

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M)

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE

**AUGUSTO FERRAZ RIBEIRO**

Porto Alegre

2024

General

# METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas, Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia extrativa,

Orientador: Jair Carlos Koppe

Porto Alegre

2024

AUGUSTO FERRAZ RIBEIRO

# METODOLOGIA PARA AVALIZAÇÃO DA CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof, Dr, Jair Carlos Koppe, UFRGS,  
Doutor pela UFRGS, Porto Alegre – Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Cezar Zingano  
PPGE3M – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dr. Vitor Luconi Rosenhaim  
Consultor – Sísmica Engenharia.

Prof. Dr. Carlos Arroyo  
DEMIN – Universidade Federal de Ouro Preto.

Coordenador do PPGE3M: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Porto Alegre, novembro/2024.

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de realizar este trabalho e por me fortalecer nos momentos de dificuldade. Dedico este trabalho com muito carinho aos meus pais, Luciano e Neiva, que, embora ausentes fisicamente, continuam presentes em meu coração e me inspiram a cada dia. Agradeço também à minha companheira, Luiza, por todo o amor, apoio e compreensão durante este período. Sou imensamente grato a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), na pessoa do meu orientador Prof, Dr, Jair Carlos Koppe, pelo ensino gratuito de qualidade e a oportunidade de realização de trabalhos em minha área de atuação profissional.

Agradeço a Enaex Brasil pelo apoio durante a etapa de estudo. E, também, aos meus colegas de profissão que foram fundamentais na realização desse estudo: Pedro Garcia, Julio Freitas, Rafael Gonçalves e Tulio Reis.

## RESUMO

A mineração a céu aberto depende de taludes com geometrias estáveis, conforme planejado, para assegurar a segurança operacional e a viabilidade econômica. O desmonte de rochas próximo aos limites de lavra exige técnicas específicas para minimizar danos e preservar a integridade das paredes finais, sendo o pré-corte uma das técnicas mais empregadas. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para avaliar a capacidade de filtro do pré-corte, investigando sua eficácia na redução de vibrações induzidas por detonações.

Os estudos foram realizados em uma mina de níquel, com ensaios de campo que compararam cenários com e sem a aplicação do pré-corte. Foram utilizados geofones triaxiais e sismógrafos para monitorar vibrações em diferentes distâncias, campo curto e longo. Os dados obtidos foram analisados com base em modelos de atenuação de vibração propostos por Holmberg & Persson (1979) e Devine (1962), permitindo caracterizar a propagação das ondas sísmicas no maciço rochoso e a influência do pré-corte como filtro.

Os resultados mostraram que o pré-corte é eficaz na redução de vibrações, especialmente em curtas distâncias, contribuindo para a preservação dos taludes e estruturas próximas. A metodologia proposta possibilita avaliar de forma sistemática a capacidade de filtragem do pré-corte, oferecendo uma ferramenta para aprimorar o planejamento de desmontes e mitigar impactos ambientais e operacionais.

Conclui-se que a abordagem desenvolvida é uma solução inovadora para a gestão de vibrações em desmontes, com potencial para ser aplicada em diferentes contextos de mineração, promovendo operações mais seguras e sustentáveis.

Palavras Chaves: Campo curto, campo longo, Devine (1962), Holmberg & Persson (1979), modelo preditivo, talude, pré-corte, vibração.

## ABSTRACT

Open-pit mining relies on slopes with stable geometries, as planned, to ensure operational safety and economic viability. Rock blasting near the mining limits requires specific techniques to minimize damage and preserve the integrity of final walls, with pre-splitting being one of the most widely used methods. This study aims to develop a methodology to evaluate the filtering capacity of pre-splitting by investigating its effectiveness in reducing vibrations induced by detonations.

The research was conducted in a nickel mine, involving field tests that compared scenarios with and without the application of pre-splitting. Triaxial geophones and seismographs were used to monitor vibrations at different distances, including both near-field and far-field measurements. The collected data were analyzed based on vibration attenuation models proposed by Holmberg & Persson (1979) and Devine (1962), enabling the characterization of seismic wave propagation in the rock mass and the influence of pre-splitting as a filter.

The results demonstrated that pre-splitting is effective in reducing vibrations, especially at short distances, contributing to the preservation of slopes and nearby structures. The proposed methodology systematically evaluates the filtering capacity of pre-splitting, providing a tool to enhance blast planning and mitigate environmental and operational impacts.

It is concluded that the developed approach represents an innovative solution for vibration management in blasting, with the potential for application in various mining contexts, promoting safer and more sustainable operations.

Keywords: Near-field, far-field, Devine (1962), Holmberg & Persson (1979), predictive model, slope, pre-splitting, vibration.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Fluxograma da metodologia .....	15
Figura 2-Variáveis de um plano de fogo.....	18
Figura 3-Ciclo da onda na rocha, compressão seguida de tensão. ....	26
Figura 4-Elementos de uma onda. ....	26
Figura 5-Movimento dos tipos de ondas.....	27
Figura 6-Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência. .....	29
Figura 7-Sismógrafo Instavel Micromate. ....	30
Figura 8-DataTrap. ....	31
Figura 9-Fatores geométricos da equação de Holmberg & Persson-H&P (1979).....	34
Figura 10-Simplificação da equação de Holmberg & Persson. ....	34
Figura 11-Croqui do ensaio de campo. ....	36
Figura 12-Posição dos geofones de sacrifício. ....	36
Figura 13-Posição dos sismógrafos de superfície.....	37
Figura 14 -Perfil de carregamento do pré-corte. ....	39
Figura 15-Vista de perfil da posição do geofone em relação a carga de explosivo. ....	40
Figura 16-Instalação do sismógrafo de superfície. ....	40
Figura 17-Croqui da temporização.....	41
Figura 18-Registros do geofone triaxial de sacrifício G2. ....	42
Figura 19-Registro do sismógrafo de superfície S1. ....	42
Figura 20-Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2:61,72\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).....	46
Figura 21-Gráfico da regressão transversal ( $r^2:70,1\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).....	46
Figura 22-Gráfico da regressão vertical ( $r^2:73,04\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).....	47
Figura 23-Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2:74,6\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).....	48
Figura 24-Gráfico da regressão transversal ( $r^2:77,75\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).....	48
Figura 25-Gráfico da regressão vertical ( $r^2:61,5\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).....	49
Figura 26- Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2:60,47\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962). ....	50
Figura 27- Gráfico da regressão transversal ( $r^2:70,48\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962). ....	51
Figura 28- Gráfico da regressão vertical ( $r^2:69,13\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962). ....	51
Figura 29-Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2:75,76\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962). ....	52
Figura 30-Gráfico da regressão transversal ( $r^2:73,16\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962). ....	53
Figura 31-Gráfico da regressão vertical ( $r^2:68,91\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962). ....	53
Figura 32- Equação de atenuação longitudinal ( $r^2:74,23\%$ ) dos sismógrafos antes do pré- corte pela teoria de Devine (1962). ....	54

<b>Figura 33- Gráfico da regressão transversal (<math>r^2:73,29\%</math>) dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).</b>	<b>55</b>
<b>Figura 34- Gráfico da regressão vertical (<math>r^2:81,29\%</math>) dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).</b>	<b>55</b>
<b>Figura 35- Gráfico da regressão longitudinal (<math>r^2:71,88\%</math>) dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).</b>	<b>56</b>
<b>Figura 36- Gráfico da regressão transversal (<math>r^2:81,88\%</math>) dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).</b>	<b>57</b>
<b>Figura 37- Gráfico da regressão vertical (<math>r^2:97,04\%</math>) grafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).</b>	<b>57</b>
<b>Figura 38- Comparação do efeito do pré-corte para curtas distâncias no eixo longitudinal.</b>	<b>60</b>
<b>Figura 39- Comparação do efeito do pré-corte para curtas distâncias no eixo transversal.</b>	<b>60</b>
<b>Figura 40- Comparação do efeito do pré-corte para curtas distâncias no eixo vertical. ..</b>	<b>61</b>
<b>Figura 41- Comparação do efeito do pré-corte para longas distâncias no eixo longitudinal.</b>	<b>62</b>
<b>Figura 42- Comparação do efeito do pré-corte para longas distâncias no eixo transversal. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 43- Comparação do efeito do pré-corte para longas distâncias no eixo vertical. .</b>	<b>63</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Cálculo de aterro dos furos.....	38
Tabela 2-Carga dos furos.....	39
Tabela 3-Vibração induzida por cada furo (continua). ....	43
Tabela 4-Vibração induzida por cada furo (continuação).....	44
Tabela 5-Correlação entre as constantes dos modelos. ....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ANFO: *Ammonium nitrate fuel oil*;

DE: Distância escalonada;

E: Módulo de Elasticidade;

HP: Fator Holmberg & Persson

NBR9653: Norma brasileira 9653;

NR22: Norma regulamentadora 22;

PPGE3M: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais;

PPV: *Peak Particle Velocity* (Velocidade de Pico da Partícula);

PPVc: *Peak Particle Critical Velocity* (Velocidade Crítica de Pico da Partícula);

RCU: Resistência à Compressão Uniaxial;

UCS: *Uniaxial Compressive Strength*);

Vp: Velocidade da Onda P;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.1</b>	<b>DESMONTE DE ACABAMENTO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>PLANO DE FOGO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1</b>	<b>PARÂMETROS GEOMÉTRICOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2</b>	<b>EXPLOSIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3</b>	<b>ACESSÓRIOS DE INICIAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.4</b>	<b>SEQUÊNCIA DE INICIAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>PROPIEDADES DA ROCHA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.1</b>	<b>COEFICIENTE DE POISSON .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDADE .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.1</b>	<b>VELOCIDADE DA ONDA P .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2</b>	<b>VELOCIDADE CRÍTICA DE PICO DA PARTÍCULA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.1</b>	<b>NATUREZA CICLICA DAS VIBRAÇÕES.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4.2</b>	<b>PROPIEDADES DAS ONDAS.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.3</b>	<b>TIPOS DE ONDAS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5</b>	<b>MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO INDUZIDA .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1</b>	<b>NORMA BRASILEIRA 9653 .....</b>	<b>28</b>
<b>2.5.2</b>	<b>GEOFONE .....</b>	<b>29</b>
<b>2.5.3</b>	<b>SISMÓGRAFO .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5.4</b>	<b>DATATRAP .....</b>	<b>30</b>
<b>2.6</b>	<b>MODELO DE ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO .....</b>	<b>31</b>
<b>2.6.1</b>	<b>MODELO DE ATENUAÇÃO DE DEVINE (1962).....</b>	<b>31</b>
<b>2.6.3</b>	<b>MODELO DE ATENUAÇÃO DE HOLMBERG &amp; PERSSON (1979).....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE CAMPO.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>ENSAIO DE CAMPO.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>REGISTROS SÍSMICOS .....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>

<b>4.1</b>	<b>MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO GEOFONE DE SACRIFÍCIO .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.1</b>	<b>MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO - TEORIA DE HOLMBERG &amp; PERSSON (1979) .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.2</b>	<b>MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO - TEORIA DE DEVINE (1962)....</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO SISMÓGRAFO DE SUPERFÍCIE.</b>	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
<b>5.1</b>	<b>COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE HOLMBERG &amp; PERSSON (1979) E DEVINE (1962).....</b>	<b>58</b>
<b>5.2</b>	<b>CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE PARA CURTAS DISTÂNCIAS</b>	<b>59</b>
<b>5.3</b>	<b>CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE PARA LONGAS DISTÂNCIAS</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Essa dissertação de mestrado foi motivada pelo fato de que é de fundamental importância para a mineração a céu aberto que os taludes finais e temporários possuam uma geometria de acordo com o que é proposto no planejamento de lavra. Isso ocorre, pois, uma incoerência nesse desenho pode causar impactos na segurança operacional, na conciliação dos modelos de teores e massa e na viabilidade econômica do projeto mineiro (diluição, perda de minério).

De um modo geral, desmontes de rocha próximos aos limites de lavra requerem um estudo específico. Pois, quando essa operação não é realizada de uma maneira adequada, o plano de lavra da mina pode não ser respeitado e, também, pode criar riscos a operação devido a presença de blocos instáveis nos taludes (Mackenzie, 2004). Nesse sentido, Mackenzie (2004), cita o pré-corte, *trim blasting* e o amortecimento como técnicas de desmonte com explosivo comumente usadas que visam limitar o dano além da parede projetada. Dessa forma, é necessário entender como a energia do explosivo se perpetua no meio para entender como se pode controlar o dano na parede remanescente.

Um dos métodos de desmonte cuidadoso mais utilizados na mineração é o do pré-corte. Essa técnica é marcada por provocar uma mudança de meio entre o desmonte de produção e o talude, sendo que essa alteração de meio tem como objetivo ser um filtro para vibração induzida e, assim, reduzir a energia propagada no meio. Para isso, é preciso entender como a energia liberada na detonação se perpetua no maciço rochoso quando é utilizada essa técnica e quando ela está ausente.

O foco principal é desenvolver uma metodologia para avaliar a capacidade do pré-corte em filtrar as ondas de choque, comparando as leis de atenuação obtidas antes e após a aplicação dessa técnica, tanto em zonas próximas quanto distantes da detonação. Deste modo, este trabalho fundamenta-se em um estudo sísmico como geofones e sismógrafos realizado em um ponto específico de uma mina no níquel no sul da Bahia, a configuração do ensaio permitiu a coleta de dados para a elaboração de modelos preditivos de vibração, com base nas teorias de Holmberg & Persson (1979) e Devine (1962). Essa análise permitirá compreender melhor o mecanismo de atenuação e determinar o grau de eficácia de pré-corte típico da mina na redução dos danos à rocha e às estruturas adjacentes.

Os resultados obtidos nesta pesquisa reforçam a importância do pré-corte como uma ferramenta estratégica para o controle de vibrações em operações de mineração, em especial

para a preservação de paredes. Além disso, a metodologia proposta neste estudo oferece uma base sólida para futuros trabalhos voltados ao aprimoramento das técnicas de desmonte.

## 1.1 OBJETIVOS

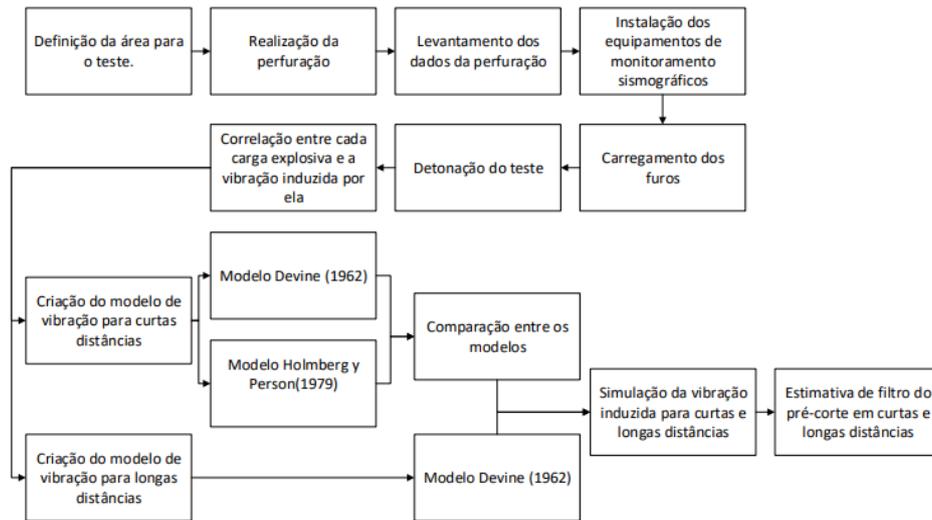
Essa dissertação propõe-se desenvolver e validar uma metodologia completa para quantificar a eficiência do pré-corte na filtragem de vibrações geradas por desmontes de rocha. A pesquisa tem como foco a determinação das leis de atenuação de vibração em diferentes cenários, tanto com quanto sem a utilização de pré-corte. A influência do pré-corte na atenuação das vibrações em distâncias curtas e longas é avaliada.

## 1.2 METODOLOGIA

A realização desse trabalho foi baseada em um estudo de sísmica de campo curto e longo, o qual tinha como objetivo criar equações de atenuação da vibração em duas condições, sem o efeito do filtro de pré-corte e com a presença dele. Assim, estuda-se a capacidade de filtro de um perfil específico de pré-corte a partir da análise comparativa entre essas equações nas duas situações analisadas e nas proximidades do desmonte de acabamento e há distâncias maiores dos furos detonados.

Para o desenvolvimento desta tese, a dissertação foi dividida em seis capítulos. No primeiro capítulo, são apresentados a motivação do estudo, os objetivos e a metodologia aplicada. O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica que fundamenta teoricamente a dissertação. O terceiro capítulo descreve em detalhe o desenvolvimento do trabalho, enquanto o quarto capítulo apresenta os resultados obtidos. No quinto capítulo, é realizada uma discussão sobre os resultados, e, por fim, o sexto capítulo expõe a conclusão da dissertação e propõe direções para futuros trabalhos. A Figura 1, tem como objetivo representar o fluxo das atividades realizadas desde a implementação do trabalho em campo até a análise dos resultados.

