



Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)

### Dissertação

# MODELAGEM DE DESMONTES DE ROCHAS CONTROLADOS COM AUXÍLIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAS - ESTUDO DE CASO ITABIRA

Rodolfo Matias de Sousa Cruz

Ouro Preto Minas Gerais, Brasil 2022

#### **Rodolfo Matias de Sousa Cruz**

# MODELAGEM DE DESMONTES DE ROCHAS CONTROLADOS COM AUXÍLIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAS - ESTUDO DE CASO ITABIRA

Projeto de Pesquisa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Vidal Félix Navarro Torres, PhD

Ouro Preto 2022 ii

# SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C957m Cruz, Rodolfo Matias Modelagem de de neurais artificias - es de Sousa Cruz 202 64 f.: il.: color., ta	de Sousa. esmontes de rochas controlados com auxilio de redes tudo de caso Itabira. [manuscrito] / Rodolfo Matias 2. ıb., mapa.
Orientador: Prof. Dissertação (Mes Preto. Programa de M Automação de Proce Instrumentação, Con Área de Concentr Processos Minerais.	Dr. Vidal Félix Torres. trado Profissional). Universidade Federal de Ouro 4estrado Profissional em Instrumentação, Controle e ssos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em trole e Automação de Processos de Mineração. ação: Engenharia de Controle e Automação de
1. Redes neurais Demolição - Desmon Comunidades. I. Torr Preto. III. Título.	(Computação). 2. Vibração - Atenuação. 3. te Controlado. 4. Barragens de rejeitos. 5. es, Vidal Félix. II. Universidade Federal de Ouro
	CDU 681.5:622.2

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA **ESCOLA DE MINAS** PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT. PROCESSOS DE MIN.



SEI nº

# FOLHA DE APROVAÇÃO

## Rodolfo Matias de Sousa Cruz

### Modelagem de desmonte de rochas controlados com auxílio de redes neurais artificiais - Estudo de caso Itabira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

Aprovada em 06 de setembro de 2022

Membros da banca

Doutor - Vidal Félix Navarro Torres - Orientador - Instituto Tecnológico Vale Doutor - Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto Doutor - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Universidade Federal de Ouro Preto Doutor - José Ildefonso Gusmão Dutra - Universidade Federal de Minas Gerais

Vidal Félix Navarro Torres, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 04/11/2022



Documento assinado eletronicamente por Bruno Nazário Coelho, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO, em 07/11/2022, às 14:32, 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? <u>acao=documento conferir&id orgao acesso externo=0</u>, informando o código verificador 0422958 e o código CRC 5F0FD483.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.015094/2022-22 0422958

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163 Telefone: (31)3552-7352 - www.ufop.br

"O que realmente importa na vida não são os objetivos que estabelecemos, mas os caminhos que seguimos para alcançá-lo"

(Peter Bamm).

### Agradecimentos

Agradeço ao orientador Vidal Félix Navarro Torres por todo o conhecimento transmitido, paciência e tempo dedicado no suporte necessário a conclusão desta etapa. À minha mãe Anadilva Matias, pelos ensinamentos a mim passados, por ter valorizado a educação e me feito desenvolver um anseio constante por conhecimento. A minha esposa Mariana, pelo companheirismo, compreensão e incentivo ao longo do período dedicado a este estudo.

A Vale SA, por impulsionar o desenvolvimento de seus colaboradores, em especial ao meu gestor no início dessa jornada, Andre Carmo, pelo incentivo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

### Resumo

Resumo da Projeto de Pesquisa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

# MODELAGEM DE DESMONTES DE ROCHAS CONTROLADOS COM AUXÍLIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAS - ESTUDO DE CASO ITABIRA

Rodolfo Matias de Sousa Cruz

Setembro, 2022

Orientador: Vidal Félix Navarro Torres, PhD.

Este estudo avalia o comportamento dinâmico de vibrações geradas pelos desmontes com explosivos nas operações do complexo minerador de Itabira, contemplando as barragens de Conceição, Itabiruçu, Borrachudo e Cambucal e da cidade de Itabira. Tem por objetivo é caracterizar comportamento da atenuação das vibrações induzidas por detonações com explosivos no sentido das barragens e da cidade para evitar possíveis danos as estruturas e incomodidade humana.

Este estudo adotou uma metodologia para prever, avaliar e controlar as vibrações do terreno operando próximo a barragens e a comunidade. Foram monitorados sistematicamente mediante 543 pontos correspondentes as 74 desmontes distribuídos redor das barragens citadas e da cidade de Itabira, de janeiro a junho de 2021. A campanha de monitoramento sísmico foi realizada utilizando 21 sismógrafos de engenharia, para consolidar uma robusta base de dados que permitem determinar a lei de atenuação das vibrações e caracterizar a propagação das ondas sísmicas induzidas pelos desmontes com explosivas realizados nas minas de Conceição e Minas do Meio.

Após coleta em campo, estes foram tratados de modo a consolidar um banco de dados e utilizados para treinar redes neurais artificiais com o objetivo de criar modelo de predição de PPV, PVS e Frequência para as principais direções de vibração, selecionando aquelas com o melhor desempenho. Por fim criou-se uma interface gráfica para realizar a avaliação das vibrações de forma simples e intuitiva, que possibilitou sua aplicação prática nas operações da mina em estudo, propiciando o atendimento a normas de segurança, sem afetar a eficiência das operações.

Palavras-chave: Desmonte Controlado. Barragem de Rejeitos. Comunidade. Atenuação de Vibrações. Redes Neurais.

**Macrotema:** Mina; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Previsão e Controle de Vibrações. **Área Relacionada da Vale:** Desmonte de Rochas.

### Abstract

Abstract of Research Project presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

# DETONATION MODELING OF CONTROLLED ROCKS WITH THE AID OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS - ITABIRA CASE STUDY

Rodolfo Matias de Sousa Cruz

September, 2022

Advisors: Vidal Félix Navarro Torres, PhD

This project aims to study the dynamic behavior of vibrations generated by blasting with explosives in the operations of the mining complex of Itabira, contemplating the dams of Conceição, Itabiruçu, Borrachudo and Cambucal and the city of Itabira. The objective is to characterize the behavior of the attenuation of vibrations induced by blastings with explosives towards the dams and the city to avoid possible damage to structures and human discomfort.

This study presents a methodology to predict, evaluate and control ground vibrations operating close to dams and the community. They were monitored systematically through 543 points corresponding to the 74 blastings distributed around the already mentioned dams and the city of Itabira, from January to June 2021. The seismic monitoring campaign was carried out using 21 engineering seismographs, to consolidate a robust database that allows determine the vibration attenuation law and characterize the propagation of seismic waves induced by blasting carried out in the Conceição and Minas do Meio mines.

After collecting data in the field, consolidate a database and used to train artificial neural networks in order to create a PPV, PVS and Frequency prediction model for the main vibration

directions, selecting those with the better performance. Finally, create a graphical interface to perform the vibration assessment in a simple and intuitive way, allowing its subsequent practical application in the operations of the mine under study, providing compliance with safety standards, without affecting the efficiency of operations.

**Keywords**: Controlling Rock Blasting. Tailings Dam. Community. Vibration Attenuation. Neural Network.

Macrotheme: Mine; Research Line: Instrumentation in Mineral Processing; Theme: Vibration Prediction and Control.; Related Area of Vale: Rock Blasting

# Lista de Figuras

Figura 3.1: Tipos de ondas e movimento das partículas do solo	20
Figura 3.2: Limites de vibração recomendadas pela DIN-4150, 2016	23
Figura 3.3: Norma portuguesa NP 2074-2015	23
Figura 3.4: Limites de vibração recomendadas pela norma BS 6472-2:2008, em relação a resposta humano, para a até 3 eventos com vibração por dia	24
Figura 3.5: Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência	25
Figura 3.6: Modelo do neurônio artificial baseado no neurônio humano	
Figura 3.7: Funções de Ativação	27
Figura 3.8: Arquitetura e Topologia das Redes Neurais.	
Figura 3.9: Processo de treinamento.	
Figura 4.1: Metodologia de estudo	
Figura 4.2: Metodologia de desmonte controlado	
Figura 4.3: Litologia da mina de Conceição. A coloração azul escuro representa o itabirito compactado, azul claro itabirito friável	
Figura 4.4: Seção vertical do Sinclinal Conceição	
Figura 4.5: Seção vertical das Minas do Meio	37
Figura 4.6: Descrição das litologias sentido a cidade.	37
Figura 4.7: Localização das Barragens de Borrachudo, Conceição, Cambucal, Itabiruçu, pontual, Rio do Peixe e os diques Minervino e cordão nova	
Vista em relação ao município de Itabira.	
Figura 4.8: Pontos de monitoramento sísmico com foco a barragem de Conceição, Planta de concentração II e diques A e B (Campanha 1)	40
Figura 4.9: Pontos de monitoramento sísmico com foco a barragem de Itabiruçu	
(Campanha 2)	40

