

LILIAN MARCONDES LUSVARDI TAVARES

**FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE RISCO APLICADAS NA
MINERAÇÃO**

São Paulo

2015

LILIAN MARCONDES LUSVARDI TAVARES

**FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE RISCO APLICADAS NA
MINERAÇÃO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas
do curso de graduação do Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston

São Paulo

2015

TF. 2015
T 194f

Syeno 2753152

FICHA CATALOGRÁFICA

#2015u

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010013

Catálogo-na-publicação

Tavares, Lilian Marcondes Lusvardi

Ferramentas de Análise de Risco Aplicadas na Mineração / L. M. L.

Tavares -- São Paulo, 2015.

52 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Segurança na Mineração 2.Prevenção de Acidentes (Ferramentas, Análise) 3.Mineração a Céu Aberto 4.Mineração Subterrânea I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

RESUMO

As indústrias de maneira geral apresentam muitos riscos, a mineração especificamente é um dos setores que mais apresenta riscos, desde riscos a saúde do trabalhador a riscos econômicos para a empresa. Para que estes riscos sejam evitados ou ao menos mitigados, é necessário fazer uma análise de todas as condições perigosas presentes nos locais de interesse. Esta análise pode ser realizada com o auxílio de ferramentas de análise de risco. Este trabalho tem como objetivo entender as algumas dessas ferramentas (*Workplace Risk Assessment and Control*, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*, *Hazard and Operability Studies*, *Fault Tree Analysis*, *Event Tree Analysis* e *Bowtie*) e então realizar a análise de cinco eventos na área de lavra de mineração (a céu aberto e subterrânea) aplicando essas ferramentas. Os cenários analisados foram: desmonte (perfuração, carregamento e detonação), carregamento e transporte, deslizamento de talude, explosão e ventilação. A partir da análise e aplicação dos métodos acima citados, foi possível notar causas e consequências relacionados a cada evento, as possíveis barreiras para evitar ou mitigar as ameaças ou efeitos, e dependendo do método aplicado, como deveria ser a priorização das ações a serem todas. Cada ferramenta possui vantagens e desvantagens, por isso, em muitas situações é interessante aplicar mais de um recurso para que esses possam se complementar.

Palavras-chave: Segurança na Mineração; Prevenção de Acidentes (Ferramentas, Análise); Mineração a Céu Aberto; Mineração Subterrânea).

ABSTRACT

Industries in general present many risks, specifically mining, this is one of the sectors that present more risks, for example, risks to workers' health and safety and economic risks for the company. To avoid or at least mitigated the causes and consequences of this risks, it is necessary to analyze of all hazardous conditions present. This analysis can be performed using risk analysis tools. This study aims to understand some of these tools (Workplace Risk Assessment and Control, Failure Mode Effect and Criticality Analysis, Hazard and Operability Studies, Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis and Bowtie) and then perform five event analysis in the Mining field (open pit and underground mining) applying these tools. The scenarios analyzed were drilling, loading and blasting; loading and transporting; slope sliding; explosion; and ventilation. From the analysis and application of the methods mentioned before, it was possible to understand the causes and related consequences to each event, the possible barriers to prevent or mitigate threats or effects, depending on the method applied, and how the prioritization of actions to all barriers should be. Each tool has advantages and disadvantages, so in many situations it is useful to apply more than one resource so that they can complement each other.

Key-words: Mining Safety, Accident Prevention (Tools, Analysis), Open Pit Mining, Underground Mining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Matriz de Priorização de Risco.	13
Figura 2 - Esquema Árvore de Falha.....	18
Figura 3 - Esquema de uma Árvore de Eventos.	20
Figura 4 - Modelo do Queijo Suíço.	21
Figura 5 - Ferramenta de Análise de Risco <i>Bowtie</i>	22
Figura 6 - Triângulo de Coward.....	32
Figura 7 - Esboço de um talude.	33
Figura 8 - Matriz de Priorização de Risco.	46
Figura 9 - Esboço de uma Mina Subterrânea.....	47
Figura 10 - <i>Bowtie</i> de Explosão.....	53
Figura 11 - <i>Bowtie</i> de Deslizamento de Talude	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo das aplicações das ferramentas de análise de risco.	12
Tabela 2 - Classificação de Probabilidades e Consequências.	14
Tabela 3 - Valoração da Ocorrência e da Severidade.	15
Tabela 4 - Exemplos de palavras-guia.	16
Tabela 5 - Elementos da Árvore de Falhas.	19
Tabela 6 - Portas Lógicas da Árvore de Falha e suas funções.	19
Tabela 7 - Resumo das ferramentas adequadas e aplicadas para cada cenário	24
Tabela 8 - Valoração da ocorrência e da probabilidade para FMECA.....	38
Tabela 9 - FMECA para desmonte	38
Tabela 10 - WRAC para Carregamento e Transporte.....	45
Tabela 11 - HAZOP de Sistema de Ventilação	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BTA	<i>Bowtie Analysis</i>
DSST	Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho
ETA	<i>Event Tree Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode Effect and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Studies</i>
ISO	<i>International Organization for</i>
LIE	Limite Inferior de Explosividade
LIF	Limite Inferior de Inflamabilidade
LSE	Limite Superior de Explosividade
LSF	Limite Superior de Inflamabilidade
TEM	Ministério do Trabalho e Emprego
NPR	Número de Prioridade de Risco
OHSAS	<i>Occupational Health and Safety Assessment Series</i>
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
WRAC	<i>Workplace Risk Assessment and Control</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 <i>OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY ASSESSMENT SERIES 18001, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 31000 E AS ETAPAS DE GERENCIAMENTO DE RISCO</i>	10
3.2 TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES	11
3.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE RISCO	12
3.3.1 <i>WORKPLACE RISK ASSESSMENT AND CONTROL</i>	12
3.3.2 <i>FAILURE MODE EFFECT AND CRITICALITY ANALYSIS</i>	14
3.3.3 <i>HAZARD AND OPERABILITY STUDIES</i>	16
3.3.4 <i>FAULT TREE ANALYSIS</i>	17
3.3.5 <i>EVENT TREE ANALYSIS</i>	19
3.3.6 <i>BOWTIE</i>	20
4. METODOLOGIA	23
5. ANÁLISES E DISCUSSÕES	24
5.1 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE RISCO NA MINERAÇÃO	24
5.2 DESMONTE – PERFURAÇÃO, CARGA E DETONAÇÃO	24
5.3 CARREGAMENTO E TRANSPORTE	27
5.4 VENTILAÇÃO	29
5.5 EXPLOSÕES	31
5.6 DESLIZAMENTO DE TALUDES	33
6. CONCLUSÕES	35
7. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

A mineração é um dos setores industriais que mais apresenta riscos, tanto em relação aos riscos físicos aos quais os trabalhadores estão submetidos, quanto aos riscos econômicos provenientes da descontinuidade dos processos de lavra e tratamento de minério. Atualmente, a preocupação com os riscos envolvidos nos processos é cada vez maior, trazendo um enfoque maior em segurança, higiene e controle ambiental nas indústrias.

Neste ambiente inóspito, as causas dos acidentes podem ser resultado de condições inseguras, como manutenção insuficiente de equipamento e ventilação insuficiente em mina subterrânea; ou atos inseguros, provenientes de comportamentos inadequados, podendo estar associado à falta de informação.

Para que a mineração seja uma atividade segura, é necessário gerenciar eficientemente os riscos envolvidos, visando a identificação dos problemas de segurança, assim como as soluções sugeridas. Para diminuir esses riscos, políticas de segurança, higiene e controle ambiental devem ser implantadas e constantemente monitoradas.

Uma maneira de analisar os riscos envolvidos em diferentes áreas da mineração é através da utilização de ferramentas de análise de risco, estas possuem diferentes metodologias e são adequadas para diversos eventos. As ferramentas frequentemente utilizadas nas indústrias são: *Workplace Risk Assessment and Control*, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*, *Hazard and Operability Studies*, *Fault Tree Analysis*, *Event Tree Analysis* e *Bowtie*.

Através da utilização destas ferramentas, é possível identificar riscos e o grau de severidade de cada um deles, o que é crucial para a criação de medidas eficazes de controle de acidentes. Além disso, por meio delas atinge-se um melhor entendimento das condições de trabalho; desenvolvem-se locais de trabalho, tornando-os mais seguros; e as mudanças tecnológicas podem implementar as condições de trabalho, reduzindo riscos. Essas ferramentas auxiliam na priorização dos riscos e das medidas que devem ser tomadas, importante na gestão de uma indústria.

2. OBJETIVO

Este trabalho de formatura tem como objetivo estudar as ferramentas de análise de risco e suas aplicações em segurança e higiene na mineração, com enfoque na área de lavra, tanto para lavra a céu aberto como subterrânea. As ferramentas a serem analisadas são: *Workplace Risk Assessment and Control*, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*, *Hazard and Operability Studies*, *Fault Tree Analysis*, *Event Tree Analysis* e *Bowtie*, nos seguintes cenários de lavra: desmonte (perfuração, carregamento e detonação), carregamento e transporte, deslizamento de talude, explosão e ventilação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY ASSESSMENT SERIES 18001, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 31000 E AS ETAPAS DE GERENCIAMENTO DE RISCO

Em 1970, com o ato da Saúde e Segurança Ocupacional, o congresso dos Estados Unidos criou a *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) para assegurar condições saudáveis e seguras para os trabalhadores por meio da criação de normas e oferecendo treinamentos, assistência e educação. Esta é parte do Departamento do Trabalho. Assim como nos Estados Unidos, muitos outros países possuem órgãos para normatizar as condições de trabalho (segurança e saúde) (About OSHA, 2015).

No Brasil, há a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), esta é o Foro Nacional de Normalização, foi fundada em 1940, é uma entidade privada e sem fins lucrativos. O órgão governamental brasileiro responsável pela criação de normas é o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), este criou o Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho (DSST) para planejar as ações de fiscalização dos ambientes de trabalho. Vinculada ao Ministério do Trabalho, existe a Fundacentro que desenvolve pesquisas em segurança no trabalho, difunde conhecimento por meio de ações educativas e presta serviços à comunidade, órgãos públicos e empresariais. (Conheça a ABNT, 2015)

Com o intuito de unificar e padronizar as normas em relação a segurança e saúde dos trabalhadores, a OSHA juntamente com outros órgãos de diversas nações, por exemplo, Austrália, Irlanda, África do Sul e Inglaterra, criaram em 1999 a *Occupational Health and Safety Assessment Series* (OHSAS) 18001, que em 2007 foi atualizada. Esta tinha como objetivo controlar os riscos relacionados à segurança e saúde ocupacionais, por meio de identificação e controle de riscos, redução de potenciais acidentes, assistência a conformidade legal e aprimoramento de desempenho.

Assim como a OHSAS 18001, em 2009 surgiu a *International Organization for Standardization* (ISO) 31000, um padrão internacional de gerenciamento de risco desenvolvido pelo *ISO Technical Management Board Working Group*. A ISO define uma lista de diretrizes e princípios e sugere que as empresas adotem esses princípios. Ao aplicar este padrão, a empresa alcançaria vários benefícios, como o aprimoramento da habilidade de reconhecer condições perigosas (*hazards*), ameaças (*threats*) e oportunidades, melhoria na alocação de recursos de controle de riscos e na redução de perdas organizacionais, e aprimoramento do gerenciamento de incidentes.

Para que os riscos sejam reduzidos, algumas etapas de gerenciamento devem ser seguidas. O *Project Management Institute* (PMI) escreveu um guia, *Project Management Body of Knowledge* (PMBOK), um conjunto de práticas na gestão de projetos, sendo uma das áreas de conhecimento a Gestão de Riscos do Projeto. Conforme o PMBOK, as etapas de gerenciamento de risco incluem:

- a) Planejamento do gerenciamento de riscos: tem como objetivo decidir como as atividades de gerenciamento serão abordadas, planejadas e executadas;
- b) Identificação de condições perigosas (*hazards*) tem a função de determinar e detalhar os riscos que podem afetar o projeto;
- c) Análise qualitativa de riscos: analisa a probabilidade de ocorrência e a severidade, então determina a prioridade para ação.
- d) Análise quantitativa de riscos: analisa numericamente o efeito dos riscos identificados previamente;
- e) Planejamento de respostas a riscos: opções e ações são desenvolvidas para reduzir as vulnerabilidades encontradas;
- f) Monitoramento de respostas a riscos: riscos são acompanhados antes e depois das ações e novos riscos são identificados.

3.2 TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES

Em diferentes indústrias, o mesmo termo pode ser utilizado de diversas maneiras e, muitas vezes até em diferentes áreas de uma mesma indústria o mesmo termo pode possuir diferentes significados. Em segurança do trabalho, alguns termos, como acidente, risco e condição perigosa, são muito utilizados e devem ser compreendidos corretamente, pois muitas análises dependem destes conceitos.

Diferentes órgãos possuem definições específicas para os termos utilizados em segurança, neste trabalho, enfocam-se as definições da OHSAS e da ABNT. A primeira é uma das mais utilizadas mundialmente e a segunda é um conjunto de normas brasileiras.

Inicialmente, deve-se diferenciar acidente de incidente. Conforme a OHSAS 18001:1999, acidente é um “evento indesejado que resulta em morte, enfermidade, lesão, dano ou outras perdas”, já para a ABNT (NBR 14280/2001), acidente é a “ocorrência imprevista e indesejável, instantânea ou não, relacionada com o exercício do trabalho que provoca lesão pessoal ou decorrência de risco próximo ou remoto dessa lesão. Em relação a incidente, tanto a OHSAS 18001, como a ABNT, possuem a mesma definição: “evento que tenha resultado ou tenha potencial em resultar em um acidente, um incidente sem morte, sem enfermidade, lesão, dano ou outras perdas também é denominado como quase acidente” (Lapa, 2011).

