipamento / Ativo	Parâmetro	Palavra Guia	Detalhe do desvio	Causas	Efeitos (Condição de Risco)	Descrição detalhada do efeito
N10	Transportador de correia	FLUXO	MAIOR	Fluxo maior na TC	Variabilidade na retomadora (taxa projeto correia 1,2 porém atinge 1,45 devido a variabilidade da retomadora)	Colapso da estrutura do transportador de correia	Transbordo de material gerando acúmulo e colapso da estrutura do transportador de correia. Parada operacional de 3 meses com impacto financeiro de 150MUSD (considerado 60 USD/t)
N10	Transportador de correia	VELOCIDADE	MENOR	Velocidade menor na TC	Baixa velocidade na TC	Colapso da estrutura do transportador de correia	Transbordo de material gerando acúmulo e colapso da estrutura do transportador de correia a montante. Parada operacional de 3 meses com impacto financeiro de 150MUSD (considerado 60 USD/t)
N10	Transportador de correia	COMPOSIÇÃO	DESCONTROLADA (O)	Composição descontrolada (presença de material não britável)	Presença de material não britável gerando rasgo no transportador de correia	Perda de contenção de minério do transportador de correia	Queda de material particulado através do rasgo, com parada operacional. Obs.: considerado severidade significativo devido a dimensão do equipamento
N10	Transportador de correia	FLUXO	DESCONTROLADA (O)	Fluxo descontrolado	Alimentação descentralizada de material causando desalinhamento no transportador de correia	Perda de contenção de minério do transportador de correia	Queda de material particulado, com parada operacional
N10	Transportador de correia	TEMPERATURA	MAIOR	O acúmulo de material aumenta o atrito do rolete, gerando calor e aumento de temperatura	Acúmulo de material com travamento do rolete	Incêndio no transportador de correia	O acúmulo de material aumenta o atrito do rolete, gerando calor e aumento de temperatura, causando um incêndio do transportador de correia

SEVERIDADE INERENTE					
PESSOAS	MEIO AMBIENTE	FINANCEIRO	PROBABILIDADE INERENTE	SEVERIDADE INERENTE (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO INERENTE
Crítico	Moderado	Moderado	Muito Provável	Crítico	Muito Alta
Moderado	Leve	Moderado	Muito Provável	Moderado	Média
Significativo	Moderado	Moderado	Muito Provável	Significativo	Muito Alta
Significativo	Moderado	Moderado	Muito Provável	Significativo	Muito Alta
Crítico	Moderado	Moderado	Muito Provável	Crítico	Muito Alta

Controles / Salvaguardas	SEVERIDADE RESIDUAL			PROBABILIDADE reduzida após FRP (RESIDUAL) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL (Automática)	PRIORIDADE DE RISCO RESIDUAL (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANCEIRO (Automática)			
Balança Intertravada parando o transportador de correia	Crítico	Moderado	Moderado	Provável	Crítico	Muito Alta
Sensor de velocidade intertravado parando o circuito a montante	Moderado	Leve	Moderado	Provável	Moderado	Média
Sensor de rasgo Intertravado parando o circuito a montante	Significativo	Moderado	Moderado	Provável	Significativo	Alta
Sensor de desalinhamento Intertravado parando o circuito a montante	Significativo	Moderado	Moderado	Provável	Significativo	Alta
Raspador primário e raspador secundário Guia lateral Sensor de nível alto (capacitivo) intertrava o carro móvel sistema a montante Sensor de desalinhamento Intertravado parando o TC (e o circuito a montante)	Crítico	Moderado	Moderado	Possível	Crítico	Alta