Figura 4.10: Direções contempladas durante a campanha de monitoramento	
sísmico.	42
Figura 4.11: Sismógrafos instalados.	43
Figura 4.12: Pontos de desmonte e monitoramento sísmico durante a campanha	
realizada de janeiro a julho de 2021.	44
Figura 4.13: Características dos sismógrafos de engenharia utilizados no Teste	45
Figura 5.1: Retirada dos valores de outliers	47
Figura 5.2: Análise dos resíduos (PVS)	47
Figura 5.3: Histograma de frequências dominantes das vibrações.	48
Figura 5.4: Fluxograma do processo de treinamento da Rede Neural	50
Figura 5.5: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 1	51
Figura 5.6: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 2	52
Figura 5.7: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 3	52
Figura 5.8: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 4	53
Figura 5.9: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 5	54
Figura 5.10: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Todas Direções.	
	54
Figura 5.11: Regressão do Modelo (PPVL medido x PPVL calculado)	55
Figura 5.12: Regressão do Modelo (frequência medida x frequência calculada)	56
Figura 5.13: Resumo dos valores de R2 e MAE para as redes treinadas para	
predição de PVS	57
Figura 5.14: Visão geral do software de previsão de vibração no local apontado no	
mapa	58

# Lista de Tabelas

Tabela 4.1:	: Pontos prograv	nados de monito	ramento e quanti	dade de leituras	41
I abcia 411	, i ontos progra	nuuos uo monno	rumento e quanti	uuue ue leitulus	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •

# Lista de Siglas e Abreviaturas

- ITV: Instituto Tecnológico Vale.
- PPV: Vibrações pico de partículas
- PVS: Soma vetorial da velocidade pico da partícula
- RNA: Rede neural artificial

# SUMÁRIO

1		INTRODUÇÃO	14
2		OBJETIVOS	16
	2.1	Objetivo geral	16
	2.2	Objetivos específicos	16
3		REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA	17
	3.1	Vibrações geradas por desmonte de rochas	17
	3.2	Tipos de ondas geradas pelo processo de detonação	18
	3.3	Redes Neurais Artificiais	25
4		MATERIAIS E MÉTODOS	32
	4.1	Caracterização da área de estudo	34
	4.2	Plano de caracterização in situ das vibrações	38
	4.3	Resultados da campanha de monitoramento in situ	43
5		METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DA REDE NEURAL	46
	5.1	Tratamento de dados	46
	5.2	Arquitetura das Redes Neurais	48
	5.3	Treinamento das redes neurais para estimar vibração (PVS) nas cinco direções	51
	5.4	Treinamento das redes neurais para estimar vibração (PPV)	55
	5.5	Interface ao usuário	57
6		CONCLUSÕES	59
7		TRABALHOS FUTUROS	60
	J	REFERÊNCIAS	61

#### 1 INTRODUÇÃO

Nas operações de lavra de minas, o desmonte de rocha por explosivos é amplamente aplicado e consequentemente associado a diversos efeitos secundários. Parte destes efeitos podem causar danos como também incomodo humano, tal como, as vibrações no terreno que vêm apresentando grande relevância devido ao atual cenário da mineração em função do rompimento de estruturas de mina.

Devido ao rompimento de barragens de rejeitos as fiscalizações em torno dessas construções estão cada mais rigorosas. Devido à proximidade de algumas barragens em torno das minas de Itabira (barragem de Conceição está aproximadamente 600 m de distância da área de desmonte) a vibração proveniente do desmonte de rochas pode afetar a estabilidade dessas estruturas. Essas barragens também estão muito próximas da cidade, como no caso da barragem de Cambucal, que está praticamente a 200 m da cidade de Itabira. Uma possível ruptura geraria um impacto ambiental, social e econômico enorme. O aumento do volume desmontado e o avanço das frentes de lavras nas proximidades irá exigir um dimensionamento criterioso do plano de fogo. Sendo assim, será possível a execução de um desmonte controlado que afete o mínimo possível as barragens e evite possíveis danos estruturais e incomodidade humana da população circunvizinha.

Por meio de diversas fontes bibliográficas e estudos de casos, já é possível associar problemas de estabilidade de barragens de rejeitos com a influência de vibrações no terreno. Dentre os problemas, um que vem sendo bastante discutido é o efeito da liquefação dinâmica referente a barragens de rejeito, motivado pela possibilidade de ruptura física de barragem pelo fenômeno, principalmente em função de estruturas projetadas por alteamento a montante.

Geralmente a prática do desmonte de rochas por explosivos baseia-se em uma aplicação experimental e pouca introdução de estudos científicos para aprimorar a operação. Isso favorece a iniciativa de estudos na área para deixar a prática mais sustentável. Para atingir uma maior sustentabilidade o estudo das propriedades dinâmicas do meio deve ser caracterizado, permitindo checar a influência dessa prática ao entorno da mina.

Via um monitoramento *in situ*, será possível identificar a característica das operações de desmonte de rochas no complexo Itabira, o comportamento dinâmico de vibrações induzidas na região da mina e os possíveis efeitos a serem gerados em barragens próximas. Por fim, com os resultados das análises dos sismos induzidos formando um banco de dados podemos utilizá-

lo para treinar redes neurais artificiais para criar modelos de predição vibração dos desmontes. De posse desta ferramenta pode-se avaliar possíveis impactos na segurança das barragens, das estruturas urbanas e a incomodidade humana, adequando desta forma o dimensionamento do plano de desmonte de modo a atender os limites de vibração estabelecidos pelas operações de forma a garantir a segurança e estabilidade das barragens, assim como evitar os possíveis danos e incomodo humano na cidade de Itabira.

Esta aplicação nas operações de mina poderá levar a uma produção sustentável e focando na segurança da operação.

#### **2 OBJETIVOS**

#### 2.1 Objetivo geral

Caracterização o comportamento das ondas sísmicas induzidas pelos desmontes com explosivos entre as cavas de minas do Complexo Itabira e as estruturas geotécnicas sensíveis, tais como barragens e a cidade de Itabira, usando métodos estatísticos e redes neurais, para desenvolver planos de fogo com controle de vibrações compatíveis com a segurança das barragens, das estruturas urbanas e a incomodidade humana na cidade de Itabira.

#### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os métodos de desmonte de rochas com explosivos praticados na mina através da frequência dos parâmetros do desmonte de rochas utilizados.
- Caracterizar o nível de vibração induzida por detonações que chega até as estruturas tais como casas, edifícios e barragens de rejeito do complexo ferrífero de Itabira.
- Caracterizar a lei de atenuação de vibrações induzidas por detonações que ocorre em diferentes direções do Complexo de Itabira.
- Treinar a rede neural e elaborar a arquitetura e dos algoritmos de treinamento da rede;
- Validar os resultados e criação dos modelos para predição de PPV, PVS e Frequência Dominante para as 5 direções de desmonte;
- Desenvolver a interface gráfica de modo a facilitar a utilização da rede neural como ferramenta de previsão e controle de vibrações.
- Face livre

#### **3 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA**

#### 3.1 Vibrações geradas por desmonte de rochas

O desmonte de rochas por explosivos é o método que apresenta o melhor custo-benefício na fragmentação de rochas. Porém, apenas cerca de 5 a 15% da energia liberada é efetivamente utilizada para fragmentar o material e o restante da energia se dissipa no ambiente gerando efeitos secundários (GAMA, 1998). Dentre os principais estão: danos ao maciço rochoso remanescente, ultra lançamento, geração de poeira, pressão acústica e as vibrações. Devido à proximidade das minas com a comunidade, é comum observar reclamações sobretudo pela geração de vibrações e pressão acústica que podem causar danos estruturais a residências e incômodo humano (TORRES *et al.*, 2018).

Segundo (ÁLVAREZ-VIGIL *et al.*, 2012), as características das vibrações induzidas no maciço rochoso originadas da atividade de desmonte com explosivos, dependem de alguns fatores tais como:

- O tipo de rocha, devido a diferença de velocidade de propagação da onda para cada terreno;
- A ocorrência de famílias de descontinuidades, falhas, mudanças litológicas e dobramentos;
- A distância da detonação até o ponto de controle;
- Variações topográficas em o local desmonte e de proteção;
- Outra parcela relacionada à detonação, ou seja, a fonte da vibração, são:
- O tipo de explosivo a ser utilizado;
- A carga máxima por espera;
- Geometria do plano de desmonte, passando pelo afastamento, espaçamento, diâmetro do furo, comprimento do furo;
- A temporização utilizada no desmonte.

Diversos estudos científicos, entre estes alguns feitos com o ITV, contribuíram para um desmonte de rochas controlado, isto é, de modo a evitar danos estruturais a estruturas sensíveis e incômodo à população da comunidade circunvizinha utilizando ferramentas computacionais para delimitar regiões mais impactadas pelas ondas geradas pelo desmonte de rochas como os realizados por Torres *et al.* (2018), Silveira (2017) e Torres *et al.* (2019). Dentre os principais

motivos do estudo das vibrações na área da mineração, se dá uma maior importância aos danos estruturais em barragens de rejeito. Atualmente, a preocupação envolvendo os efeitos das vibrações induzidas por desmonte de rochas por explosivos com a segurança da estabilidade de estruturas geotécnicas dentro da mina aumentou, principalmente para as barragens construídas pelo método montante que não foram projetadas para suportar abalos sísmicos. Então, trabalhos de análise de riscos de classificação de rejeitos foram feitos para levar as principais causas de ruptura concluiu-se que 83% das falhas ocorreram quando as barragens estavam ativas, 15% ocorreram em barragens inativas e abandonadas e apenas 2% ocorreram em barragens inativas, mas mantidas pelo proprietário (PEREIRA, 2016).

