



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas - Escola de Minas



**ANÁLISE E CONTROLE DE EMISSÕES DE GASES NO<sub>x</sub> EM DETONAÇÃO NA  
MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO MINA DE FERRO DO QUADRILÁTERO  
FERRÍFERO**

GABRIEL AUGUSTO DE OLIVEIRA CASTRO

OURO PRETO  
2024

**ANÁLISE E CONTROLE DE EMISSÕES DE GASES NO<sub>x</sub> EM DETONAÇÃO NA  
MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO MINA DE FERRO DO QUADRILÁTERO  
FERRIFERO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO  
2024

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C355a Castro, Gabriel Augusto de Oliveira.  
Análise e controle de emissões de gases NOx em detonação na mineração [manuscrito]: estudo de caso mina de ferro do quadrilátero ferrífero. / Gabriel Augusto de Oliveira Castro. - 2024.  
42 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Desmonte de rochas. 2. Detonação. 3. Óxidos de nitrogênio. I.  
Arroyo Ortiz, Carlos Enrique. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.  
Título.

CDU 622.235

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriel Augusto de Oliveira Castro**

### **Análise e Controle de Emissões de Gases NOx em Detonações na Mineração: Estudo de Caso Mina de Ferro do Quadrilátero Ferrífero**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 22 de Janeiro de 2024

#### Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto  
Engº - Pedro Henrique Lopes de Carvalho - Universidade Federal de Ouro Preto  
Engº - Augusto Ferraz Ribeiro - Enaex

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/01/2024



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/01/2024, às 16:30, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0656823** e o código CRC **6C391DAB**.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Reinaldo e Sayonara, pelo constante apoio, amor incondicional e pelos sacrifícios que fizeram para me proporcionar a oportunidade de estudar.

Ao meu irmão, Felipe, por compartilhar comigo tantos momentos de aprendizado e crescimento ao longo desta jornada.

As amigadas que fiz em Ouro Preto e ao 17.1 por todos os anos de convívio, estudos e diversão. Em especial ao Enilson, Jair, Rubens, Matheus, Cunha, Luana, Days e Rafa.

Ao professor orientador, Carlos Enrique Arroyo Ortiz, por toda atenção, paciência, orientação e dedicação.

Ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e a Escola de Minas, por todo o ensino de qualidade.

" A conquista real de um objetivo se inicia na capacidade que todos temos de  
pensar e sonhar. "

## RESUMO

Este trabalho aborda a problemática das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) resultantes de detonações em operações mineradoras. O objetivo principal é realizar uma análise detalhada das causas da emissão de gases NOx durante o processo de detonação e propor estratégias eficazes de controle dessas emissões. A metodologia inclui a coleta de dados em campo e a aplicação de técnicas analíticas avançadas para quantificar e caracterizar as emissões de NOx durante as detonações. Com base nos resultados obtidos, são propostas medidas de controle através de uma matriz de investigação, considerando todos os pontos de falha levantados, tais como balanço de oxigênio, calibração do caminhão e % de óleo combustível que é levado junto ao explosivo. Com essas informações, foi possível fazer um plano de ação para essas medidas visando a redução de emissão de gases NOx na mineração, atrelado a sustentabilidade ambiental e a saúde pública.

**Palavras-chave: Gases NOx; Detonação; Redução; Ambiental.**

## **ABSTRACT**

This work addresses the issue of nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) emissions resulting from detonations in mining operations. The main objective is to conduct a detailed analysis of the causes of NO<sub>x</sub> gas emissions during the detonation process and propose effective control strategies for these emissions. The methodology includes field data collection and the application of advanced analytical techniques to quantify and characterize NO<sub>x</sub> emissions during detonations. Based on the obtained results, control measures are proposed through an investigation matrix, considering all identified failure points, such as oxygen balance, truck calibration, and the percentage of fuel oil that is mixed with the explosive. With this information, it was possible to create an action plan for these measures aimed at reducing NO<sub>x</sub> gas emissions in mining, linked to environmental sustainability and public health.

**Keywords:** NO<sub>x</sub> Gases; Detonation; Reduction; Environmental.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Preenchimento dos espaços de ar do ANFO pela emulsão.....	16
Figura 2 - Painel de controle do caminhão fábrica .....	18
Figura 3 - Caminhão Fábrica.....	19
Figura 4 - Gases Produzidos x % Óleo Combustível (FO) .....	24
Figura 5 - Esquema simplificado do Diagrama de Ishikawa .....	25
Figura 6 - Mapa geológico simplificado ao QF .....	27
Figura 7 - Vista de uma lavra a céu aberto .....	28
Figura 8 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.....	29
Figura 9 - Imagem feita pelo drone no momento do desmonte .....	29
Figura 10 - Diagrama de Ishikawa.....	32
Figura 11 - Diagrama de Ishikawa 2.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação visual de detonação com formação de gases NOx .....	20
Tabela 2 - Plano de Fogo .....	30
Tabela 3 - Composição ANFO .....	33
Tabela 4 - Composição ANFO - Correção do BO .....	34

## LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ANFO	Ammonium nitrate – fuel oil
AN	Nitrato de amônio
C	Carbono
CO	Monóxido de Carbono
FO	Óleo diesel (Fuel Oil)
N	Nitrogênio
NA	Nitrato de amônio
NO	Óxido Nítrico
NOx	Óxidos de Nitrogênio
O	Oxigênio
QF	Quadrilátero Ferrífero
%	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>OBJETIVOS</b>	12
1.1	Objetivo geral	12
1.2	Objetivos específicos	12
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA</b>	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	14
3.1	Explosivos	14
3.2	ANFO	14
3.3	Emulsão	15
3.4	Emulsão Blendada	16
3.5	Caminhão Fábrica / Painel de Controle	17
3.6	Gases NOx	19
3.7	Balço de Oxigênio	22
3.8	Diagrama de Ishikawa	24
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	26
4.1	Local de estudo	26
4.1.1	Localização	26
4.1.2	Quadrilátero Ferrífero	26
4.1.3	Método de Lavra	27
4.2	Metodologia	28
4.2.1	Estudo de caso	29
4.2.2	Checklist	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	32
5.1.1	Matriz de Investigação	32
5.1.2	Avaliação das informações	32
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	36
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	37
	<b>ANEXO</b>	41

## INTRODUÇÃO

A indústria da mineração desempenha um papel fundamental na economia global, fornecendo os minerais essenciais que sustentam uma variedade de setores, desde a construção até a produção de eletrônicos. No entanto, a extração mineral não é isenta de desafios ambientais e de saúde. Entre esses desafios, a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) provenientes das detonações em minas é uma preocupação crescente devido aos seus impactos negativos no meio ambiente e na qualidade do ar.

A indústria mineradora como um todo, não está imune a esses desafios. A detonação de explosivos para a extração de minérios é uma prática comum nesse empreendimento, resultando na liberação de NOx na atmosfera. Os NOx são poluentes atmosféricos que não apenas contribuem para a deterioração da qualidade do ar, mas também estão associados a problemas de saúde em seres humanos e danos ambientais, como a acidificação do solo e a formação de smog (nevoeiro composto por substâncias poluentes).

Nos últimos anos, a emissão de NOx em processos de combustão tem sido objeto de extensas pesquisas científicas em todo o mundo. Inicialmente, esses estudos tinham como objetivo identificar os mecanismos de formação do NOx e suas relações com os parâmetros termodinâmicos da chama. Com o tempo, o foco das pesquisas passou a ser o desenvolvimento de técnicas para reduzir e controlar as emissões. Essa evolução nas investigações se deve, em grande parte, à imposição cada vez mais rigorosa de padrões de emissão de NOx por parte das autoridades ambientais.