Outros termos muito utilizados são condição perigosa, perigo e evento indesejável. Conforme a OHSAS, condição perigosa ou *hazard* é: fonte, situação ou ato com potencial de dano em termos de ferimentos ou problemas de saúde, ou uma combinação destes. Sendo assim, perigo ou *danger* refere-se à exposição a algo que possa causar danos ou lesão, isto é, exposição à condição perigosa. Esta exposição é denominada como evento indesejável.

Por fim, as últimas definições cruciais são risco, controles, barreiras e defesas. Para a OHSAS, risco é a combinação de três fatores: inicia-se com um evento potencial, então, combina-se com a probabilidade e a severidade da consequência, deve-se também considerar qual a probabilidade de um evento com

potencial dano ou exposição a esse dano ocorrer no futuro, e quão severos são os impactos em saúde e segurança se o evento ocorrer. Resumindo, risco é a relação entre a probabilidade de um evento ocorrer e a sua consequência. Como medidas mitigadoras de ocorrência e recorrência de eventos indesejados, existem os controles, as barreiras ou defesas, aqui usados como sinônimos. Para diminuir a probabilidade de ocorrência de um incidente, utilizam-se medidas de prevenção ou barreiras, já para atenuar as consequências, utilizam-se medidas de mitigação, e o melhor meio para gerenciar risco é através de seu controle (Lapa, 2011).

3.3 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE RISCO

Nas indústrias, diversos riscos estão envolvidos, podendo causar danos irreversíveis, sejam econômicos para a empresa ou para a saúde do trabalhador. Saber identificar, mensurar e priorizar esses riscos é essencial para um bom desenvolvimento da indústria. Para que esta tarefa seja possível, existem diversas ferramentas de análise de risco, neste trabalho será dado enfoque para as seguintes ferramentas: *Workplace Risk Assessment and Control*, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*, *Hazard and Operability Studies*, *Fault Tree Analysis*, *Event Tree Analysis* e *Bowtie*.

As ferramentas a serem descritas a seguir podem ser divididas em dois grandes grupos conforme suas aplicações, conforme a tabela 1. Tal classificação facilita entender como cada ferramenta se adequa a um cenário específico.

Tabela 1- Resumo das aplicações das ferramentas de análise de risco.

Ferramenta de análise de risco	Aplicação
<i>Fault Tree Analysis</i>	A análise é focada em um evento único
<i>Event Tree Analysis</i>	
<i>Bowtie</i>	
<i>Workplace Risk Assessment and Control</i>	É possível analisar diversos eventos simultaneamente
<i>Failure Mode Effect and Criticality Analysis</i>	
<i>Hazard and Operability Studies</i>	

(Elaboração própria)

3.3.1 WORKPLACE RISK ASSESSMENT AND CONTROL

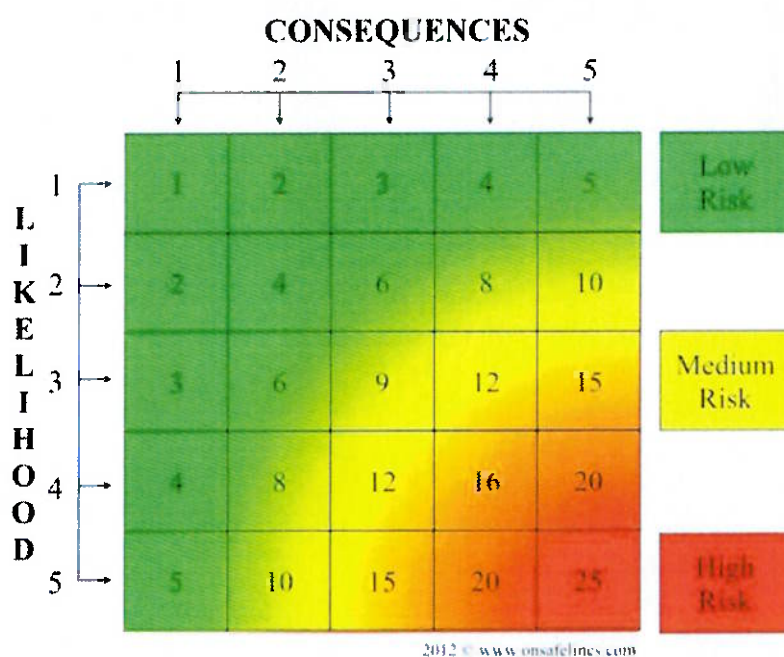
A ferramenta de análise de risco *Workplace Risk Assessment and Control* (WRAC), ou Avaliação e Controle de Riscos do Local de Trabalho, tem como principal característica uma abordagem ampla, na qual os eventos são analisados antes que qualquer dano tenha ocorrido no local em questão, de maneira pró ativa e sistemática, examinando toda e qualquer parte do ambiente de trabalho para assegurar que as condições perigosas foram entendidas e estão controladas. É uma

ferramenta de análise preliminar, usada para identificar as condições perigosas mais críticas e prever erros humanos associados com cada evento analisado.

Além dessas características, o WRAC é um método de análise qualitativo, ou seja, os níveis de risco são estabelecidos por meio de comparações com outros níveis de riscos, e então cada risco é classificado, observando-se o sistema total. Enquanto outras ferramentas são orientadas para processos e equipamentos, esta também é adequada para locais de trabalho com muitos colaboradores e com atividades muito dependentes dos operadores.

A análise é efetuada da seguinte maneira, desenha-se o fluxograma do local de trabalho, mapeando todos os processos envolvidos, focando nas principais condições perigosas, então os potenciais eventos não desejados (acidentes e incidentes) são identificados nas etapas de operações. A seguir, preenche-se um formulário contendo: Etapa de operação, Evento indesejado, Probabilidade, Consequência, Grau de risco, Controles atuais e Controles Recomendados. Para se determinar o grau de risco, utiliza-se uma Matriz de Priorização (Matriz de Risco) (Tabela 2 e Figura 1), e como mencionado anteriormente, os valores são qualitativos, ou seja, comparativos (NSW, 2009).

Figura 1- Matriz de Priorização de Risco.



(Risk Assessment Matrix, 2015).

Tabela 2 - Classificação de Probabilidades e Consequências.

Probabilidade	Consequências
5. Quase certo	5. Fatalidade
4. Provável	4. Lesão grave, resultando em incapacidade
3. Possível	3. Lesão requer atendimento hospitalar ou médico
2. Possível (sob circunstâncias trágicas)	2. Ferimentos leves, primeiro socorro necessário
1. Raro	1. Ferimentos leves, primeiro socorro não necessário

(Elaboração Própria)

A classificação do risco é calculada pela multiplicação da probabilidade de ocorrência com a consequência, sendo a probabilidade e a consequência definidas pela equipe envolvida na análise. Para a matriz em questão, quando o nível de risco se encontra entre 16 e 25, este é considerado alto e as atividades associadas deveriam ser imediatamente suspensas até a introdução de medidas de controle que mitiguem o risco. Para uma pontuação entre 9 e 15, o nível de risco é médio, e somente podem ser tolerados no curto prazo, medidas de controle devem ser planejadas. Por fim, quando o nível de risco varia entre 1 e 8, o risco é normalmente aceitável, contudo deve ser monitorado frequentemente (NSW, 2009).

3.3.2 FAILURE MODE EFFECT AND CRITICALITY ANALYSIS

A ferramenta *Failure Mode Effect and Criticality Analysis* (FMECA), também conhecida como Análise de Efeitos e Criticalidade dos Modos de Falha, tem como objetivo analisar um sistema e identificar possíveis falhas de cada componente presente neste sistema, individualizando cada parte, e então prever como os efeitos destas falhas interferem em outros componentes, ou seja, o impacto destas falhas sobre o sistema. Após a identificação de falhas e determinação dos modos de falha, deve-se hierarquizá-las por meio da valoração dos efeitos, e identificar as que tem efeito múltiplo sobre outros componentes e sobre o sistema e, por fim, avaliar as adequações e corrigir as proteções existentes.

A implantação desta ferramenta deve ser acompanhada de um formulário, o qual possui os seguintes campos: Item a ser analisado, Modo de falha, Efeitos em outro item, Efeitos no sistema, Ocorrência, Severidade, Criticalidade e Controle. A Ocorrência refere-se à probabilidade de a falha ocorrer, a Severidade representa a gravidade das consequências, e a Criticalidade é a multiplicação da ocorrência com a severidade. Outro fator também a ser considerado é o Índice de Detecção das Falhas, que está relacionado aos modos de falha ou às causas destes modos. Este valor mostra a eficiência dos controles de detecção, ou seja, quanto menor for seu valor, menor será a dificuldade para detecção. A diferença entre esta ferramenta e a FMECA é a ausência da análise da criticalidade e do índice de detecção de falhas, que somente a FMECA possui.

Após obtenção destes valores, é possível calcular o Número de Prioridade de Risco (NPR) para que então seja possível a hierarquização dos efeitos das falhas. O NPR é igual a multiplicação da Criticalidade com o Índice de Detecção. Sendo assim, quanto maior o NPR, maior sua prioridade e maior deve ser o enfoque dado a esta falha.

Existem dois tipos de FMECA, a Detalhada e a Funcional. A primeira analisa falha nos componentes dentro de um subsistema e a partir do reconhecimento de modo de falha do componente, examina-se os efeitos sobre o sistema (abordagem indutiva). Ao contrário, o segundo tipo analisa os subsistemas, identificando seus efeitos (abordagem dedutiva).

As principais etapas para a execução do FMECA são (Herpich & Fogliatto, 2013):

- a) Escolha dos membros da equipe: obrigatória a presença de pelo menos um responsável pelo projeto ou sistema pois entende como os sistemas funcionam e irá implementar as decisões tomadas, e um especialista nesta ferramenta para sanar eventuais dúvidas;
- b) Definição do sistema e dos componentes: quando há muitos componentes, deve-se focar naqueles os quais, ao falharem, comprometem a função, a segurança e a ergonomia, ou que falham com mais frequência, ou que sofreram manutenção;
- c) Fluxogramas, modelos confiabilísticos e diagrama funcional de blocos: utilizados para compreender como as várias partes do sistema interagem e facilitar a verificação dos caminhos críticos;
- d) Descrição das funções dos componentes: muito importante por ser uma referência para os modos de falha;
- e) Modos de falha de cada componente: identificação dos possíveis modos de falha e classificação da falha;
- f) Efeitos causados no sistema: essencial para definir os processos de manutenção;
- g) Avaliação dos efeitos e análise das causas do modo de falha: são usadas escalas para estimar o impacto nos custos e imagem da empresa, ao meio ambiente, às normas regulatórias e à segurança do cliente, e identifica-se as causas dos modos de falha;
- h) Revisão do formulário e seleção das ações principais: define-se as ações de melhorias.

Para valoração da probabilidade de ocorrência e das consequências, a tabela 3 pode ser utilizada.

Tabela 3 - Valoração da Ocorrência e da Severidade.

Valoração da Ocorrência	Valoração da Severidade
5. Quase certo	5. Fatalidade (pessoas)
4. Provável	4. Lesão a pessoas
3. Possível	3. Suspensão temporária do empreendimento
2. Possível (sob circunstâncias trágicas)	2. Parada no setor, quebra de equipamento
1. Raro	1. Alteração de prazos ou qualidade

(Elaboração própria)

Ao se utilizar essa ferramenta em uma empresa, muitos benefícios são alcançados, como a identificação dos componentes críticos, focando-se nestes para implementação de planos de ação. Isto gera melhorias no desempenho da empresa de maneira geral e também auxilia no estabelecimento de prioridades das ações corretivas. Contudo, é difícil obter taxas confiáveis para a falha de componentes, não é levado em consideração falhas humanas e ergonomia, as interfaces operacionais são subavaliadas.

3.3.3 HAZARD AND OPERABILITY STUDIES

A ferramenta de análise de risco *Hazard and Operability Studies* (HAZOP) também é conhecida como Estudo de Condição Perigosa e Operabilidade. É utilizada para a identificação de condições perigosas em sistemas e problemas operacionais em termos de projeto da planta e erros humanos. É um método sistemático de questionamento aberto que tem como base a hipótese de que todos os eventos que possuem riscos são causados pelo desvio das intenções de operações. Assim como a ferramenta WRAC, esta também é uma ferramenta qualitativa e, além disso, possui uma abordagem indutiva.

Esta ferramenta requer uma pesquisa minuciosa de toda a instalação, normalmente em forma de fluxograma dos processos e diagramas de instrumentação. É necessária a divisão da planta em nós, ou seja, pontos de análise, os quais compreendem componentes como trocadores de calor e bombas. Para definir os desvios de intenção do projeto são utilizadas "palavras-guia" (Tabela 4) que caracterizam diversas variáveis do processo como fluxo, nível, pressão, concentração e temperatura, de acordo com alterações que elas podem sofrer. Alterações estas que causam desvios de quantidade, no tempo ou na direção ideal em que elas deveriam aparecer (Aguilar, 2001).

Tabela 4 - Exemplos de palavras-guia.

Palavra-guia	Desvio Considerado	Exemplo
Mais de	Acréscimo quantitativo em relação ao projetado	Mais fluxo
Menos de	Decréscimo quantitativo em relação ao projetado	Menos fluxo
Nenhum	Negação do projetado	Nenhum fluxo
Reverso	Oposição ao projetado	Fluxo contrário
Outro de	Substituição completa	Outro fluxo

(Elaboração própria)

A partir da análise destes desvios, procura-se descobrir quais são as causas e entender quais são as consequências, e verificar se realmente podem ocorrer e se as consequências produzem efeitos danosos e perdas, pois caso produzam uma condição perigosa deve ser tomada uma ação de prevenção ou proteção, considerando que as ações atuais não sejam suficientes.