Outro trabalho feito em parceria com o ITV utilizou-se de métodos probabilísticos de simulação de Monte Carlo para estudar o comportamento das vibrações para evitar possíveis danos a uma barragem de rejeitos em uma mina do quadrilátero ferrífero mineiro. Pela análise probabilística foi possível considerar uma alta probabilidade de ocorrência dos desmontes realizados com 53 kg de carga máxima por espera a uma distância de 700m atingirem valores de velocidade pico de partícula estimados equivalentes a 0,1 mm/s na barragem de rejeito. Ao mesmo tempo, apresentam baixos valores de probabilidade de alcançar valores equivalentes a 1 mm/s na barragem, indicando que a metodologia de desmonte aplicada representa uma baixa influencia quanto a vibrações no terreno (FERREIRA, 2020).

As ondas sísmicas são consideradas como um fator com capacidade para gerar danos a estruturas próximas à mina, portanto é importante o seu monitoramento. Os efeitos dos desmontes incluem mudanças no comportamento das rochas com implicações na estabilidade e integridade das estruturas, podendo inclusive ser considerado como gatilhos para o processo de liquefação de barragens de rejeito, principalmente aquelas construídas pelo método a montante, mais vulneráveis abalos sísmicos (GAMA, 1978).

Contudo, para a área de vibrações induzidas poucos estudos são observados, a maior parte são destinados aos estudos com sismos naturais (terremotos) (GAMA, 1978). Estruturas são projetadas e construídas para suportar cargas estáticas e dinâmicas (STOJADINOVIC *et al.*, 2011).

#### 3.2 Tipos de ondas geradas pelo processo de detonação

As vibrações geradas no terreno advindas da energia remanescente do desmonte de rochas por explosivos são ondas mecânicas descritas pela oscilação durante o deslocamento da

partícula do meio, como também pela velocidade e aceleração em um determinado período (AVELLAN; BELOPOTOCANOVA; PUURUNEN, 2017).

As ondas Volumétricas que se propagam no interior do maciço, podem ser de dois tipos, as ondas P ou primarias são ondas de maior velocidade se caracterizam também pelo movimento de compressão e tração no sentido de propagação da onda.

As ondas S ou secundarias possuem uma velocidade reduzida em relação a onda P, e o movimento que ela provoca no terreno é perpendicular a direção de propagação da onda,

Ondas Superficiais, são ondas que se propagam próximas a superfície do terreno e se dividem em dois tipos: as ondas *Rayleigh* que são caracterizadas por um movimento elíptico retrogrado, o que pode ser considerado uma combinação de ondas P e possuem velocidades de propagação inferiores as da onda S.

As ondas *Love* são caracterizadas por provocar no terreno movimentos transversais horizontas a direção de propagação da onda.



Figura 3.1: Tipos de ondas e movimento das partículas do solo Fonte: BOLT, 1982.

As propriedades elásticas do meio também se relacionam com a maneira que as ondas vibracionais se propagam, é devido ao comportamento anisotrópico e heterogêneo das rochas e dos solos cuja determinação da propagação dessas ondas se tornam uma tarefa extremamente complexa.

Assim, as características do meio rochoso geram problemas na aplicação de teorias e análises das leis de propagação. Dessa forma, trabalhos de previsibilidade e monitoramento são realizados com base em equações aplicáveis para cada local geradas por registros coletados em campo (HOLMBERG; PERSSON, 1979). Pela necessidade de controlar as vibrações, métodos para caracterizar as vibrações são utilizados com equações representativas da propagação das vibrações no terreno. Dos parâmetros para a medição das vibrações, a Velocidade de Pico de

Partícula e Aceleração Pico são as mais importantes para avaliar possíveis danos a estruturas devido a sismos induzidos.

A correlação entre amplitudes das vibrações, velocidade de vibração de partícula de pico e os fatores relacionados à fonte de energia sobre os quais se tem controle, como a massa de explosivos detonada por espera e a distância entre ela e o ponto monitorado é determinada pela equação conhecida como atenuação da velocidade das vibrações. A equação 1 de Johnson (1971) apud Silveira (2017) é considerada no meio científico a mais simples para descrever o comportamento das ondas sísmicas no terreno geradas pelo desmonte de rochas com explosivos.

$$\nu = aQ^b D^c \tag{1}$$

Onde:

v = velocidade de vibração de partícula resultante máxima (mm/s);

a, b, c: constantes da litologia local e particularidades das detonações

Q= carga máxima por espera (kg);

D= distância entre o ponto de detonação e o ponto monitorado (m).

A equação descrita trabalha com a distância real entre o ponto de detonação e os pontos de monitoramento, ao invés da distância escalonada utilizada nos outros modelos. Considera também os parâmetros específicos do terreno, ajustados por regressão linear múltipla, ao invés de atribuir valores já pré-estabelecidos.

A geologia local e a geomecânica das rochas têm uma grande influência na propagação das vibrações. A heterogeneidade das propriedades geomecânicas, bem como a existência de diferentes litologias, leva à diversificação das propriedades de propagação. Os diferentes tipos de solos e rochas acarretam um papel de filtragem de vibrações com determinadas frequências, tipicamente entre 5 e 100 Hertz (KUMAR *et al.*, 2016).

A existência de diferentes litologias e heterogeneidades no terreno têm, em grande parte dos casos, um efeito atenuador na propagação das vibrações no terreno. Contudo, em condições específicas, podem ocorrer fenômenos de amplificação, desencadeando assim um aumento do risco de acidentes. Um dos exemplos mais claros é, no caso de solos estratificados, a ocorrência de amplificação das vibrações quando ocorre uma diminuição da espessura dos estratos (THOMÉ; PASSINI, 2018).

O grande problema, quando se considerada as barragens de rejeito, se dá pelas diferenças encontradas quanto a alteração das vibrações entre meios rochosos e terrosos. Esse fator pode ser bem observado em zonas de contato entre rochas e solos, onde a amplitude da vibração é relativamente menor em solos do que em rochas e na zona de contato entre esses meios podem acarretar um efeito de reflexão de onda, permitindo uma variação da intensidade da onda vibratória (JAYASINGHE *et al.*, 2019).

Ondas de baixa frequência, da ordem de 8 Hz ou abaixo, ou ondas de alta frequência têm efeitos diferentes sobre as estruturas. As de baixa ou muito baixa frequência podem danificar seriamente a estrutura e as de alta frequência são menos propensas a causar danos. A estabilidade de maciços terrosos com os efeitos da vibração pode ser determinada pela relação entre a oscilação das partículas e o aumento da poropressão do maciço. Esses materiais sofrem uma redução do seu volume aumentando a poropressão. A distância entre as partículas aumenta diminuindo o contato entre os grãos (MA; HAO; ZHOU, 2020).

Geralmente, os efeitos da vibração são mais perceptíveis em locais próximos às detonações, ou seja, quanto mais próximo uma construção estiver, maior será o impacto sofrido. Os fatores que contribuem para a atenuação das vibrações com a distância são: a expansão geométrica das ondas, a progressiva separação das três componentes, longitudinal, vertical e transversal que provém das diferentes velocidades de propagação, a presença de descontinuidades nos maciços (causando reflexões, refrações, difrações e dispersões) e o atrito interno dinâmico característico das rochas) (TAIEBAT *et al.*, 2017).

Normas internacionais de admissibilidade de vibração induzida por detonação, distância mínima entre a mina e comunidade e as constantes obtidas na regressão são utilizadas para estabelecer a máxima carga explosiva por espera para um nível de vibração do solo aceitável que não causaria danos estruturais e desconforto humano. Como, por exemplo, a norma alemã DIN – 4150 (BACCI, 2003). Esta norma tem sua primeira edição datada do ano de 1975, está desde então sendo aprimorada e revisada periodicamente, sofreu alterações nos anos de 1986, 1999 e a última versão data de 2016. Esta norma divide as estruturas em 3 tipos, tipo um

habitações, tipo dois industrial e tipo três edifícios particularmente delicados, conforme Figura 3.2:

Tipo de estrutura	Guia de valores de $v_{i,max}$ em mm/s					
	Na fundação, em todas as direções i = x, y, z para as frequências de			No piso mais elevado, na direção porizontal	Nas lajes, na	
				i = x, y	i = z	
	1Hz a 10Hz	10Hz a 50Hz	50Hz a 100Hzª	Todas as frequências	Todas as frequências	
1	20	20 a 40	40 a 50	40	20	
2	5	5 a 15	15 a 20	15	20	
3	3	3 a 8	8 a 10	8	20 <sup>b</sup>	

Nota 1: Todos os valores de referência dados, mesmo respeitados, pequenos danos não podem ser excluídos

Figura 3.2: Limites de vibração recomendadas pela DIN-4150, 2016 Fonte: FARIA, 2020.