Nesse contexto, surge a necessidade de um estudo criterioso com relação as causas e efeitos da geração de gases NOx no desmonte de rochas e criar meios de diminuir os impactos causados por essa atividade, visando a preservação do meio ambiente e a promoção de práticas mais sustentáveis na indústria de mineração e construção.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo geral**

Realizar uma análise investigativa das possíveis causas e/ou fatores que influenciam para a formação de gases NOx no processo de desmonte em uma mineração de ferro.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Avaliar as principais causas da formação de gases NOx através de um checklist e uma matriz de investigação (Diagrama de Ishikawa).
- Fazer um plano de ação de medidas que possam ser adotadas a fim de evitar/reduzir a formação de gases NOx.

## 2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O presente trabalho tem como foco uma nova abordagem dos conceitos físico-químicos e balanço de material/energia, atrelado a uma melhoria dos resultados relativos a geração de gases tóxicos resultantes do desmonte de rocha em uma mineração de ferro, o qual geram consequências negativas para o setor em termos de incidentes, acidentes e até mortes de trabalhadores, além de perdas econômicas pelo aumento dos custos operacionais devido à má fragmentação, uma vez que a formação dos referidos gases reduz a energia liberada na explosão.

O NOx proveniente de detonações constitui apenas uma pequena proporção das emissões totais de NOx provenientes de atividades humanas (principalmente geração de energia e veículos motorizados) e de fontes naturais. Contudo, a detonação de rochas produz uma libertação súbita e localizada de gases com concentrações potencialmente elevadas de NOx.

Apesar de um longo histórico de emissões de NOx relacionadas com explosões, muito poucos são os estudos quantitativos que foram realizados em condições de campo realistas.

Na ausência de uma causa geral única ou de uma solução geral, estas orientações devem ser vistas como uma ajuda para identificar a causa local do NOx e como um alerta para possíveis formas de abordar essas causas.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Explosivos**

Explosivos são substâncias ou misturas, em qualquer estado, que quando submetidas a uma causa térmica ou mecânica suficientemente energética (calor, atrito, impacto etc.), se transformam total ou parcialmente em gases, liberando uma grande quantidade de energia num intervalo de tempo muito curto, gerando altas pressões e temperaturas (Crosby, 1998).

Os explosivos possuem a principal função de fragmentar o material em sua volta. A fragmentação ocorre através da decomposição química do material explosivo, que é capaz de liberar gases quentes em expansão em questão de milissegundos juntamente com a liberação de uma energia de alta temperatura e liberação de pressão (YANG et al., 2016).

Um entendimento da detonação dos explosivos requer um conhecimento das ondas de choque e da termoquímica envolvida. Os primeiros explosivos usados foram compostos primariamente de átomos de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) e alguns com pequenas adições de elementos metálicos (Clark, 1980).

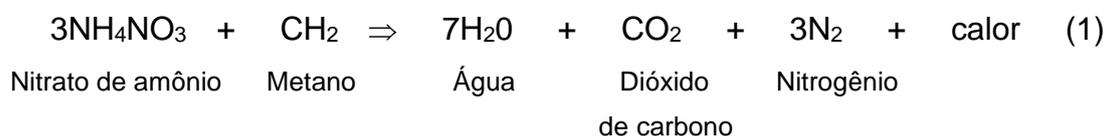
Explosivos químicos são materiais que causam reações químicas muito rápidas para liberar produtos gasosos e energia. Estes gases sob alta pressão liberam forças nas paredes do buraco, o que faz com que a rocha frature. A detonação de todos os explosivos industriais produz uma grande quantidade de gases, bem como pequenas quantidades de resíduos sólidos. Entre os gases que são formados, há sempre uma certa proporção variável de gases tóxicos, como o Monóxido de Carbono (CO) e os Óxidos de Nitrogênio (N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>3</sub>) (Iparraguirre, 2015).

#### **3.2 ANFO**

Este agente explosivo se baseia na mistura do nitrato de amônia (AN) com um combustível. O nitrato de amônia é capaz de liberar uma grande quantidade de energia fornecendo um baixo custo. Contudo o nitrato de amônia sozinho é incapaz de detonar, para isso é necessária a presença de um

combustível. Geralmente o combustível utilizado é o óleo combustível (FO), pois ele é capaz de criar uma mistura mais homogênea com o nitrato de amônia, além de apresentar um ponto de volatilidade maior que ocasiona um menor risco a explosões indesejadas (ZHANG, 2016).

A reação química de um explosivo é do tipo redução/oxidação (“redox”), que acontece num intervalo de tempo muito curto. O explosivo é composto pela mistura de um agente oxidante e um combustível. O agente detonante mais comum usado hoje na mineração é a combinação de nitrato de amônio (“amônio nitrato” - AN) e óleo diesel (“fuel oil” – FO). A reação química para o processo é dada abaixo:



Neste caso, o AN é o oxidante (ele contém o oxigênio) e o óleo diesel é o combustível. O óleo diesel é oxidado e o nitrato de amônio é reduzido, em um curto intervalo de tempo (Hustrulid, 1999).

Por causa da grande afinidade do AN com a água (hidroscópico), esforços foram feitos para desenvolver explosivos à base de AN que poderiam ser usados em furos com água. Este foi um dos fatores que conduziu ao desenvolvimento das lamas explosivas e mais tarde das emulsões, que é considerada a quarta geração dos explosivos comerciais.

### 3.3 Emulsão

Sua composição é feita a base da mistura de um oxidante com um óleo mineral, mas a sua forma física é alterada. A mistura é alterada a ponto de gerar duas fases, que são responsáveis pelo aumento da resistência à água pelo nitrato de amônia. Essa mistura se baseia na geração de gotas de solução de nitrato de amônia que são envolvidas por uma fina camada do óleo combustível, que permite repelir à água em volta impedindo que o nitrato de amônia solubilize na água do ambiente. Suas vantagens se encontram no baixo custo, alta resistência

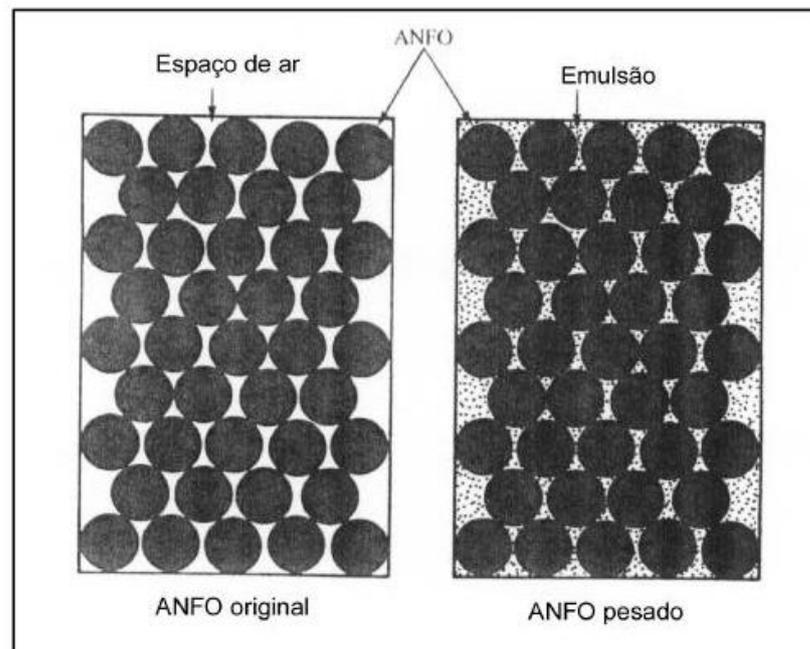
à presença de água, alta velocidade de detonação, seguro de se manusear e fabricar, permite carregamento automatizado (ZHANG, 2016).