Figura 1-Fluxograma da metodologia



## 2 REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS

O desmonte de rocha é a primeira etapa de cominuição existente em um processo de lavra, sendo que ele pode ser realizado com e sem o uso de explosivos. Porém, quando se utiliza esse componente químico é exigido um maior nível de atenção e cuidado devido ao alto grau de periculosidade envolvido nesse processo e, também, o grande impacto ao meio ambiente pela geração de gases, ruídos e poeira (Pereira et al, 2016).

De acordo Silva (2019), um desmonte de rochas com explosivos é bem-sucedido quando se obtém um material detonado com uma fragmentação adequada para as necessidades da mina e sem a ocorrência de ultralançamentos. Porém, ao se planejar uma detonação, também, se deve atentar para os seguintes pontos: perfil da pilha do material detonado, respeito as legislações socioambientais, danos e segurança geotécnica dos taludes, aderência do talude remanescente e preservação de estruturas de interesse nas proximidades da mina.

#### 2.1.1 DESMONTE DE ACABAMENTO

McKenzie et al. (2004) em sua obra “*A Study of Damage Profile Behind Blasts*”, expõe o fato de que normalmente, em minerações a céu aberto, os desmontes próximos aos taludes possuem características diferentes daqueles que são realizados mais próximos ao centro da cava, os quais formam taludes com um tempo de residência curto. Isso ocorre, pois, as

detonações próximas aos limites finais da cava têm como objetivo, também, reduzir o dano causado no maciço rochoso da parede remanescente. Dessa forma, é esperado que seja possível ter paredes seguras na mina e com ângulos de acordo com o que foi planejado, o que é fundamental, também, para a manutenção da relação estéril e minério da mina. Ainda nesse material McKenzie et al, (2004) explica a diferença dos três principais tipos de desmonte de acabamento: *trim blast*, amortecimento e pré-corte.

- *Trim blast*:

É um desmonte planejado especificamente para reduzir o impacto da detonação na parede, assim possui como características: largura estreita (normalmente 4 linhas paralelas a parede), comprimento do polígono a ser detonado frequentemente muito maior que a largura, face livre completamente exposta permitindo a movimentação do material, e carga reduzida nos furos próximos ao talude. Além disso, o confinamento é um fator extremamente importante e, por isso, fatores como o tamponamento, temporização, sequenciamento da iniciação e tipo de rocha devem ser considerados no planejamento de um desmonte desse tipo.

- Amortecimento:

Esse método, via de regra, envolve a modificação de uma ou mais linhas do desmonte de produção que estão mais próximas do talude. Apesar dessa técnica não ter tanta preocupação na movimentação do material, por geralmente, ser utilizada em polígonos com muitas linhas ela procura reduzir os níveis de vibração no maciço pela diminuição da carga explosiva próxima a parede. Por isso, o amortecimento propõe as seguintes alterações que podem ser feitas de forma isoladas ou não: redução do diâmetro de perfuração, diminuição da carga explosiva por furo, redução da malha, uso de furos inclinados, profundidade reduzida, menor comprimento de tampão, maior tempo entre as linhas.

- Pré-corte:

Em muitos casos o pré-corte é utilizado juntamente com as técnicas de *trim blast* e amortecimento, sendo iniciado antes de todos esses, inclusive do desmonte de produção. O desmonte de pré-corte tem como vantagem conseguir ajudar a conformar paredes mais estáveis e limpas, pois há a percepção de que esse tipo de desmonte introduz uma mudança de meio que gera um filtro na propagação

da onda de choque. Mas, por outro lado é considerado caro e de difícil implementação, Uma marca registrada desse tipo de desmonte é uma linha com os furos com um curto espaçamento entre eles, mas no seu projeto ainda pode ocorrer uma grande variedade de configurações, como: diâmetro do furo, carga por furo, distribuição da carga no furo, uso ou não do tampão, espaçamento ideal, carregamento das linhas anteriores, temporização e sequenciamento da linha de pré-corte.

## 2.2 PLANO DE FOGO

O plano de fogo é o documento responsável por conter todo o planejamento do desmonte e deve conter todas as premissas necessárias para que essa operação inicial de cominuição consiga atender as necessidades pré-estabelecidas, como fragmentação ideal, formato da pilha do material desmontado, minimização de danos e aderência da parede remanescente (Silva, 2009). Como apresentado por Jimeno & Lopez (1994), o plano de fogo pode ser dividido basicamente em três partes, sendo que a primeira parte de projeto contém os fatores geométricos, a segunda etapa os explosivos e acessórios a serem utilizados e por último a sequência de iniciação dos furos desse plano.

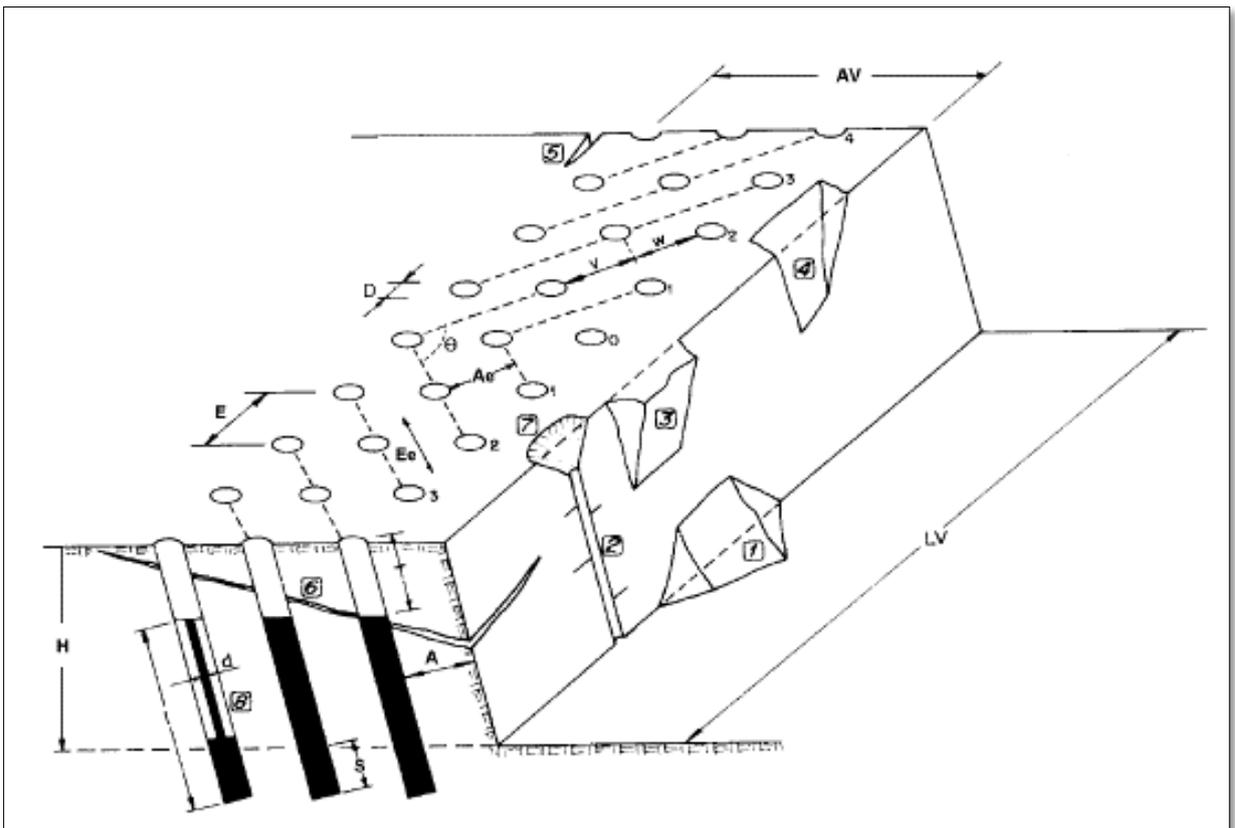
### 2.2.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

São os parâmetros relacionados ao plano de perfuração (Figura 2, Jimeno & Lopez, 1994). Silva (2019) descreve os principais aspectos geométricos de um plano de fogo: diâmetro de perfuração, afastamento, espaçamento, subfuração, profundidade do furo, tampão e altura da bancada. Sendo que o afastamento e o espaçamento formam a malha de perfuração.

- Afastamento: Considerado com a distância entre as linhas de furos, bem como a distância da primeira linha para a face livre da bancada (Konya, 1995).
- Espaçamento: É a distância entre furos sucessivos de uma mesma linha (Ricardo et al, 1990).
- Subfuração: O quanto é realizado de perfuração além do nível da praça da bancada, que tem como objetivo reduzir a formação de repés na praça remanescente (Konya, 1995).
- Profundidade do furo: É o comprimento de perfuração total de um furo.

- Tampão: É a parte superior do furo que não é ocupada com explosivo, mas com material inerte e tem como objetivo realizar o confinamento dos gases gerados nos processos de detonação (Koppe et al., 2009).
- Altura da bancada: É a distância vertical entre a superfície superior e inferior de uma bancada. Quando a relação entre a altura da bancada e o afastamento é alta ( $>4$ ), o deslocamento e a deformação da rocha tendem a ocorrer mais facilmente (Jimeno & Lopez, 1994).
- Diâmetro do furo: Se refere ao diâmetro da perfuração realizada na bancada e esse ponto é influenciado pela característica do maciço rochoso, tamanho de fragmentação requerida, altura do banco, dimensão dos equipamentos de carga e aspectos econômicos da perfuração e desmorte (Jimeno & Lopez, 1994).

Figura 2-Variáveis de um plano de fogo.



Fonte: Jimeno & Lopez, 1994.

Legenda: H = altura do banco; D = diâmetro do furo; L = comprimento do furo; d = diâmetro da carga; A = afastamento nominal; E = espaçamento nominal; LV = comprimento do desmorte; AV = largura da bancada; Ae = afastamento efetivo; Ee = espaçamento efetivo; T = tampão; S = subperfuração; I = comprimento da carga;  $\theta$  = ângulo de saída;  $v/w$  = grau de equilíbrio;  $tr$  = tempo de retardo; 1 = repé; 2 = meia cana do furo; 3 = rocha saliente; 4 = sobrescavação; 5 = fenda de tração; 6 = trincamento do maciço; 7 = cratera; 8 = carga desacoplada.

### 2.2.2 EXPLOSIVOS

Jimeno & Lopez (1994) descreve que os explosivos são divididos em duas categorias, os primários e os secundários. Os explosivos primários são aqueles utilizados para iniciar os secundários devido a sua alta energia e sensibilidade, ou seja, estão presentes nos iniciadores como o fulminato de mercúrio e a pentrita. Já, os explosivos secundários apesar de possuírem menor sensibilidade eles liberam uma maior quantidade de energia e, por isso, são utilizados para realizar a fragmentação e movimentação da rocha. Assim, os explosivos secundários são fabricados de forma industrial sendo divididos em grupos dependendo a importância, sendo que os mais utilizados comumente são o ANFO (*ammonium nitrate fuel oil*), emulsão e blends.

- ANFO: Geralmente, uma mistura de qualquer substância combustível com o Nitra de Amônio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) pode formar o ANFO, porém, utiliza-se preferencialmente os combustíveis líquidos (diesel) devido ao fato de não ter um ponto de volatilidade tão baixo e, conseqüentemente, um menor risco de detonação de vapores. A reação estequiométrica entre o combustível (5,7%) e o nitrato de amônio (95,3%) ocorre da seguinte forma:  $3\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CH}_2 \rightarrow 3\text{N}_2 + 7\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ . O ANFO tem baixa densidade ( $0,8\text{g}/\text{cm}^3$ ) e não apresenta resistência a água. Outros fatores, também, podem influenciar no desempenho desse explosivo como o tamanho dos *prills* de nitrato, densidade utilizada, porcentagem e tipo de combustível utilizado, diâmetro do furo e grau de confinamento da carga (Hopler, 1998).
- Emulsão: As emulsões são formadas por uma mistura de uma solução de nitrato de amônio e de sódio com água, emulsificados por óleos especiais. Uma das grandes vantagens da emulsão é o fato de ser resistente a água, e sua densidade pode ser maior que  $1,0\text{g}/\text{cm}^3$ , assim quando aplicada no furo ela expulsa a água. A emulsão é sensibilizada pela presença de espaços vazios do agente sensibilizante, que pode ser um o nitrito, que gaseifica gerando microbolhas. Quando a emulsão já está sensibilizada e é armazenada industrialmente em cartuchos é nomeada emulsão encartuchada, porém quando é aplicada

diretamente nos furos por um caminhão e a adição do agente sensibilizante é feita pelo caminhão é nomeada emulsão bombeada.

- Blends: Os blends são uma mescla de emulsão base com o ANFO, nesse sentido o ANFO apresenta espaços entre os *prills* que podem ser ocupados pela emulsão. As propriedades dos blends são fortemente influenciadas pela proporção de ANFO e emulsão nessa mistura, mas se pode considerar que apresentam de forma geral maior energia, melhores características de sensibilidade, maior resistência a água. Com o aumento da porcentagem de emulsão a densidade aumenta, provocando um aumento na energia relativo ao volume do agente explosivo. Porém, esse aumento na proporção de emulsão causa uma redução na sensibilidade do explosivo.

### 2.2.3 ACESSÓRIOS DE INICIAÇÃO

Segundo Munaretti (1997), a detonação de explosivos requer equipamentos específicos para garantir a segurança e a eficiência do processo. Os acessórios de detonação desempenham um papel crucial nessa etapa, atuando como ferramentas versáteis que iniciam reações explosivas, transmitem a onda de choque e propagam uma onda explosiva de um ponto ao outro. Como os principais acessórios de iniciação podemos citar o cordel detonante, os iniciadores não elétricos, iniciadores eletrônicos, *primers* e os reforçadores (boosters).

- Cordel detonante: O cordel pode ser utilizado tanto para a iniciação de cargas explosivas dentro dos furos, como interligando cargas de furos próximos ou linhas próximas. Esse acessório consiste basicamente em um núcleo de nitropenta recoberto por uma trama de fios e uma cobertura plástica impermeável, para proteger o explosivo e reduzir a chance de uma iniciação involuntária. O cordel tem como característica uma velocidade de detonação de aproximadamente 7000m/seg e é classificado pela quantidade de explosivo presente por metro de cordel, por exemplo: NP-03 significa 3 gramas de nitropenta por metro linear de cordel e NP10- significa 10 grama de nitropenta por metro linear de cordel (Jimeno & Lopez, 1994).
- Iniciador não elétrico: Esse acessório é formado por uma espoleta comum não elétrica que é conectada a um tubo plástico transparente (diâmetro interno de

1,5mm e externo de 3mm). Esse tubo costuma ser envolto por pentrita pulverizada em concentração de 20mg/m, que ao ser iniciada gera uma onda de choque que percorre o tubo com uma velocidade de aproximadamente 2000m/s. Essa carga explosiva não danifica o lado externo do tubo, mas consegue iniciar a espoleta presente na sua extremidade, a qual possui capacidade de iniciar o booster (Oliveira Maciel, 2018).

- Detonador eletrônico: O detonador eletrônico se destaca, principalmente, pela sua grande precisão nos tempos de iniciação e pela variabilidade do sequenciamento de iniciação, o que é de grande valia nos trabalhos de otimização de fragmentação, de controle de vibração e de projeção. Os principais componentes dos detonadores eletrônicos são a unidade de retardo eletrônico e um detonador instantâneo, que possui energia suficiente para iniciar o booster (Jimeno & Lopez, 1994).
- Reforçador (booster): O reforçador possui carga pirotécnica, sendo constituída de Nitropenta e Trinitrotolueno (TNT), podendo ser na proporção 50/50 e 60/40. Esse acessório é utilizado para a iniciação de agentes explosivos como ANFO e emulsões, mas ele deve ser sensível a iniciação da espoleta ou cordel detonante. Para a escolha do booster ideal se deve levar em consideração o diâmetro do furo, o explosivo a ser iniciado e o grau de confinamento do furo (Persson et al, 1996).

#### 2.2.4 SEQUÊNCIA DE INICIAÇÃO

Cunningham (2020), ressalta que o a temporização em um desmonte de rochas é um parâmetro crítico no plano de fogo, pois pode impactar diretamente a fragmentação, o formato da pilha de material desmontado e a propagação da vibração induzida. Além disso, pode-se considerar que a temporização deva ser específica para cada maciço rochoso, pois como demonstrado pela Equação 1 apresentada por Rorke (2007), o tempo entre furos pode ser determinado por características sísmicas do material a ser desmontado, como o comprimento da onda de choque e a Velocidade da Onda P ( $V_p$ ). Por fim, Silva (2019) ressalta que uma mesma malha de perfuração pode apresentar resultados divergentes a depender da sequência de iniciação escolhida na iniciação dos furos.