Resumidamente, a sequência de análise de um projeto consiste em: identificação das intenções de projeto, desvios, causas, consequências (condição perigosa e dificuldades operacionais), avaliação de proteções e prevenções, e ações corretivas adicionais, sendo todos os nós definidos inicialmente analisados. Para a tomada de algumas decisões, às vezes, são necessárias mais informações sobre determinado processo.

A eficácia de um HAZOP depende da exatidão das informações disponíveis (completas e atualizadas), as habilidades dos membros do time, a destreza do time em comparar adequadamente as consequências e manter um senso de proporção entre os gastos de recursos para reduzir um risco. Os elementos cruciais para esta ferramenta são time, descrição completa do processo, palavras-guia relevantes, condições propícias para brainstorming, gravar as reuniões e seguir com o planejado (Aguiar, 2001).

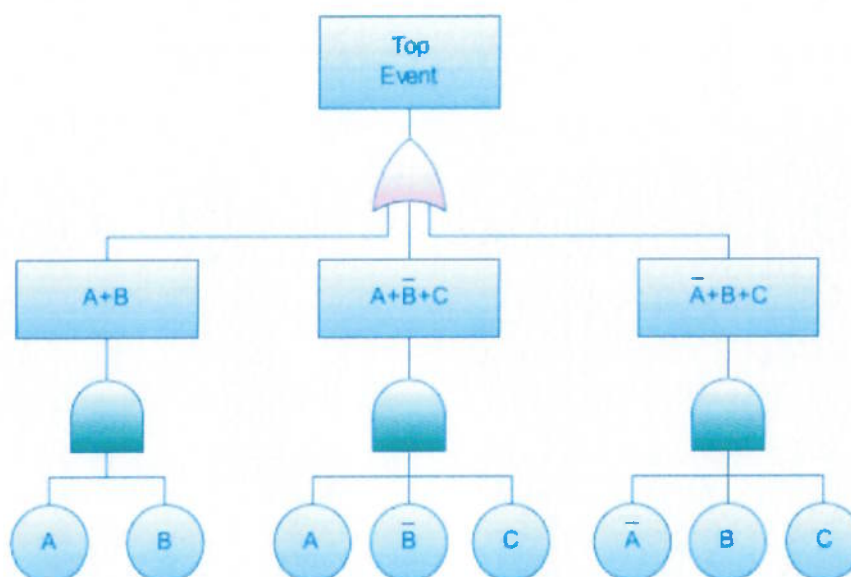
Este método possui muitas vantagens, como ajudar a confrontar condições perigosas que são difíceis de quantificar e que sejam causadas por erro humano ou que sejam difíceis de detectar, analisar, isolar e prever. Este método não requer uma medida exata de probabilidade de ocorrência do desvio ou habilidade de detectá-lo. Baseado em "brainstorming", é uma metodologia sistemática e abrangente, mais simples e intuitiva que outras ferramentas de análise de risco. Contudo, possui desvantagens como não avaliar as condições perigosas provenientes da interação entre as diferentes partes do sistema, não priorizar as condições perigosas (os times podem adicionar esta tarefa caso sintam a necessidade) e, por fim, não tem como objetivo medir a eficácia de controles existentes ou propostos.

3.3.4 FAULT TREE ANALYSIS

A ferramenta *Fault Tree Analysis* (FTA) conhecida como Análise de Árvore de Falhas, tem como objetivo um desenvolvimento lógico e sistemático de fatores contribuintes para um determinado evento indesejado. Por possuir uma representação gráfica, torna a visualização das relações entre os componentes do sistema mais fácil. Normalmente, para um evento ocorrer, são necessárias uma ou mais falhas e esta ferramenta permite analisar a combinação de fatores iniciantes para um evento.

Além disso, a FTA possui uma abordagem dedutiva, ou seja, a partir de um evento, pesquisa-se as suas possíveis causas, sendo este evento denominado evento topo. Ele é um comportamento anormal do sistema, o qual pode ser global ou específico de algum componente. É a partir dele que se inicia a construção da árvore, este é consequência de uma sequência de eventos possíveis, os quais devem ser investigados, e são dispostos em série ou paralelo, utilizando os operadores lógicos "e" e "ou", dando forma ao diagrama (Tabela 5 e Tabela 6). Outro elemento da FTA é o evento primário, este não sofre nenhuma alteração durante a análise, são independentes uns dos outros (Lima, Naghettini, & Espósito, 2013). Na Figura 2, um exemplo de uma árvore de falha.

Figura 2 - Esquema Árvore de Falha.



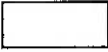
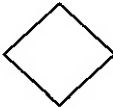
(Schmitt, 2013)

A árvore de falhas pode ser analisada de maneira qualitativa, com o objetivo de individualizar modos de falhas mais sensíveis ou identificar vulnerabilidades no sistema, ou de maneira quantitativa atribuindo-se probabilidades aos eventos primários para avaliar a probabilidade de um evento indesejável ocorrer e também com o objetivo de estimar a confiabilidade do sistema.

De maneira simplificada, a construção de uma árvore de falhas envolve os seguintes passos: definição do evento topo, sendo necessários relatos de falhas ocorridas e potenciais, entendimento da estrutura e funcionamento do sistema, construção da árvore de falhas, representando as relações que possam causar o evento topo, avaliação da árvore de falhas, calculando a probabilidade de ocorrência do evento topo (para análise quantitativa) e, por fim, implementação de ações corretivas, focando nos itens que possuem baixa confiabilidade.

Diferentemente das ferramentas apresentadas anteriormente, esta permite quantificar eventos e, além disso, visualizar combinações entre efeitos, identificar falhas de operação, de manutenção e humanas sendo, utilizada com frequência na investigação de acidentes graves e também na construção de programas gerenciais de segurança industrial e de prevenção de acidentes. Contudo, exige um grande volume de trabalho e é de difícil aplicação em sistemas muito complexos.

Tabela 5 - Elementos da Árvore de Falhas.

Símbolo Lógico	Evento	Observações
	Evento intermediário ou evento de topo	
	Evento básico	Acontecimento iniciador, falha inicial ou evento que não carece de maior desenvolvimento
	Evento condicional	Condições específicas ou restrições que se aplicam a qualquer porta lógica.
	Evento exterior	Evento que ocorre habitualmente.
	Evento por desenvolver	Ramo que não é objeto de maior desenvolvimento por não ter importância ou por não haver informação suficiente que o fundamente.

(Lima, Naghettini, & Espósito, 2013)

Tabela 6 - Portas Lógicas da Árvore de Falha e suas funções.

Símbolo	Definição Porta	Observações
	Porta OU	O evento de saída ocorre se pelo menos um evento ocorrer.
	Porta E	O evento de saída ocorre se todos os eventos anteriores ocorrerem.
 Entrada	Porta de Entrada	O evento advém de outra sequência (ou folha) e dá continuidade na folha corrente.
 Saída	Porta de Saída	Este símbolo representa uma transferência, ou seja, que a árvore continua em outra folha.

(Lima, Naghettini, & Espósito, 2013)

3.3.5 EVENT TREE ANALYSIS

A *Event Tree Analysis* (ETA), conhecida como Análise da Árvore de Eventos, possui uma abordagem indutiva que consiste em: a partir de um evento iniciador, identificam-se diversas consequências, possíveis, decorrentes deste evento. É um

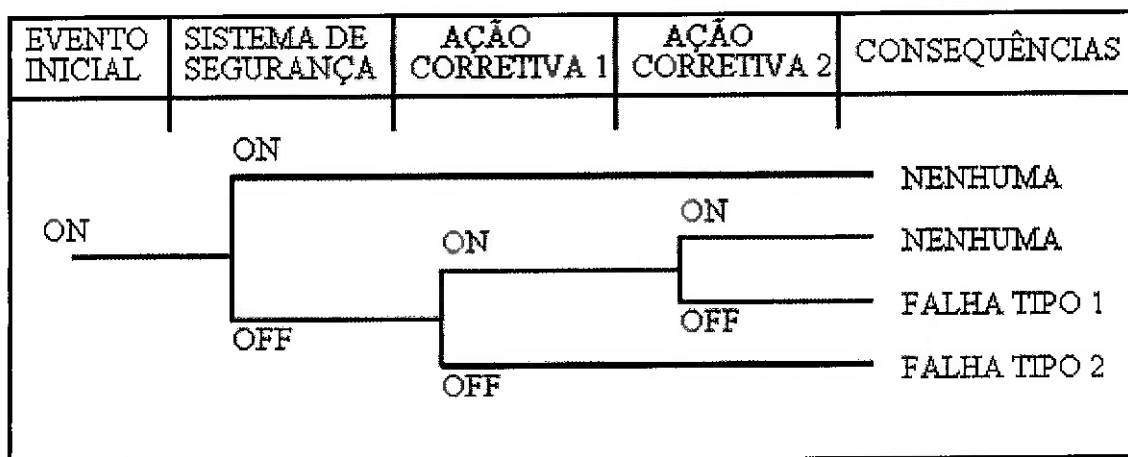
método quantitativo que possui o objetivo de determinar a frequência das consequências citadas anteriormente.

De forma simplificada, a árvore de eventos pode ser desenvolvida a partir dos seguintes passos: definição do evento inicial (normalmente a falha de um componente), definição de ações para minimizar os efeitos do evento inicial, desenho da árvore lógica de decisões com diversas sequências de eventos, provenientes do evento inicial e, por fim, cálculo das probabilidades de cada consequência a qual pode levar a uma falha do sistema (Figura 3).

Esta ferramenta destaca a relação entre os estados operacionais dos sistemas ou funções de segurança, e requer um conhecimento profundo da associação do evento iniciador com suas funções e os sistemas de segurança.

A ETA deve ser lida da esquerda para a direita, sendo que está se inicia com o evento inicial e continua com os eventos sequenciais. A linha superior representa o "não", ou seja, o evento não ocorre, e a linha inferior representa o "sim".

Figura 3 - Esquema de uma Árvore de Eventos.



(Alternativo, 2015)

A abordagem metódica, estruturada e rígida é uma vantagem deste método, assim como o fato de permitir a avaliação de probabilidades, pode ser eficazmente realizada em diferentes níveis de detalhes, e combina o sistema com o ambiente e a interação humana. Porém, possui desvantagens como: possui apenas um evento iniciador, sendo assim, são necessários vários ETAs para avaliar a consequência de múltiplos eventos iniciadores, falhas parciais não são distinguíveis e requer um analista com experiência no time para o desenho da árvore.

3.3.6 BOWTIE

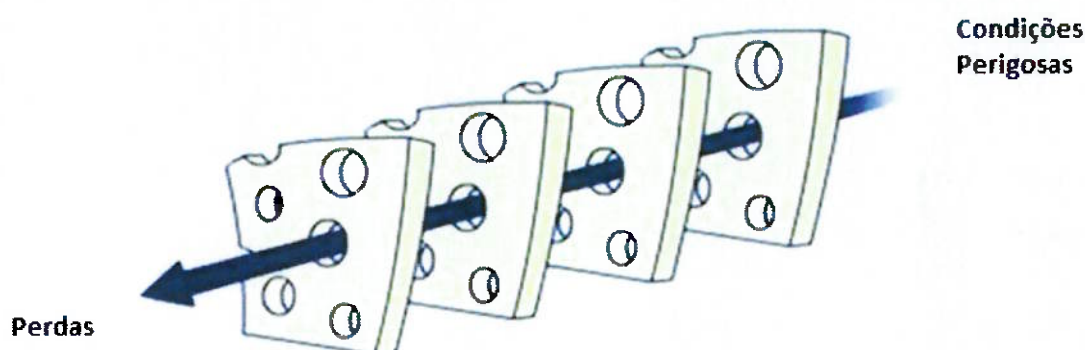
A última ferramenta a ser descrita é a *Bowtie*, esta é utilizada para analisar e demonstrar relações causais em cenários de alto risco. De maneira simplificada, este método proporciona os possíveis acidentes que podem ocorrer devido a uma condição perigosa, as consequências e causas destes acidentes, as medidas de

controle que devem ser tomadas para evitar o acidente ou suas consequências e o que ocorre se essas medidas falham.

Este método teve a influência de outras ferramentas de análise de risco na sua construção, em relação à análise da cadeia de eventos, tem-se a árvore de falhas (lado esquerdo do *Bowtie*), a árvore de eventos (lado direito do *Bowtie*), e a identificação de medidas de controle se baseia no *Swiss Cheese Model* de James Reason.

O *Swiss Cheese Model* (Modelo do Queijo Suíço) foi desenvolvido em 1990 por James T. Reason, o qual partiu da seguinte hipótese: vários controles impedem as condições perigosas de causarem danos, contudo nenhum controle é 100% eficaz (Figura 4). Todo controle possui uma fraqueza ou defeito e, quando esses defeitos dos controles se alinham, a condição perigosa se torna um perigo. De forma metafórica, este modelo pode ser representado por uma fileira de queijos suíços (representando os controles) que quando os buracos se alinham, ocorre a falha.

Figura 4 - Modelo do Queijo Suíço.