Por sua vez, a norma portuguesa atualizada, NP 2074 – 2015, intitulada "Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares." também considera a frequência e o tipo de estruturas para definir a velocidade máxima de vibração de partícula de pico admissíveis.

	Velocidade máxima de vibração de partículas (mm/s)			
Tipos de estruturas	Frequência dominante, f			
	f ≤ 10 Hz 10Hz < f ≤ 40 Hz		f > 40 Hz	
Sensíveis	1,5	3	6	
Correntes (comuns)	3	6	12	
Reforçadas	6	12	40	

Figura 3.3: Norma portuguesa NP 2074-2015

Fonte: adaptado de Instituto Português Da Qualidade, 2022.

Outra norma que trata de controle de vibrações é a Britânica, BS 6472-2:2008, "Guia para avaliação da exposição humana à vibração em edifícios – Parte 2: Vibração induzida por

explosão" que contém critérios PPV para resposta humana à detonação, bem como métodos de previsão utilizando distância escalonada. (BRITISH STANDARD, 2008).

Local	Horário	PPV (mm/s) satisfatório
	Dia	6.0 a 10.0
Residencial	Noite	2.0
	Outros horários *	4.5
Escritórios	A qualquer hora	14.0
Oficinas	A qualquer hora	14.0

Figura 3.4: Limites de vibração recomendadas pela norma BS 6472-2:2008, em relação a resposta humano, para a até 3 eventos com vibração por dia.

Fonte: adaptado de British Standards, 2008.

\* Para efeitos de detonação, considera-se diurno o horário das 8 às 18 horas de segunda a sexta e sábado de 8 às 13 horas. As detonações de rotina normalmente não deveriam ser realizadas aos domingos ou feriados. Outros horários cobrem o período fora da jornada de trabalho, mas excluem o período noturno, que é definido como das 23 às 07 horas.

A norma apresenta também um fator que deve ser aplicado quando ocorrem mais de três eventos de vibração originada de uma detonação em um dia, deve ser utilizado um fator multiplicador adicional, o fator "F", para adequar os limites a valores satisfatórios, "F" deve ser calculado da seguinte forma:

$$F = 1.7N^{0.5}T^{-d}$$

Onde:

N é o número de eventos por dia

T é a duração típica da vibração

d é zero para T menor que 1s, 0.32 para pisos de madeira e 1.22 para pisos de concreto.

Para a norma, a definição de um evento de vibração de explosão é aquela que apresenta um PPV superior a  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . E a duração é o período de tempo em segundos, durante o qual este nível é excedido.

No Brasil o tema é tratado pela norma NBR 9653/2018, "Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas". (ABNT, 2018) A figura

2 apresenta o gráfico que relaciona velocidade de partícula com a frequência associada à onda de choque, adotada pela norma.



Figura 3.5: Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência Fonte: ABNT, 2014.

A norma trata dos limites com base na faixa de frequência, porém este normativo não indica limites relacionados a incômodos gerados nas comunidades vizinhas a regiões onde são realizados desmontes de rochas.

Para barragem de rejeito não há evidências que comprovam que os limites apresentados na norma são seguros. A norma brasileira não é apropriada para avaliar a estabilidade e a segurança de uma barragem de rejeitos e de outras estruturas sensíveis, levando em conta o fato de que em estudos relacionados a estabilidade de barragens de rejeito, o parâmetro que é levado em consideração é a aceleração da partícula e não a velocidade.

Nesse contexto, percebe-se a necessidade de realizar estudos científicos que contribuam para a manutenção desta lavra de minério de ferro, de modo com que ela atue com desmonte de rochas controlado, isto é, de modo a evitar danos estruturais e incômodo à população da comunidade.

#### 3.3 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA) são uma ramificação da área de Inteligência Artificial e são usadas, principalmente, para processar informações de modo análogo ao funcionamento dos neurônios presentes no cérebro. Assim, são compostas por unidades básicas, os neurônios, altamente conectadas e processando paralelamente informação (COSTA, 2019). As RNAs utilizam um modelo de neurônio artificial desenvolvido por McCulloch e Pitts, (1943). Através da modelagem matemática, este neurônio tenta reproduzir a capacidade de aprendizado do neurônio humano.



Figura 3.6: Modelo do neurônio artificial baseado no neurônio humano. Fonte: SOUZA, 2020.

A saída de cada neurônio é ligada à entrada de outro neurônio formando uma rede. Ás ligações dá-se o nome de sinapses ou pesos sinápticos. O processamento de cada neurônio consiste na combinação linear das entradas. A cada entrada  $I_i$  está associado um peso  $W_i$  que reflete a sua importância. Então tem-se que a função de transferência (TF) é:

$$TF = I_1 * W_1 + I_2 * W_2 + \dots + I_n * W_n = \sum_{i=1}^n I_i * W_i$$
(1)

À função de transferência da equação 1 é somado um limiar  $\theta$  ou *bias*, esta constante tem a função de ajustar a saída ponderada e trazer flexibilidade para o ajuste da rede. O resultado passa por uma função de ativação  $f(\Sigma)$  que tem o objetivo de restringir os valores de saída de

cada neurônio. Cada função de ativação tem sua particularidade, por exemplo, a função Linear produz uma saída linear contínua, a função Degrau, uma saída binária (não-linear discreta) e a função Sigmoidal, uma saída não-linear contínua. As principais funções de ativação utilizadas podem ser vistas na Figura 3.7.



Figura 3.7: Funções de Ativação Fonte: COSTA, 2019.

Além da sua unidade básica, o neurônio artificial, dois outros fatores são muitos importantes na criação de redes neurais: a arquitetura e o algoritmo de treinamento. A arquitetura diz respeito ao número de camadas da rede, sua topologia e o número de neurônios. Uma rede de um único neurônio é chamada de *perceptron*. Já quando temos vários neurônios conectados formando diversas camadas dá-se o nome de *Multilayer Perceptron* ou MLP. As camadas são definidas como um grupo de neurônio que recebem informação simultaneamente. As camadas que não estão ligadas a entrada ou saída são ditas camadas internas, ocultas ou escondidas.

Já a topologia diz respeito ao método de propagação da informação recebida. Quando a informação é feita somente em um sentido, tem-se uma rede feedforward. A informação que é retroalimentada, ou seja, volta ciclicamente para realimentar a rede, define a topologia feedback. Os detalhes da arquitetura podem ser vistos na Figura 3.8



Figura 3.8: Arquitetura e Topologia das Redes Neurais. Fonte: RAUBER, 2005.

Após a definição da arquitetura da RNA, o próximo passo é a definição do algoritmo de aprendizagem. O processo de aprendizagem visa modificar os pesos entre os neurônios com o objetivo de minimizar o erro entre os valores de saída obtidos pela rede e os valores desejados. O principal algoritmo de aprendizado utilizado na literatura é o *Backpropagation*. O algoritmo de *Backpropagation* é o aquele que apresenta maior versatilidade e robustez, além de ser mais eficiente no processo de aprendizagem em multicamadas. Portanto é o algoritmo mais aplicável e será utilizado no desenvolvimento deste estudo. Um esquema do algoritmo pode ser visto na Figura 6.



Figura 3.9: Processo de treinamento. Fonte: SOUZA, KURKA e LINS, 2019.

O primeiro estágio deste algoritmo está relacionado a propagação direta (*feedforward*) da informação. As entradas, os neurônios da camada oculta e da camada de saída são representados por  $I_n$ ,  $H_p \in O_q$ , respectivamente. Os pesos são representados por W e os limitares (ou *bias*) por *b*.

Os resultados da camada oculta e da camada de saída são descritos pelas equações 2 e 3.

$$h_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{j,i}^{(1)} I_i + b_1\right) \therefore i = 1 \dots n; \ j = 1 \dots p$$
<sup>(2)</sup>

$$o_k = f\left(\sum_{j=1}^p W_{k,j}^{(2)} h_j + b_2\right) \therefore k = 1 \dots q$$
(3)

Onde n representa o número de entradas, p o número de neurônios da camada oculta e q o número de saídas. Já  $W_{j,i}^{(1)}I_i$  e  $W_{k,j}^{(2)}h_j$  são as matrizes de pesos sinápticos que ligam os neurônios.

O segundo estágio obtém os erros resultantes da diferença entre as saídas  $o_k$  e os valores medidos ou alvo  $t_k$ . Este erro é dado como Erro Quadrático da Soma (ou *Sum Square Error - SSE*) representado na equação 4.

$$E = \sum_{k=1}^{q} E_k(s) = \sum_{k=1}^{q} (t_k(s) - o_k(s))^2$$
(4)

O objetivo da RNA é minimizar a função Erro Quadrático Médio (ou *Mean Square Error* - *MSE*), sendo que  $E_m = \frac{E}{S}$ . Onde S representa o número de amostras.