### 3.4 Emulsão Blendada

A emulsão blendada, é um tipo de explosivo utilizado em sua maior frequência em minas a céu aberto onde se mesclam o ANFO e a emulsão no intuito de aumentar a performance e a potência de ruptura do maciço rochoso no ato da detonação. Os blends que contém 30% a 50% emulsão são derramável e chamados de ANFO PESADO. Já os blends de 70% de emulsão ou mais podem ser bombeados e chamados de BLENDADOS (Hustrulid, 1999).

Quando a emulsão se encontra em proporções maiores, essa mistura tem como característica o grande poder de choque, alta velocidade, nível elevado de energia relativa por volume, resistência a água e possibilidade de variação de densidade. Seu uso é recomendado para rochas duras, densas e em furos que contém água. A Figura 1 abaixo mostra esse comparativo do ANFO Original para o ANFO PESADO.

**Figura 1 - Preenchimento dos espaços de ar do ANFO pela emulsão.**



**Fonte: Hustrulid, 1999.**

### **3.5 Caminhão Fábrica / Painel de Controle**

O caminhão é uma fábrica de explosivo móvel, onde tem em sua finalidade o transporte de emulsão “base” e nitrato em tanques separados assim realizando um transporte seguro e eficiente executando a formulação do explosivo apenas no momento da aplicação nos furos. As principais vantagens do uso de caminhão fábrica na mineração a céu aberto são:

- Segurança no transporte;
- Praticidade no carregamento dos furos;
- Ganho de tempo operacional;
- Dimensionamento de densidade do explosivo in loco de acordo com

característica da rocha.

O funcionamento do caminhão fábrica constitui-se da seguinte forma: O painel de bombeamento utiliza-se de uma memória programável para armazenar instruções e implementar funções específicas, tais como sequenciamento, temporização, contagem, etc. O painel controlador é programado para fornecer uma grande quantidade de informações, como pressão do produto, temperaturas pressões do processo, rotações, vazão e dentre outras, tornando assim as operações de carregamento de furos mais rápidas, os equipamentos ficam mais compactos e a capacidade de receber informações e processá-las cresce muito, como mostrado na Figura 2.

**Figura 2 - Painel de controle do caminhão fábrica**



**Fonte: CONVICTA, 2023.**

Através do acionamento no painel onde é controlado quantidade de emulsão bombeada, quantidade de nitrito aplicado e quantidade de água aplicada, controla-se a densidade da emulsão explosiva de acordo com as características da rocha e necessidade de preenchimento do furo.

A Emulsão é aplicada através do acionamento de bomba, de forma helicoidal, que manda a emulsão para o misturador, onde é adicionado o Nitrito, cujo as quantidades aplicadas são dimensionadas de acordo com a densidade desejada a ser aplicada, as quantidades da mistura vão de acordo com o comando do painel e o nitrito é adicionado somente no misturador.

O misturador realiza a homogeneização criando um único produto, somente após esta mistura que obtemos o explosivo. A velocidade de homogeneização não pode ser elevada para que a mistura não perca suas propriedades.

O sistema permite o controle de quantidade de água adicionada ao processo de bombeamento, a água tem a função de lubrificar a mangueira de aplicação, realizando uma lâmina de água em toda extensão da parede interna da mangueira de forma que explosivo não trave na mangueira ocasionando pressão no sistema de bombeamento.

A mistura explosiva é aplicada via mangueiras com diâmetros dimensionadas segundo as propriedades do sistema de bombeamentos aplicados em cada caminhão fábrica. As mangueiras são introduzidas nos furos já escorvados para aplicação do explosivo de acordo com a carga dimensionada no plano de fogo e o controle da carga é acompanhada pelo operador do caminhão, conforme mostrado na Figura 3.

**Figura 3 - Caminhão Fábrica**



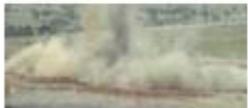
Fonte: FEM, 2023.

### 3.6 Gases NOx.

O grupo de gases conhecidos como Óxidos de Nitrogênio ou NOx, dos quais os mais comuns são o óxido nítrico (NO) e óxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), são frequentemente encontrados como subprodutos nos gases pós-explosão de

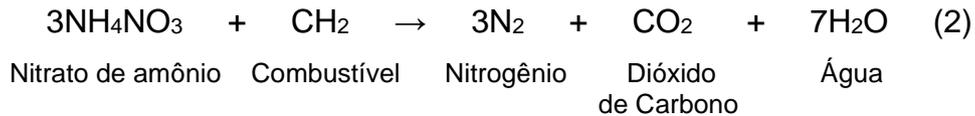
explosivos à base de nitrato de amônia. Juntos, esses gases são vagamente chamados de “NOx”. O óxido nítrico é invisível, mas o dióxido de nitrogênio varia do amarelo ao vermelho escuro, dependendo da concentração e do tamanho da nuvem de gás. Esses gases são considerados tóxicos. A Tabela 1 apresenta vários níveis de emissão de gases NOx possíveis, classificados de acordo com a intensidade de cor, medidos em escala Pantone e RGB.

**Tabela 1 - Classificação visual de detonação com formação de gases NOx**

Nível	Cor	Número Pantone	Aparência típica
Nível 0 Sem gases NOx		Cinza 1C (RGB 244, 222, 217)	
Nível 1 Poucos gases NOx		Pantone 155C (RGB 244, 219, 170)	
Nível 2 Gases NOx amarelados/alaranjados		Pantone 157C (RGB 237, 160, 79)	
Nível 3 Gases laranjas		Pantone 158C (RGB 232, 117, 17)	
Nível 4 Gases alaranjados/avermelhados		Pantone 1525C (RGB 181, 84, 0)	
Nível 5 Gases vermelhos/roxos		Pantone 161C (RGB 99, 58, 17)	

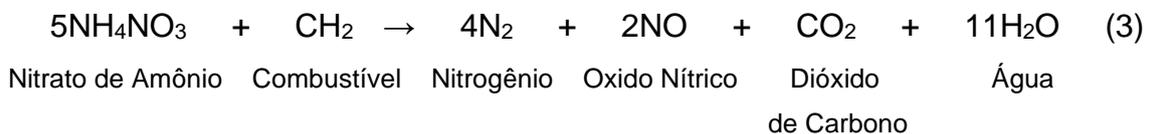
**FONTE: Adaptado de OLUWOYE et al. (2017).**

Sob condições ideais, a detonação de explosivos à base de nitrato de amônia produzirá nitrogênio, dióxido de carbono e vapor de água de acordo a reação abaixo (a entidade CH<sub>2</sub> representa um combustível hidrocarboneto típico).

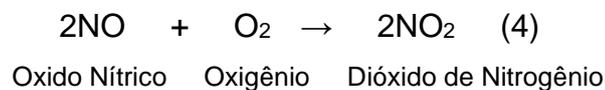


Nenhum dos gases do produto explosivo é colorido, portanto, além do vapor e da poeira, não haverá “fumaça” visível.

Se as condições não permitirem que ocorra uma decomposição tão completa, uma fração do nitrato pode reagir apenas parcialmente para produzir NO<sub>x</sub>, em vez de uma reação completa ao nitrogênio. Por exemplo, o óxido nítrico pode ser gerado por explosivos com pouco combustível (“positivos para oxigênio”) de acordo com reações semelhantes a:



O óxido nítrico formado inicialmente converte-se rapidamente em plumas laranja/vermelhas de dióxido de nitrogênio em contato com o oxigênio atmosférico:



Cada quilograma de nitrato de amônio desviado ao longo das vias de reação (3) e depois (4) gera mais de 110 litros de NO<sub>x</sub>. No pior caso, sem adição de combustível, um quilograma de nitrato de amônio pode teoricamente gerar cerca de 600 litros de NO<sub>x</sub>. A liberação de energia associada às reações geradoras de NO<sub>x</sub> é menor do que para a decomposição completa do nitrato de amônio conforme a reação (2), mas, como indicam os cálculos acima, apenas uma pequena fração da massa explosiva reagindo de maneira errada pode produzir volumes de gases NO<sub>x</sub>. Assim, uma explosão que gere volumes perceptíveis de gases NO<sub>x</sub> não produzirá necessariamente um mau resultado de detonação.