Equação 1-Cálculo do tempo entre furos.

$$D = \left( \frac{B + \lambda * n}{Vp} \right) * 1000$$

Onde:

D: Tempo entre furos (ms)

B: Distância entre os furos (m)

$\lambda$ : Comprimento da onda (m)

n: Número de ciclos da onda (para interferências construtivas, considera <2)

Vp: Velocidade da Onda P (m/s)

## 2.3 PROPIEDADES DA ROCHA

Como exposto por Jimeno & Lopez (1994) as características geológicas do maciço rochoso têm influência significativa no resultado do desmonte de rocha. Por isso, é importante termos conceitos como: Coeficiente de Poisson, Resistência à Tração, Resistência a Compressão Uniaxial (RCU ou UCS – *Uniaxial Compressive Strength*), Módulo de Elasticidade (E), Velocidade da onda P (Vp) e Velocidade Crítica da Partícula (*Peak Particle Critical Velocity* -PPVc).

### 2.3.1 COEFICIENTE DE POISSON

O Coeficiente de Poisson é importante, pois ele exerce influência na Velocidade da Onda P no meio (Cintex, 2006). Como apresentado por Sheriff (2002), o Coeficiente de Poisson é definido pela razão entre a tensão transversal e a tensão longitudinal sofrida por um corpo, quando nesse é aplicada uma tensão unidirecional compressiva ou distensiva. Dessa forma, pode-se entender que o Coeficiente de Poisson represente o quanto o corpo se deforma no sentido horizontal em relação ao sentido do carregamento.

### 2.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Um dos fatores que fazem a Resistência à Tração ser importante para o desmonte de rocha é que ela é fundamental na determinação da Velocidade Crítica da Partícula (Pangue, 2016). A resistência à tração de uma rocha representa a capacidade do material de resistir a forças que tendem a alongá-lo até a ruptura. Quantitativamente, ela é calculada pela razão entre a força máxima aplicada e a área da seção transversal da amostra. É importante notar que a maioria das rochas exibe uma resistência à tração significativamente menor, cerca de dez vezes inferior, quando comparada à Resistência a Compressão Uniaxial (Aadnoy & Looyeh, 2014).

### 2.3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A Resistência à Compressão Uniaxial (RCU ou UCS – *Uniaxial Compressive Strength*) é um importante fator, pois possibilita uma aferição da resistência do maciço rochoso, assim é muito utilizada para resolver problemas geotécnicos (Hoek, 1977). Mas, a determinação do UCS costuma ter um alto custo, por isso muitas vezes se realiza a estimativa do UCS pelo ensaio de carga puntiforme (PLT), pois ele é mais barato, rápido e de fácil locomoção (ISRM, 1985). Nesse sentido, é importante ressaltar que existe diferença entre o UCS da amostra e do maciço rochoso.

O ensaio do PLT consiste em comprimir uma amostra entre duas ponteiros de aço em posições opostas as amostras, realizando o aumento da pressão até a ruptura dessa amostra, sendo que esse valor da pressão é utilizado para estimar o UCS. Para rochas anisotrópicas é sugerido realizar o PLT em duas direções paralelas (ISRM, 1985).

### 2.3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O Módulo de Elasticidade, também, é conhecido como Módulo de Young e de acordo com Mehta (1994), pode ser definido como a relação entre a tensão axial aplicada em um corpo e a deformação axial instantânea produzida nesse plano dentro de um limite proporcional considerado. E esse fator exerce influência direta na Velocidade da Onda P (Cintex, 2006), bem como na determinação Velocidade Crítica da Partícula (Pangue, 2016).

### 2.3.1 VELOCIDADE DA ONDA P

Como apontado por Velasques (2023), a velocidade de propagação da onda P ( $V_p$ ), é uma característica da rocha. Isso ocorre, pois ela é influenciada pelo meio. Módulo de Elasticidade e o Coeficiente de Poisson da rocha. E, esse atributo, pode ser medido pela razão entre a distância e o tempo de propagação (Cintex, 2006).

### 2.3.2 VELOCIDADE CRÍTICA DE PICO DA PARTÍCULA

A Velocidade Crítica da Partícula (*Peak Particle Critical Velocity* -PPVc) representa um valor limite de vibração, determinado por parâmetros geotécnicos (Equação 2), abaixo do qual não se espera que ocorram danos em um determinado tipo de rocha. A relação entre a velocidade das partículas e a deformação dinâmica da rocha, mais evidente em zonas próximas à detonação, permite estimar o nível de fraturamento induzido pela detonação. Isso ocorre porque as altas velocidades das partículas geradas pela detonação provocam tensões que podem exceder a resistência da rocha, levando à formação de novas fraturas. Ao estabelecer limites para a velocidade das partículas, é possível controlar o nível de quebramento/fragmentação da rocha pela onda de choque e minimizar os danos a estruturas adjacentes. Sendo que, para esses marcos temos que quando a velocidade da partícula alcança quatro vezes o valor de PPVc é esperado que tenhamos um faturamento intenso, já quando esse valor é uma vez é criado novas fraturas e com o valor de um quarto do PPVc temos a extensão de fraturas pré-existentes (Pangue, 2016).

Equação 2-Cálculo do PPVc.

$$PPVc = \frac{\sigma t \times Vp}{E}$$

Onde:

$\sigma t$ : Resistência à tração (MPa)

$Vp$ : Velocidade da onda P na rocha (m/s)

E: Módulo de Elasticidade - Módulo de Young (GPa)

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS

Como exposto em Jimeno & Lopez (1994) os fatores que afetam as características das vibrações induzidas pelo desmonte de rochas são praticamente as mesmas que são responsáveis pela qualidade dessa operação. Com isso, essas variáveis podem ser divididas entre as que são controláveis (carga explosiva, temporização, tipo de explosivo, variáveis geométricas do plano de fogo) e as que não são controláveis (geologia local, distância do ponto de desmonte).

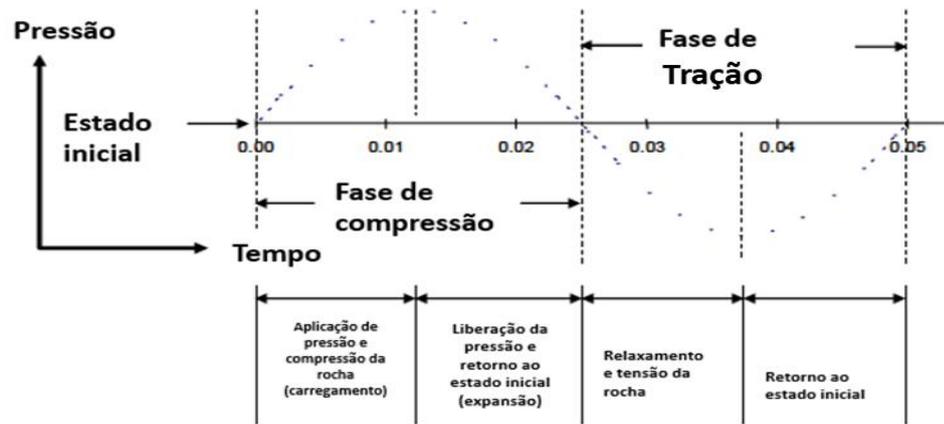
É fundamental entender e estudar maneiras para controlar as vibrações induzidas pelo desmonte de rochas. Pois, apenas uma pequena parcela da energia liberada (5-15%) pelos explosivos em uma detonação é usada para a fragmentação e movimentação da rocha e o restante é dissipado no meio através de vibração induzida e pressão acústica, o que pode causar efeitos não desejados (Dinis da Gama, 1998).

A detonação libera um pico de energia de forma extremamente rápida no maciço rochoso, seguido por um período de relativa estabilidade. Essa característica única gera desafios e oportunidades para o estudo da propagação de ondas, exigindo um arcabouço teórico robusto que a dinâmica de rochas proporciona, pois é uma linha de pesquisa que analisa o comportamento da rocha sob cargas dinâmicas. Assim, é essencial entender as vibrações e, conseqüentemente, a onda sísmica responsável por essas oscilações (Silveira, 2017).

### 2.4.1 NATUREZA CICLICA DAS VIBRAÇÕES

As vibrações são um movimento cíclico em um meio com a variação entre a fase de compressão e a de tensão. Já, para vibrações induzidas pela detonação é considerado que a vibração é gerada na frente de detonação do explosivo, local onde o explosivo é convertido em um gás com a mesma densidade do explosivo sólido (fase de compressão). Essa zona de choque é responsável pela maior parte do quebraimento inicial da rocha e das vibrações. Ao fim da frente de detonação o gás se expande (fase de tração) e, assim, promove a movimentação da rocha. Sendo que a Figura 3 representa esse ciclo de compressão e tensão da vibração induzida pela detonação com explosivo (Cintex, 2006).

Figura 3-Ciclo da onda na rocha, compressão seguida de tensão.

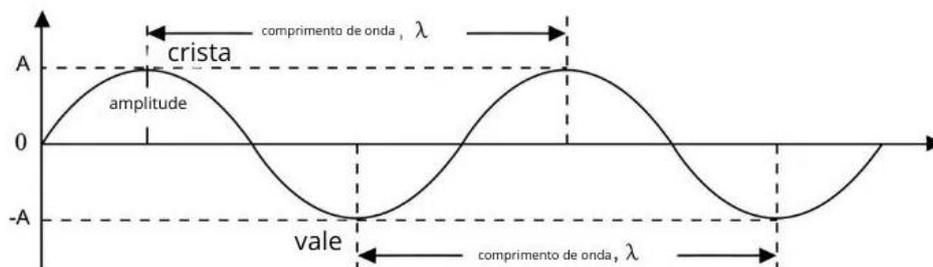


Fonte: Adaptada de Cintex, 2006.

#### 2.4.2 PROPIEDADES DAS ONDAS

Como exposto por Jimeno & Lopez (1994), as ondas se propagam em três direções: radial (longitudinal), transversal e vertical. Além disso, as ondas possuem cinco propriedades que trazem informações importantes sobre a sua característica. Sendo que a primeira propriedade é a frequência, a qual é definida pela quantidade de ciclos (compressão x tensão) que ocorrem por uma unidade de tempo. Já, a amplitude é o nível máximo de tensão ou compressão que o meio é exposto, enquanto que o comprimento de onda é a distância percorrida em um ciclo (Figura 4). Por fim, a duração é tempo que o meio fica exposto a vibração e a velocidade de propagação é a velocidade na qual a onda se propaga (Cintex, 2006).

Figura 4-Elementos de uma onda.



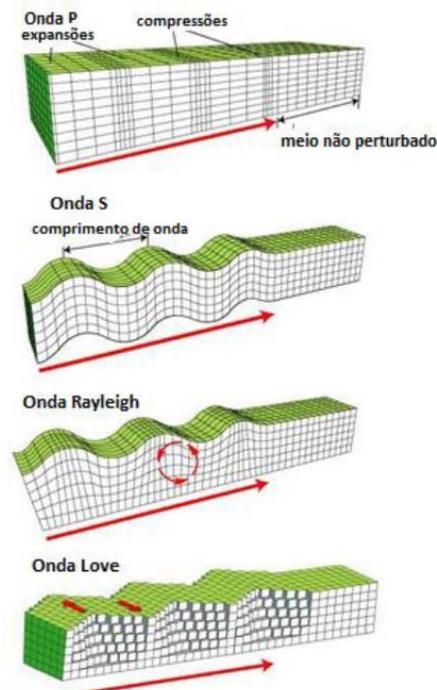
Fonte: Adaptada de Mundo educação, 2024.

### 2.4.3 TIPOS DE ONDAS

Segundo Jimeno & Lopez (1994), as ondas sísmicas que são responsáveis pela vibração são classificadas em dois grupos, as volumétricas e as superficiais (Figura 5). As ondas volumétricas possuem como principal característica propagar-se no interior do maciço e possuem dois tipos de ondas, ondas P e ondas S. As ondas P (ondas primárias, longitudinais ou de compressão), tem o movimento de compressão e tração na própria direção de propagação da onda, além de possuir a maior velocidade entre as ondas. Por outro lado, as ondas S (ondas secundárias, transversais ou de cisalhamento) têm como características os movimentos de compressão e tensão perpendiculares a propagação de onde, com velocidade inferior ao da onda P.

Já as ondas superficiais também possuem dois tipos e elas são marcadas por se propagarem na superfície do terreno. O primeiro tipo são as ondas Rayleigh, que possuem movimento elíptico e retrógrado com a menor velocidade entre os tipos de onda. Enquanto que as ondas Love têm velocidade superior as ondas Rayleigh e inferior as ondas S, mas possuem movimentos transversais e horizontais à direção de propagação da onda (Jimeno & Lopez, 1994).

Figura 5-Movimento dos tipos de ondas.



Fonte: Sciencelearn, 2024.

## 2.5 MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO INDUZIDA

Diante da perturbação que a vibração induzida pelo desmonte de rocha com explosivos pode causar no meio é necessário ter regulamentação própria no intuito de preservar aqueles que convivem diretamente e indiretamente com uma operação mineira. Além disso, é essencial utilizar equipamentos adequados para realizar o monitoramento e a medição dessa vibração induzida para saber se a regulamentação está sendo obedecida e, também, para entender como a energia da detonação está sendo perpetuada no meio.

### 2.5.1 NORMA BRASILEIRA 9653

A Norma Brasileira 9653 (NBR 9653) de 2018 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) explana sobre a avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. Assim, essa norma estabelece os limites considerados de vibrações e pressão acústica seguros para efeitos de danos nas estruturas civis e, também, como essas vibrações devem ser medidas.

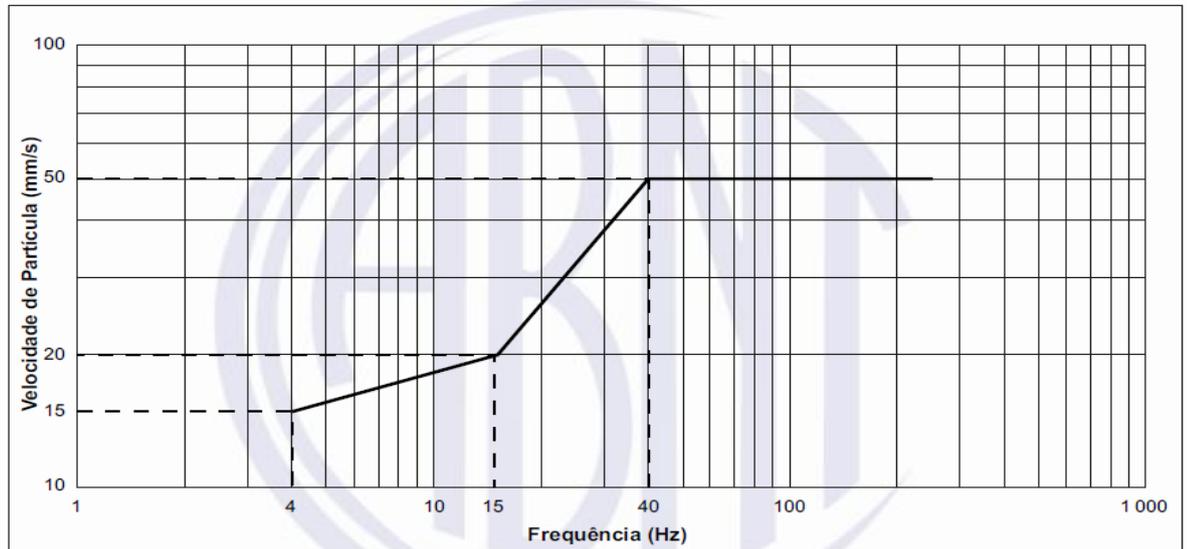
De acordo com a NBR 9653 a pressão acústica medida além da área de operação da mina não pode ultrapassar o valor de 100 Pa, correspondendo a 134 dB. Sendo que, por essa legislação a pressão acústica é provocada por uma onda de choque aérea com frequência na faixa audível (20Hz a 20000Hz) e não audível com duração menor do que um segundo.

Quanto a vibração essa Norma Brasileira define alguns conceitos, como a Velocidade de Pico de Partícula (PPV) que é a velocidade máxima instantânea de uma partícula em um dado intervalo de tempo, entendida como o maior valor alcançado pelas componentes (longitudinal, transversal e vertical) de velocidade durante as vibrações da partícula nesse mesmo período. Já a Velocidade Resultante de Partícula (PVS) é o maior valor absoluto da soma vetorial das três componentes ortogonais de vibração de uma partícula, ao longo de um determinado intervalo de tempo, representando a velocidade resultante máxima. Outro conceito importante que é apresentado na norma é a Distância Escalonada (DE), que é a razão entre a distância da detonação até o ponto de monitoramento sismográfico pela raiz quadrada da Carga Máxima por Espera (CME). Já a frequência é o número de oscilações da partícula por segundo.

Por fim, a NBR 9653 determina os limites de vibração pela Velocidade de Pico da Partícula, os quais estão expostos na Figura 6. Mas, os riscos de ocorrência de danos induzidos

pela vibração devem ser avaliados a velocidade da partícula e a frequência de vibração dessas partículas.

Figura 6-Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência.



Fonte: NBR 9653, 2018.

### 2.5.2 GEOFONE

O sismógrafo utiliza um geofone para medir a velocidade de vibração do solo em três direções ortogonais: longitudinal, transversal e vertical. Para isso, o geofone deve ser orientado com a seta superior apontando para a fonte da detonação.