(Safety Management Systems, 2015)

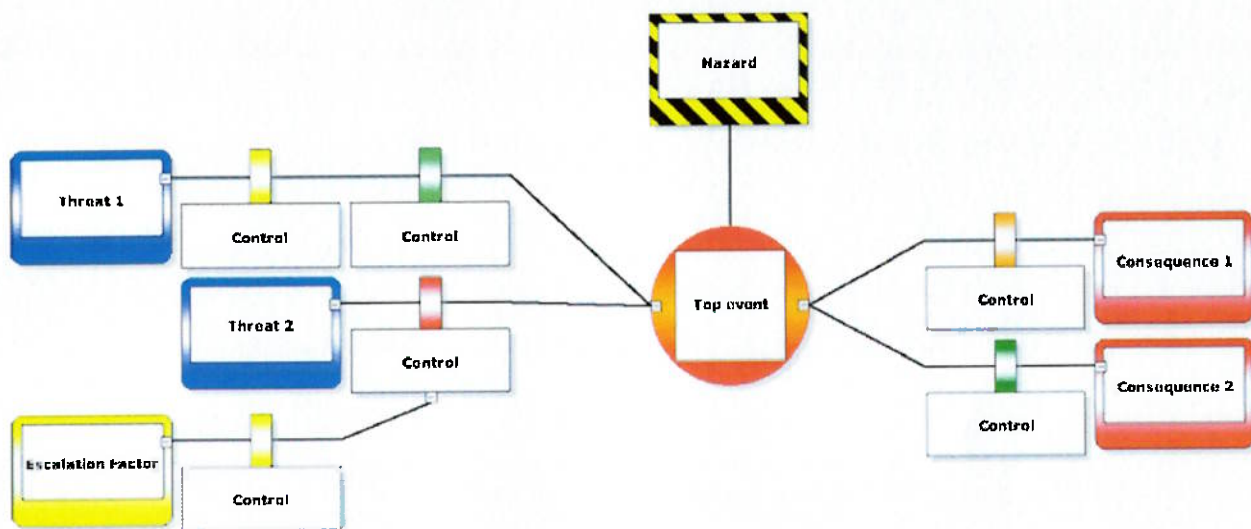
Os elementos os quais compõem esta ferramenta são: condição perigosa, evento topo, ameaças, consequências, medidas de controle e medidas de recuperação. A condição perigosa como descrita anteriormente, não é o perigo em si, mas se possui o potencial de causar algum dano, se proporciona um impacto negativo quando o controle é perdido, então o *Bowtie* possui a finalidade de entender como não permitir que esta condição perigosa se torne um evento indesejável. Assim que a condição perigosa é determinada, define-se o evento topo, isto é, quando o controle da condição perigosa é perdido, ainda não ocorreu nenhum dano ou impacto negativo. Ou seja, o evento topo é determinado antes que qualquer dano ocorra (The Bowtie Method, 2015).

A próxima análise se refere às ameaças as quais podem causar o evento topo. Podem existir múltiplas ameaças, estas devem ser muito bem determinadas, evitando-se causas genéricas como erro humano ou falha no equipamento.

Considerando que o evento topo ocorreu, então existem as consequências. Assim como nas ameaças, podem haver várias consequências e, da mesma maneira, devem-se evitar consequências genéricas, como dano financeiro, tornando-se mais fácil definir as barreiras necessárias (Figura 5).

Por fim, têm-se as medidas de controle. Estas possuem a finalidade de não deixar que as ameaças causem uma perda de controle (evento topo) e podem ser divididas em basicamente dois tipos: comportamento humano e *hardware* ou tecnologia. É importante saber qual é a eficiência da barreira, para caso seja necessário, implementá-la, tornando-a mais eficaz. Se as barreiras falharem e o evento topo ocorrer, existem as medidas de recuperação ou mitigação as quais têm como função minimizar os danos das consequências (The Bowtie Method, 2015).

Figura 5 - Ferramenta de Análise de Risco *Bowtie*.



(The Bowtie Method, 2015)

Resumindo, a construção de um *Bowtie* pode ser realizada seguindo os seguintes passos: definição da condição perigosa, definição do evento topo, identificação das ameaças, das barreiras para cada ameaça e os fatores que podem causar a falha de cada barreira, identificação das consequências, das medidas de recuperação para cada consequência e os fatores que podem causar a falha de cada uma destas medidas.

Este método possui como benefício sua forma de apresentação, ou seja, é de fácil visualização, facilitando a comunicação. Além disso, possui uma abordagem prática a qual mobiliza muitas pessoas na sua construção, ou seja, as pessoas tomam conhecimento da importância de medidas de controle e mitigação, é aplicável para inúmeros tipos de riscos, demonstra a eficácia de controles já existentes e identifica onde os recursos devem ser investidos para a redução de riscos. Contudo, é inteiramente qualitativo, sendo complementar para métodos quantitativos e depende da experiência das pessoas envolvidas.

4 METODOLOGIA

Após o estudo e compreensão das ferramentas de análise de risco, analisou-se como estas ferramentas podem ser aplicadas na mineração, com enfoque na área de lavra, tanto subterrânea, como a céu aberto. Os cenários analisados foram: desmonte (perfuração, carregamento e detonação), carregamento e transporte, ventilação, explosões e deslizamento de taludes.

Para que isso fosse possível, descreveu-se cada cenário, quais eram as etapas envolvidas, se havia o envolvimento de pessoas e equipamentos, se existia confinamento ou não, quantos eventos estavam envolvidos neste cenários e como os componentes de um determinado cenário interagem entre si principalmente em caso de falhas.

Então, entendeu-se a necessidade de cada cenário e comparou-se com as funções e aplicações das ferramentas descritas na seção 3. Sugeriu-se a aplicação de determinadas análises para cenários específicos, e a seguir aplicou-se uma dessas ferramentas sugeridas a uma situação hipotética.

5 ANÁLISES E DISCUSÕES

5.1 APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE RISCO NA MINERAÇÃO

As ferramentas de análise de risco WRAC, HAZOP, FMECA, FTA, ETA e BTA possuem diferentes enfoques, cada uma proporcionando vantagens e desvantagens para diferentes cenários. As operações unitárias e eventos a serem analisados são: desmonte (perfuração, carga e detonação), carregamento e transporte, ventilação, explosões em mina subterrânea e deslizamento de taludes. Será apresentada uma breve explicação sobre cada um dos tópicos citados, para que seja possível entender o motivo de determinada ferramenta ser mais adequada a um cenário específico.

Em relação ao enfoque das ferramentas, tem-se que a WRAC, HAZOP e FMECA tratam múltiplos eventos simultaneamente, portanto são mais genéricas. Em contraposição, FTA, ETA e BTA focam num único evento, analisando-o de forma mais detalhada, ou seja, são bem específicas.

Considerando a aplicação de cada ferramenta (evento único e múltiplos eventos) e outras características descritas anteriormente, determinou-se quais ferramentas seriam adequadas para cada cenário, e então, uma delas foi selecionada e aplicada ao caso específico, conforme tabela 7.

Tabela 7 - Resumo das ferramentas adequadas e aplicadas para cada cenário

Cenário	Ferramentas adequadas	Ferramenta selecionada
Desmonte	WRAC, FMECA	FMECA
Carregamento e transporte	WRAC, HAZOP	WRAC
Ventilação	WRAC, HAZOP	HAZOP
Explosões em mina subterrânea	BTA	BTA
Deslizamento de taludes	BTA	BTA

(Elaboração própria)

5.2 DESMONTE – PERFURAÇÃO, CARGA E DETONAÇÃO

O desmonte, considerando as três operações unitárias perfuração, carga e detonação, é utilizado tanto na mineração a céu aberto quanto na subterrânea, por exemplo, na escavação de galerias, túneis, poços e chaminés, prospecção de jazidas, desenvolvimento de frentes de lavra, produção de minério, em pedreiras para a produção de brita e na exploração de rochas ornamentais.

Tanto na mineração a céu aberto como na subterrânea, em relação à produção de minério, o objetivo do desmonte é fragmentar a rocha permitindo o transporte e alimentação das operações subsequentes, como o transporte e beneficiamento. A fragmentação e distribuição granulométrica devem ser adequadas para permitir o carregamento, transporte, manuseio e beneficiamento eficientes, além disso, o desmonte influencia no formato da pilha, nos danos no maciço rochoso remanescente, nos impactos ambientais e na otimização dos custos (influenciando nas operações seguintes).

No caso da mineração a céu aberto, focando em desmonte de bancadas, na primeira operação unitária do desmonte, perfuração, o equipamento utilizado é a perfuratriz e quando necessário, compressores de ar são envolvidos no processo. O carregamento de explosivos é composto pela carga de fundo (por exemplo, dinamite), a carga de topo (normalmente explosivos bombeáveis como emulsão), sistema de iniciação (*booster*, estopim, cordel detonante, espoletas) e o tamponamento. Subsequentemente, ocorre a detonação, sendo que para que esta seja possível os trabalhadores devem se encontrar a uma distância segura pré-determinada pela mineradora.

Os principais problemas ambientais decorrentes da detonação são emissão de gases tóxicos (monóxido de carbono e gases nitrosos) e de partículas sólidas na atmosfera, comprometendo a qualidade do ar; emissão e propagação de ondas sísmicas transientes pelo maciço rochoso causando vibrações, emissão e propagação de energia pela atmosfera provocando deslocamento do ar (sobrepessão), sendo que ambos podem causar danos materiais e incômodos ao ser humano, ultra lançamento de fragmentos rochosos, podendo causar danos materiais e acidentes com vítimas, indução de escorregamento podendo ocasionar acidentes com trabalhadores e prejudicar o andamento das atividades.

A partir do detalhamento acima, nota-se que muitos eventos estão envolvidos, portanto é necessária uma abordagem ampla, tornando-se adequada a aplicação da ferramenta WRAC. Durante a perfuração, carregamento e detonação, normalmente muitos trabalhadores estão envolvidos e a WRAC é orientada tanto para processos e equipamentos, como para locais de trabalho com muitos colaboradores e com atividades muito dependentes dos operadores, diferentemente de outras análises.

Além disso, em relação a cenários que envolvem múltiplos eventos, é desejável que os eventos sejam analisados antes que qualquer dano tenha ocorrido no local, e a WRAC proporciona isto de maneira pró ativa e sistemática, examinando todas as partes do ambiente de trabalho para assegurar que as condições perigosas foram entendidas e estão controladas, como mencionado na sua descrição.

Outra análise possível para o desmonte é através da FMECA, esta tem como objetivo analisar um sistema e identificar possíveis falhas de cada componente do sistema e prever como os efeitos destas falhas interferem em outros componentes ou no sistema como um todo.

Por exemplo, considerando o componente sendo o tamponamento: Quais são as consequências se o tamponamento não estiver com tamanho adequado? Provavelmente o tamanho do material desmontado não estará adequado para as próximas etapas como carregamento e britagem; a pilha formada poderá estar espalhada, sendo necessário uma carregadeira para ajustar a pilha e então as

próximas etapas serão possíveis; podem ocorrer danos ambientais como sobrepressão, emissão de gases tóxicos e vibração, prejudicando a população em seu entorno.

Todas as consequências devem ser analisadas e mensuradas, hierarquizando-as através da valoração dos efeitos, e principalmente identificando as falhas que causam efeitos múltiplos sobre outros componentes, então é necessário avaliar as adequações e corrigir proteções existentes. Utilizando esta metodologia, é possível reconhecer os componentes críticos do sistema, os que estão mais susceptíveis a falhas, assim, foca-se na implementação de planos de ação para esses componentes, proporcionando benefícios para a empresa. Porém, é difícil obter taxas confiáveis para as falhas e, diferentemente da ferramenta WRAC, falhas humanas e ergonomia não são levadas em consideração.

Observa-se que nenhuma ferramenta é perfeita, possuindo suas desvantagens, portanto, em muitos cenários mais de uma ferramenta deve ser aplicada, como no caso do desmonte. A utilização em conjunto das ferramentas WRAC e FMECA proporciona vantagens já que estas possuem características diferentes, contudo, a aplicação de ferramentas demanda recursos humanos e financeiros e muitas empresas não possuem todos esses recursos disponíveis.

A ferramenta selecionada para uma aplicação mais detalhada foi a FMECA, como apresentado no apêndice A. Considerou-se o cenário hipotético no qual existem trabalhadores e equipamentos presentes no entorno do desmonte. Assim, os seguintes componentes foram analisados: sistema de iniciação, tamponamento, cordel, carga de fundo, carga de coluna, malha de perfuração e ordem de retardos.

Para cada um deles, determinou-se sua respectiva função, como este componente pode falhar (modo potencial de falha), os efeitos potenciais dessas falhas e a valoração da severidade desses efeitos, quais são as possíveis causas e sua valoração de ocorrência, e por fim, quais são os controles recomendados e qual o nível de prioridade de cada falha.

Em relação aos componentes e potenciais modos de falha analisados, os itens que devem ser tratados prioritariamente são: tamponamento com confinamento insuficiente resultando em emissão de gases tóxicos e particulados ou ultra-lançamento de blocos, e tamponamento excessivo resultando também em ultra-lançamento de blocos. Tais pontos necessitam de uma maior atenção devido ao fato da possibilidade de causar danos aos trabalhadores. Os controles sugeridos foram: medidores de gases e particulados, EPI para trabalhadores, recobrimento superficial da bancada e maior tempo de retardo.

5.3 CARREGAMENTO E TRANSPORTE

As operações de carregamento e transporte envolvem o manuseio tanto de minério, como de estéril, além da aspersão de água em pistas de rolamento e descarga do material transportado. O carregamento pode ser feito através de pás carregadoras ou escavadeiras frontais, retroescavadoras ou *draglines*, as escavadeiras realizam duas tarefas, a escavação do minério ou estéril e o carregamento deste material escavado, possuem acionamento hidráulico ou podem ser elétricas.