Embora o exemplo acima descreva um explosivo com falta de combustível, qualquer coisa que impeça o nitrato de amônio de se decompor completamente em seu produto final termodinamicamente favorecido, o

nitrogênio, pode resultar em NOx. Isto pode acontecer mesmo em explosivos perfeitamente equilibrados em oxigênio.

As condições que levam ao NOx pós-explosão são variadas, mas podem ser vistas como casos de deficiência de combustível ou detonação incompleta do explosivo. Estes problemas podem aplicar-se à composição explosiva como um todo ou a regiões localizadas dentro do explosivo.

Em termos práticos, estas condições geradoras de NOx podem ser o resultado de (AIESG, 2011):

- Formulação explosiva e garantia de qualidade.
- Condições geológicas.
- Projeto de explosão.
- Seleção explosiva de produtos.
- Práticas em bancada.
- Contaminação de explosivo no buraco de explosão.

### **3.7 Balanço de Oxigênio**

O balanço de oxigênio (BO) é um parâmetro termoquímico para determinar a proporção ideal entre oxidante e combustível, de forma que a formulação possa liberar sua energia completamente, a partir da reação de oxirredução entre os reagentes. De acordo com os valores de BO calculados, podem ser classificados em (MAHADEVAN, 2013; WANG, 1994):

- BO negativo: indica que há falta de oxidante e haverá formação de CO e H<sub>2</sub>, levando à formação de fumaça acinzentada;
- BO igual a zero: balanço perfeito entre oxidante e combustível e quando há oxidação completa dos reagentes, com liberação de energia máxima, há liberação de gases H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>;
- BO positivo: indica que há excesso de oxidante e haverá formação de gases NOx, caracterizados por uma fumaça alaranjada.

Para explosivos que contém água em sua formulação, como é o caso de emulsões explosivas, o BO pode ser levemente negativo. Portanto, é ideal que o BO seja zero (ou próximo de zero), uma vez que há liberação máxima de energia

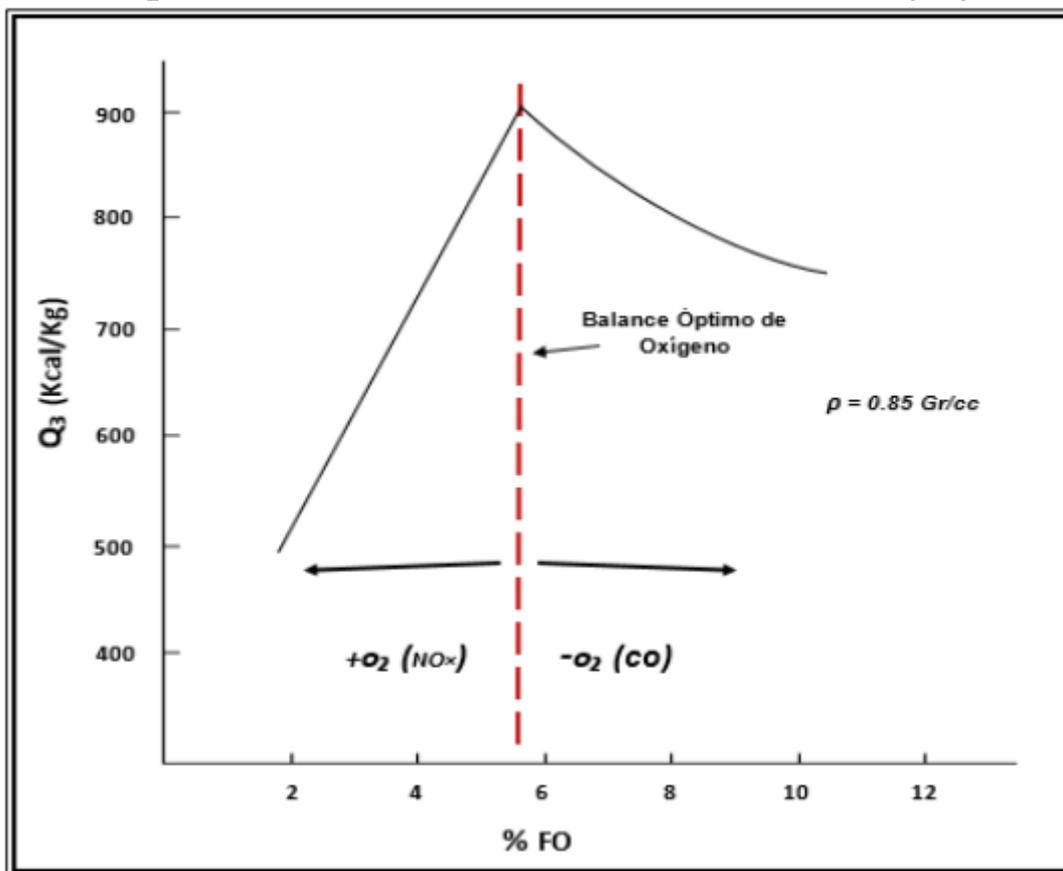
com mínima formação de gases tóxicos, se houver (MEYER, 1977; MAHADEVAN, 2013; URBANSKI, 1994; WANG, 1994).

A formação de gases NO<sub>x</sub> não se deve exclusivamente aos valores de BO positivos, mas deve-se atentar para que estas condições sejam minimizadas. A baixas concentrações de NO<sub>x</sub>, os gases possuem o potencial de irritar olhos, nariz, garganta e pulmões, podendo causar tosses e sangramento, dificuldades na respiração, cansaço e náusea. Em casos de altas concentrações, causam como um dos sintomas edema pulmonar, possivelmente resultando em morte, além de causar desequilíbrios no meio ambiente, com a ocorrência de chuvas ácidas (OLUWOYE et al., 2017)

Os combustíveis e oxidantes são adicionados ao explosivo básico para favorecer o balanço de oxigênio na reação química de detonação. O combustível (óleo diesel, serragem, carvão em pó, parafina, sabugo de milho, palha de arroz etc.) combina com o excesso de oxigênio da mistura explosiva, de forma que previne a formação de NO e NO<sub>2</sub>; o agente oxidante (nitrato de amônio, nitrato de cálcio, nitrato de potássio, nitrato de sódio etc.) assegura a completa oxidação do carbono, prevenindo a formação de CO. A formação de NO, NO<sub>2</sub> e CO é indesejável, pois além de altamente tóxicos para o ser humano, especialmente em trabalhos subterrâneos, esses gases reduzem a temperatura da reação “ladões de calor” e conseqüentemente, diminuem o potencial energético e a eficiência do explosivo (Valdir Silva, 2009).

O Figura 4 abaixo refere-se a um gráfico que mostra os problemas relacionados ao excesso ou deficiência do óleo diesel, o que se reflete na geração de gases tóxicos, como monóxido de carbono em caso de excesso de óleo diesel e gases nitrosos em caso de deficiência, impactando significativamente nos resultados de uma detonação em termos de eficácia e eficiência, dependendo se o equilíbrio de oxigênio é positivo ou negativo. No entanto, ao otimizar os agentes de detonação determinando as proporções adequadas de AN (94,48%) e FO (5,51%), o equilíbrio de oxigênio tende a zero (0), resultando em uma reação ideal para a formação de produtos desejados, como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>.