No terceiro estágio, conhecido como propagação reversa (*back-propagation*), os pesos e os limiares são atualizados através de uma retroalimentação dos erros. Os passos do treinamento do primeiro estágio até o terceiro são repetidos de forma iterativa até obter um erro mínimo definido. A vibração causada pelo uso de explosivos no desmonte de rochas, também pode ser indiretamente afetada por outros fatores, como parâmetros do plano de fogo e litologia. Visto que a influência de tais fatores na vibração é difícil de ser medida por métodos tradicionais, fazse necessário o uso de técnicas para reconhecimento de padrões através de algoritmos de aprendizado de máquina como as Redes Neurais Artificiais (KHANDELWAL; SINGH, 2009). Estas redes devem ser treinadas com um banco de dados que contenha informações suficientes para possibilitar que ela consiga reconhecer padrões, quando o erro atinge valores que serão estabelecidos como aceitáveis o treino está concluído e a rede poderá então ser usada para realizar as previsões esperadas.

O uso de rede neural aplicada a previsão de vibração, fragmentação de rochas e outros impactos associados ao desmonte com explosivos vem sendo aplicado recentemente, motivado pela eficiência demonstrada por esse tipo de metodologia, como alguns estudos a seguir.

Tiile (2016) desenvolveu uma rede neural com a arquitetura 7-13-3, ou seja, sete neurônios na camada de entrada, 13 na camada interna e 3 na camada de saída, para esta rede a arquitetura escolhida foi a de feedfoward back-propagation. A rede neural foi utilizada para minimizar os impactos de vibração e ruido, adequando com simulações previas ao planejamento dos desmonte para atender aos limites estabelecidos pela operação em estudo, mineração de Ouro em Gana na África, que seriam estes, a vibração fora do empreendimento abaixo de 0.7mm/s de PPV e ruido abaixo de 115dB.

Trivedi, Singh e Raina (2014) utilizaram de uma rede neural que também se utilizada de uma arquitetura feedfoward back-propagation para previsão de possíveis ultra lançamentos gerados por desmonte de rochas em quatro minas de calcário na Índia. Como variáveis de entrada foram utilizados os seguintes parâmetros: razão linear de carregamento, afastamento da malha de perfuração, tamanho do tampão, razão de carga, Resistencia não confinada da rocha (UCS) e a designação de qualidade da rocha (RQD). A rede neural conseguiu realizar previsões com coeficiente de correlação de 98%.

Kamali e Ataei (2010) desenvolveram estudos com o objetivo de prever o PPV das vibrações durantes as detonações para construção da usina de Karoun III localizada no Irã. Foram utilizados três modelos para predição de vibração, análise estatística por meio de uma regressão multivariada, modelos empíricos além de redes neurais.

Os resultados obtidos com cada técnica foram analisados a partir de dois parâmetros. A correlação entre os dados observados e os previstos além do erro total entre os dados observados e os previstos. Ao fim da campanha de monitoramento e aplicação dos três métodos, aquele que apresentou o melhor desempenho foi a rede neural, com coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 98%, para o modelo de análise estatística o resultado obtido foi de 94% e para os modelos empíricos o melhor resultado obtido foi de um R<sup>2</sup> de 92%, sendo, portanto, a rede neural escolhida como o melhor método para este tipo de estudo.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo se baseia no monitoramento *in situ* e correlação com parâmetros de desmonte com explosivos, caracterização da propagação das vibrações induzidas pelo desmonte de rochas e da propagação das ondas entre as barragens, estruturas urbanas próximas ás cavas e o incomodo humano da população de Itabira, análise e tratamento do banco de dados consolidados, desenvolvimento e treinamento de rede neural para predição de vibração nas direções principais de desmontes. Este estudo foi realizado segundo as seguintes etapas:

- Delimitação da litologia e tipo de terreno que ocorre entre as operações de lavra e a comunidade mediante modelos topográficos, geológicos e geotécnicos disponibilizados pela equipe da mina e artigos científicos;
- Caracterização dos atuais registros de vibração e pressão acústica provenientes dos planos de fogo comumente utilizados perante normas e padrões de admissibilidade.
- Consolidação da base dados de vibrações, através de campanhas de monitoramento com sismógrafos de engenharia alocados em pontos distintos da região, registrando as vibrações pico (PPV) nas três direções (transversal, vertical e longitudinal), a resultante (PVS) e a frequência.
- Determinação da lei de atenuação das vibrações e pressão acústica para o tipo de terreno existente entre a cava e a comunidade, utilizando técnicas de regressão linear múltipla com o uso do software LABFit.
- Desenvolver um modelo de predição para vibrações, treinando redes neurais artificiais por meio dos dados obtidos durante campanha de monitoramento.

A Figura 7 mostra um fluxograma simplificado da metodologia adotada para a etapa de monitoramento dos desmontes deste trabalho, destacando os trabalhos a serem realizados em campo, descritos acima.



Figura 4.1: Metodologia de estudo. Fonte: adaptado de SILVEIRA, 2018.

A análise e caracterização dos desmontes de rochas executados será realizada em função das detonações em áreas consideradas relativamente próximas a estruturas sensíveis e a comunidade no entorno da mina. A princípio, o critério será baseado em monitoramentos de pontos em um raio de aproximadamente 1,5 km de distância de locais onde ocorrem desmontes de rochas por explosivos. Os parâmetros a serem observados são associados a elaboração da lei de atenuação de vibrações (**v**), são a distância (**D**) entre os desmontes e as detonações e a carga máxima explosiva por retardo utilizada nas detonações (**E**).

Internacionalmente existem muitas normas que recomendam as velocidades de vibração de partículas, no Brasil a Norma NBR 9653-2018 (ABNT, 2018) considera a frequência, mas não os tipos de estrutura, pelo que impossibilita a sua aplicação neste caso, já a Norma DIN

4150 (Alemanha) (BACCI, 2003), leva em conta os tipos de estrutura a ser afetada e a frequência. Os limites admissíveis de velocidade de vibração de partículas e suas frequências associadas diferem segundo 3 diferentes tipos de estruturas. A norma portuguesa NP 2074 – 2015 também considera a frequência e o tipo de estrutura para definição dos limites de vibração.

A aplicação de padrões a serem adotados permitirá a determinação da carga explosiva máxima admissível e desenvolver a metodologia do desmonte controlado.

#### 4.1 Caracterização da área de estudo

A mina está localizada na extremidade sudoeste do Distrito de Ferro de Itabira, está em operação desde 1942 pela atual companhia, a lavra é realizada a céu aberto em bancadas de 15m. Cerca de 70% de sua lavra depende de desmonte prévio devido a dureza das rochas, em sua maioria composta por itabiritos, demandando, portanto, um grande volume de desmontes. A perfuração é realizada por perfuratrizes de grande porte, perfurando no diâmetro de 9 7/8", os furos são posteriormente carregados em sua maioria com emulsão blendada, na proporção de 70% de Emulsão pura e 30% de ANFO, em alguns casos em rochas muito friáveis aplica-se apenas ANFO puro.

Nas operações de desmonte de rochas da mina em estudo são utilizadas espoletas eletrônicas como sistema de iniciação em todos os desmontes realizados, facilitando desta forma o controle das vibrações, pois este tipo de acessório permite maior flexibilidade na sua configuração permitindo sua iniciação a qualquer tempo necessário, em um range de 0 a 8000 ms. Já os acessórios não elétricos, que possuem tempos de retardo pré-definidos, reduzem a flexibilidade na temporização dos desmontes, possuem ainda maior erro associado ao tempo indicado quando comparação aos eletrônicos.

É utilizado para controle de vibração em áreas tidas como críticas a técnica de múltiplos decks de carregamento dos furos, de modo que cada carga explosiva seja iniciada de forma individual, com tempos diferentes, separadas entre si por material inerte (brita ou material do colar do furo perfurado) ou ainda associado a colunas de ar dispostos de tal modo que o explosivo dos decks a detonar não se iniciem por simpatia (Figura 8), reduzindo desta forma a carga máxima por espera, parâmetro crucial no controle de vibrações.



Figura 4.2: Metodologia de desmonte controlado. Fonte: TORRES *et al.*, 2020.

Posterior ao desmonte temos a etapa de carga e transporte do material até as britagens primarias de cada uma das três usinas do complexo minerário, que são realizados por escavadeiras e carregadeiras de grande porte. No ano de 2022 estes somam um total de 13 equipamentos, sendo 5 carregadeiras e 9 escavadeiras, que realizam a carga do material em uma frota de 60 caminhões de grande porte.

Tratando da geologia das minas objeto do estudo, o complexo minerário de Itabira está situado ao nordeste do quadrilátero ferrífero, localizado no município de Itabira, Minas Gerais. O complexo é formado por três grandes cavas, Conceição, Minas do Meio e Cauê, esta última já exaurida (Figura 9).



Figura 4.3: Litologia da mina de Conceição. A coloração azul escuro representa o itabirito compactado, azul claro itabirito friável.

Fonte: VALE. Litologia da mina de Conceição. Ilustração. 2021. Autor. Equipe de Geologia da Mina de Conceição.