A metodologia de fixação do geofone varia de acordo com a natureza da superfície. Em solos macios, a cravação com pinos é o método mais comum, sendo recomendada uma profundidade de 10 a 20 cm. Já em superfícies duras, como rochas, a utilização de materiais adesivos, como gesso, é mais adequada para garantir a adesão do equipamento (NBR 9653). É fundamental na fixação dos geofones respeitar os procedimentos, visto que a fixação tem interferência na qualidade das medições realizada, como mostrado por Gomes (2017).

### 2.5.3 SISMÓGRAFO

De acordo com a Norma Brasileira 9653, o sismógrafo é um instrumento de medição constituído por um conjunto de sensores calibrados e identificados individualmente. O geofone capta as vibrações nas três componentes, o microfone registra os sons, e a unidade de processamento coleta e analisa os dados, fornecendo informações precisas sobre o ambiente em estudo.

O equipamento captura os valores máximos instantâneos da velocidade de vibração em três eixos ortogonais (longitudinal, transversal e vertical), expressos em milímetros por segundo, juntamente com as respectivas frequências dominantes. Além disso, calcula a velocidade de vibração resultante máxima.

O sismógrafo utilizado nesse trabalho foi o Micromate da empresa Instantel (Figura 7). Esse equipamento tem como característica a sua instalação na superfície.

Figura 7-Sismógrafo Instantel Micromate.



Fonte: VMA, 2024.

### 2.5.4 DATATRAP

O DataTrap (Figura 8) é um equipamento da empresa MREL, sendo ele um gravador de dados definitivo para aplicações em ambientes desafiadores. O DataTrap é marcado por ser robusto, versátil e preciso para coletar dados de uma ampla variedade de sensores, incluindo acelerômetros, sensores de pressão e geofones. Além disso, o DataTrap oferece funcionalidades específicas para aplicações em detonações de explosivos, como o cálculo da velocidade de detonação e a medição da vibração induzida (MREL, 2024).

Figura 8-DataTrap.



Fonte: MREL, 2024.

## 2.6 MODELO DE ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO

A fim de mitigar os impactos das vibrações provenientes de detonações, pesquisadores buscaram estabelecer uma relação quantitativa entre a carga explosiva, a distância e o nível de vibração induzido. Essa relação, expressa por meio de uma equação, permite prever os efeitos vibratórios em diferentes pontos e tomar medidas preventivas. Dois modelos muito conhecidos são o proposto por Devine (1962) e por Holmberg & Persson (1979), e esses podem ser utilizados a depender da condição.

### 2.6.1 MODELO DE ATENUAÇÃO DE DEVINE (1962)

De acordo com Jimeno & Lopez (1994), quando se utilizam cargas explosivas cilíndricas, análises adimensionais demonstraram que, para obter uma previsão mais precisa das vibrações, é necessário ajustar as distâncias. Segundo pesquisas de Devine (1962) essa correção é realizada dividindo a distância por sua raiz quadrada.

Contreras (2009) reforça essa ideia do ponto de vista teórico, indicando que essa relação é especialmente válida em zonas distantes da detonação. Esse ajuste se baseia no princípio de que a relação entre a distância e a carga explosiva influencia significativamente a propagação das vibrações.

Como exposto por Quispe (2017), a Equação 3 proposta por Devine é a que melhor representa o comportamento da vibração em campo longo, ou seja, situações na qual a distância entre a carga e o ponto de monitoramento é maior que dez vezes o comprimento da carga. Claramente, o parâmetro  $n$  na equação de Devine é controlado pela geometria da frente de onda em expansão e pelo coeficiente de atenuação da rocha. No entanto, o valor de  $K$  é controlado

principalmente pelo explosivo e pela eficiência com que a pressão de detonação é transmitida à rocha circundante como uma tensão.

Equação 3- Equação de Devine.

$$PPV = k \times \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^n$$

Onde:

PPV: Velocidade de Pico da Partícula (mm/s)

d: Distância (m)

k: Constante baseada na velocidade

W: Carga explosiva (Kg)

n: Constante de atenuação

### 2.6.3 MODELO DE ATENUAÇÃO DE HOLMBERG & PERSSON (1979)

Para condições muito próximas da carga explosiva, conhecida como campo curto, se deve modificar a equação da lei de atenuação para se conseguir considerar a forma cilíndrica da carga. Nessa condição, Holmberg & Persson-H&P (1979) propuseram uma equação (Equação 4) que leva em consideração o fato de que a razão linear (quantidade de explosivo por metro no furo) exerce maior influência na vibração do que o peso da carga como proposto por Devine (Cintex, 2006).

Equação 4- Equação de Holmberg & Persson-H&P (1979).

$$PPV = K\gamma^\alpha \left[ \int_0^H \frac{dh}{\left[ R_0^2 + (R_0 \tan\phi - x^2) \right]^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha$$

Onde:

PPV: Velocidade de Pico da Partícula (mm/s)

g: Razão linear de carga (Kg/m)

Ro: Distância de medição até a carga (m)

h: Comprimento da carga (m)

Xs: Comprimento do tampão (m)

Xo: Profundidade de medição (m)

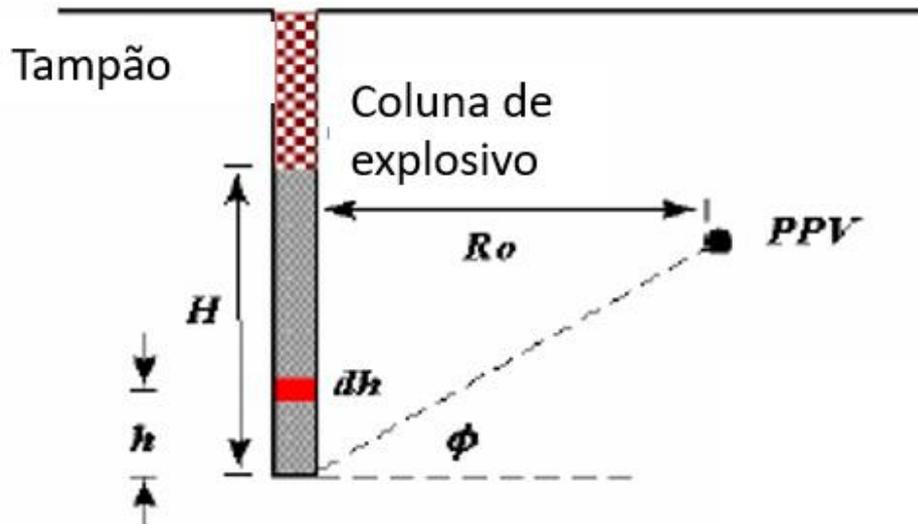
k: Constante baseada na velocidade

n: Constante de atenuação

$\theta$ : Ângulo entre profundidade de medição e a distância até a carga

Quispe (2017), ressalta que a constante K é a mesma apresentada por Devine (Equação 3), já a constante  $\alpha$  se equivale a constante  $n$  no modelo de Devine. Enquanto que a constante  $\beta$  apresentada na Figura 8 é equivalente a duas vezes a constante  $n$  do modelo de Devine, e o restante dos fatores da equação estão relacionados a fatores geométricos e a razão linear da carga (Figura 9), como apresentado por Edwin (2021). Dessa forma, para facilitar podemos considerar a simplificação apresentada na Figura 10, na qual HP representa o Fator Holmberg & Persson.

Figura 9-Fatores geométricos da equação de Holmberg & Persson-H&P (1979).



Legenda:  $H$ =comprimento da carga,  $R_o$ =distância de medição até a carga,  $h$ =profundidade de medição,  $\theta$ =ângulo entre profundidade de medição e a distância até a carga.

Fonte: Quispe, 2017.

Figura 10-Simplificação da equação de Holmberg & Persson.

$$PPV = K\gamma^\alpha \left[ \int_0^H \frac{dh}{\left[ R_o^2 + (R_o \tan \phi - x^2) \right]^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha \longleftrightarrow PPV = KxHP^\beta$$

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE CAMPO

O objetivo principal dessa dissertação é desenvolver uma metodologia capaz de mensurar a capacidade de filtro de um desmonte de pré-corte e mensurar essa capacidade em um plano de fogo de pré-corte específico. A metodologia empregada tem como base um ensaio de campo para caracterização sísmica realizado em uma mina de níquel localizada no sul do Estado da Bahia, Brasil. A partir desse trabalho foi possível criar leis de atenuações de propagação de vibração para condições com e sem o uso do pré-corte, o que com uma análise subsequente pode permitir mensurar a capacidade de filtro dessa técnica de desmonte de acabamento tanto para preservação do talude remanescente como de estruturas localizadas distantes do desmonte.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Como ponto inicial desse estudo é fundamental entender e conhecer em qual tipo de material o trabalho foi desenvolvido, dessa forma é importante salientar a caracterização geológica da jazida de níquel em questão, que está hospedada em uma intrusão máfica-ultamáfica. O local escolhido para essa análise é uma região na zona denominada D4\_Z4, a qual é predominantemente marcada pela presença da litologia Gabro.

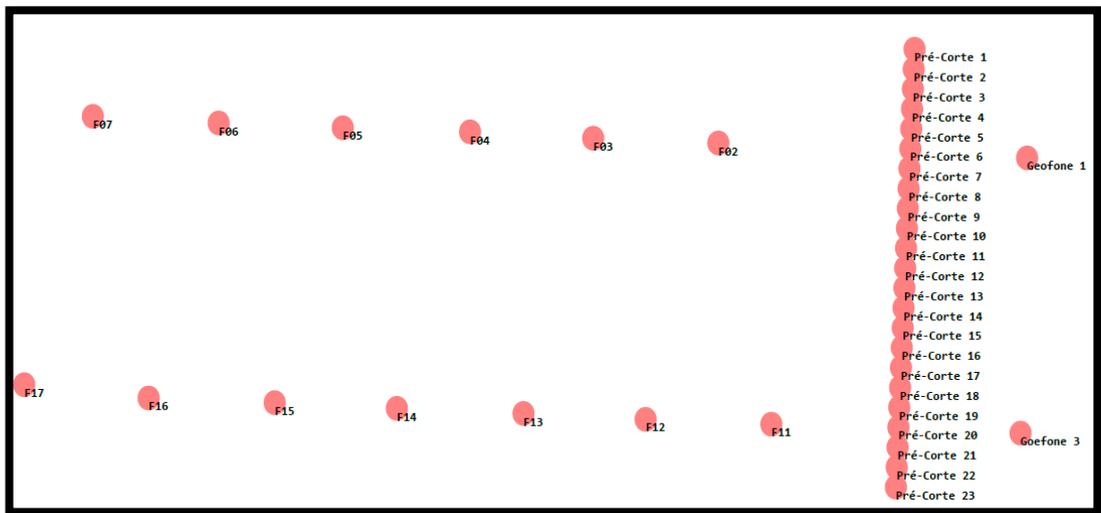
Já as informações específicas da litologia Gabro na zona D4\_Z4 foram fornecidas pelo time de geologia da mina. Sendo, esse material marcado por uma Resistência à Compressão Uniaxial (UCS) de 157,04 MPa, Módulo de Elasticidade (E) de 22,6 GPa e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,27.

#### 3.2 ENSAIO DE CAMPO

A configuração base do ensaio de campo tem como inspiração principal um estudo de vibração de campo curto apresentado por Lopes (et al, 2021). O ensaio foi realizado com quatorze furos com o diâmetro de 114mm (4,5in) e com profundidade média de 8,77m, sendo que esses furos foram divididos em duas linhas formando uma malha estagiada com afastamento de sete metros e nos furos da mesma linha, também, havia um espaçamento de sete metros. A uma distância de sete metros dessas duas linhas foi perfurada uma linha de 23 furos análoga a um pré-corte já utilizada na mina, com espaçamento de um metro, e profundidade de 9 metros e diâmetro de 114mm (4,5in). E, também, realizou-se mais três furos com profundidade

média de 9,33m para se instalar geofones triaxiais de sacrifício, sendo um deles alocado alinhado com a primeira linha de furos e a aproximadamente 17m dela e outros alinhados com a segunda linha de furos e distantes, respectivamente, 14 e 21 metros dessa linha. Por fim, foram instalados três sismógrafos de superfície distantes 96, 120 145 metros do furo 11, com o intuito de fazer os registros sismográficos a grandes distâncias e, assim, realizar uma análise de campo longo como proposto por Lopes (et al,2018). A Figura 11 representa um croqui desse ensaio no campo, a Figura 12 uma foto da bancada na qual foi realizado o estudo e a posição dos geofones de sacrifício, já a Figura 13 a posição dos sismógrafos de superfície.

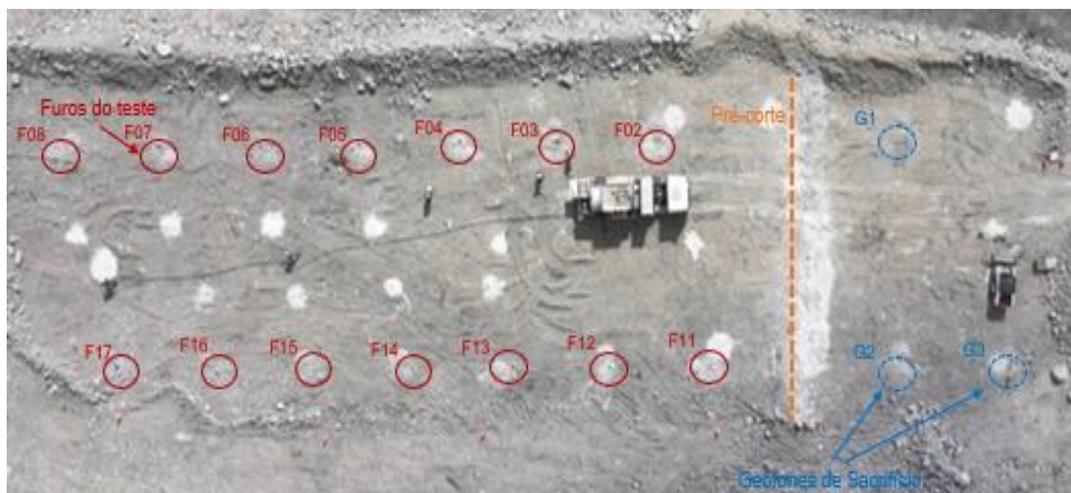
Figura 11-Croqui do ensaio de campo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Legenda:F02= Furo 2, F03= Furo 3, F04= Furo 4, F05= Furo 5, F06= Furo 6, F07= Furo 7, F08= Furo 8, F11= Furo 11, F12= Furo 12, F13= Furo 13, F14= Furo 14, F15= Furo 15, F16= Furo 16, F17= Furo 17, G1= Geofone de sacrifício 1, G2= Geofone de sacrifício 2, G3= Geofone de sacrifício 3.

Figura 12-Posição dos geofones de sacrifício.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Legenda:F02= Furo 2, F03= Furo 3, F04= Furo 4, F05= Furo 5, F06= Furo 6, F07= Furo 7, F08= Furo 8, F11= Furo 11, F12= Furo 12, F13= Furo 13, F14= Furo 14, F15= Furo 15, F16= Furo 16, F17= Furo 17, G1= Geofone de sacrifício 1, G2= Geofone de sacrifício 2, G3= Geofone de sacrifício 3.

Figura 13-Posição dos sismógrafos de superfície.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Legenda:F02= Furo 2, F03= Furo 3, F04= Furo 4, F05= Furo 5, F06= Furo 6, F07= Furo 7, F08= Furo 8, F11= Furo 11, F12= Furo 12, F13= Furo 13, F14= Furo 14, F15= Furo 15, F16= Furo 16, F17= Furo 17, G1= Geofone de sacrifício 1, G2= Geofone de sacrifício 2, G3= Geofone de sacrifício 3, S1= Sismógrafo de superfície 1, S2= Sismógrafo de superfície 2, S3= Sismógrafo de superfície 3.

Após a perfuração dos furos de acordo com o croqui elaborado e a conferência da perfuração todos os furos tiveram a sua posição levantada pelo time de topografia, assim foi possível determinar que o furo número sete é o que possui a cota do pé em posição mais elevada. Com isso, foi calculado de acordo com a Tabela 1 quanto deveria ser aterrado em cada furo para que toda a furação tivesse a mesma cota no pé e, conseqüentemente, a profundidade dos furos foi atualizada com mostrada na Tabela 1.

Tabela 1-Cálculo de aterro dos furos.