Em relação ao transporte este pode ser realizado de forma contínua, através de transportadores de correia de longa distância e teleféricos, ou cíclica, com o uso de caminhões (fora de estrada ou convencionais). Os teleféricos possuem a vantagem de facilmente contornar obstáculos, contudo, devido a riscos operacionais, poluição visual e sonora, estes estão em desuso, sendo substituídos por correias transportadoras. As correias convencionais possuem baixo custo operacional e um funcionamento adequado em rampas, contudo apresentam limitações em curvas e não são adequadas para materiais com alta granulometria e possuem uma capacidade limitada.

O equipamento mais utilizado para transporte de minério e estéril entre as frentes de lavra e seus destinos (britador, usina, pilhas de estoque, pilhas de lixiviação e depósitos de estéril) são os caminhões. Estes possuem alta flexibilidade operacional, atendendo várias frentes de lavra simultaneamente, por esse motivo, mesmo sendo um transporte com custo mais elevado comparado à correia transportadora, é o meio de transporte mais comum em minas. Os caminhões rodoviários são utilizados quando o transporte externo é requerido ou em minas de pequeno porte. Os caminhões fora de estrada possuem um dos três sistemas motrizes: diesel-elétrico com corrente contínua, diesel-elétrico com corrente alternada, ou motor elétrico.

O fluxo mais comum em mina subterrânea ou a céu aberto é: o material desmontado é carregado pela pá carregadeira até o caminhão ou correia transportadora, é transportado até seu destino final, e então ocorre a descarga do material.

Assim como no desmonte, as operações de carregamento e transporte envolvem múltiplos eventos, como citado a cima, a partir desta característica, torna-se adequado utilizar a ferramenta WRAC para análise das condições perigosas presentes. Tanto no carregamento como no transporte, na maioria das minas, os equipamentos são conduzidos por seres humanos, existe a automação, contudo esta não se encontra difundida devido ao seu alto custo de implantação. A ferramenta WRAC possui a vantagem de englobar erros humanos e ergonômicos na análise, característica a qual algumas ferramentas, como a FMECA, não possuem.

Algumas das falhas a serem analisadas são: carregamento muito a cima ou muito abaixo da capacidade do caminhão que interfere na produção e pode interferir na manutenção do equipamento (no caso de excesso de material carregado), falha na sinalização de carros nas vias, o caminhão bascular de forma inadequada (a uma distância maior da desejável ou formando uma pilha muito espalhada), se as pistas se encontram adequadas para o trânsito de caminhões e pás carregadeiras, se a

manutenção dos equipamentos está adequada, acidentes com os operadores e falhas na correia transportadora, sendo que estas são mais prejudiciais do que problemas em um caminhão específico, pois o transporte inteiro é suspenso, causando atrasos em toda a produção, portanto devem ser analisadas cuidadosamente.

Outra possível análise para o carregamento e transporte é utilizando a ferramenta HAZOP. Através desta, é possível analisar fluxos, ideal para a análise da quantidade de material transportado, principalmente em correias transportadoras, já que o fluxo é contínuo. É necessário dividir a planta em nós (pontos de análise), o primeiro nó seria no basculamento da pá carregadora para a correia e o segundo só no basculamento da correia para uma pilha ou britador.

A seguir, analisa-se quais são as consequências de um abastecimento acima ou abaixo do previsto e como isso vai impactar as próximas etapas, além disso, deve-se entender as causas deste carregamento não ideal para que medidas possam ser tomadas. É crucial verificar se as consequências produzem efeitos danosos e perdas, caso produzam, deve ser tomada alguma ação de prevenção e proteção.

Este método possui a vantagem de ajudar a confrontar condições perigosas que são difíceis de quantificar e que sejam causadas por erro humano, ideal para este cenário pois os equipamentos são conduzidos por operadores, portanto estão susceptíveis a erros humanos. Contudo, possui desvantagens como: não avalia as condições perigosas provenientes da interação entre as diferentes partes do sistema (por exemplo, pá carregadeira e correia transportadora), não prioriza as condições perigosas, e não tem como objetivo medir a eficácia de controles existentes ou propostos.

A ferramenta selecionada para aplicação foi a WRAC, como mostra o apêndice B, em um cenário com pessoas e equipamentos. As etapas consideradas foram divididas em carregamento e transporte, e então em cada uma delas definiu-se os eventos indesejados e sua valoração de probabilidade, as consequências desse evento e sua valoração, calculou-se o grau de risco (multiplicando as valorações citadas), e sugeriu-se quais controles seriam adequados para cada evento indesejado.

A partir do grau de risco foi possível listar esses eventos, priorizando qual deveria ser observado inicialmente. Conforme o grau de risco calculado, os pontos que necessitam maior atenção são: vias inadequadas ocasionando derrapagem do caminhão e trabalhadores na via sem aviso dos motoristas causando atropelamento. Os controles sugeridos foram, respectivamente, bermas, e EPI e rádio para sinalização dos trabalhadores. É possível notar que ambos possuem uma alta prioridade porque envolvem acidentes com seres humanos e não apenas problemas no ritmo da usina de beneficiamento.

5.4 VENTILAÇÃO

Na mineração subterrânea, a ventilação é crucial para a continuidade das operações, proporcionando segurança aos trabalhadores. O objetivo da ventilação é assegurar um ar com qualidade adequada para a respiração do ser humano, atendendo às normas de segurança, além de resfriar o ambiente, proporcionar umidade adequada para eficiência e conforto dos trabalhadores durante as operações e prevenir incêndios e explosões devido à acumulação de gases e materiais particulados explosivos.

O monitoramento da qualidade do ar que circula dentro de uma mina subterrânea é muito importante. Manter a qualidade do ar adequada é uma tarefa complexa, devido ao fato das minas apresentarem potencial de formação de gases tóxicos em toda a sua extensão e o local por onde esses gases são eliminados é o mesmo que conduz ar fresco para dentro da mina. Conforme a profundidade da mina aumenta, o gradiente de temperatura também aumenta, ou seja, quanto mais profunda a mina, mais elevada será a sua temperatura, isto faz com que seja necessária uma intensificação na circulação do ar. Num sistema de ventilação em mina, os elementos presentes são: ventiladores, dutos, exaustores, portas e reguladores.

O controle da composição e quantidade de ar que circula na mina deve ser contínuo, pois as condições não são estáticas, sempre há mudanças na frente de lavra, novas galerias são escavadas e a formação de substâncias tóxicas e particulados é variável. Sendo assim, são necessários ajustes constantes para que a ventilação permaneça adequada. Este controle não deve ser exclusivo de gases tóxicos, mas também de materiais particulados, analisando composição, concentração e tamanho de partículas.

A qualidade do ar, em relação a gases nocivos e poeiras, é reduzida consideravelmente devido a alguns fatores, como, avanços na frente de lavra, detonações, gases provenientes de equipamentos, furos de sondagem e rocha e manuseio e transporte do material escavado.

Através da descrição acima de ventilação em minas subterrâneas, pode-se notar que esta operação envolve diversos eventos que muitas vezes ocorrem simultaneamente. A aplicação das ferramentas WRAC e HAZOP para este cenário é adequada, já que estas possibilitam análises de múltiplos eventos.

A abordagem ampla, proveniente da ferramenta WRAC, torna possível a análise de muitos eventos presentes na ventilação, como verificação da quantidade de ar que entra na mina, controle das quantidades dos componentes presentes no ar, quais são as consequências se a quantidade ou qualidade do ar estiverem inadequadas (trabalhadores com náuseas ou desmaios, explosões, mortes) e quais foram as causas dessa inadequação (ventiladores insuficientes ou em manutenção, nova detonação em uma das frentes de lavra).

A partir da análise das causas e consequências, deve-se verificar quais são as medidas de prevenção e mitigação necessárias, pois caso ocorram explosões ou

mortes, por exemplo, toda a produção da mina será afetada, além da imagem da empresa. A WRAC, por ser uma ferramenta pró ativa e sistemática e analisar os eventos antes que qualquer dano tenha ocorrido, ajuda a prevenir as causas de determinados eventos com a utilização de barreiras e a mitigar as consequências, caso eles ocorram, minimizando os danos.

A utilização da HAZOP requer uma pesquisa minuciosa das instalações. A planta é dividida em nós, por exemplo, no início e fim de cada galeria e onde portas, ventiladores e exaustores se encontram. Em cada nó, o fluxo de ar é controlado (qualidade e quantidade), então a análise é iniciada utilizando as palavras guia, por exemplo, o que ocorre se a quantidade de ar diminuir e a composição de gás carbônico aumentar, excedendo determinado limite e quais são as consequências se a quantidade de metano no ar aumentar. Através desse processo, variáveis como concentração, temperatura e velocidade são caracterizados.

Após a análise dos desvios, procura-se compreender quais são as causas e consequências de cada um, verificando se o desvio pode ocorrer e se as consequências causam danos, pois caso produza uma condição perigosa, barreiras e mitigações são essenciais. Uma das vantagens proporcionadas pelo método é a detecção de condições perigosas difíceis de detectar, analisar, isolar e prever, características as quais são condizentes com a ventilação. Contudo, condições perigosas provenientes da interação entre diferentes partes do sistema não são avaliadas, a eficácia de controles existente não é medida e as condições perigosas não são priorizadas.

Para a ventilação, a ferramenta aplicada foi a HAZOP, como mostra o apêndice C. Diversos cenários hipotéticos foram descritos para tornar a análise mais completa. Os cenários (nós) são: entrada e saída de ar da galeria principal, galeria com presença de pessoas, galeria com presença de pessoas e acúmulo de gás metano, e galeria com presença exclusiva de equipamentos.

Os parâmetros analisados foram: fluxo de ar, temperatura, quantidade de oxigênio, quantidade de metano. Determinou-se quais são os métodos de detecção para cada parâmetro, como estes podem desviar do planejado, quais são as possíveis causas, os possíveis efeitos e os controles adequados.

A partir da análise realizada, notou-se que alguns nós eram muito semelhantes, como no caso da entrada e saída de ar da galeria principal, portanto não há a necessidade de construir dois relatórios de análises. É crucial compreender que as variáveis a serem analisadas são as mesmas, contudo os valores obtidos durante uma amostragem em campo serão completamente diferentes, exigindo ações diferentes.

Outro caso de semelhança são os nós “com pessoas” e “com pessoas na presença de metano”. Quando a presença de metano é elevada, muitas ações devem ser tomadas, contudo em uma galeria onde trabalhadores se encontram presentes, a monitoração de gases deve ser constante. Ou seja, assim como no caso anterior (entrada e saída da galeria principal), as variáveis a serem analisadas são as mesmas contudo as ações a serem tomadas podem variar.

Após realizar a aplicação da ferramenta, notou-se que a maior parte das consequências afetam diretamente o trabalhador. A ventilação em mina subterrânea

é de extrema importância para a continuidade das operações e principalmente a saúde dos trabalhadores, por isso deve ser monitorada constantemente.

5.5 EXPLOSÕES

Na mineração subterrânea, explosões não são incomuns. Muitas vezes os prejuízos devido a essas explosões são irreversíveis, podendo causar danos ao patrimônio, paradas na extração do minério e danos à saúde do trabalhador, como invalidez e até morte. Por isso, o sistema de ventilação é crucial para a prevenção de incêndios, sendo sempre necessário verificar sua adequabilidade.

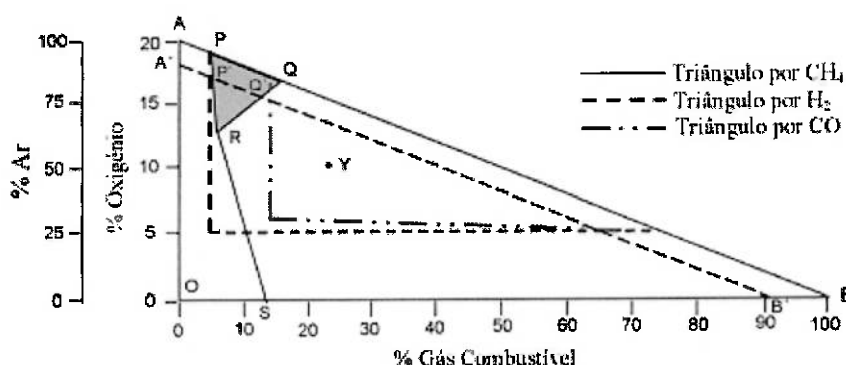
As explosões podem ocorrer devido a poeiras ou gases inflamáveis. Em relação aos gases, esses podem ser classificados como:

- Oxidantes: não são inflamáveis, mas colaboram para a combustão, por exemplo, oxigênio, dióxido de nitrogênio e cloro.
- Inertes: não participam da combustão, nem reagem com outros materiais. Ao fornecer um gás inerte a um espaço confinado, a quantidade de oxigênio será reduzida e, portanto, a combustão associada a um incêndio será limitada. Exemplo de gases inertes: gás carbônico, argônio e gás nitrogênio.
- Inflamáveis: queimam ou explodem, se sofrerem ignição e estiverem em proporções adequadas, exemplo de gases inflamáveis: amônia, metano, hidrogênio e monóxido de carbono.

Para que ocorra uma explosão, a quantidade de gás presente no local deve ser adequada, se a concentração for muito alta ou muito baixa, a explosão não irá ocorrer. Esses limites são denominados de domínio de inflamabilidade ou de explosividade, ou seja, é a amplitude de concentração de um gás, que ao sofrer ignição, queima ou explode. Para concentrações muito baixas, existe o Limite Inferior de Inflamabilidade/Explosividade (LIF/LIE) e para concentrações muito altas, existe o Limite Superior de Inflamabilidade/Explosividade (LSF/LSE). A ventilação deve limitar a concentração dos gases inflamáveis em no máximo 25% do limite inferior de inflamabilidade.