Figura 4 - Gases Produzidos x % Óleo Combustível (FO)



FONTE: Porter, P . ISEE - USA, 2007.

### 3.8 Diagrama de Ishikawa

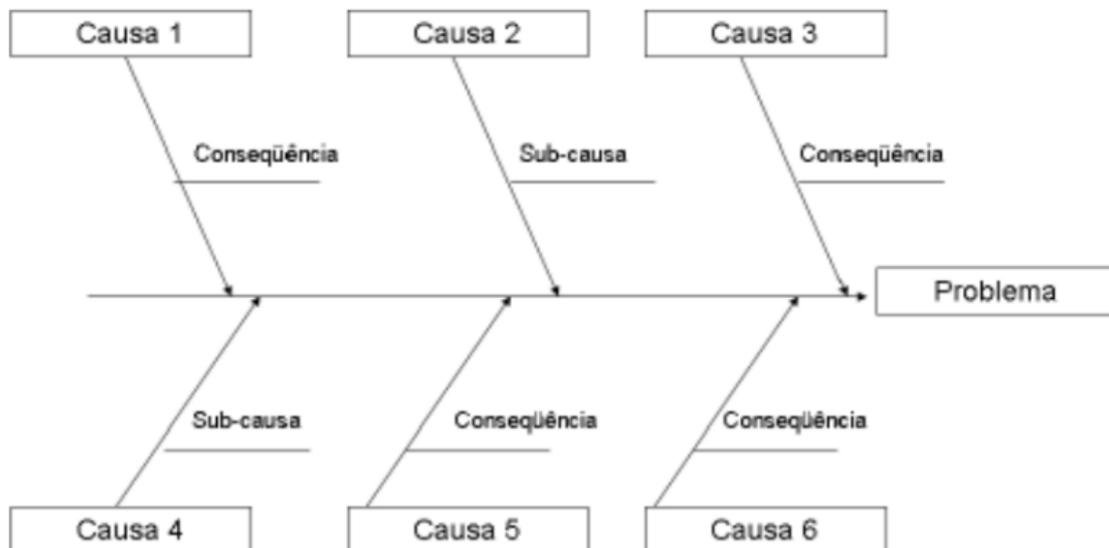
O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito ou Espinha de Peixe, é uma ferramenta amplamente utilizada na simplificação de processos considerados complexos. Ela permite a estratificação desses processos em etapas menores facilitando a análise de causas potenciais e seu nível de contribuição para o efeito (Tubino, 2000).

Segundo Toledo et al. (2018), essa metodologia consiste em uma representação gráfica que dispõe e organiza de forma sequencial, lógica e pôr em ordem de importância, as causas potenciais ou dificuldade atrelada ao problema. Na Figura 5 abaixo, tem-se um exemplo de escopo do Diagrama de Ishikawa.

O objetivo fundamental desta ferramenta é a identificação das causas subjacentes ao problema. Sendo assim, o diagrama pode ser utilizado para evidenciar os fatores que influenciam no resultado de um processo, permitindo a

clara visualização das causas que podem impactar tecnicamente esse resultado. Deste modo, torna-se bastante efetivo na busca das raízes do problema (Slack, 2009).

**Figura 5 - Esquema simplificado do Diagrama de Ishikawa**



**Fonte: Sabino, 2009.**

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Local de estudo

#### 4.1.1 Localização

O atual estudo foi realizado em uma mina de minério de ferro. A mina em questão está localizada no estado de Minas Gerais. Trata-se de uma operação de exportação de minério de ferro integrada com mina, planta de beneficiamento e mineroduto que destina o material para a etapa de filtragem em uma instalação dedicada a exportação.

#### 4.1.2 Quadrilátero Ferrífero

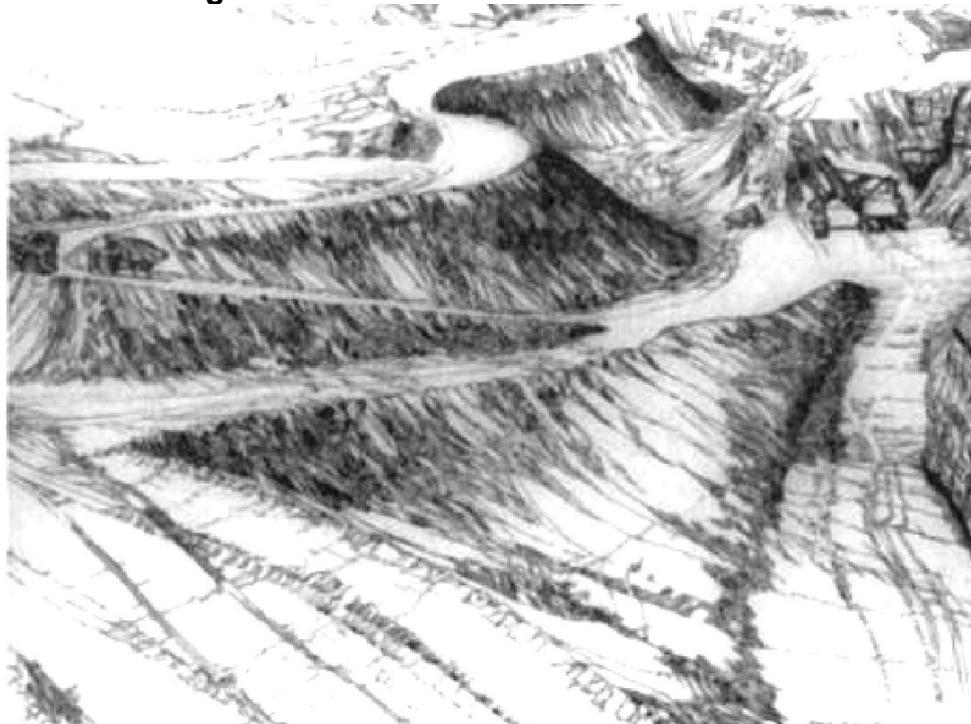
O Quadrilátero Ferrífero (QF), está localizado na porção sul-sudeste do Cráton São Francisco (Almeida, 1977) e possui uma área de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup>, sendo uma importante província metalogenética que abriga grandes depósitos auríferos (Lobato et al. 2001). Compreende terrenos Arqueanos a Paleoproterozóicos, podendo ser dividido em três grandes unidades embasamento granito-gnáissico; *greenstone belt* Rio das Velhas, e sequências metassedimentares (Dorr II, 1969), conforme Figura 6.

Segundo Farina et al. (2016), o QF é resultado de dois eventos deformacionais, sendo eles o Transamazônico, de idade paleoproterozóica, e o Pan-Africano/Brasiliano, de idade neoproterozóica. O evento Transamazônico, ou Riacciano-Orosiriano, é um ciclo geodinâmico responsável pela formação de crosta continental da Plataforma Sul- Americana. Ele teve início no Paleocontinente São Francisco com a tafrogênese da massa continental e desenvolvimento de uma margem passiva, que seria correspondente do Supergrupo Minas. Com o fim das colisões é possível que se tenha formado um supercontinente que desenvolveu sob ele diversos riftes e depositou sedimentos continentais intercalados com lavas ácidas (Alkmim et al. 2004). O evento Brasiliano, por sua vez, compreende também um ciclo geodinâmico, que se inicia com um regime extensional e respectiva formação de riftes, ou seja, há um começo de fragmentação do supercontinente Rodínia e termina com a fusão do Gondwana. Ele foi responsável



recuperação ambiental da área. A lavra por bancadas é utilizada principalmente em depósitos de minérios metálicos (Curi, 2014).