A mina de Conceição contém Xistos do Supergrupo Rio das Velhas e um conjunto de rochas que variam de filitos e xistos a metaxistos com formação ferrífera. Ocorrem também itabiritos dolomíticos, itabiritos siliciosos e corpos hematíticos da Formação Cauê, e quartzitos e filitos prateados de a Formação Cercadinho (ROSSI; ENDO; GABRIEL, 2019). A mina de Conceição está situada em uma extensa dobra, denominada Sinclinal Conceição (Fig. 10). Esta dobra é caracterizada como uma dobra inclinada, fechada, assimétrica.



Figura 4.4: Seção vertical do Sinclinal Conceição. Fonte: ROSSI, ENDO e GABRIEL, 2019.

As Minas do Meio são localizadas na porção centro-leste do Distrito Ferrífero de Itabira. As rochas presentes nessa porção seguem a mesma sequência de rochas da Mina de Conceição além de rochas associadas à Suite Borrachudos (Figura 11) que afloram na região chamada de Serra do Esmeril. Nesta região são encontradas unidades graníticas compostas por quartzo, biotita, feldspato e anfibólio. (ROSSI; ENDO; GABRIEL, 2019).



Fonte: ROSSI, ENDO e GABRIEL, 2019.

O posicionamento das cavas supracitadas, das estruturas geotécnicas e as distancias à comunidade são ilustradas na Figura 12.



Figura 4.6: Descrição das litologias sentido a cidade.

Fonte: VALE. Descrição das litologias sentido a cidade. Ilustração. 2022. Autor. Equipe de Planejamento de Médio prazo.

#### 4.2 Plano de caracterização in situ das vibrações

Para a correlação entre os parâmetros dos desmontes e dos eventos sísmicos registrados, análises e tratamento de dados serão utilizadas para melhor representatividade em função da realidade da mina e das operações executadas. Assim, de forma a contribuir para a melhor representação possível da lei de atenuação via regressão linear múltipla dos parâmetros analisados, e qualidade das informações para compor o banco de dados a treinar as redes neurais.

Em função do monitoramento, malhas regulares de pontos referentes a localização dos sismógrafos serão elaboradas com o âmbito de abranger uma área mais representativa possível da região da mina a ser estudada. O monitoramento será baseado em diferentes direções que contemplam a área entre os desmontes e as estruturas de interesse. Dentre as estruturas de interesse podemos considerar as barragens de Conceição, Itabiruçu, Borrachudo, Cambucal, Rio do Peixe e Pontual (Figura 13).



Figura 4.7: Localização das Barragens de Borrachudo, Conceição, Cambucal, Itabiruçu, pontual, Rio do Peixe e os diques Minervino e cordão nova Vista em relação ao município de Itabira.

Fonte: TORRES e COSTA, 2020.

Devido à grande distância entre algumas áreas de desmonte de rochas e barragens (barragem de Itabiruçu e Borrachudo estão aproximadamente 2 km de distância; Pontal 3km), existe a possibilidade de não observar grande influência das vibrações induzidas nas estruturas. Porém, em meios estratificados e se sua geometria favorecer, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras refletidas, podendo medir-se maiores valores de vibração em pontos mais afastados. Portanto, serão considerados pontos de monitoramento até um raio de 1,5 km que seria alcance dos sismógrafos. Além das barragens serão monitorados os diques Minervino e Cordão Nova Vista e as instalações da Planta de Concentração II de Conceição e pontos estratégicos na cidade em função da incomodidade humana.

Com base na região entre as barragens e as áreas operacionais, campanhas foram elaboradas para servir de base inicial para os estudos. Ao todo serão contempladas as campanhas 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Para a Campanha 1 (Figura 14) o monitoramento ocorreu entre a Cava Conceição e a barragem Conceição, considerada situação mais crítica devido a distância de aproximadamente 610 m da coordenada de desmonte mais próximo do pé da barragem. Em 2023 essa distância poderá ser de 350 m. Portanto, de todas as barragens essa exigirá mais cuidado no monitoramento dos desmontes. Os pontos em amarelo, nas imagens, são referentes aos prováveis locais de monitoramento sísmico, contudo a localização dos pontos pode sofrer alterações conforme à possibilidade de acesso para a instalação do equipamento de monitoramento.



Figura 4.8: Pontos de monitoramento sísmico com foco a barragem de Conceição, Planta de concentração II e diques A e B (Campanha 1).

Fonte: TORRES e COSTA, 2021.

Para a Campanha 2 (Figura 15) é levado em conta a área entre a Cava Conceição e a barragem Itabiruçu.



Figura 4.9: Pontos de monitoramento sísmico com foco a barragem de Itabiruçu (Campanha 2). Fonte: TORRES e COSTA, 2021.

Visando a barragem borrachudo teremos a campanha 3, área de estudo se passa por uma pilha de estéril. Boa parte da pilha está sob região de aterro que dificulta a leitura das vibrações das ondas, desse modo então os pontos foram limitados nas estradas que ligam a pilha a barragem ou nos acessos disponíveis.

Serão feitos monitoramentos em alguns pontos na cidade de Itabira em virtude da grande concentração de residências, ao redor da mina do Meio do Periquito e da barragem do Cambucal I. Analisando os limites futuros da cava, percebe-se que com o passar dos anos, a distância entre as minas e comunidade tende a se estreitar. Pontos serão distribuídos em locais estratégicos próximos às instalações da Vale. Próximos a esses pontos estão os bairros que mais se aproximam das áreas de desmonte onde podem surgir ou ampliar as reclamações em virtude do avanço das frentes de lavra e o aumento do volume desmontado, desse modo contemplando assim a Campanha 4.

A outra localidade que deve ser analisada com cuidado é o condomínio Vila Técnica Conceição que será relacionada a campanha 5. Atualmente se encontra próximo a Cava Conceição e é um local que registra constantes reclamações de vibrações de seus moradores. Então é necessário um estudo das vibrações provenientes dos desmontes para averiguar a probabilidade de danos as estruturas ou incomodidade humana.

A Tabela 4.1 abaixo resume as propostas de campanhas de monitoramento a serem executadas. A aderência da execução das campanhas depende exclusivamente do acesso, condições locais, presença de vegetação e necessidade em função da distância. Desse modo, é cabível considerar uma diferença dos locais de monitoramento, entretanto mantendo o âmbito de monitorar as áreas descritas nessa metodologia.

Campanha	n° de pontos	Localização do estudo
1	95	Barragem Conceição
2	74	Barragem Itabiruçu
3	60	Barragem Borrachudo
4	62	Barragem Cambucal
5	60	Barragem Rio do Peixe e Condomínio Vila Técnica Conceição
6	84	Comunidade de Itabira
Total	435	

Tabela 4.1: Pontos programados de monitoramento e quantidade de leituras.

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Foram estabelecidas as principais direções de monitoramento visando as estruturas geotécnicas e a comunidade no entorno da mina (Figura 16).



Figura 4.10: Direções contempladas durante a campanha de monitoramento sísmico. Fonte: TORRES, COSTA e SOUSA, 2021.

Finalmente, com o modelo de atenuação de vibrações, análises realizadas e medidas elaboradas, será possível averiguar a necessidade de adequação e inovação de maneira sustentável para os métodos de desmonte de rochas nas minas do Complexo Itabira. Será criado um modelo baseado em RNA, treinado com os dados obtidos pelas capturas de ondas sísmicas, a partir desse modelo e conceitos da dinâmica de rochas será possível o dimensionamento mais preciso do plano de fogo e assim minimizar os impactos ambientais, isto é, aproveitar melhor a energia dos explosivos para o processo de fragmentação ao invés de dissipá-la em forma de vibrações e pressão acústica.

4.3 Resultados da campanha de monitoramento in situ.

Entre os meses de janeiro a junho de 2021 foi realizada uma intensa campanha de monitoramento de campo, com localização de geofones num total de 543 pontos resultantes de 74 desmontes com uso de sismógrafos de engenharia (Figura 4.11).

Para realizar a campanha de monitoramento foram utilizados 21 sismógrafos, em sua maior parte da marca GEOSONICS®, modelo SSU 3000 e outros da INSTANTEL®, modelos Micromate e Minimate.

Ao instalar os sismógrafos para coleta de dados foram configurados com um gatilho de limite inferior de 0,25 e 0,5mm/s variando conforme ponto de instalação. A instalação dos geofones e microfones seguiu a ABNT-NBR 9653 - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – que indica detalhadamente os procedimentos técnicos para este tipo de atividade, de modo a garantir maior confiabilidade nos dados obtidos. A Figura 4.11 mostra sensores instalados em solo, cravados ou fixado com gesso quando necessário. (TORRES; COSTA; SOUZA, 2021).



Figura 4.11: Sismógrafos instalados. Fonte: TORRES, COSTA e SOUSA, 2021.

Os parâmetros medidos para cada evento do sismo induzido foram registrados, são eles, velocidade de vibração de partículas e frequências nas direções vertical, transversal e

longitudinal, carga explosiva por retardo, distância entre o local de desmonte e o ponto de monitoramento.