A proporção em que os gases oxidantes, inertes e inflamáveis se encontram determina o nível de explosividade, caracterizada pelo Triângulo de Coward. Esta metodologia é mais adequada para analisar o nível de Explosividade de um gás pois leva em consideração quais são os gases presentes na atmosfera local e suas respectivas composições. A figura 6 é uma representação do triângulo de Coward e nele é possível determinar o nível de explosividade de três gases: metano, hidrogênio e monóxido de carbono.

Figura 6 - Triângulo de Coward.



(Torres & Gama, 2005)

Para o caso do metano, tem-se que em condições normais este é inerte, contudo na presença de ar (oxigênio), sua principal característica é a inflamabilidade e explosividade, por isso a importância de se considerar a composição da atmosfera a ser analisada para um determinado gás.

As fontes de ignição em minas são: fósforos, arco voltaico, impacto de brocas (centelha), gases quentes de equipamentos, atrito de partes mecânicas móveis, descargas eletrostáticas.

Em relação às poeiras, os fatores que influenciam na explosão destas são: a dimensão das partículas, concentração, impurezas, concentração de oxigênio e a potência da fonte de ignição. De maneira geral, a poeira encontra-se depositada ao longo da mina, quando colocada em suspensão e na presença de uma fonte de ignição com energia suficiente para deflagrá-la, pode ocorrer uma explosão. Com essa explosão, mais poeira entrará em suspensão, causando mais explosões.

Uma ferramenta adequada para a análise de explosões é a BTA. A seguinte análise foi realizada: a perda de controle (evento topo) é a explosão, esta causa muitos danos desde perdas na produção e no maquinário como perdas humanas, portanto deve ser analisada prioritariamente em minas subterrâneas. Como a explosão é um evento único, torna-se adequado a aplicação do BTA.

A condição perigosa considerada para este evento topo é a presença de gás metano em lavra subterrânea, e algumas das causas consideradas foram: presença de particulados em condição de detonação (em suspensão e com granulometria adequada), presença de fontes de calor (como fósforos) e utilização de equipamentos de impacto. As barreiras sugeridas foram, respectivamente, monitoração do nível de particulados, sensores de temperatura, e sistema de umidificação local. É importante considerar que essas barreiras também podem falhar, sendo necessário aplicar medidas para evitar essa falha da barreira, para o caso da barreira monitoração do nível de particulados, uma possível falha é a má operação dos sensores, e portanto, pode-se adotar uma barreira como programa de manutenção dos sensores para evitar essa falha.

A explosão em uma galeria tem algumas consequências, como desestabilização do maciço, incêndio e interrupção da produção. Para esses eventos, algumas barreiras são, respectivamente, estruturas de contenção contra queda de blocos, sistema de combate ao incêndio e utilização de pilha pulmão. É

possível notar que algumas das consequências são muito mais graves que outras e mais difíceis de serem controladas, como no caso de incêndio que pode causar perdas humanas.

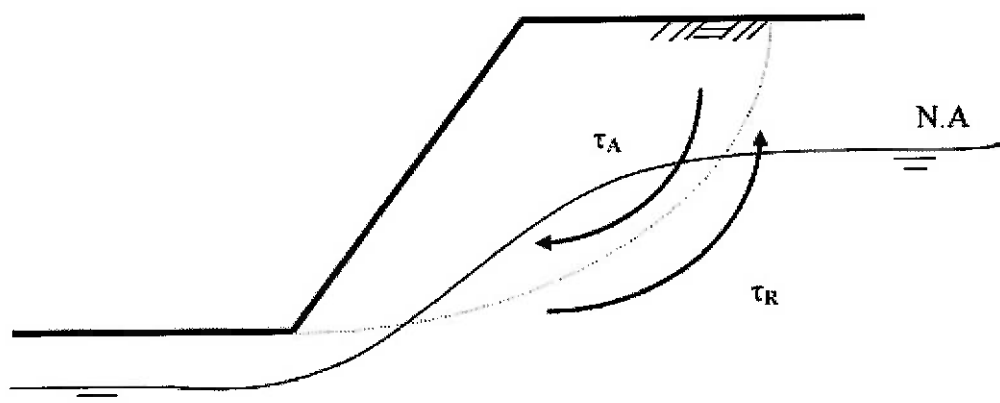
Esta ferramenta, como citado anteriormente, possui a vantagem de ser uma abordagem prática, possui uma ótima forma de apresentação, com fácil visualização e torna-se fácil identificar onde os recursos devem ser aplicados para prevenir a perda de controle ou mitigar consequências. Porém, seria adequado aplicar uma ferramenta quantitativa, combinada com essa, para que a análise se torne mais profunda e mensurável.

5.6 DESLIZAMENTO DE TALUDES

O deslizamento de taludes não é um evento incomum na mineração a céu aberto, portanto o monitoramento dos taludes é crucial para minimizar as consequências sendo possível em alguns casos até evitar o deslizamento.

Vários fatores podem levar ao deslizamento do talude, como mudança da geometria do talude (inclinação e/ou altura); aumento da carga atuante (por sobrecargas na superfície, por exemplo); atividades sísmicas; variação do nível de água que pode gerar aumento do peso específico do material, aumento da poro-pressão diminuição da pressão efetiva, saturação em areias, que faz desaparecer a coesão fictícia, rebaixamento rápido do nível de água gerando forças de percolação; diminuição da resistência do solo ou rocha, ou do maciço como um todo, por lixiviação, mudanças nos minerais secundários, nas descontinuidades (Figura 7).

Figura 7 - Esboço de um talude.



Legenda: τ_R = Tensões resistentes = $c + \sigma \cdot \tan \phi$ (critério de Mohr-Coulomb para solos) τ_A = Tensões atuantes

Esses efeitos mencionados a cima podem ser causados por (Dymunski, 2011):

- Fatores geológicos: materiais fracos ou suscetíveis, presença elevada de água, rochas fraturadas, fissuras e descontinuidades, diferenças em permeabilidade, diferenças em rigidez;
- Fatores morfológicos: movimentação de placas tectônicas, erosão fluvial ou glacial, erosão subterrânea, remoção de vegetação;
- Fatores físicos: chuvas intensas, rápido degelo, precipitação prolongada e excepcional, terremotos, erupções vulcânicas, descongelamento, mudanças climáticas drásticas;
- Fatores humanos: escavações de taludes e repê, carregamento excessivo no topo de taludes (crista), drenagem rápida de represas, desflorestamento, irrigação, mineração, vibrações artificiais e vazamentos de água de utilitários.

Os custos de um deslizamento na mineração a céu aberto incluem: reparo de danos, relocação de estruturas e manutenção de obras e instalações de contenção, perda ou danos em equipamentos, perda de produtividade devido aos danos locais e interrupção de sistemas de transporte, perda de vidas humanas, invalidez física ou trauma psicológico dos trabalhadores.

Algumas medidas como adoção de normas e códigos para movimentos de terra e construções; execução de obras de drenagem, contenção e correção de geometria de taludes, para prevenção de escorregamentos; monitoração da água superficial e subterrânea e de deslocamentos, podendo ser desenvolvidos sistemas de alerta de movimentos iminentes que podem ajudar na redução do risco de deslizamentos. Além disso, é importante identificar áreas vulneráveis a movimentações por meio de: mapas topográficos, mapas geológicos, fotografias aéreas e de satélite e evidências de movimento (Dymunski, 2011).

Uma ferramenta adequada para aplicação é a BTA, pois o deslizamento de talude é um evento único para ser analisado, no apêndice E é possível visualizar a ferramenta aplicada ao cenário. O evento topo considerado é o deslizamento de talude e a condição perigosa é a mineração em bancada. Algumas causas do deslizamentos, como citadas anteriormente, são aumento da carga atuante, atividade sísmica e infiltração de água, e as barreiras são, respectivamente, obras de contenção, monitoração de vibração e tratamentos de impermeabilização.

Em relação as consequências, algumas delas são soterramento e interrupção do sistema de transporte de minério, e suas barreiras são equipe de resgate e rotas alternativas. No caso da equipe de resgate, esta pode falhar não sendo eficiente, demorando para atender o chamado, sendo assim, uma possível barreira são treinamentos contínuos.

Assim como na seção 5.6 Explosões, é aconselhável aplicar juntamente com o BTA outra ferramenta que seja quantitativa, para que então a análise realizada se torne mais aprofundada e assim seja possível priorizar quais medidas devem ser tomadas para que algumas consequências sejam evitadas ou ao menos mitigadas.

6 CONCLUSÕES

As ferramentas de análise de risco descritas na seção 3 são muito importantes em todas as indústrias, principalmente no setor da mineração, já que este apresenta diversas condições perigosas, e a partir delas é possível priorizar quais ações devem ser tomadas inicialmente para evitar perdas de controle ou ao menos mitigar as consequências.

A BTA, WRAC e a HAZOP são ferramentas qualitativas, já a FTA e ETA são quantitativas. É adequado aplicar mais de uma ferramenta, já que elas se complementam. Por exemplo, ao usar um BTA é possível obter uma análise com abordagem prática que proporciona uma fácil visualização e fácil identificação de alocação de recursos, contudo não é possível priorizar quais barreiras devem ser enfocadas. Portanto, é aconselhável aplicar conjuntamente um FTA, pois a partir dessa análise quantitativa, o resultado será mais completo, sendo possível priorizar quais ações devem ser tomadas preferencialmente.

Além da característica qualitativa ou quantitativa, as ferramentas diferem em relação a quantidade de eventos que são analisados por vez. A WRAC, FMECA e HAZOP analisam diversos eventos simultaneamente, são mais abrangentes, e podem levar em consideração como uma falha em um parâmetro ou componente interfere em outras partes do sistema. A WRAC possui a vantagem de considerar o erro humano além das falhas sistêmicas, característica a qual a FMECA e HAZOP não possuem. Já a ETA, FTA e BTA são focadas em um evento único. No caso do BTA, é possível conectar os *Bowties*, ou seja, a consequência de uma análise se torna o evento topo de outra.

Em relação aos cenários analisados, as ferramentas aplicadas foram: para o desmonte, FMECA; para carregamento e transporte, WRAC; para ventilação, HAZOP; para explosões, BTA; e por fim, para deslizamento de talude, BTA.

Para que a análise seja completa e realista, é necessário uma equipe adequada, com conhecimento dos processos realizados, engajada e mobilizada, para que todos os eventuais problemas encontrados sejam discutidos e então valorados quando conveniente.

Ao mensurar as consequências de um determinado evento, as mais críticas envolvem duas características, a primeira é ocorrer com uma frequência elevada, e a segunda é envolver danos aos trabalhadores, desde pequenos acidentes até a morte, a valoração considera o grau desse dano, ou seja, pequenos acidentes possuem um valor menor, e morte um valor maior. Sendo assim, quanto maior o valor encontrado, maior deve ser a atenção e a alocação de recursos na implementação de barreiras para evitar ou mitigar tais consequências.

Por fim, os diferentes métodos possuem aplicações em diversos eventos, se tornando mais adequado ou menos dependendo da situação analisada. Este trabalho permitiu a compreensão da aplicabilidade das ferramentas e além disso a importância na hora de priorizar quais medidas devem ser tomadas para evitar tragédias.

7 REFERÊNCIAS

- About OSHA. (2015, 05 07). Retrieved from Occupational Safety & Health Administration – OSHA, Accident Investigation.: <https://www.osha.gov/about.html>
- Aguiar, L. A. (2001). *Metodologias de Análise de Risco (APP & HAZOP)*, Rio de Janeiro.
- Alternativo, C. (2015, Maio 07). *Segurança e Higiene do Trabalho - Avaliação de Riscos*. Retirado de http://alternativorg.wdhouseDNS.com.br/11-Avaliacao_de_riscos-AAE-%20ADB-%20ACC-%20AAF-MORT.pdf
- Área de Atuação da Fundacentro. (2015, Setembro 08). Retirado de Fundacentro: <http://www.fundacentro.gov.br/institucional/atuacao>
- Banerjee, S. C. (2000). *Prevention and Combating Mine Fires*. Rotterdam.
- Candia, R. C., Hennies, W. T., Iramina, W., & Elguera, J. F. (2009, oct/dec). Análise de acidentes fatais na mineração - o caso da mineração no Peru. *Revista Escola de Minas*, 62(4).
- Conheça a ABNT. (2015, Setembro 08). Retirado de Associação Brasileira de Normas Técnicas: <http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>
- Diniz, F., Oliveira, L. F., Bardy, M., & Visco, N. (2006). *Estudo de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos*. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente - Secretaria de Qualidade Ambiental.
- Dymunski, A. S. (2011). *Noções de Estabilidade de Taludes e Contenção*. Universidade Federal do Paraná.
- Harvey, D. M. (1985). *Models for accident investigation*. Alberta Workers Health, Safety and Compensation, Canada Occupational Health and Safety Division.
- Herpich, C., & Fogliatto, F. S. (2013). Aplicação de FMECA para definição de estratégias de manutenção em um sistema de controle e instrumentação de turbogeradores. *Revista Iberoamericana de Engenharia Industrial*, 5(9), pp. 70-88.
- Iramina, W. S., Tachibana, I. K., Silva, L. M., & Eston, S. M. (2009, oct/dec). Identificação e controle de riscos ocupacionais em pedreira da região metropolitana de São Paulo. *Revista Escola de Minas*, 62(4).
- Joy, J. (2000). *Risk Management Integration and Decision Making in the Mineral Industry*. Terrigal: Proceedings of the NSW Mining Industry Occupational Health and Safety Conference.
- Júnior, A. M., & Madeira, M. S. (2005). *A Segurança do Trabalho em Minas de Carvão Agindo na Prevenção da Pneumoconiose - Região Carbonífera de Santa Catarina*. Criciúma: Universidade do Extremo Sul Catarinense.
- Lapa, R. P. (2011). *Investigação e análise de incidentes*. São Paulo: Edicon.