**Figura 7 - Vista de uma lavra a céu aberto**



**Fonte: Curi, 2014.**

## **4.2 Metodologia**

Este tópico aborda uma descrição do caso em função do problema levantado e da solução estudada. É apresentada uma metodologia para redução dos gases NOx emitidos no processo de desmonte de rochas, adequando aos parâmetros ambientais e de qualidade. A Figura 8 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada no trabalho.

**Figura 8 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho.**

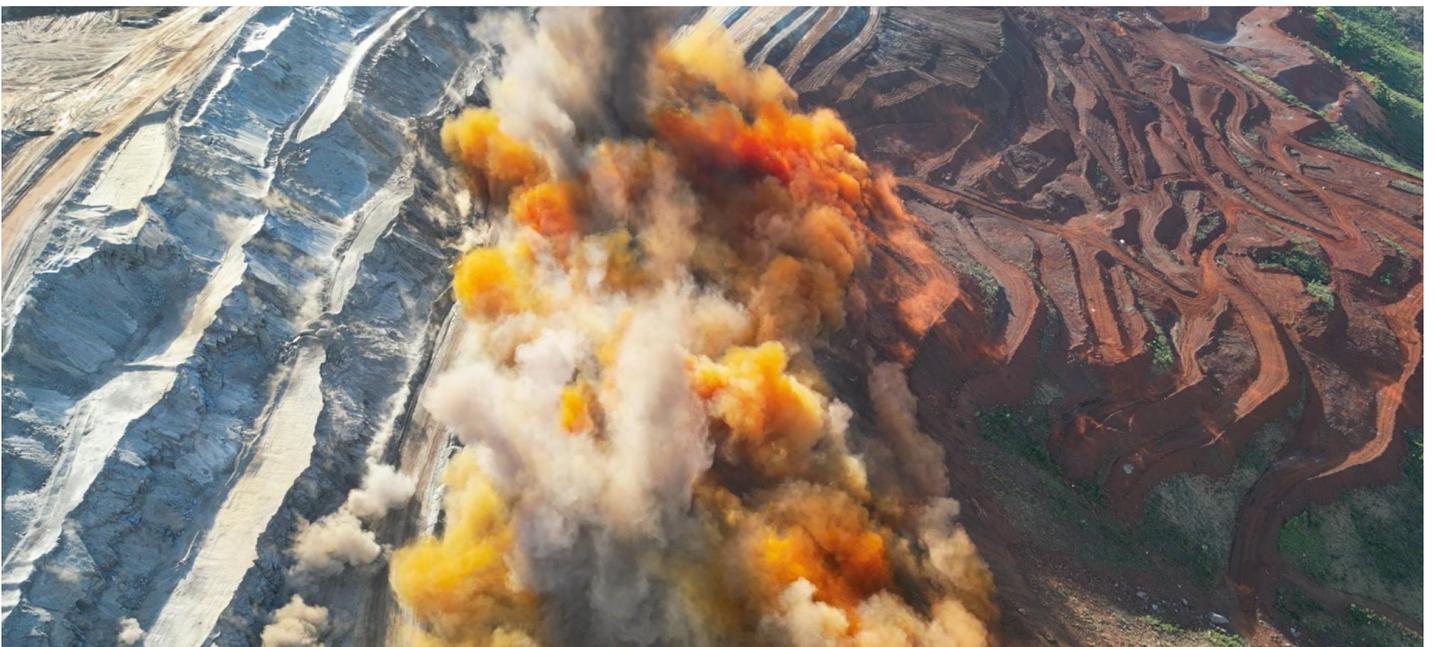


**FONTE: O autor, 2024.**

#### 4.2.1 Estudo de caso

Foi realizado um desmonte em uma mina de minério de ferro, onde foi observado uma fumaça alaranjada proveniente da detonação, conforme a Figura 9. O desmonte em questão utilizou-se de emulsão blendada para a carga de fundo e nitrato para o preenchimento do furo, o plano de fogo com mais informações consta na Tabela 2.

**Figura 9 - Imagem feita pelo drone no momento do desmonte**



**FONTE: O autor, 2023.**

**Tabela 2 - Plano de Fogo**

<b>FOGO</b>	
<b>Nº FUIROS:</b>	<b>611</b>
<b>ELETRONICOS:</b>	<b>623</b>
<b>INICIADOR 18M 250MS</b>	<b>623</b>
<b>INICIADOR 12M 2500MS</b>	<b>0</b>
<b>REFORÇADOR 450G</b>	<b>623</b>
<b>EMULSÃO ENCARTUCHADA KG</b>	<b>0</b>
<b>ANFO SACARIA KG</b>	<b>0</b>
<b>EMULSÃO KG</b>	<b>113.699</b>
<b>NITRATO KG</b>	<b>163.532</b>
<b>Nº BACKUP</b>	<b>0</b>
<b>MINA ENTREGUE</b>	
<b>INICIO DO CARREGAMENTO</b>	
<b>ALERTA VERMELHO (H)</b>	
<b>COR</b>	<b>ALARANJADA/VERMELHO</b>
<b>HORÁRIO DESMONTE</b>	
<b>DATA DESMONTE</b>	

Diante desse incidente, surgiram indagações quanto à tonalidade da fumaça e às razões subjacentes a esse fenômeno. Este evento desencadeou a imperativa realização de uma investigação mais aprofundada, visando identificar as causas primordiais que conduziram a tal ocorrência.

#### 4.2.2 Checklist

Um checklist é uma ferramenta crucial no setor da mineração, constituindo uma lista detalhada de itens a serem verificados durante diferentes fases das operações mineradoras. Sua importância é evidente na garantia da segurança, na conformidade regulatória e na eficiência operacional. Ao seguir um checklist específico, os profissionais da mineração asseguram que todas as precauções de segurança foram adequadamente implementadas, equipamentos estão em condições ideais, procedimentos ambientais estão sendo seguidos e requisitos legais estão sendo atendidos. Isso não apenas contribui para a

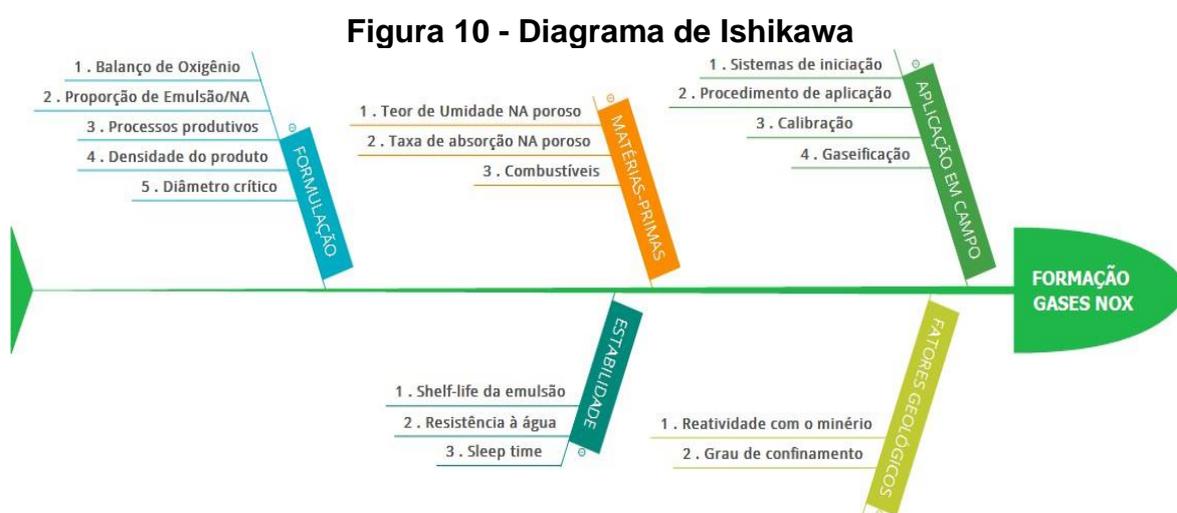
prevenção de acidentes e danos ambientais, mas também otimiza a produção ao minimizar paralisações não planejadas.