Estes resultados constituem dados de grande importância, dado que permitirá caracterizar as leis de atuação de vibrações em 5 sentidos, usando tecnologia estatística e de Redes Neurais, de forma que será útil para a determinação da carga máxima admissível e sua implementação no plano de desmonte controlado.



Figura 4.12: Pontos de desmonte e monitoramento sísmico durante a campanha realizada de janeiro a julho de 2021.

Fonte: TORRES e COSTA, 2021.



### General Specifications

Channels	Microphone and Triaxial Geophone (ISEE or DIN)
Vibration Monitoring	
Range	Up to 254 mm/s (10 in/s)
Response Standard	ISEE or DIN 45669-1
Resolution	0.00788 mm/s (0.00031 in/s)
Accuracy (ISEE/DIN)	+/- 5% or 0.5 mm/s (0.02 in/s), whichever is larger, between 4 and 125 Hz / DIN 45669-1 Standard
Transducer Density	2.0 g/cc (127 lbs/ft <sup>3</sup> )
Frequency Range (ISEE/DIN)	2 to 250 Hz, within zero to -3 dB of an ideal flat response / 1 to 315 Hz
Maximum Cable Length (ISEE/DIN)	1000 m (3280 ft)
Air Overpressure Monitoring	
Weighting Scales	ISEE Linear Microphone
Response Standard	ISEE Seismograph Specification
Linear Range	88 to 148 dB (500 Pa [0.072 psi] Peak)
Linear Resolution	0.0156 Pa (2.2662x10-6 psi)
Linear Accuracy	+/- 10% or +/- 1dB, whichever is larger, between 4 and 125 Hz
Linear Frequency Response	2 to 250 Hz between -3 dB roll off points
Maximum Cable Length (ISEE)	500 m (1640 ft)

### Figura 4.13: Características dos sismógrafos de engenharia utilizados no Teste

Fonte: INSTANTEL, (2022).

#### 5 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DA REDE NEURAL

A metodologia a seguir foi baseada no trabalho desenvolvido por Torres *et al.* (2021), apresentado no relatório científico intitulado "Criação de um modelo de redes neurais para previsão de vibrações. Estudo de caso Itabira" deste modo não sendo necessário a repetição das referências, mais informações que não aqui apresentadas buscar na referência mencionada.

Em 2019 o ITV desenvolveu um projeto (COSTA, 2019) que utilizou um modelo de redes neurais aplicada a previsão de vibrações de desmontes de rocha. Os resultados obtidos apresentaram bons coeficientes de determinação, acima de 90%. A mesma metodologia foi então aplicada para a construção do modelo de redes neurais para a mina em estudo.

Esta metodologia consiste nas seguintes etapas:

- Consolidar inicialmente base de dados, considerando os valores de pico de vibração da partícula (PPV) com suas respectivas frequências e a resultante (PVS).
- • Tratamento dos dados com remoção de outliers.
- • Treinamento de Redes Neurais.
- Desenvolvimento de interface ao usuário para que seja possível tornar visual a previsão de vibrações e frequência.

A primeira etapa, que foi previamente realizada, foi a campanha de monitoramento dos desmontes, apresentados nos itens 4.2 e 4.3 deste estudo.

#### 5.1 Tratamento de dados

Foram realizados 531 registros de vibração. Por meio da análise da dispersão dos dados foram identificados os possíveis valores inconsistentes. Deste modo, foi construída uma curva de regressão (Figura 5.1) que relaciona as variáveis, carga máxima por espera identificada pela letra "Q" além da distância entre o desmonte e o local de controle identificada pela letra "D" e a variável dependente, PVS.



Figura 5.1: Retirada dos valores de outliers Fonte: Torres *et al.* (2021).

Na Figura 5.2 aqueles sinalizados em vermelho são os dados tidos como outliers. Outra metodologia utilizada para analisar os dados é a análise dos resíduos. Os resíduos são a diferença entre o valor previsto e o de fato coletado.



Figura 5.2: Análise dos resíduos (PVS) Fonte: Torres *et al.* (2021).

Após a remoção dos valores anômalos foram mantidas 521 medições. O tratamento dos dados relativos ao PPV e a frequência seguiram a mesma metodologia apresentada para remoção de valores anômalos do PVS apresentado.

Para entendimento da faixa de frequência dominante foi realizada a análise do valor de pico da vibração e sua respectiva frequência para as três direções (vertical, transversal e longitudinal). Os resultados são apresentados no gráfico de dispersão da Figura 5.3, desta forma é possível identificar que a faixa dominantes está entre 5 e 20Hz.



Figura 5.3: Histograma de frequências dominantes das vibrações. Fonte: Torres *et al.* (2021).

#### 5.2 Arquitetura das Redes Neurais

As redes neurais criadas foram projetadas para estimar o PPV e o PVS e suas respectivas frequências, A arquitetura escolhida foi a de feedfoward back-propagation com três camadas. O erro médio quadrático foi o critério utilizado

Para as redes neurais criadas para prever o PVS foi designada apenas uma saída, já para as redes que realizam a previsão do PPV foram especificadas duas saídas, uma associada à

vibração e outra relativa à sua frequência correspondente, o critério utilizado para definir a parada para o treinamento foi o erro médio quadrático.

Para treinamento das redes foram utilizados os seguintes parâmetros: distância, carga máxima por espera, afastamento, espaçamento, tamanho do tampão, razão de carga e sub perfuração.

A Figura 5.4 apresenta o fluxograma da metodologia realizada para treinamento da rede neural.



Figura 5.4: Fluxograma do processo de treinamento da Rede Neural Fonte: Torres *et al.* (2021).

#### 5.3 Treinamento das redes neurais para estimar vibração (PVS) nas cinco direções

Para estimar o PVS, foram testadas diferentes configurações de redes neurais, o  $R^2$ , ou coeficiente de determinação, foi o principal indicador para avaliação da eficiência da rede neural, ela indica a proximidade ou discrepância do ajuste por regressão linear, esse coeficiente pode variar de 0 a 100%, quanto maior o valor, melhor a correlação entre os dados. Além deste, também foi realizada a análise do Erro Absoluto médio, que indica a diferença entre o valor que foi previsto pela rede neural com o medido.

Após repetidos testes, com variadas configurações para predição do PVS, as redes com melhor resultado para cada uma das direções apresentadas na Figura 5.5 estão representadas abaixo.



Figura 5.5: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 1. Fonte: Torres *et al.* (2021).



Figura 5.6: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 2. Fonte: Torres *et al.* (2021).



Figura 5.7: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 3. Fonte: Torres *et al.* (2021).



Figura 5.8: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 4. Fonte: Torres *et al.* (2021).



Figura 5.9: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Direção 5. Fonte: Torres *et al.* (2021).



Figura 5.10: Regressão do Modelo (PVS medido x PVS calculado) – Todas Direções. Fonte: Torres *et al.* (2021).

#### 5.4 Treinamento das redes neurais para estimar vibração (PPV)

Foi criada uma rede neural para a estimativa da vibração utilizando o parâmetro PPV nas direções longitudinal, transversal e vertical e suas respectivas frequências, necessários para utilização de algumas normas que levam estes parâmetros em consideração para definição dos limites de vibração.

Para a estimativa do PPV Longitudinal a rede que obteve melhor índice de correlação, de 89% e menor erro absoluto médio, 1,25mm/s, foi a rede escolhida para o modelo de predição. Já para a previsão da frequência, a rede mais eficiente teve um coeficiente de correlação de 77% e o erro absoluto médio de 2,64Hz. O resultado da regressão para os modelos criados para a PPV longitudinal pode ser visto nos gráficos (Figura 5.11, Figura 5.12). A mesma metodologia foi aplicada para a PPV Vertical e Transversal.



Figura 5.11: Regressão do Modelo (*PPVL* medido x *PPVL* calculado). Fonte: Torres *et al.* (2021).



Figura 5.12: Regressão do Modelo (frequência medida x frequência calculada). Fonte: Torres *et al.* (2021).

A Figura 5.13 apresenta um resumo dos valores de coeficiente de determinação de  $(R^2)$  e do Erro Absoluto Médio (MAE) das redes escolhidas para cada direção

Direção	Medições	R²	MAE (Mean Absolute Error)	Unidade
1	114	0,95	1,98	mm/s
2	118	0,98	0,52	mm/s
3	136	0,90	0,96	mm/s
4	52	0,98	1,94	mm/s
5	101	0,90	0,66	mm/s
Todas	521	0,99	0,81	mm/s

Figura 5.13: Resumo dos valores de *R*2 e MAE para as redes treinadas para predição de PVS. Fonte: Torres *et al.* (2021).

#### 5.5 Interface ao usuário

Após a etapa de treinamento da rede é gerado no software Matlab® a função para estimar os valores alvo, frequência, PVS e PPV com base nos valores imputados do plano de desmonte a se executar. A interface permite a variação da carga máxima por espera, de modo a avaliar qual a resposta na vibração em decorrência desta variação até o ponto de interesse e ao longo das direções pré-definidas. Para representar os dados de forma visual, a aplicação apresenta um mapa com imagem de satélite do Google Earth.