- Lima, F. N., Naghettini, M., & Espósito, T. (2013). *Aplicação do Método da Árvore de Falhas (FTA) para Avaliação da Probabilidade de Falha das Comportas do Vertedouro de uma Barragem*. Bento Gonçalves: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Lipol, L. S., & Haq, J. (2011, October). Risk Analysis Method: FMEA/FMECA in the Organizations. *International Journal of Basic & Applied Sciences*, 11(5).
- Livingston, A. D. (2001). *Root causes analysis: Literature review*. HSE Books.
- NSW, G. (2009). *Risk assessment workbook for mines: Metalliferous, extractive and opal mines, and quarries*. Industry & Investment - NSW Government.
- Practical HSE Risk Management – An Introduction to the Bow-tie Method. (2007). *International Conference for Achieving Health & Safety*. Dubai: Gareth Book, Risktec Solutions Ltd.
- Ramsden, M. (2013, October 31). Ten rules for smart bowtie analysis. *Environmental Resources Management*.
- Ringdahl, L. H. (2004). Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management. *Journal of Hazardous Materials*, 111, 13-19.
- Risk Assessment Matrix*. (2015, July 27). Retirado de ImageStack: <http://imagestack.co/40808853-risk-assessment-matrix.html>
- Sá, A. (2013). *Prevenção e Controle dos Riscos com Poeiras Explosivas*. Segurança e Trabalho.
- Safety Management Systems*. (2015, July 19). Retirado de Transport Canada - Government of Canada: <http://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/standards/sms-info-nov2007-3827253-2785.htm?pedisable=true>
- Schmitt, J. C. (2013). *Método de Análise de Falha Utilizando a Integração das Ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA*. Santa Bárbara d'Oeste: Universidade Metodista de Piracicaba.
- Segurança e Saúde no Trabalho*. (2015, Setembro 10). Retirado de Ministério do Trabalho e Emprego: http://portal.mte.gov.br/seg_sau/seguranca-e-saude-no-trabalho.htm
- The Bowtie Method*. (2015, Julho 27). Retirado de CGE - Risk Management Solutions: <http://www.cgerisk.com/knowledge-base/risk-assessment/thebowtiemethod>
- Torres, V. F., & Gama, C. D. (2005). *Engenharia Ambiental Subterrânea e Aplicações*. (R. C. Villas-Boas, Ed.) Rio de Janeiro: CETEM/CYTED.

APÊNDICE A - FMECA: Desmonte

Tabela 8 - Valoração da ocorrência e da probabilidade para FMECA

	Valoração da Ocorrência	Valoração da Severidade
5. Quase certo		5. Fatalidade (pessoas)
4. Provável		4. Lesão a pessoas
3. Possível		3. Suspensão temporária do empreendimento
2. Possível (sob circunstâncias trágicas)		2. Parada no setor, quebra de equipamento
1. Raro		1. Alteração de prazos ou qualidade
(Elaboração própria)		

Tabela 9 - FMECA para desmonte

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles	NPR
Sistema de iniciação	Iniciar a detonação	Não detonar	Perigo ao trabalhador	4	Falha elétrica Fio corrompido	1	Equipe especializada	4

CONTINUA

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles	NPR
Tamponamen- to	Confinar o explosivo para uma detonação eficiente	Confinamento insuficiente	Má fragmentação de blocos	1			Fogacho	3
			Sobrepresão atmosférica	3			Medidor de pressão EPI para trabalhador	9
			Emissão de gases tóxicos e particulados	4			Medidor de gases tóxicos e particulados	12
							Recobrimento superficial da bancada	12
			Ultralancamento de blocos	4	Tamanho inadequado (tamponamento menor que o desejado)	3	Maior tempo de retardo	
			Pilha inadequada	1			Escavadeira para ajustar a pilha	3
			Backbreak	2			Afastamento reduzido	6
							Maior tempo de retardo	
			Piso da bancada inadequado	2			Escavadeira para ajustar pista	6
			Repé	2			Escavadeira para ajuste Fogacho	6

CONTINUAÇÃO

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles	NPR
Tamponamen- to	Confinar o explosivo para uma detonação eficiente	Confinamento excessivo	Má fragmentação de blocos	1			Fogacho	3
			Ultralançamento de blocos	4			EPI para trabalhadores	12
							Maior tempo de retardo	
			Pilha inadequada	1	Tamanho inadequado (maior que o desejado)		Escavadeira para ajustar a pilha	3
			Backbreak	2		3	Afastamento reduzido	6
							Maior tempo de retardo	
			Piso da bancada inadequado	2			Escavadeira para ajustar pista	6
			Repé	2			Escavadeira para ajuste	6
			Vibração do terreno	3			Fogacho	
							Medidor de vibração	9

CONTINUAÇÃO

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles	NPR
Cordel	Conectar malha de explosivos	Não detonar	Perigo ao trabalhador	4	Falha elétrica	1	Equipe especializada	4
		Demorar mais que o previsto para detonar	Má fragmentação	1	Fio corrompido		Fogacho	2
			Pilha inadequada	1	Falha elétrica	2	Escavadeira para ajustar a pilha	2
Carga de Fundo	Explosivo de alta potência para detonar carga de coluna	Insuficiente	Má fragmentação	1	Falha no carregamento dos furos	2	Fogacho	2
			Pilha inadequada	1			Escavadeira para ajustar a pilha	2

CONTINUAÇÃO

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles	NPR
Carga de Fundo	Explosivo de alta potência para detonar carga de coluna	Em excesso	Ultralançamento de blocos	4			Recobrimento superficial da bancada	8
							Maior tempo de retardo	
			Pilha inadequada	1			Escavadeira para ajustar a pilha	2
							Afastamento reduzido	4
			Backbreak	2	Falha no carregamento dos furos	2	Maior tempo de retardo	
			Piso da bancada inadequado	2			Escavadeira para ajustar pista	4
			Sobrepresão atmosférica	3			Medidor de pressão	6
			Vibração do terreno	3			Medidor de vibração	6

CONTINUAÇÃO

Componente	Função	Modo Potencial de Falha	Efeitos Potenciais de Falha	Severidade	Causas Potenciais	Ocorrência	Controles	NPR
Carga de Coluna	Responsável pela fragmentação do maciço	Em excesso	Ultralançamento de blocos	4			Recobrimento superficial da bancada	8
							Maior tempo de retardo	
			Pilha inadequada	1			Escavadeira para ajustar a pilha	2
							Afastamento reduzido	4
						2	Maior tempo de retardo	
							Escavadeira para ajustar pista	4
			Piso da bancada inadequado	2			Medidor de pressão	6
			Sobrepressão atmosférica	3			Medidor de vibração	6
			Vibração do terreno	3				

CONTINUAÇÃO

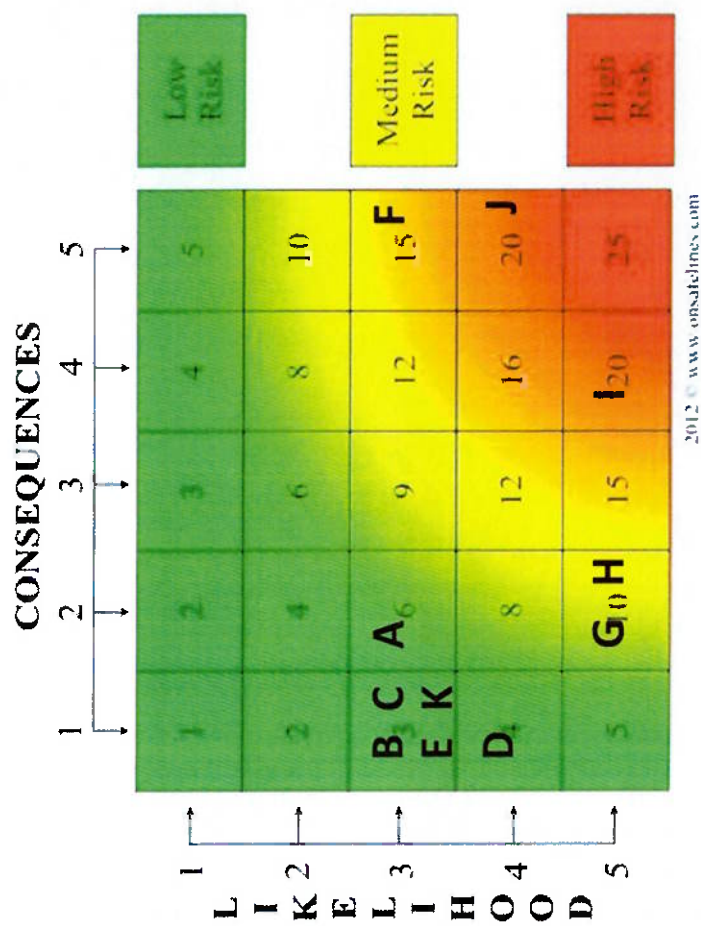
[illegible]

APÊNDICE B – WRAC: Carregamento e Transporte

Tabela 10 - WRAC para Carregamento e Transporte

Etapa de Operação	Evento Indesejado	Valoração da Probabilidade	Consequência	Valoração da Consequência	Grau de Risco	Controles	Priorização	Identificação
Carregamento	Carregamento do caminhão acima do desejado	3	Desgaste excessivo do caminhão	2	6	Balança	Baixo Risco	A
			Manutenção deve ser mais frequente	1	3	Manutenção preventiva	Baixo Risco	B
	Carregamento do caminhão abaixo da desejada	3	Diminuição do ritmo da usina de beneficiamento	1	3	Balança	Baixo Risco	C
	Matacão	4	Diminuição do ritmo da usina de beneficiamento	1	4	Fogacho antes do carregamento	Baixo Risco	D
	Estacionar "longe" da carregadeira	3	Maior tempo gasto no carregamento	1	3	Treinamento para motorista	Baixo Risco	E
	Veículos na via não sinalizados	3	Atropelamento ou batidas	5	15	Bandeirinha para sinalização do veículo	Médio Risco	F
Transporte						Aspersão de água na pista	Médio Risco	G
			Formação excessiva de poeira	2	10	Aterro frequente da via		
	Vias inadequadas (estreitas, inclinação, piso)	5	Desgaste excessivo do caminhão	2	10	Aterro frequente da via	Médio Risco	H
			Derrapagem do caminhão	4	20	Berma	Alto Risco	I
	Trabalhadores na via sem aviso aos motoristas	4	Atropelamento	5	20	EPI e rádio para sinalização dos trabalhadores	Alto Risco	J
	Estacionar longe do britador	3	Maior tempo gasto para bascular, necessário manobrar	1	3	Treinamento para motorista	Baixo Risco	K

Figura 8 - Matriz de Priorização de Risco.

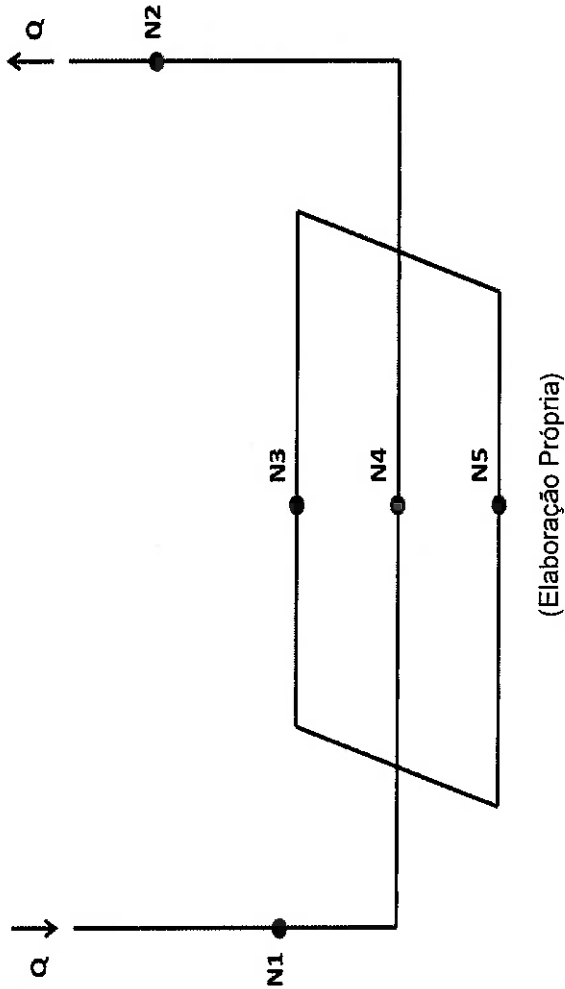


(Risk Assessment Matrix, 2015).

APÊNDICE C - HAZOP: Ventilação

Representação das galerias de uma mina subterrânea com a definição dos nós a serem analisados.