Recomendações / Ações	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA			PROBABILIDADE reduzida após FRP (PROJETADA) (Automática)	SEVERIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)	PRIORIDADE RESIDUAL PROJETADA (Automática)
	PESSOAS (Automática)	MEIO AMBIENTE (Automática)	FINANÇAS (Automática)			
Atualizar todos os PI&D's da planta para atender as adequações mapeadas	Crítico	Moderado	Moderado	Possível	Crítico	Alta
Dimensionamento do transportador de correia para a taxa de 1,45	Moderado	Leve	Moderado	Provável	Moderado	Média
	Significativo	Moderado	Moderado	Provável	Significativo	Alta
	Significativo	Moderado	Moderado	Provável	Significativo	Alta
Restabelecimento do SPCI	Crítico	Moderado	Moderado	Possível	Crítico	Alta

Fonte: Adaptado Empresa (2026)

Em conformidade com a tabela 14, na condição inerente, os cenários analisados apresentam probabilidade muito provável, com severidades classificadas entre moderada e crítica, resultando em prioridades de risco predominantemente muito altas. A adoção de controles e salvaguardas, como balança intertravada, sensores de velocidade, rasgo e desalinhamento, além de raspadores, guias laterais e sensores de nível, reduz parcialmente a probabilidade de ocorrência, mantendo os riscos residuais classificados entre médio e muito alto, a depender do cenário. Com a implementação das ações recomendadas, incluindo a atualização dos PI&Ds da planta, o dimensionamento do transportador para a taxa máxima de operação e o restabelecimento do sistema de proteção contra incêndio (SPCI), observa-se redução adicional da probabilidade, resultando em risco projetado classificado entre médio e alto, evidenciando ganhos relevantes na segurança operacional, integridade estrutural e confiabilidade do sistema de transporte.

- Resultado:

Por fim, a análise de risco aplicada por meio da metodologia HAZOP ao processo de beneficiamento mineral permitiu a identificação e classificação sistemática dos cenários críticos da planta. Conforme apresentado na Tabela 15, foram mapeados 26 cenários de risco, evidenciando a redução progressiva da criticidade entre os estágios inerente, residual e projetado.

Tabela 15 – Resumo Análise de Risco

Resumo Análise de Risco			
Classificação	INERENTE	RESIDUAL	PROJETADA
Muito alta	6	2	0
Alta	0	4	6
Média	20	16	16
Baixa	0	4	4

Fonte: Pesquisa Direta (2026)

Conforme apresentado na Tabela 15, foram analisados 26 cenários de risco associados aos equipamentos do processo de beneficiamento mineral. No cenário inerente, identificaram-se 6 riscos classificados como muito alta criticidade, representando 23% do total, enquanto 20 cenários (77%) foram classificados como média criticidade. Esse panorama inicial evidencia que, na ausência de salvaguardas consideradas formalmente, o processo apresenta exposição significativa a eventos de elevada severidade, com potencial impacto sobre a segurança das pessoas, integridade ambiental e continuidade operacional.

Com a consideração das salvaguardas existentes, observou-se, no cenário residual, uma redução de 66% dos riscos inicialmente classificados como muito altos, os quais foram reclassificados para alto, permanecendo apenas 2 cenários nessa condição. Paralelamente, verificou-se uma redução de 20% dos riscos médios para a classificação baixa, demonstrando que as barreiras já implementadas exercem papel efetivo na mitigação da probabilidade e/ou severidade dos eventos analisados.

No cenário projetado, após a proposição e incorporação das recomendações oriundas da análise HAZOP, ocorreu a eliminação total dos riscos classificados como muito altos, os quais foram reclassificados para alto, totalizando 6 riscos nessa categoria. As classificações de média e baixa criticidade permaneceram inalteradas em relação ao cenário residual, indicando estabilização do perfil de risco após as intervenções propostas.

Destaca-se que os 6 riscos classificados como alta criticidade devem ser tratados como prioritários no plano de gestão da usina. Esses cenários exigem monitoramento constante e sistemático, com atenção especial à integridade, funcionalidade e inspeção periódica das salvaguardas associadas, assegurando que os controles implementados mantenham sua

efetividade ao longo da operação. A perda de desempenho dessas barreiras pode resultar na elevação da criticidade e comprometer a estabilidade operacional.