N	X	Y	Z	Prof. INICIAL-m	Z TOE	ATERRO-m	Prof. OBJETIVA-m
Geofone 1	422928,165	8430181,83	94,214	9,3	84,914	0,137	9,163
2	422917,945	8430195,83	93,925	9,4	84,525	0,526	8,874
3	422913,753	8430201,46	93,693	8,7	84,993	0,058	8,642
4	422909,695	8430207,06	93,702	8,85	84,852	0,199	8,651
5	422905,4	8430212,77	93,313	8,65	84,663	0,388	8,262
6	422901,246	8430218,36	93,363	8,75	84,613	0,438	8,312
7	422897,105	8430224,08	93,501	8,45	85,051	0	8,45
8	422892,938	8430229,7	93,68	8,9	84,78	0,271	8,629
Geofone 2	422921,376	8430167,78	94,124	9,4	84,724	0,327	9,073
Goefone 3	422917,139	8430173,5	94,273	9,3	84,973	0,078	9,222
11	422908,77	8430184,7	93,976	9,15	84,826	0,225	8,925
12	422904,56	8430190,37	93,568	8,95	84,618	0,433	8,517
13	422900,52	8430195,9	93,54	8,75	84,79	0,261	8,489
14	422896,288	8430201,61	93,388	8,95	84,438	0,613	8,337
15	422892,236	8430207,14	93,335	8,65	84,685	0,366	8,284
16	422888,007	8430212,82	93,201	8,35	84,851	0,2	8,15
17	422884,176	8430218,68	93,194	8,3	84,894	0,157	8,143

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

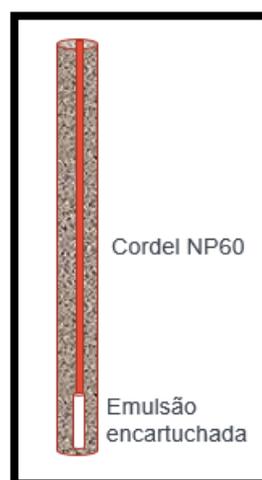
Em seguida os furos foram carregados com a carga fixa de 15Kg de emulsão bombeada sensibilizada quimicamente. A densidade média desse explosivo nos furos foi de 1,18g/cm<sup>3</sup>, tendo uma altura média da carga de 1,43m (HC), como mostrado nos dados de carregamento na Tabela 2, já os furos do pré-corte tiveram a altura planejada de nove metros e foram carregados com uma trama de cordel de gramatura de 60g/m (NP60) com uma emulsão encartuchada com diâmetro de 2 ¼” e 4” de comprimento no pé do furo (Figura 14).

Tabela 2-Carga dos furos.

Furo	N	Prof. Real-m	Carga-Kg	Densidade-g/cm <sup>3</sup>	Tampão-m	Hc -m
1	Geofone 1	9,2	15	Geofone 1	Geofone 1	Geofone 1
2	2	8,9	15	1,17	7,8	1,1
3	3	8,7	15	1,16	7,65	1,05
4	4	8,7	15	1,17	7,35	1,35
5	5	8,3	15	1,2	6,95	1,35
6	6	8,3	15	1,18	6,6	1,7
7	7	8,45	15	1,22	6,8	1,65
8	8	8,6	15	1,21	7,05	1,55
9	Geofone 3	9,15	15	Geofone 3	Geofone 3	Geofone 3
10	Geofone 2	9,2	15	Geofone 2	Geofone 2	Geofone 2
11	11	9	15	1,17	7,55	1,45
12	12	8,5	15	1,19	6,6	1,9
13	13	8,4	15	1,18	7	1,4
14	14	8,35	15	1,19	6,8	1,55
15	15	8,2	15	1,15	6,65	1,55
16	16	8,15	15	1,18	6,95	1,2
17	17	8,15	15	1,18	6,9	1,25

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 14 -Perfil de carregamento do pré-corte.

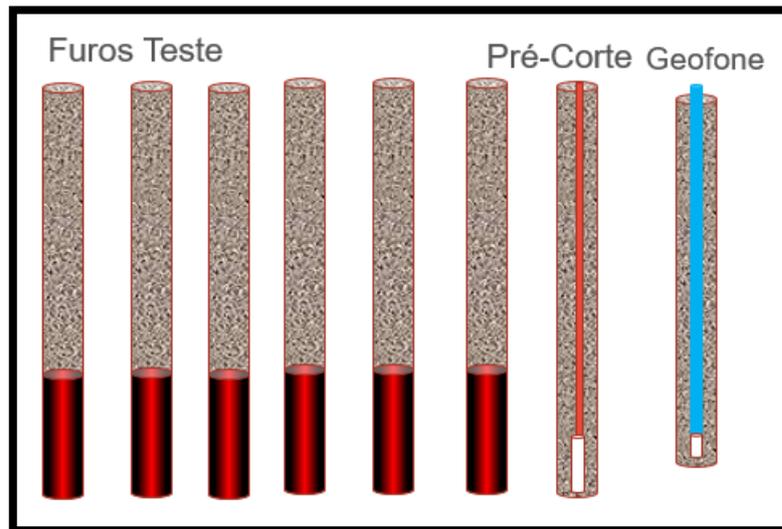


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os geofones de sacrifício foram conectados ao equipamento DataTrap e são considerados de sacrifícios, pois foram instalados nos furos com o auxílio de argamassa e, dessa

forma, a sua recuperação após o ensaio é muito difícil. Assim, na implementação de campo esses dispositivos foram instalados com o objetivo de que eles ficassem na altura correspondente da metade da altura da carga dos furos (Figura 15). Por outro lado, os sismógrafos de superfície foram instalados como rege a NBR9653 com gesso (Figura 16).

Figura 15-Vista de perfil da posição do geofone em relação a carga de explosivo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

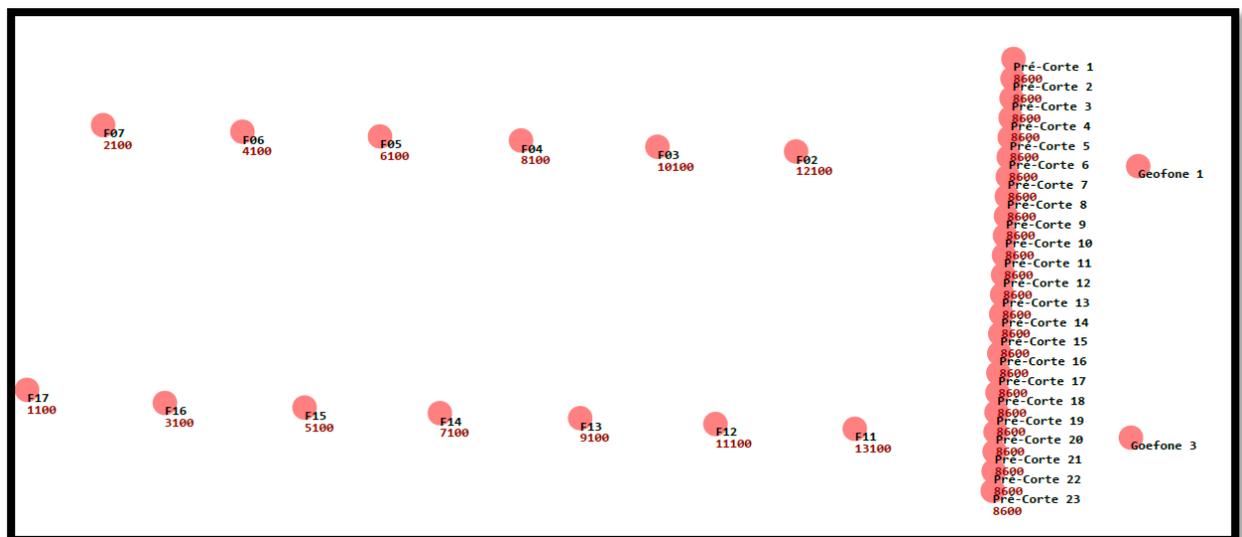
Figura 16-Instalação do sismógrafo de superfície.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Após a instalação dos equipamentos de medição e o carregamento dos furos com carga explosiva eles foram iniciados com o sistema de iniciação eletrônica com um intervalo de 1000ms entre cada furo. Após o furo 04 com o tempo de 8100ms iniciar, os 23 furos do pré-corte foram acionados simultaneamente e, em seguida, a sequência de iniciação continuou respeitando o intervalo de 1000ms como mostrado no croqui de temporização (Figura 17).

Figura 17-Croqui da temporização.



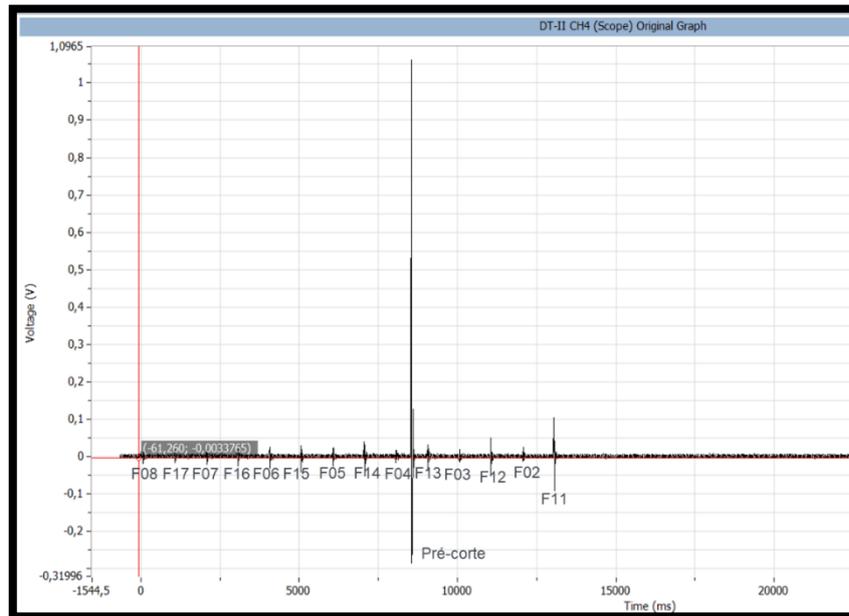
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Legenda: F02= Furo 2, F03= Furo 3, F04= Furo 4, F05= Furo 5, F06= Furo 6, F07= Furo 7, F08= Furo 8, F11= Furo 11, F12= Furo 12, F13= Furo 13, F14= Furo 14, F15= Furo 15, F16= Furo 16, F17= Furo 17.

### 3.3 REGISTROS SÍSMICOS

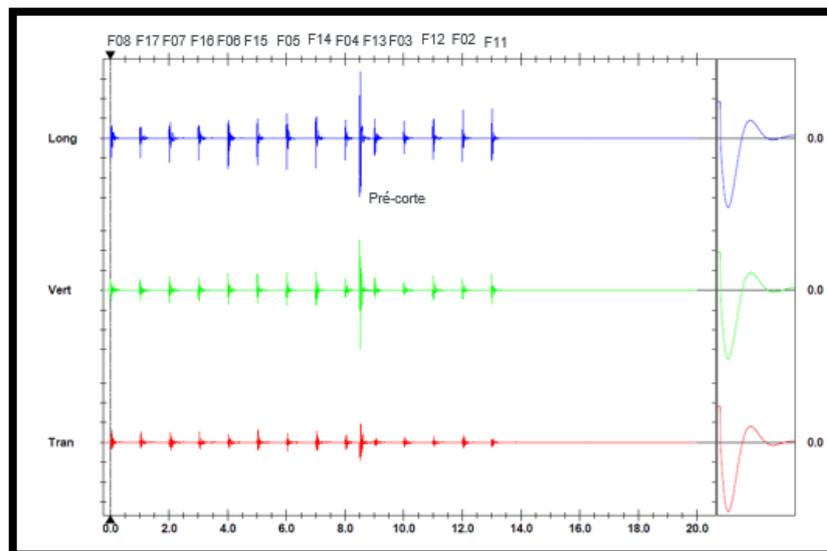
Na etapa seguinte, após detonação do ensaio, o equipamento DataTrap e os três sismógrafos de superfície foram recolhidos e foram obtidos em seus *softwares* específicos os gráficos que representam a vibração induzida provocada pelas detonações dos furos do teste de campo. Ao analisar os gráficos é possível perceber com nitidez o efeito que cada evento desse ensaio provocou no meio. A Figura 18 exemplifica como é possível identificar a detonação de cada furo separadamente, nessa imagem estão os registros sismográficos gerados por um dos eixos do geofone triaxial de sacrifício dois G2 que, assim como os outros geofones triaxiais de sacrifício, está conectado ao equipamento DataTrap. Enquanto isso, a Figura 19 ilustra como esse reconhecimento ocorreu nos três eixos do sismógrafo de superfície.

Figura 18-Registros do geofone triaxial de sacrifício G2.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 19-Registro do sismógrafo de superfície S1.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com a diferença de iniciação de cada furo foi possível constatar qual foi a vibração induzida por cada furo em cada um dos instrumentos de medição. Com isso, foi possível criar a Tabela 3, na qual expõe essa relação mostrando qual foi a Velocidade de Pico de Partícula

(PPV) em cada uma das três componentes (longitudinal, transversal e vertical) gerada por cada furo detonado. Contudo, vale ressaltar que o geofone de sacrifício G3 não conseguiu capturar os registros no eixo vertical, pois o DataTrap possui oito entradas de conexão e cada geofone usa uma entrada para cada um dos eixos, ou seja, seriam necessárias nove entradas para conseguir captar todos os eixos de todos os três geofones.

Tabela 3-Vibração induzida por cada furo (continua).

Furo	Equipamento	PPV Long-mm/s	PPV Trans-mm/s	PPV Vert-mm/s
F08	Geofone 1	4,18	7,41	3,96
F17	Geofone 1	3,54	6,55	5,25
F07	Geofone 1	5,04	9,12	6,96
F16	Geofone 1	3,75	7,41	5,25
F06	Geofone 1	6,54	14,28	7,82
F15	Geofone 1	5,68	7,84	5,25
F05	Geofone 1	7,83	15,99	8,46
F14	Geofone 1	6,76	9,55	4,61
F04	Geofone 1	7,19	15,56	6,53
F13	Geofone 1	8,90	11,70	5,25
F03	Geofone 1	11,05	11,27	5,46
F12	Geofone 1	9,76	13,42	4,61
F02	Geofone 1	17,05	15,99	7,39
F11	Geofone 1	13,19	15,99	12,32
F08	Geofone 2	6,55	3,86	3,33
F17	Geofone 2	6,98	5,57	3,33
F07	Geofone 2	7,19	4,28	4,84
F16	Geofone 2	8,48	6,00	4,19
F06	Geofone 2	10,63	5,14	6,56
F15	Geofone 2	14,06	8,57	6,99
F05	Geofone 2	8,48	7,71	6,56
F14	Geofone 2	17,92	8,57	7,42
F04	Geofone 2	6,12	6,43	5,70
F13	Geofone 2	13,20	7,71	6,77
F03	Geofone 2	6,98	5,14	6,13
F12	Geofone 2	17,92	10,71	10,43
F02	Geofone 2	8,69	8,57	7,64
F11	Geofone 2	36,60	23,99	24,63
F08	Geofone 3	8,04	4,61	
F17	Geofone 3	7,61	5,90	
F07	Geofone 3	8,04	5,04	
F16	Geofone 3	8,47	5,90	
F06	Geofone 3	10,19	5,90	
F15	Geofone 3	11,04	6,76	
F05	Geofone 3	9,33	7,62	
F14	Geofone 3	13,19	6,33	

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 4-Vibração induzida por cada furo (continuação).

Furo	Equipamento	PPV Long- mm/s	PPV Trans- mm/s	PPV Vert- mm/s
F04	Geofone 3	8,47	7,19	
F13	Geofone 3	10,19	6,76	
F03	Geofone 3	7,40	6,33	
F12	Geofone 3	13,62	7,83	
F02	Geofone 3	10,40	7,19	
F11	Geofone 3	19,62	13,63	
F08	Sismógrafo 1	9,97	6,05	5,36
F17	Sismógrafo 1	9,71	5,49	5,57
F07	Sismógrafo 1	11,70	4,98	6,57
F16	Sismógrafo 1	10,85	5,32	6,32
F06	Sismógrafo 1	15,34	3,93	8,32
F15	Sismógrafo 1	13,68	6,59	8,14
F05	Sismógrafo 1	15,71	4,78	8,60
F14	Sismógrafo 1	15,03	5,85	9,13
F04	Sismógrafo 1	10,81	3,60	5,84
F13	Sismógrafo 1	9,69	2,08	6,09
F03	Sismógrafo 1	8,39	2,62	4,11
F12	Sismógrafo 1	10,56	3,14	7,33
F02	Sismógrafo 1	14,38	3,58	4,72
F11	Sismógrafo 1	14,94	2,25	8,07
F08	Sismógrafo 2	4,28	2,89	3,07
F17	Sismógrafo 2	4,12	2,10	2,79
F07	Sismógrafo 2	4,62	3,73	3,42
F16	Sismógrafo 2	4,48	2,38	3,29
F06	Sismógrafo 2	5,53	1,73	4,31
F15	Sismógrafo 2	5,35	2,94	3,92
F05	Sismógrafo 2	5,62	2,02	4,42
F14	Sismógrafo 2	5,90	3,21	4,17
F04	Sismógrafo 2	3,74	1,80	3,05
F13	Sismógrafo 2	3,85	2,14	3,04
F03	Sismógrafo 2	3,05	1,39	2,04
F12	Sismógrafo 2	4,89	1,62	3,70
F02	Sismógrafo 2	4,30	1,51	2,70
F11	Sismógrafo 2	5,23	1,75	4,17
F08	Sismógrafo 3	2,56	2,17	2,38
F17	Sismógrafo 3	2,44	1,74	1,98
F07	Sismógrafo 3	2,88	2,55	2,45
F16	Sismógrafo 3	2,59	1,59	2,03
F06	Sismógrafo 3	3,02	2,15	2,77
F15	Sismógrafo 3	3,17	2,14	2,21
F05	Sismógrafo 3	2,98	1,88	2,66
F14	Sismógrafo 3	3,85	2,48	2,37
F04	Sismógrafo 3	2,43	1,29	1,79
F13	Sismógrafo 3	3,79	1,30	1,69
F03	Sismógrafo 3	2,66	1,07	1,22
F12	Sismógrafo 3	3,31	1,50	1,51
F02	Sismógrafo 3	2,76	1,10	1,51
F11	Sismógrafo 3	2,42	1,40	1,80

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

## 4 RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos no desse ensaio proposto pela metodologia adotada podemos construir leis de atenuações em diferentes cenários. Isso é importante, pois é uma maneira de se entender como a vibração induzida pela detonação se propaga em um meio. Uma lei de atenuação é uma fórmula que visa estimar a Velocidade de Pico da Partícula (PPV) num determinado cenário de detonação, assim se faz necessário escolher a teoria que melhor se adequa a cada situação. Desse modo, foram criados modelos preditivos para vibração em campo curto com os dados coletados nos geofones de sacrifício, sendo um modelo com os dados obtidos antes da detonação do pré-corte e outro após a detonação desses furos. Seguindo essa lógica, com os dados obtidos nos sismógrafos de superfície foram criados modelos em campo longo antes e depois da detonação dos furos de pré-corte.