As empresas fabricantes de explosivos possuem um checklist de informações importantes a serem respondidas e verificadas para análise, tendo perguntas envolvendo dosagem de explosivo e combustível, calibração dos caminhões, qual material está sendo usado na fabricação do explosivo, densidade, teor, litologia, etc, conforme Anexo 1.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1.1 Matriz de Investigação

De acordo com as informações disponibilizadas através do checklist de investigação (Anexo 1) foi feita uma avaliação, através do Diagrama de Ishikawa, de todas as possíveis causas na formação de gases NOx que podem estar ocorrendo na mineração de minério de ferro, conforme a Figura 10.

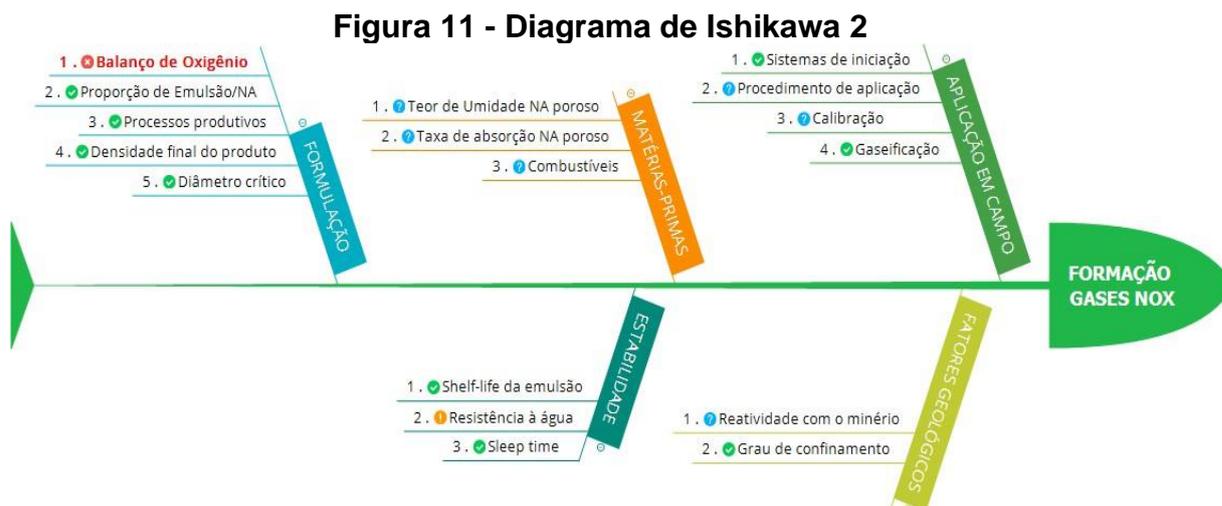


**FONTE: O autor, 2024.**

### 5.1.2 Avaliação das informações

Após a análise das possíveis causas de gases NOx resultadas do desmonte e juntamente das informações avaliadas no checklist, definiu-se os principais pontos onde podem estar ocorrendo possíveis desvios ou que serão necessárias maiores informações e avaliações de campo, conforme Figura 11.

Os pontos em vermelho destacam pontos que apresentou falhas no processo, os pontos em amarelo são pontos de atenção para possíveis falhas no processo, os pontos em azul são pontos com informações insuficientes e/ou ausentes e os pontos em verde são pontos verificados de forma correta.



**Fonte: O autor, 2024.**

O primeiro tópico avaliado diz respeito a quantidade de oxidantes e combustíveis que são necessários para que haja um correto balanço de oxigênio na detonação do produto.

Os cálculos termodinâmicos foram realizados com base nas informações 2.1 a 2.7 do checklist de investigação. Seguem abaixo as informações, conforma a Tabela 3:

**Produto:** Blendado 70/30

**Óleo diesel:** 5,5 l / 100 kg de nitrato de amônio

**Densidade do óleo diesel:** 0,84 g/cm<sup>3</sup>

**% (m/m) óleo diesel:**  $5,5 \text{ L} \times 0,84 \text{ g/cm}^3 = 4,62 \text{ kg de óleo diesel} / 100 \text{ kg de nitrato}$

**Tabela 3 - Composição ANFO**

ANFO		
<b>NITRATO DE AMÔNIO POROSO</b>	100 kg	95,58%
<b>ÓLEO DIESEL</b>	4,62 kg	4,42%
<b>TOTAL</b>	104,62 kg	100%

Os cálculos termodinâmicos indicam que para esta proporção de matérias-primas, o balanço oxigênio global da fórmula está positivo, na ordem de

3,98, favorecendo a possibilidade do surgimento dos gases nitrosos após a detonação.

Para a correção do balanço de oxigênio do explosivo, a porcentagem ideal para dosagem é de 6% de óleo diesel, conforme a Tabela 4:

**Tabela 4 - Composição ANFO - Correção do BO**

<b>ANFO</b>	
<b>NITRATO DE AMÔNIO POROSO</b>	94%
<b>ÓLEO DIESEL</b>	6%
<b>Total:</b>	100%

Ou seja, 7,6 litros para 100 kg de nitrato de amônio. Com esta composição os cálculos termodinâmicos de balanço de oxigênio ficam levemente negativos, -1,74, o que é desejável para formulações explosivas.

Os demais aspectos da formulação foram verificados e estão em conformidade com os padrões estabelecidos.

Outro tópico desta matriz diz respeito às matérias-primas utilizadas. Para este tópico, serão necessários mais dados e análises dos produtos, caso as primeiras soluções técnicas indicadas na conclusão desta análise não sejam efetivas.

A aplicação em campo do explosivo deve ser verificada com relação aos procedimentos e calibração dos equipamentos. Como o produto é fabricado em campo, é sempre bom estar de acordo com as boas práticas de aplicação e se certificar que o equipamento esteja dosando corretamente as matérias-primas e emulsão. Seria importante realizar uma checagem da calibração do caminhão fábrica verificando se as quantidades solicitadas de dosagem de matérias-primas estão de acordo com as quantidades enviadas pelo caminhão.

É importante destacar que a finalidade da calibração dos caminhões é realizar uma análise comparativa entre as condições "Antes" e "Depois" da detonação, mediante a avaliação dos parâmetros pertinentes. O objetivo é

observar e registrar os efeitos comparativos resultantes dessa calibração, proporcionando uma visão clara das alterações ocorridas e seus impactos.

Os fatores geológicos do item 2.22 do checklist de investigação não indicam nenhuma reatividade do produto com a rocha ou falta de confinamento que poderia gerar um esfriamento dos gases de detonação – ambas as situações podem gerar a formação de gases NOx.

A emulsões explosivas são conhecidas pela boa estabilidade do produto e resistência à água. Quanto maior a proporção de nitrato de amônio poroso na fórmula, menor é a resistência à água do explosivo. A proporção utilizada, de 70/30 (EMULSÃO/AN) tem bons resultados de resistência à água.

## 6 CONCLUSÕES

Com tudo que foi apresentado, foi possível montar um plano de ação a respeito da emissão de gases NOx no processo de detonação em mineração com minério de ferro, com o auxílio de checklist, matriz de investigação (Diagrama de Ishikawa) e avaliação das informações, onde identificou-se falhas relacionadas ao BO, onde o valor atual é de 3,98 positivo, sendo necessário uma calibração na quantidade de óleo diesel de 4,42% para 6%, tendo com resultado um BO de 1,74 negativo, adequando a resultados mais satisfatórios em relação a geração de gases nitrosos.