Os riscos classificados como média criticidade, por sua vez, representam parcela significativa dos cenários avaliados e demandam gerenciamento contínuo, de modo a evitar sua progressão para níveis superiores de prioridade. A adoção de práticas de inspeção, manutenção preventiva e acompanhamento operacional sistemático torna-se fundamental para manter esses riscos sob controle.

Por fim, ressalta-se que o HAZOP constitui a primeira etapa estruturada de análise de risco no contexto da retomada operacional. Embora tenha se mostrado eficaz na identificação de desvios e vulnerabilidades do processo, recomenda-se a complementação com outras ferramentas de análise, como Análise Quantitativa de Risco (AQR), a fim de assegurar uma avaliação abrangente e robusta. Somente por meio da integração de múltiplas abordagens será possível garantir, de forma consistente, a retomada segura e sustentável das operações da usina.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são abordadas as conclusões alcançadas ao final do trabalho, bem como sugestões para futuros trabalhos.

5.1 Conclusão

A análise desenvolvida neste trabalho permitiu compreender, de forma estruturada, a exposição ao risco dos principais equipamentos que compõem o processo de beneficiamento mineral da planta estudada, especialmente em um contexto de retomada operacional. Mais do que identificar cenários isolados, o estudo evidenciou como os riscos se distribuem ao longo do fluxo produtivo e como determinados ativos assumem papel estratégico na estabilidade e continuidade da operação.

A redução progressiva da criticidade entre os cenários inerente, residual e projetado confirma a relevância das salvaguardas técnicas e administrativas existentes, bem como a importância da proposição de melhorias direcionadas. Entretanto, a permanência de riscos classificados como alta criticidade indica que o gerenciamento de riscos deve ser entendido como processo contínuo, exigindo monitoramento constante das variáveis operacionais e verificação periódica da eficácia das barreiras implementadas.

Sob a perspectiva organizacional, o estudo reforça que a aplicação estruturada da metodologia HAZOP vai além do atendimento a requisitos normativos, constituindo-se como instrumento de apoio à tomada de decisão, priorização de recursos e fortalecimento da cultura de segurança. Ao sistematizar os desvios, causas e consequências, o trabalho contribui para maior previsibilidade operacional e redução de incertezas em um ambiente industrial de elevada complexidade.

Assim, o estudo respondeu ao problema de pesquisa ao demonstrar como estruturar e aplicar uma análise de risco eficaz aos equipamentos do processo de beneficiamento de minério de ferro, contribuindo para a segurança, confiabilidade e sustentabilidade operacional da planta.

5.2 Recomendações

A partir do trabalho desenvolvido, recomendam-se os seguintes trabalhos futuros:

- Análise Multicamadas de Risco em Processos Industriais: Avaliação de Segunda e Terceira Camadas Complementares ao Método HAZOP;
- Análise de Riscos em Equipamentos Auxiliares do Beneficiamento Mineral por Meio da Metodologia HAZOP;
- Comparação entre Metodologias de Análise de Risco em Processos de Beneficiamento Mineral: Um Estudo Comparativo entre HAZOP e AQR.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 31000:2009 – Gestão de riscos – Princípios e diretrizes**. Genebra, 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/43170.html>

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Diretrizes para Segurança de Processos na Mineração**. Brasília: IBRAM, 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2024/05/Diretrizes-para-seguranca-de-processo-na-mineracao_web.pdf.

KERZNER, Harold. **Gerenciamento de Riscos: Uma Abordagem Sistêmica para Planejamento, Programação e Controle**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>.

BARROS, A. C. S. D. **Filtragem de rejeitos: aspectos técnicos e operacionais**. CETEM/MCT, 2009.

CHAVES, A. P. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2012.

FUERSTENAU, M. C.; JAMESON, G. J.; YOON, R.-H. **Froth Flotation: A Century of Innovation**. SME, 2007.

GUIMARÃES, R. C. et al. **Cominuição e classificação de minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2002.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010.

MARTINS, F. P. **Transporte de materiais na mineração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C. **Reagentes de flotação: fundamentos e prática**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

RIBEIRO, F. P.; HOLANDA, J. N. F. **Espessadores: princípios de operação e dimensionamento**. CETEM, 2012.