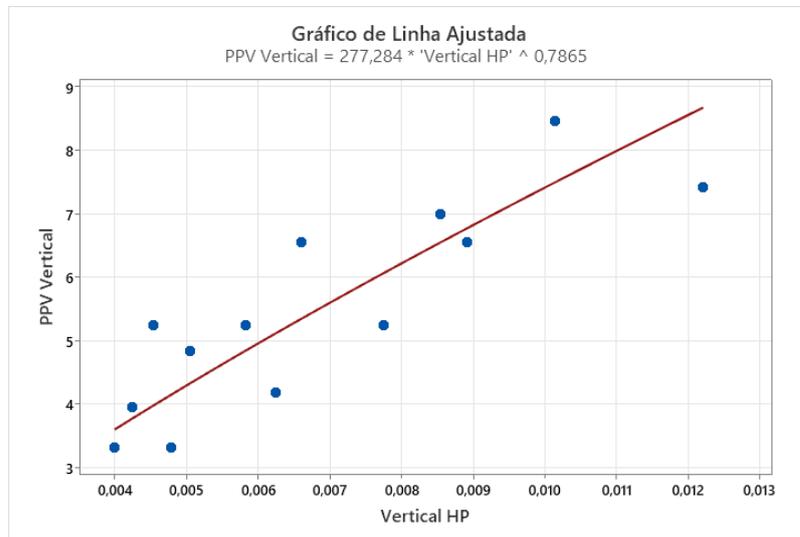
### 4.1 MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO GEOFONE DE SACRIFÍCIO

Para os geofones de sacrifício foram considerados modelos preditivos de vibração em campo curto, pois ao analisarmos as distâncias dos furos detonados até os geofones é possível perceber que há furos (Furo 11) que distam a aproximadamente 10 vezes o comprimento de carga de distância do geofone, Por isso, inicialmente os dados desses equipamentos foram analisados de acordo com a teoria proposta por Holmberg & Persson (1979), considerando um par ordenado entre o PPV correspondente ao Fator Holmberg & Persson (HP). Na sequência, foi realizada uma análise semelhante considerando o modelo de Devine (1966) com um par ordenado entre o PPV e a distância escalonada (DE), com o intuito de comparar as duas teorias e, também, de avaliar se a implementação dos geofones em campo foi eficiente.

#### 4.1.1 MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO - TEORIA DE HOLMBERG & PERSSON (1979)

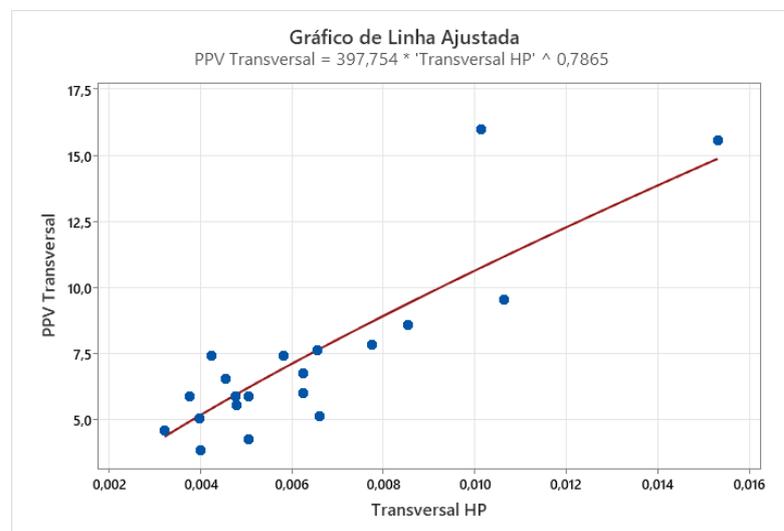
Considerando os dados extraídos dos geofones de sacrificio foi possível realizar as regressões (Figura 20, Figura 21, Figura 22) para cada componente vetorial com base na Equação 4 (equação de Holmberg & Persson (1979)), apresentada no capítulo da revisão da bibliografia, dos dados dos geofones de sacrifício dos furos detonados antes do pré-corte (F04, F05, F06, F07, F08, F14, F15, F16, F17). Essa regressão apresentou um percentual de correlação ( $r^2$ ) de 61,72% no eixo longitudinal, 70,1% no eixo transversal e 73,04% no eixo vertical.

Figura 20-Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2:61,72\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).



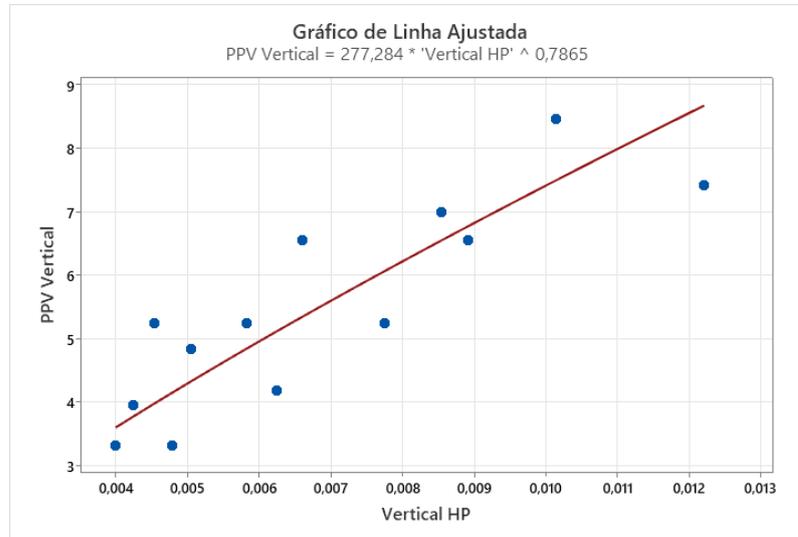
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 21-Gráfico da regressão transversal ( $r^2:70,1\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 22-Gráfico da regressão vertical ( $r^2:73,04\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

E, como resultado dessas regressões, foi possível determinar a equação de atenuação para cada componente antes do pré-corte ser acionado pela teoria de Holmberg & Persson (1979), Equação 5, Equação 6, Equação 7.

Equação 5-Equação de atenuação longitudinal antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).

$$PPVLongitudinal = 499,585 x (HP)^{-0,7865} \quad (5)$$

Equação 6-Equação de atenuação transversal antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).

$$PPVTransversal = 397,754x (HP)^{-0,7865} \quad (6)$$

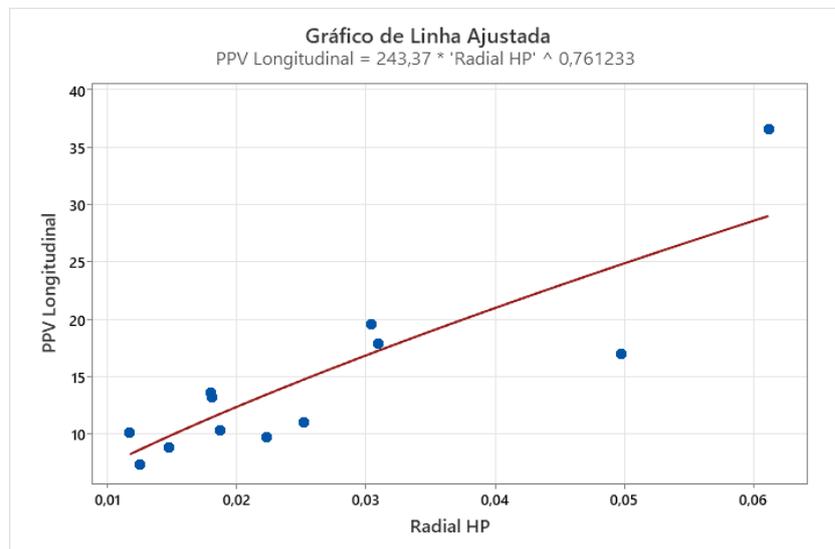
Equação 7-Equação de atenuação vertical antes do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).

$$PPVVertical = 277,284 x (HP)^{-0,7865} \quad (7)$$

Seguindo essa lógica, foi realizado o mesmo processo com os dados dos furos F02, F03, F11, F12 e F13 para se analisar os dados de vibrações após a detonação do pré-corte. Assim, as Figuras 23, 24 e 25 mostram as regressões de cada componente após a iniciação dos furos de

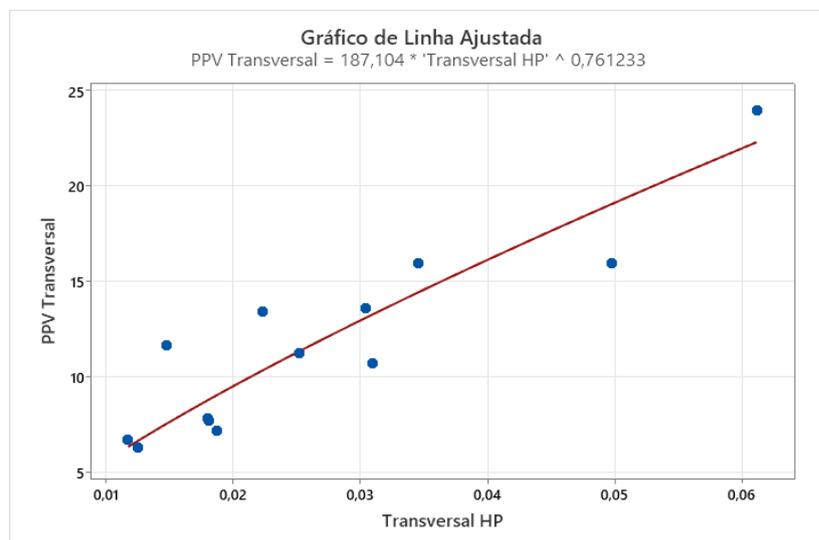
pré-corte, sendo que o eixo longitudinal apresentou uma correlação ( $r^2$ ) de 74,6%, o eixo transversal teve uma correlação de 77,75% e do eixo vertical 61,5%.

Figura 23-Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2$ :74,6%) depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).



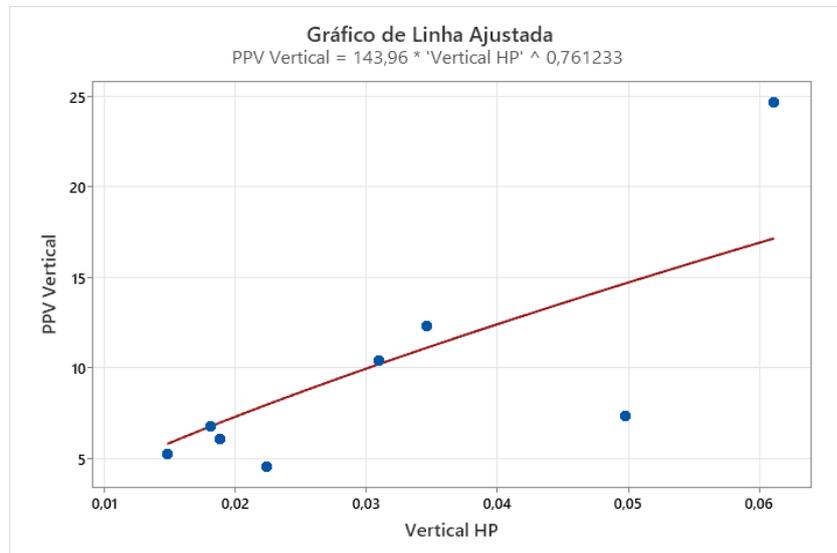
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 24-Gráfico da regressão transversal ( $r^2$ :77,75%) depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 25-Gráfico da regressão vertical ( $r^2:61,5\%$ ) depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Essas regressões também podem ser traduzidas nas equações de atenuações de vibração. Assim, temos para a teoria de Holmberg & Persson (1979) as seguintes as Equações 8,9 e 10 construídas com dados coletados após da detonação do pré-corte.

Equação 8-Equação de atenuação longitudinal depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).

$$PPV_{Longitudinal} = 243,37 x (HP)^{-0,761} \quad (8)$$

Equação 9-Equação de atenuação transversal depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).

$$PPV_{Transversal} = 187,104 x (HP)^{-0,761} \quad (9)$$

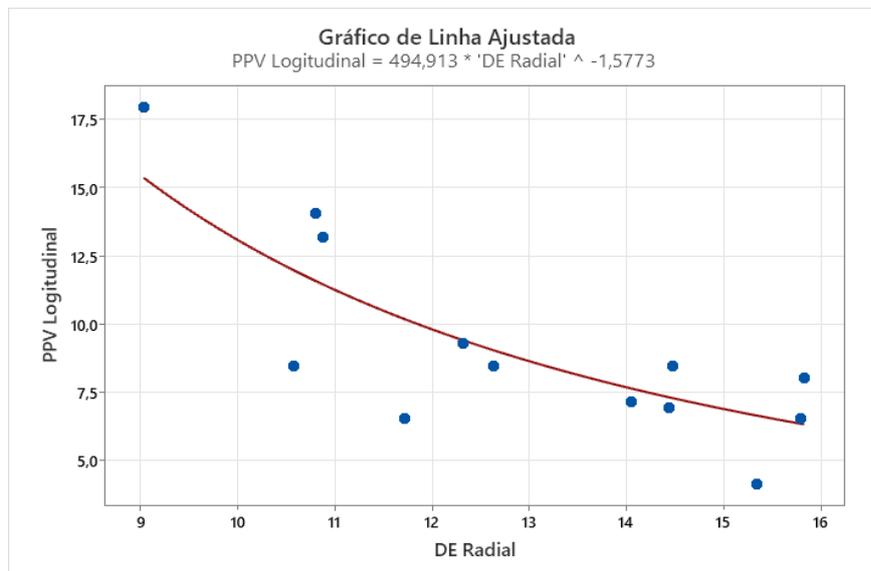
Equação 10-Equação de atenuação vertical depois do pré-corte pela teoria de Holmberg & Persson (1979).

$$PPV_{Vertical} = 143,96 x (HP)^{-0,761} \quad (10)$$

#### 4.1.2 MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO - TEORIA DE DEVINE (1962)

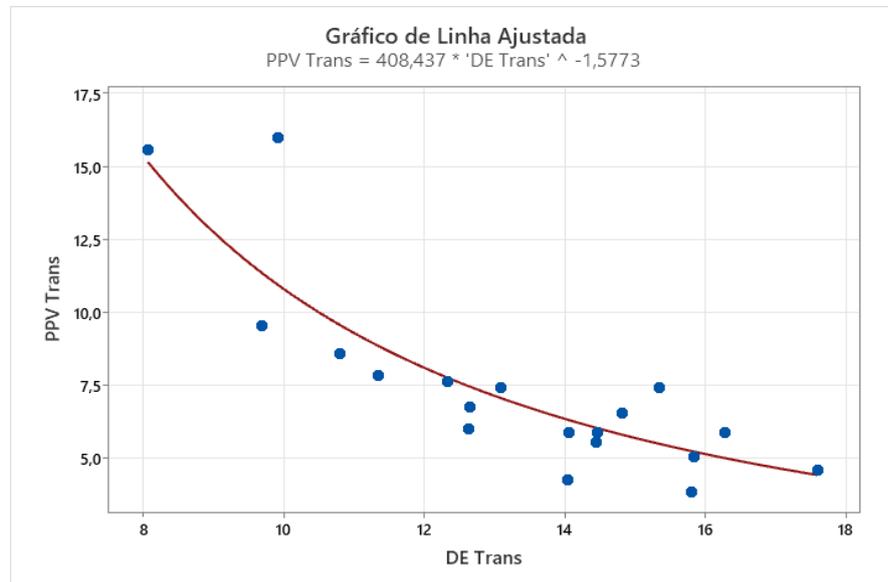
A análise pela teoria proposta por Devine (1962) seguiu a mesma lógica da observação anterior. Com isso, os dados de vibração capturados pelos geofones de sacrifício antes do pré-corte foram os furos F04, F05, F06, F07, F08, F14, F15, F16, F17, enquanto após o desmonte de acabamento foram os furos F02, F03, F11, F12 e F13. Como resultado, construiu-se as regressões antes do pré-corte (Figuras 26, 27 e 28), com correlação( $r^2$ ) de 60,47% no eixo longitudinal, 70,48% no eixo transversal e 69,13% no eixo vertical, sendo que essas regressões podem ser traduzidas pelas suas correspondentes equações de atenuação (Equações 11,12 e 13).