Outro ponto é destacar a importância de manter todos os caminhões sempre calibrados, evitando assim ter diferenças de parâmetros de um carregamento para outro e/ou de um plano de fogo para outro. Dessa forma, temos certeza que todos os parâmetros mostrado nos painéis de controle batem exatamente com o carregamento real nas bancadas e com o plano de fogo.

Como destacado anteriormente, é crucial realizar investigações aprofundadas diante de qualquer evento ou tendência significativa relacionada aos níveis de NOx, a fim de minimizar o potencial de geração desses gases e mitigar os impactos potenciais associados. Essa investigação deve ser conduzida de maneira colaborativa, envolvendo não apenas a equipe responsável pela perfuração e desmonte, mas também o fabricante e/ou fornecedor dos explosivos utilizados. A colaboração com os fornecedores é essencial para identificar soluções proativas e implementar medidas preventivas que contribuam para a redução sustentável das emissões de NOx, promovendo, assim, práticas mais ambientalmente responsáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEISG, Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. **“Code of Good Practice: Prevention and Management of Blast Generated NOx Gases in Surface Blasting”** - Austrália, 2011.

Alkmim F.F & Marshak, S. 1998. **Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region. Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** Precambrian Research, 90 (1-2):29-58.

Almeida F. F. M. 1977. **O Craton de São Francisco.** Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, 7 (4): 349- 364.

Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U., & Kawashita, K. 1973. **The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River.** In The South Atlantic (pp. 411-446). Springer, Boston, MA.

BORBA PRÁ, E. **A Manutenção Industrial Sob a Perspectiva da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) em uma Empresa da Área de Compressores Herméticos.** 2010. 72 p. Dissertação (Graduação em Engenharia em Produção e Sistemas) – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2010.

Clark, G.B. **Industrial High Explosives: Composition and Calculations for Engineers.** Colorado School of Mines. Quarterly, vol. 75, no. 1, 1980. 47 p.

Crosby, W. **International Drilling, Blasting and Explosives Technology Course.** Ouro Preto: 17 a 20 de agosto de 1998.

DIAS, Acires et al. **Metodologia para Análise de Risco: Mitigação de perda de SF6 em disjuntores.** Florianópolis: S.n., 2013. 303 p.

Dorr II, J.V.N. 1969. **Physiographic stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero**. Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional Paper 614 –A, 110 p.

EBELING, Charles. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. New York: The McGraw – Hill Companies, Inc., 1997.

Farina, F., Albert, C., Dopico, C. M., Gil, C. A., Moreira, H., Hippertt, J. P., Lana, C. 2016. **The Archean– Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions**. Journal of South American Earth Sciences, 68, 4-21.

Hustrulid, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining**. Vol 1. Rotterdam: Balkema, 1999. 301p.

Ibukun Oluwoye, Bogdan Z. Dlugogorski, Jeff Gore, Hans C. Oskierski, Mohammednoor Altarawneh, **Atmospheric emission of NOx from mining explosives: A critical review**, Atmospheric Environment, Volume 167, 2017, Pages 81-96, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.006>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231017305113>).

Acessado em Janeiro/2024.

IPARRAGUIRRE, Velásquez J. D. **“Estudio descriptivo de optimización de los agentes de voladura para controlar y/o mitigar los gases tóxicos generados al ser detonados.”** – Cajamarca, Perú, 2015.

Lobato L. M., Ribeiro-Rodrigues L. C., Zucchetti M., Noce C. M., Baltazar O. F., Pinto C. S. C. P. 2001. **Brazil’s premier gold province. Part I: The tectonic, magmatic and structure setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero**. Mineralium Deposita 36: 228-277.

MAHADEVAN, Erode G. **Ammonium Nitrate Explosives for Civil Applications: Slurries, Emulsions and Ammonium Nitrate Fuel Oils**. Singapura: Wiley-VCH, 2013.

MEYER, Rudolf. **Explosives**. 1 ed. Weinheim: Verlag Chemie, 1977.

Porter, P. **Ammonium nitrate blasting agents quality testing for maximum benefit**, ISEE – USA, 2007.

SABINO, C. V. S. et. al. **O uso do diagrama de Ishikawa como ferramenta no ensino de ecologia no ensino médio** – Educação & Tecnologia, Belo Horizonte, V.14, n. 3, p.52-57 – 2009.

SILVA, V. C., **Apostila do Curso de Desmonte e Transporte de Rocha**, Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP, 2009.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**; Revisão técnica Henrique Corrêia, Irineu Gialesi. São Paulo: Atlas, 2009.

TOLEDO, J.C. et al. **Qualidade: Gestão e Métodos**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. São Paulo: Atlas, 2000.

URBANSKI, Tadeusz. **Chemistry and Technology of Explosives. Vol. III**. Varsóvia: Pergamon Press, 1967.

YANG J., LU W., JIANG Q., YAO C., JAING S., TIAN L. A **Study on the Vibration Frequency of Blasting Excavation in highly stressed Rock Masses**. Rock Mechanics and Rock Engineering, 19 p. (2016).

WANG, Xuguang. **Emulsion Explosives**. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.

ZHANG Z.X. **Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications.** Elsevier Butterworth-Heinemann. Longyearbyen, Svalbard, Norway 528p. (2016).

## ANEXO

### ANEXO 1: CHECK LIST DE INVESTIGAÇÃO DE FORMAÇÃO DE GASES Nox

RELATÓRIO TÉCNICO		Nº do Projeto	
Título Projeto		Data:	
Elaborado por:		Revisão:	

#### 1. DADOS GERAIS

Equipe Técnica:

Cliente:

Data Início:

#### 2. CHECK LIST DE INFORMAÇÕES

- 2.1. Qual é o combustível utilizado no preparo do ANFO?
- 2.2. Qual é a quantidade de combustível que está sendo utilizada no preparo do ANFO?
- 2.3. Está sendo utilizado óleo queimado no preparo do ANFO?
- 2.4. Descreva o sistema de armazenamento do nitrato de amônio.
- 2.5. É observada alguma alteração no nitrato de amônio poroso (menor resistência do prill, empedramento, quantidade de finos)?
- 2.6. Qual blenda está sendo preparada no caminhão (emulsão/NA)?
- 2.7. A mescla está homogênea?
- 2.8. A calibração do caminhão está sendo realizada com qual periodicidade?
- 2.9. A formação de gases é observada com a aplicação de algum caminhão específico ou em todos os caminhões de aplicação?
- 2.10. Foi utilizado nitrato de amônio ao invés de ANFO na blenda?
- 2.11. A densidade do produto está sendo controlada durante a aplicação?
- 2.12. Como está sendo preparada a solução de nitrito de sódio 25%?
- 2.13. Qual é o *sleep time* do produto na aplicação?
- 2.14. A fumaça está sendo observada em todos os desmontes? Qual é a data aproximada do início da formação destes gases?

2.15. Qual é a data aproximada do início da formação destes gases? R: Início de Março.

2.16. A formação de gases está localizada em alguma região específica do desmante (início, crista...)?

2.17. Qual é o tipo de material utilizado para tamponamento dos furos e o tamanho médio do tampão?

2.18. Está sendo utilizada bolsa de ar entre a emulsão e o tampão?

2.19. Qual é o tipo e a posição do reforçador?

2.20. Há ocorrência de furos com água?

2.21. Quais são as condições climáticas das aplicações que apresentam a formação dos gases?

2.22. Litologias aonde ocorreram os gases NOx.

2.23. O quantitativo final de cada desmante corresponde às quantidades planejadas?