É possível realizar medidas de vibração em diferentes pontos, sendo necessário apenas clicar em outro local de interesse no mapa, o programa então calcula a distância do ponto do desmonte até o local determinado, considerando a diferença de cota entre os pontos, deste modo a distância e os demais parâmetros alimentam o modelo da rede neural que retorna os valores de saída, conforme apresentado na Figura 5.14.



Figura 5.14: Visão geral do software de previsão de vibração no local apontado no mapa. Fonte: Torres *et al.* (2021).

#### 6 CONCLUSÕES

A metodologia proposta para previsão e controle de vibrações utilizando redes neurais artificiais mostrou-se eficaz, uma vez que iniciada com a robusta campanha de monitoramento com a coleta de 543 leituras de sismógrafos, número acima do previsto incialmente de 435 leituras, conseguiu contemplar todas 5 direções tidas como mais relevantes para o controle de vibrações. Tal levantamento dos dados de vibração possibilitou a consolidação de um banco de dados amplo de modo a suportar o treinamento das redes neurais deixando mais assertivas as previsões de vibração.

As redes neurais depois de treinadas apresentaram valores baixos para o Erro Absoluto Médio ou MAE (Mean Absolut Error), além de altos coeficientes de determinação (maiores que 90%) para frequência e vibração.

A interface gráfica desenvolvida no Matlab® permitiu a utilização de redes neurais de forma intuitiva, possibilitando a variação de parâmetros durante a etapa de planejamento do plano de fogo, adequando-o de forma a garantir os limites estabelecidos como seguros para as operações em relação às estruturas geotécnicas e comunidade.

Por fim, este estudo contribui para a melhoria da previsão e controle de vibrações das operações em estudo por meio de simulação de vibração e ajuste prévio do plano de fogo, assegurando uma operação de desmonte de rochas mais segura e eficiente, com sua metodologia podendo ser replicada para outras unidades.

### 7 TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar a mesma metodologia para predição de vibração para os demais potenciais impactos gerados pelas detonações como: ultra lançamento e sobre pressão atmosférica.
- Utilizar as redes neurais na predição de granulometria dos desmontes, utilizando banco de dados de análise granulométrica já existente.
- Criar metodologia para consolidar os dados e retreinar a rede neural de forma automática, por meio de sismógrafos fixos conectados com rede móvel.

### REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ-VIGIL, A. E. *et al.* Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 55, p. 108–116, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 9653**. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. 3.ed. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 9656**. Alicate exclusivo para eletrônica: métodos de ensaio. 1.ed. 2014.

AVELLAN, K.; BELOPOTOCANOVA, E.; PUURUNEN, M. Measuring, Monitoring and Prediction of Vibration Effects in Rock Masses in Near-Structure Blasting. **Procedia Engineering**, v. 191, p. 504-511, 2017.

BACCI, Denise de La Corte *et al.* Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte I. **Rev. Esc. Minas**, v. 56, n. 1, mar/2003.

BOLT, B. A. **Inside the Earth:** evidence from earthquakes. Freeman & Co. San Francisco, 1982.

BRITISH STANDARD. BS 6472-2. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings Part 2: Blast-induced vibration, 2008.

COSTA, J. H. R. **Previsão de vibrações utilizando redes neurais artificiais no controle de desmonte de rochas**. 2019. 91f. Dissertação (Mestrado em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

GAMA, C. Dinis da. Dynamic stresses from blasting vibrations: a better to dam foundations. In: International Symposium on Rock Mechanical Related to Dam Foundations. **Anais**. Rio de Janeiro: 1978.

GAMA, C. Dinis da. **Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos**. In: 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro, Portugal, 16p. 1998.

FARIA C. A. C. **Estudo comparativo de normas na área de danos estruturais causados por vibrações impulsivas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil — Especialização em estrutura) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2020.

FERREIRA F. V. **Ação dinâmica do desmonte de rochas por explosivos em barragem de rejeito.** 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral – Lavra de Minas) – Escola de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

HOLMBERG, R.; PERSSON, P.A., 1979. **Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage**. In: Proc. IMM Tunneling. 79 Conference, London. Informação técnica disponibiliza pela equipe de geotecnia Vale Itabira, 2021.

INSTANTEL. **Portal Instantel. [2022].** Disponível em: <www.instantel.com>. Acesso em: 05 jan. 2022.

JAYASINGHE B. *et al.* Attenuation of rock blasting induced ground vibration in rock-soil interface. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v.11, p. 770-778, 2019.

KAMALI, M.; ATAEI, M. Prediction of blast induced ground vibrations in KarounIII power plant and dam: a neural network. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Joanesburgo, v. 10, 2010.

KHANDELWAL, M.; SINGH, T.N. Singh Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n. 7, p. 1214-1222, 2009.

KUMAR *et al.* Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 341–349, 2016.

MA G.; HAO H.; ZHOU Y. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions. **Engineering Structures**, v. 22, p. 1378-1389, 2000.

McCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biophysic**s, v. 5, p. 115–133, 1943.

PEREIRA, O. F. Análise da classificação de barragens de contenção de rejeitos no Brasil, quanto ao critério de categoria de risco. Mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais em Regiões Tropicais. Instituto Tecnológico Vale, 2016.

RAUBER, T. W. **Redes Neurais Artificiais**. Disponível em: <a href="http://www.lia.ufc.br/~eti/2003/menu/modulos/RNA/RNA-RedesNeuraisArtificiaisII.pdf">http://www.lia.ufc.br/~eti/2003/menu/modulos/RNA/RNA-RedesNeuraisArtificiaisII.pdf</a>>. Acesso em: 5 out. 2021.

ROSSI, D. Q.; ENDO, S.; GABRIEL, E. G. **Structural framework of the iron district of Itabira, Iron Quadrangle, Minas Gerais**. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, 72(1), jan. mar 2019.

SEED, B.; LEE, K. Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 92, Issue 6, p. 105-134.1966.

SILVEIRA, C. L. **Controle de vibrações e pressão acústica no desmonte de rochas com explosivos: estudo de caso em uma mina do quadrilátero ferrífero.** 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral – Lavra de Minas) – Escola de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SOUZA, Calebe Paiva Gomes de. **Diagnóstico de estruturas civis baseado em medidas de vibração**: uma abordagem a partir de algoritmos não-adaptativos e adaptativos para treinamento de redes neurais artificiais. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

SOUZA, Calebe Paiva Gomes de *et al*. Performance comparison of non-adaptive and adaptive optimization algorithms for artificial neural network training applied to damage diagnosis in civil structures. **Applied Soft Computing**, v. 104, jun/2021.

STOJADINOVIC, S. *et al.* A new approach to blasting induced ground vibrations and damage to structures. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 16, n. 4, p. 344–354, 2011.

TAIEBAT M. *et al.* Propagation of seismic waves through liquefied soils. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering,** v. 30, p. 236-257, 2010.

THOMÉ R., PASSINI M. T. Barragens de Rejeitos de Mineração Características do Método de Alteamento para Montante que Fundamentaram a Suspensão de sua Utilização em Minas Gerais. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista - UNIOESTE/MCR**. v.18 n. 34 p. 49-65, 2018.

TORRES, Vidal Félix Navarro; SILVEIRA, Leandro Geraldo Canaan; LOPES, Paulo Filipe Trindade; LIMA, Hernani Mota de. Assessing and controlling of bench blasting-induced vibrations to minimize impacts to a neighboring community. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 514-524, 2018.

TORRES, Vidal Félix Navarro *et al.* **Neural network applied to blasting vibration control near communities in a large-scale iron ore mine**. Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection – MPES 2018. Cham: Springer, 2019.

TORRES, Vidal Félix Navarro *et al.* **Teste de vibrações induzidas por explosivos e desmonte com controle de vibrações a escala de produção na mina de Alegria**. Relatório Científico ITV, Prod. Tec. ITV MI – N0039/2020, 2020.

TORRES, Vidal Feliz Navarro; COSTA, João Henrique; SOUSA Rodolfo Matias. **Criação de um modelo de redes neurais para previsão de vibrações. estudo de caso**: Itabira. Relatório Científico ITV, Prod. Tec. ITV MI – N0043/2021, 2021.

TORRES, Vidal Félix Navarro; FERREIRA, F. V.; CRUZ, R. M. S. **Caracterização da propagação das ondas sísmicas induzidas pelos desmonte com explosivos.** Relatório Científico RC-ITV-LM-VR001, Itabira, 2021.

TORRES, Vidal Feliz Navarro; COSTA L. V. **Desmonte controlado nas minas do complexo Itabira próximo a barragens e a cidade de Itabira**, 2021.

TIILE, R. N. Artificial neural network approach to predict blast-induced ground vibration, airblast and rock fragmentation. Dissertação (Master of science in Mining Engineering) – Missouri University of Science and Technology, Missouri, 2016.

TRIVEDI, Ratnesh; SINGH, Trilok Nath; RAINA, A. K. Prediction of blast-induced flyrock in Indian limestone mines using neural networks. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 6, n. 5, p. 447-454, 2014.