Figura 26- Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2$ :60,47%) antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



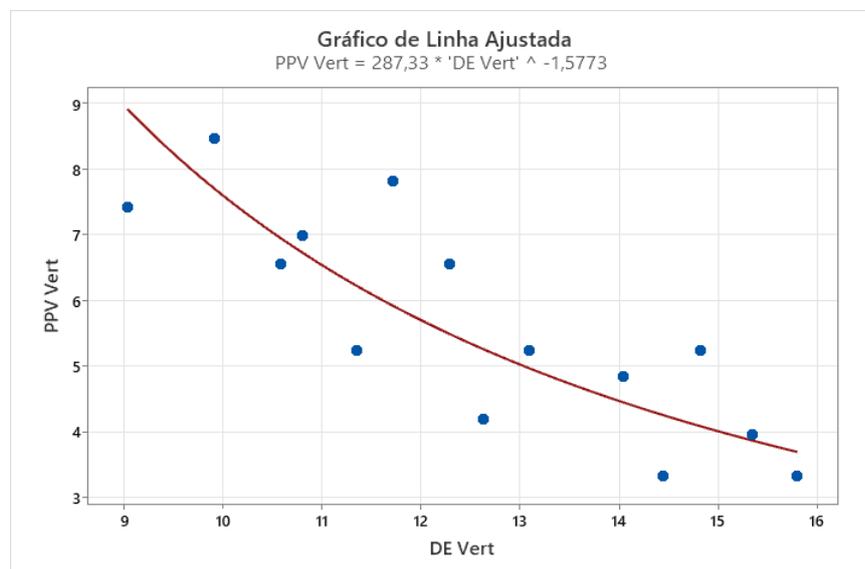
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 27- Gráfico da regressão transversal ( $r^2:70,48\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 28- Gráfico da regressão vertical ( $r^2:69,13\%$ ) antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Equação 11-Equação de atenuação longitudinal antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPV_{Longitudinal} = 494,913 \times (DE)^{-1,577} \quad (11)$$

Equação 12-Equação de atenuação transversal antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

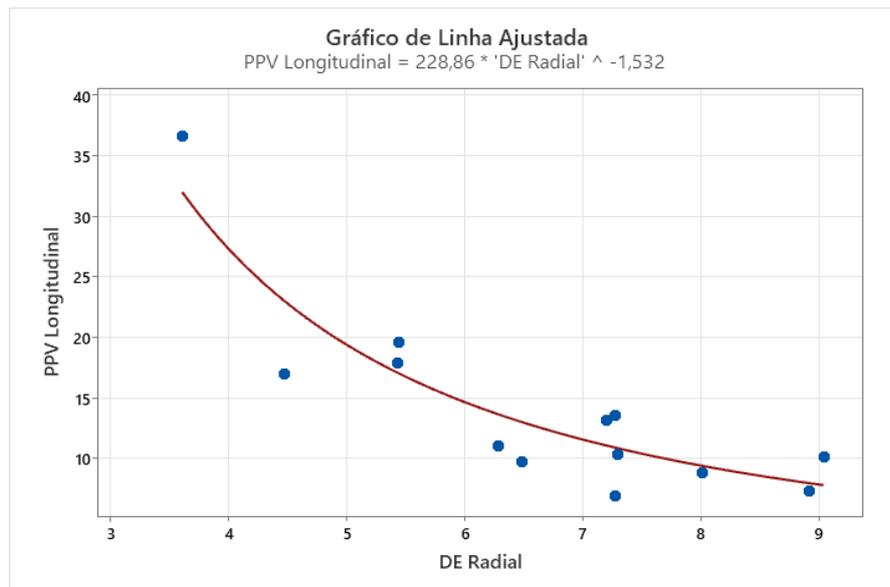
$$PPV_{Transversal} = 408,437 \times (DE)^{-1,577} \quad (12)$$

Equação 13-Equação de atenuação vertical antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPV_{Vertical} = 287,33 \times (DE)^{-1,577} \quad (13)$$

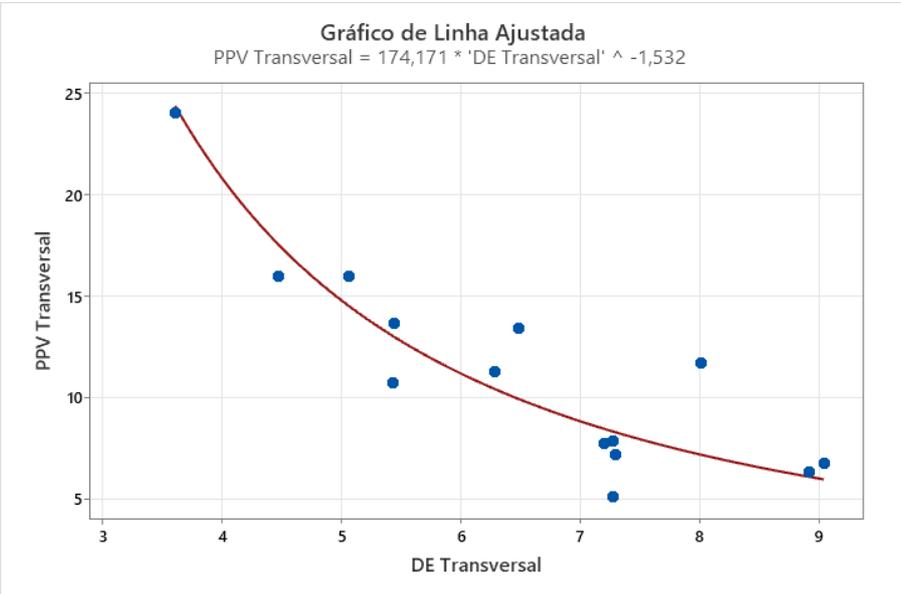
Já para os dados após o pré-corte as regressões para cada eixo estão expostas nas Figuras 29, 30 e 31 e suas respectivas equações são: Equação 13, 14 e 15. Para essa condição, a correlação ( $r^2$ ) do eixo longitudinal foi 75,76%, do eixo transversal foi 73,16% e do eixo vertical foi 68,91%.

Figura 29-Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2$ :75,76%) depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



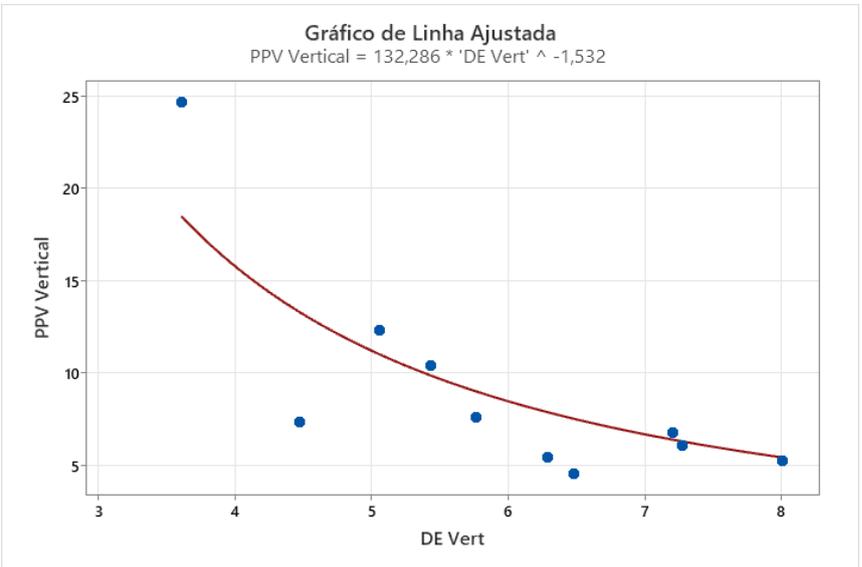
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 30-Gráfico da regressão transversal (r²:73,16%) depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 31-Gráfico da regressão vertical (r²:68,91%) depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Equação 13-Equação de atenuação longitudinal depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVLongitudinal = 228,86 \times (DE)^{-1,532} \quad (13)$$

Equação 13-Equação de atenuação longitudinal depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVTransversal = 174,171 x (DE)^{-1,532} \quad (14)$$

Equação 14-Equação de atenuação longitudinal depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

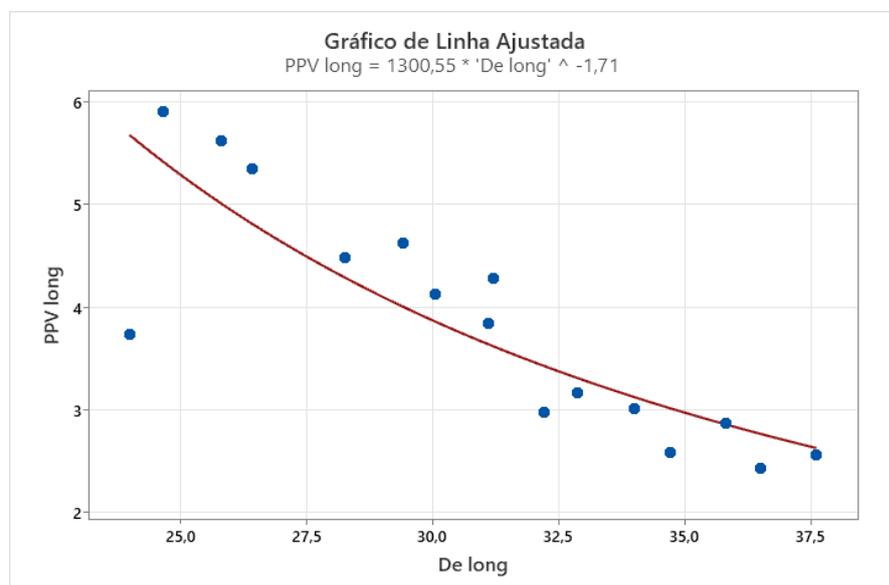
$$PPVVertical = 132,286 x (DE)^{-1,532} \quad (15)$$

#### 4.2 MODELOS PREDITIVOS DE VIBRAÇÃO SISMÓGRAFO DE SUPERFÍCIE

Devido ao fato de que a distância entre os sismógrafos e os furos do teste variam entre 45 e 145 metros foi considerado para o estudo dessa condição a teoria proposta por Devine (1962). Com isso, seguiu-se o padrão da análise dos dados dos geofones de sacrifício e foram criadas duas leis de atenuação, a primeira antes da iniciação do pré-corte considerando os dados de vibração induzida geradas pela detonação dos furos F04, F05, F06, F07, F08, F14, F15, F16, F17. A segunda lei de atenuação foi criada a partir dos dados dos furos F02, F03, F11, F12 e F13 que foram iniciados após o pré-corte.

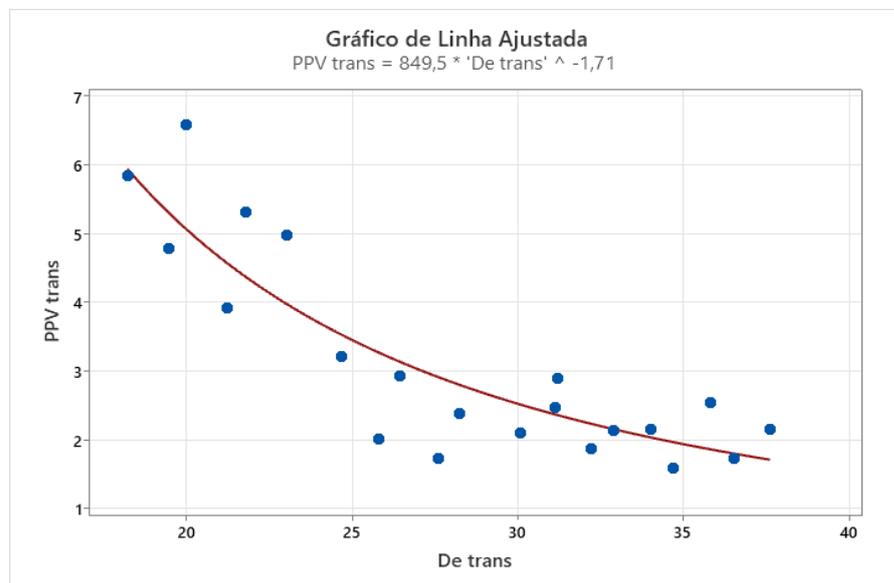
As regressões de cada eixo da primeira condição estão apresentadas nas Figuras 32, 33 e 34, sendo que o eixo transversal apresentou uma correlação ( $r^2$ ) de 74,23%, no transversal de 73,29% e no vertical de 81,29%. Sendo as equações representativas de cada regressão representadas pelas Equações 16, 17 e 18.

Figura 32- Equação de atenuação longitudinal ( $r^2$ :74,23%) dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



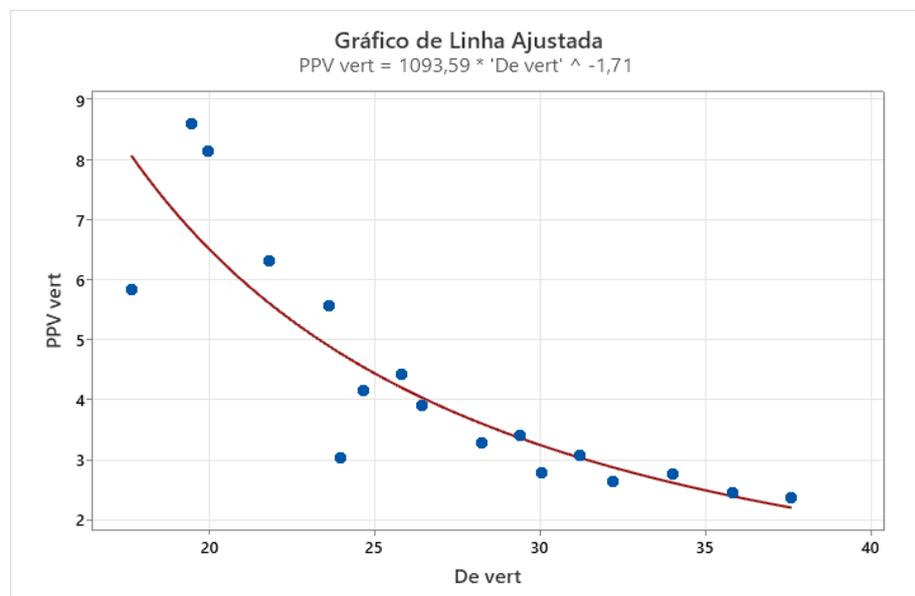
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 33- Gráfico da regressão transversal ( $r^2:73,29\%$ ) dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 34- Gráfico da regressão vertical ( $r^2:81,29\%$ ) dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Equação 16-Equação de atenuação longitudinal dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVLongitudinal = 1300,55 x (DE)^{-1,710} \quad (16)$$

Equação 17-Equação de atenuação transversal dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

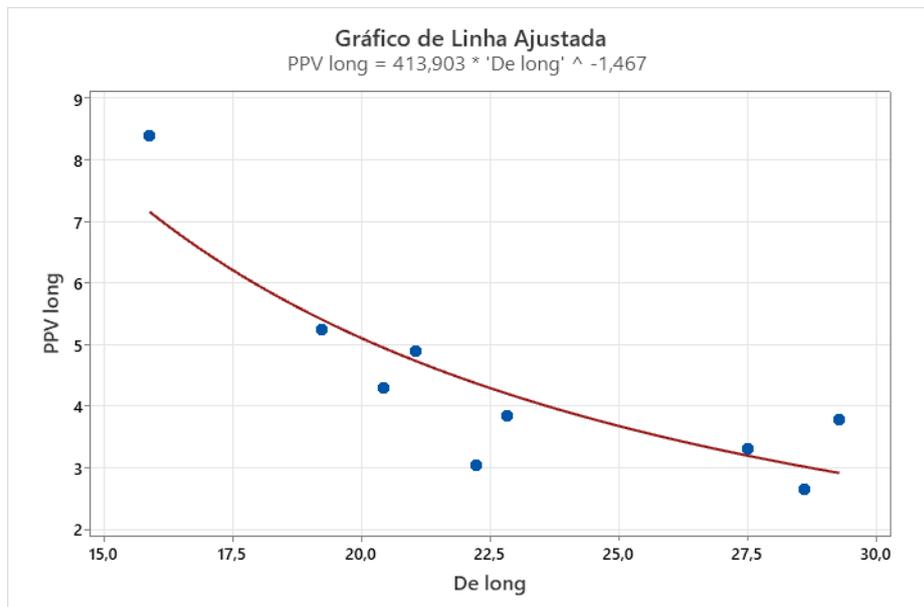
$$PPVTransversal = 849,5 x (DE)^{-1,710} \quad (17)$$

Equação 18-Equação de atenuação vertical dos sismógrafos antes do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVVertical = 1093,59 x (DE)^{-1,710} \quad (18)$$

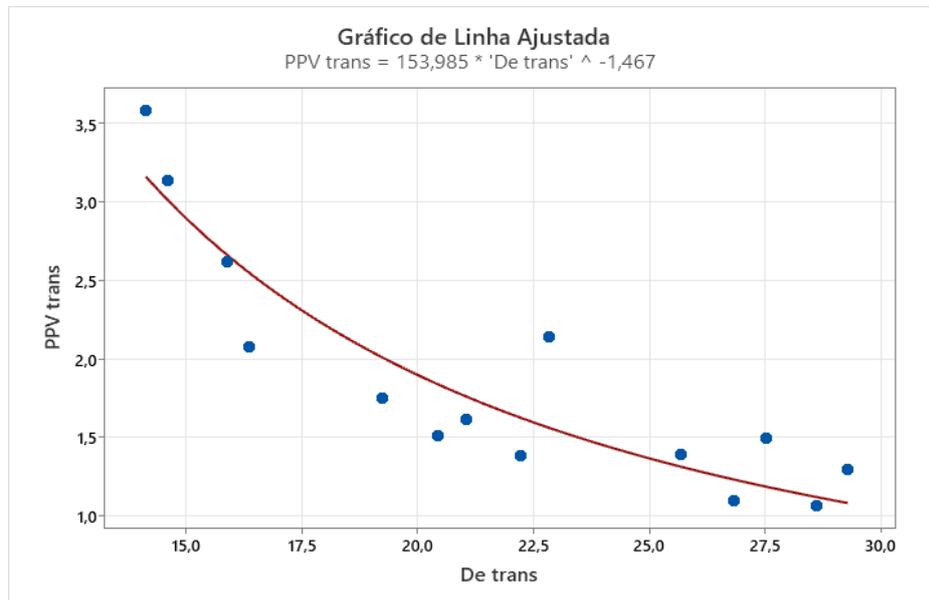
Enquanto isso, as regressões geradas pelos dados coletados após a iniciação do pré-corte estão expostas nas Figuras 35, 36 e 37. Nesse caso, a correlação no eixo longitudinal foi 71,88%, no eixo transversal foi de 81,88% e no eixo vertical foi de 97,04%, As Equações 19, 20 e 21 representam a lei de atenuação para esse caso em específico.