Figura 9 - Esboço de uma Mina Subterrânea



Legenda:

Símbolo	Característica
N1	Entrada da galeria principal
N2	Saída da galeria principal
N3	Galeria com pessoas e presença de metano
N4	Galeria com presença de pessoas
N5	Galeria com presença exclusiva de equipamentos
Q	Fluxo de ar

Tabela 11 - HAZOP de Sistema de Ventilação

HAZOP de Sistema de Ventilação em mina subterrânea				Nº: 01 - Entrada da galeria principal	
Parâmetro	Deteção	Desvio	Possíveis Causas	Possíveis Efeitos	Controles
Fluxo de ar	Medidores de vazão Sensação	Mais	Colocação de reguladores em outras galerias	Não produz condição perigosa	
		Menos	Falha em um dos ventiladores Furos nos dutos de lona	Acúmulo de poeiras ou gases tóxicos Acúmulo de poeiras ou gases inflamáveis	Medição de limite de tolerância Medição LIE/LSE Evacuação da mina
				Aumento da temperatura	Equipe de segurança/ ventilação
				Umidade abaixo da ideal	Inclinação das pás
Temperatura	Termômetros Sensação	Nenhum	Falha completa no sistema de ventilação	Falta de oxigênio Acúmulo de gases tóxicos/explosivos	Velocidade de rotação Evacuação da mina
		Reverso	Emergências	Alteração da rota de fumaça	Evacuação da mina
		Mais	Diminuição do fluxo de ar	Trabalhadores passam mal Diminui produtividade	Maior fornecimento de água gelada Ventiladores localizados
				Maior a probabilidade de ter acidentes	Roupas térmicas com gelo seco
Quantidade de oxigênio	Medidores de oxigênio	Menos	Aumento do fluxo de ar	Não produz condição perigosa (para Temp > 12° C)	
		Menos	Diminuição do fluxo de ar Incêndio	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)	Evacuação da mina
		Nenhum	Incêndio total	Morte dos trabalhadores	Evacuação da mina

CONTINUA

HAZOP de Sistema de Ventilação em mina subterrânea				
Parâmetro	Deteção	Desvio	Nó: 01 - Entrada da galeria principal	
Quantidade de metano	Medidores		Possíveis Causas	Possíveis Efeitos
		Mais (atingiu LIE)		Explosão/ incêndio
				Evacuação da mina
		Mais (acima LSE)	Detonação	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)
				Evacuação da mina
		Menos (abaixo LIE)	Acúmulo do gás	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)
			Ventilação adequada	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)
			Incêndio	
		Nenhum	Incêndio	Não produz condição perigosa

CONTINUAÇÃO

HAZOP de Sistema de Ventilação em mina subterrânea				Nó: 03 – Galeria com pessoas e presença de metano		
Parâmetro	Detecção	Desvio	Possíveis Causas	Possíveis Efeitos	Controles	
Fluxo de ar	Medidores de vazão	Mais	Colocação de reguladores em outras galerias	Não produz condição perigosa		
	Sensação	Menos	Falha em um dos ventiladores	Acúmulo de poeiras ou gases tóxicos	EPI para trabalhadores	
				Acúmulo de poeiras ou gases inflamáveis	Observação LIE/LSE	
				Aumento da temperatura	Evacuação da mina	
Temperatura	Termômetros Sensação	Nenhum	Falha completa no sistema de ventilação	Umidade abaixo da ideal	Equipe de segurança/ ventilação	
				Falta de oxigênio	Inclinação das pás	
					Evacuação da mina	
				Reverso	Alteração das rotas de fumaça	Evacuação da mina
Quantidade de oxigênio	Medidores de oxigênio	Mais	Diminuição do fluxo de ar	Trabalhadores passam mal	Trabalhadores passam mal	Maiores fornecimento de água gelada
				Diminui produtividade		Ventiladores localizados
				Maiores a probabilidade de ter acidentes		Roupas térmicas com gelo seco
Quantidade de oxigênio	Medidores de oxigênio	Menos	Aumento do fluxo de ar	Não produz condição perigosa (para Temp > 12°C)		
		Menos	Diminuição do fluxo de ar	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)		Evacuação da mina
			Incêndio			
		Nenhum	Incêndio	Morte dos trabalhadores		Evacuação da mina

CONTINUAÇÃO

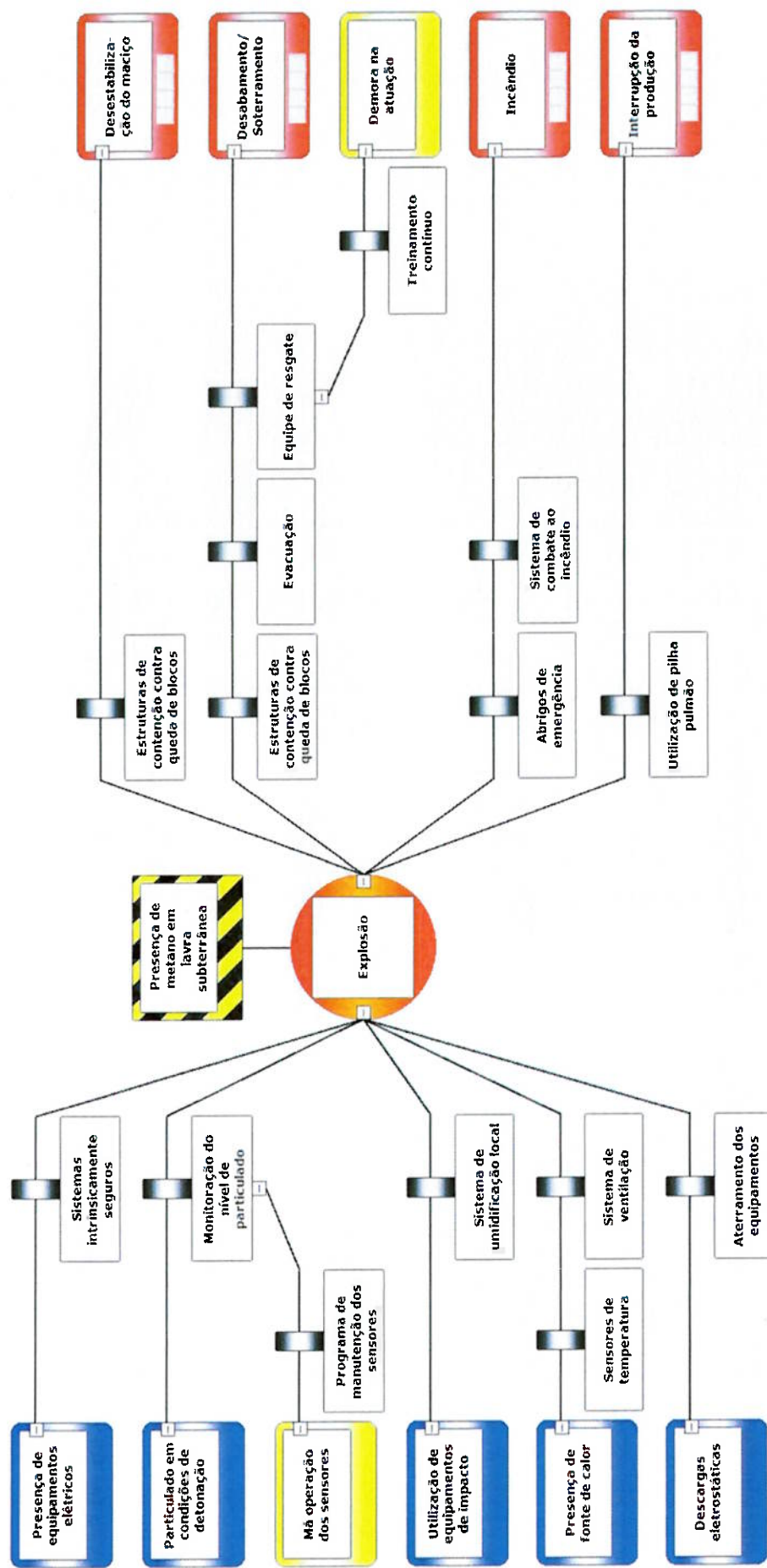
HAZOP de Sistema de Ventilação em mina subterrânea			Nó: 03 – Galeria com pessoas e presença de metano		
Parâmetro	Detecção	Desvio	Possíveis Causas	Possíveis Efeitos	Controles
Quantidade de metano	Medidores	Mais (dentro do triângulo de Coward)		Explosão/ incêndio	Evacuação da mina
				Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)	
		Mais (fora do triângulo de Coward)	Detonação	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)	Evacuação da mina
			Acúmulo do gás		
		Menos (fora do triângulo de Coward)	Ventilação adequada	Prejudicial à saúde dos trabalhadores (desmaio, morte)	
			Incêndio		
		Nenhum	Incêndio	Não produz condição perigosa	

CONTINUAÇÃO

HAZOP de Sistema de Ventilação em mina subterrânea				Nó: 05 – Galeria com máquinas	
Parâmetro	Detecção	Desvio	Possíveis Causas	Possíveis Efeitos	Controles
Fluxo de ar	Medidores de vazão	Mais	Colocação de reguladores em outras galerias	Não produz condição perigosa	
	Sensação	Menos	Falha em um dos ventiladores	Acúmulo de poeiras ou gases tóxicos	Medição LIE/LSE
			Furos nos dutos de lona	Acúmulo de poeiras ou gases inflamáveis	Evacuação da mina
				Aumento da temperatura	Equipe de segurança/ ventilação
Temperatura	Termômetros Sensação			Umidade abaixo da ideal	Inclinação das pás
		Nenhum	Falha completa no sistema de ventilação	Falta de oxigênio	Velocidade de rotação
		Reverso	Emergências	Acúmulo de gases tóxicos/explosivos	Evacuação da mina
		Mais	Diminuição do fluxo de ar	Alteração das rotas de fumaça	Evacuação da mina
Quantidade de oxigênio	Medidores de oxigênio			Superaquecimento dos equipamentos	Ventiladores localizados
				Diminui produtividade	Fornecimento de água para resfriamento dos equipamentos
				Maior a probabilidade de ter acidentes	
		Menos	Aumento do fluxo de ar	Não produz condição perigosa (para Temp > 12°C)	
CONCLUSÃO		Menos	Diminuição de fluxo de ar Incêndio	Não produz condição perigosa para os equipamentos	Evacuação da mina
		Nenhum	Incêndio total	Não produz condição perigosa para os equipamentos	Evacuação da mina

APÊNDICE D – Bowtie

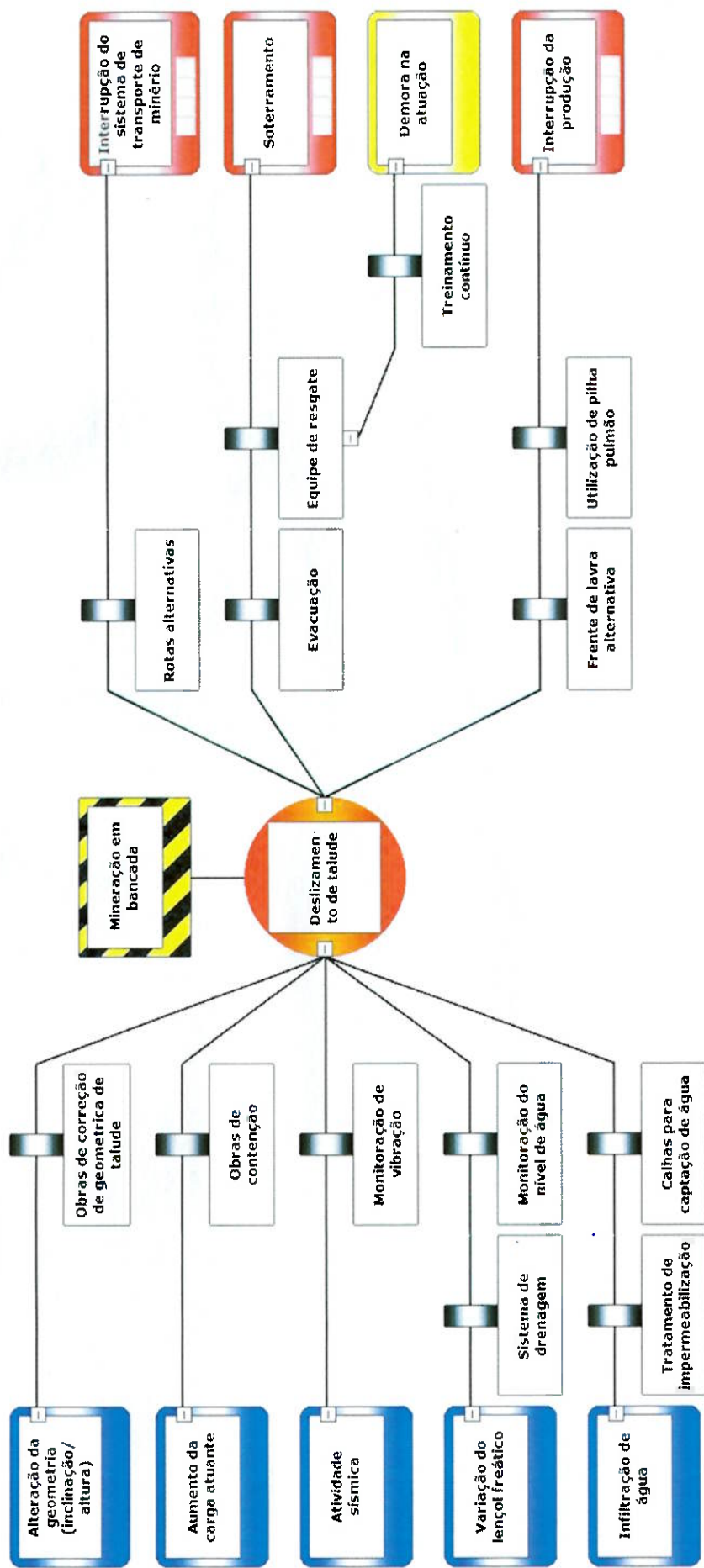
Figura 10 - Bowtie de Explosão



(Elaboração Própria)

APÊNDICE E – Bowtie

Figura 11 - Bowtie de Deslizamento de Talude



(Elaboração Própria)