CHAVES, A. P. **Mineralogia e Técnicas Experimentais**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

GUIMARÃES, R. C.; GUIMARÃES, C. A.; GOMIDE, L. A. de C. **Cominuição e classificação de minérios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG/Escola de Engenharia, 2016.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. de A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MARTINS, A. P. **Transporte contínuo na mineração: correias transportadoras**. Belo Horizonte: Oficina de Textos, 2015.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C. **Flotação: princípios e prática**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2007.

RIBEIRO, R. R.; HOLANDA, J. N. F. **Reaproveitamento de água e manejo de rejeitos em plantas de beneficiamento mineral**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CCPS – Center for Chemical Process Safety. **Guidelines for Hazard Evaluation Procedures**. 3. ed. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2008.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications**. 3. ed. Boston: Prentice Hall, 2011.

CRUZ, T. M. **Gestão da Manutenção Industrial Integrada**. São Paulo: Érica, 2013.

GARCIA, A. M. **Gestão de riscos industriais: práticas e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2018.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão de riscos na mineração: guia de boas práticas**. Brasília: IBRAM, 2020.

ISO. **ISO 45001 – Sistemas de gestão de saúde e segurança ocupacional – Requisitos com orientação para uso**. Genebra, 2018.

NR-22. **Norma Regulamentadora de Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília: Ministério do Trabalho, 2023.

OLIVEIRA, R. S. **Análise de riscos em processos químicos e minerais**. São Paulo: Blucher, 2015.

RODRIGUES, S. C.; ALMEIDA, C. A. **Impactos ambientais da mineração: diagnóstico e controle**. Florianópolis: Editora UFSC, 2010.

SILVA, J. R. **Economia mineral e análise de custos**. Ouro Preto: CEFET-MG, 2014.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical Process Safety**. Disponível em: <https://ch506npc.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/08/chemical-process-safety-2nd-ed-daniel-a-crowl-joseph-f-louvar.pdf>.

QSP – Qualidade, Segurança e Produtividade. **Bow-Tie – Análise de Riscos**. Disponível em: <https://www.qsp.org.br/pdf/bow-tie.pdf>.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e prática da pesquisa**. 28. ed. Petrópolis: Vozes, 2011.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

TUBIS, A.; WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA, S.; WROBLEWSKI, A. **Risk assessment methods in mining industry — a systematic review**. Applied Sciences, v. 10, n. 15, p. 5172, 2020.

MOON, C. J.; WHATELEY, M. K. G.; EVANS, A. M. **Introduction to Mineral Exploration**. 2. ed. Blackwell Publishing, 2006.

PLETSCH, H. C. et al. **Tipos de risco e sua classificação: categorias de risco e respectivos tipos**. Revista Contabilidade, Gestão e Governança, Brasília, v. 23, n. 2, p. 141-158, 2020.

WILLS, B. A.; FINCH, J. **Wills' Mineral Processing Technology**. 8. ed. Elsevier, 2016.

VASCONCELOS, B. D.; SANTOS, V. D.; D'AMELIO, M. T. S. **Construção do sistema de hidroclonagem para separação sólido-líquido**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 2019.

LIMA, N.; ARAÚJO, A.; PERES, A. **Flotação: Princípios e Prática**. CETEM, 2005.

SAMPAIO, J. A. **Desaguamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2001.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. **Health hazards of mining and quarrying**. In: ILO Encyclopaedia of Occupational Health and Safety. 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **ISO/IEC 31010:2019 – Risk management: Risk assessment techniques**. Genève: ISO/IEC, 2019.

CARDELLA, B. **Segurança no trabalho e prevenção de acidentes: uma abordagem holística**. São Paulo: Atlas, 2011.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. 2. ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Fault Tree Handbook (NUREG-0492)**. Washington, DC, 1981.

SWARTZ, G. **Job Hazard Analysis: A Guide to Identifying Risks in the Workplace.**
Government Institutes, 2001.