Figura 35- Gráfico da regressão longitudinal ( $r^2:71,88\%$ ) dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



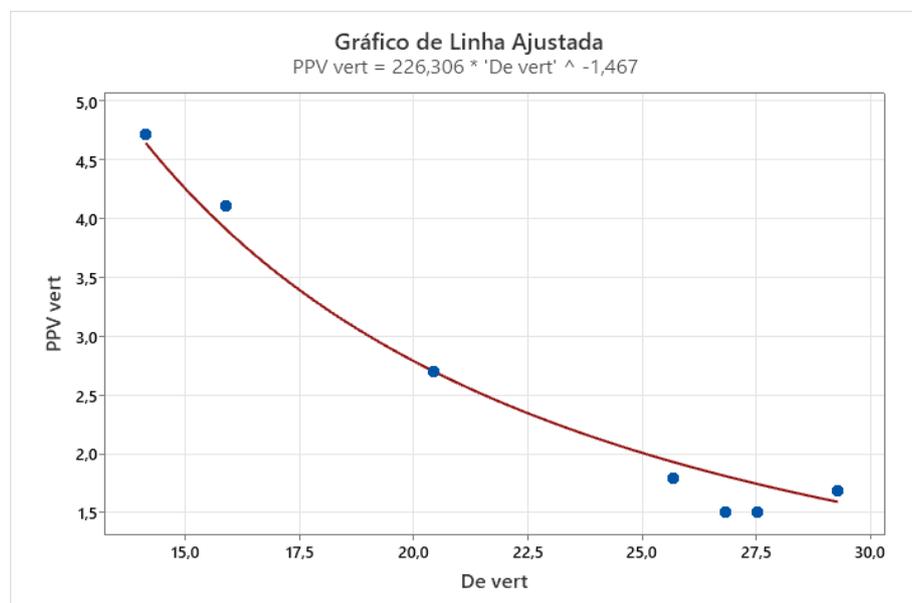
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 36- Gráfico da regressão transversal ( $r^2:81,88\%$ ) dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 37- Gráfico da regressão vertical ( $r^2:97,04\%$ ) grafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Equação 19-Equação de atenuação longitudinal dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVLongitudinal = 413,903 x (DE)^{-1,467} \quad (19)$$

Equação 20-Equação de atenuação transversal dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVTransversal = 153,985 x (DE)^{-1,467} \quad (20)$$

Equação 21-Equação de atenuação transversal dos sismógrafos depois do pré-corte pela teoria de Devine (1962).

$$PPVVertical = 226,306 x (DE)^{-1,467} \quad (21)$$

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Diante dos resultados obtidos e expostos no capítulo anterior, para cada um dos cenários estudados é possível entender o impacto do pré-corte na lei de atenuação, tanto para quando a vibração induzida é observada nas proximidades dessa linha de filtro (dados obtidos pelos geofones de sacrifício) como em condição mais distantes (dados obtidos pelos sismógrafos de superfície). Além disso, para a primeira situação, também, é possível realizar uma análise sobre a similaridades dos modelos propostos pela teoria de Holmberg & Persson (1979) e o da teoria de Devine (1962).

### 5.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE HOLMBERG & PERSSON (1979) E DEVINE (1962).

Os dados obtidos a partir os geofones de sacrifício foram utilizados para entender a impacto do pré-corte na vibração induzida nas proximidades da linha de filtro e, para esse caso, foram criadas equações baseadas nas teorias de Holmberg & Persson (1979) e de Devine (1962). Desse modo, é preciso entender a similaridade entre esses modelos e isso se faz pelas comparações entre o dobro da constante  $\beta$  (Figura 9) do primeiro conceito e a constante  $n$  (Equação 3) do segundo conceito. Nesse sentido, quando observamos a Tabela 4 vemos que essa correlação é de aproximadamente 99% tanto para as equações criadas antes, como para as criadas depois do pré-corte.

Tabela 5-Correlação entre as constantes dos modelos.

Constantes	$2 * \beta$	n	$(2 * \beta)/n$
Antes do pré-corte	1,57	1,58	99,72%
Depois do pré-corte	1,52	1,53	99,38%

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

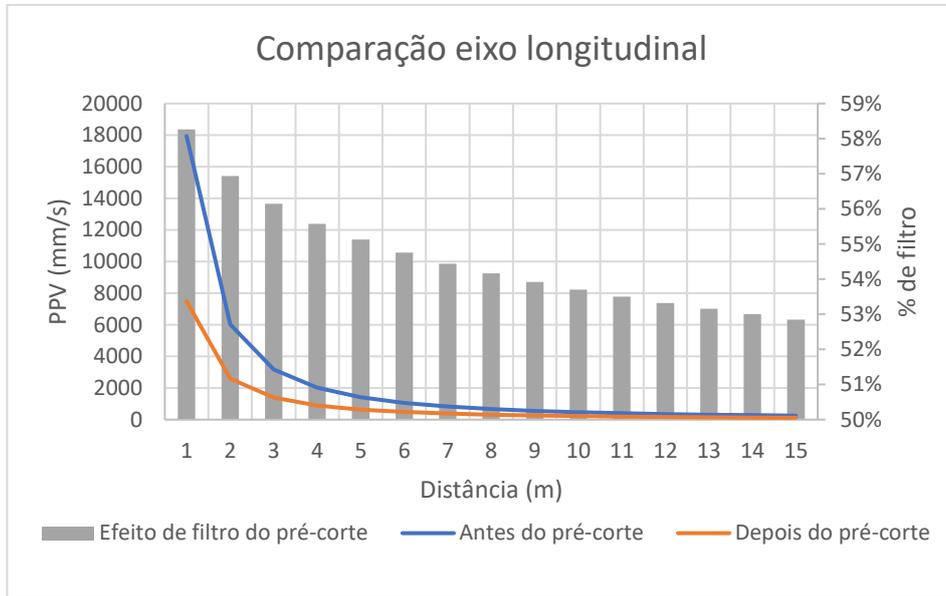
Esse alto grau de similaridade entre os modelos pode ter ocorrido por duas razões ou até mesmo pela soma delas. O primeiro aspecto é que apenas para o furo F11 a distância entre ele e o Geofone 2 (G2) é correspondente a aproximadamente dez vezes o comprimento da carga, assim para casos em que a distância é maior que dez vezes o comprimento do furo a tendência é de que as teorias analisadas se aproximem nos resultados. O segundo ponto é que a implementação em campo dos geofones foi realizada de forma de que os fatores geoespaciais entre a carga e os geofones fossem anulados na teoria de Holmberg & Persson (1979) e isso faz com que esse conceito tenha um comportamento semelhante ao de Devine (1962).

## 5.2 CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE PARA CURTAS DISTÂNCIAS

Devido à similaridade entre os modelos de previsão de vibração propostos por Holmberg & Persson (1979) e Devine (1962) é possível escolher qualquer uma das teorias para se analisar a capacidade de filtro do pré-corte para curtas distâncias. Dessa forma, convém utilizar a equação proposta por Devine (1962) por ser de mais fácil manipulação, bem como ser mais difundida nos trabalhos acadêmicos.

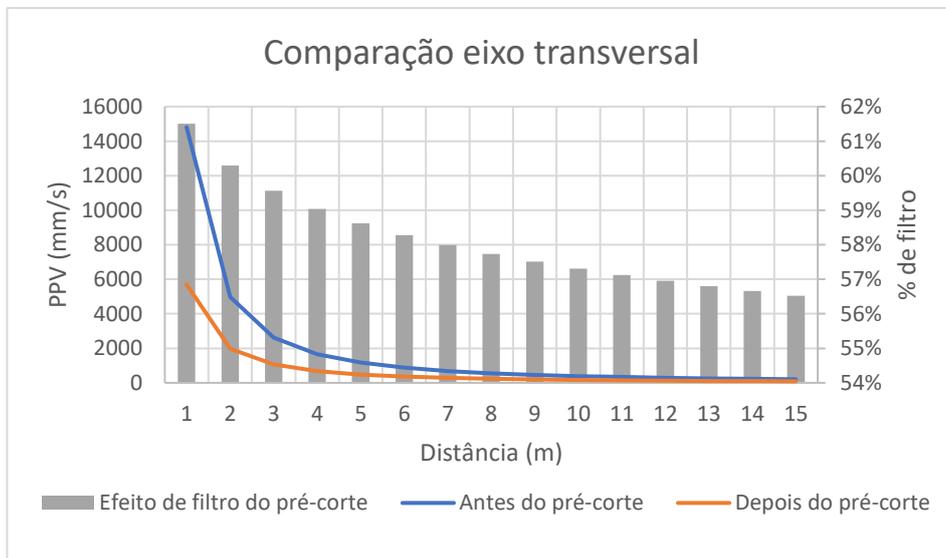
Com isso, para se estimar quanto o pré-corte consegue filtrar a onda de choque se considerou a carga máxima por espera típica de 95Kg de emulsão bombeada para furos de produção com diâmetros de 114mm e distâncias progressivas em um metro. Assim, utilizou-se essas informações nos modelos preditivos gerados antes e depois do pré-corte a partir das informações captadas nos geofones de sacrifícios. E, em seguida, comparou-se os resultados nessas duas condições para conseguir ponderar a capacidade de filtro desse desmante de acabamento. As Figuras 38, 39 e 40 expõe o efeito do pré-corte para cada eixo na vibração induzida ao mostrar a relação entre a Velocidade de Pico de Partícula (PPV) e a distância entre o furo e o ponto de monitoramento.

Figura 38-Comparação do efeito do pré-corte para curtas distâncias no eixo longitudinal.



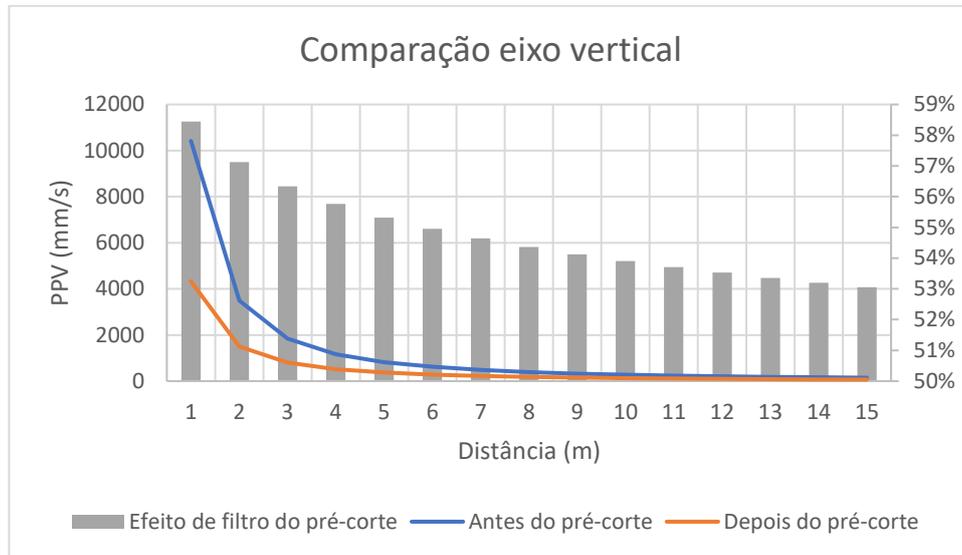
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 39-Comparação do efeito do pré-corte para curtas distâncias no eixo transversal.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 40-Comparação do efeito do pré-corte para curtas distâncias no eixo vertical.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com isso, é possível perceber que no eixo longitudinal a capacidade de filtro do pré-corte utilizado nesse estudo varia de 58% quando a carga explosiva dista um metro do ponto de monitoramento até 53% quando essa distância é de 15m, esse comportamento se repete no eixo vertical. Porém, no eixo longitudinal em números absolutos essa diferença a um metro de distância é 10455mm/s e a 15m de distância é 132mm/s, já no eixo vertical esses valores são 6089mm/s e 77mm/s. Já, para o eixo transversal nessas condições essa variação é entre 62% e 57% e em números absolutos é 9109mm/s e 117mm/s.

### 5.3 CAPACIDADE DE FILTRO DO PRÉ-CORTE PARA LONGAS DISTÂNCIAS

Para se analisar o efeito de filtro do pré-corte na atenuação da onda de choque em longas distâncias considerou-se apenas o modelo preditivo de Devine (1962) gerado pelas informações coletadas nos sismógrafos de superfície. Com isso, utilizou-se o mesmo padrão realizado na análise para curtas distâncias, foi considerada uma carga típica de 95kg de emulsão bombeada e distâncias progressivas de cinco metros iniciando em 100 metros e terminando em 395 metros. Essas informações foram adicionadas as equações geradas para a condição antes e depois do pré-corte e os resultados foram comparados para avaliar a capacidade de filtro dessa técnica de desmonte de acabamento. Logo, foi possível avaliar qual é a Velocidade de Pico da Partícula (PPV) correspondente a cada distância de monitoramento com e sem o efeito do pré-corte e, conseqüentemente, estimar o efeito de filtro dessa linha de arremate. Nesse sentido, as Figuras 41, 42 e 43 apresentam gráficos que expõem essas observações para cada um dos três eixos.

Figura 41- Comparação do efeito do pré-corte para longas distâncias no eixo longitudinal.

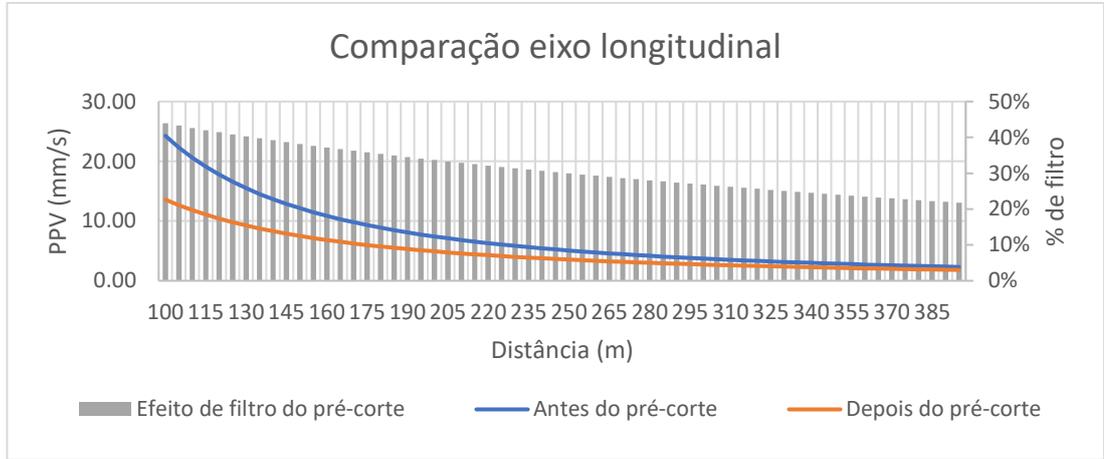


Figura 42- Compara o do efeito do pré-corte para longas distâncias no eixo transversal.

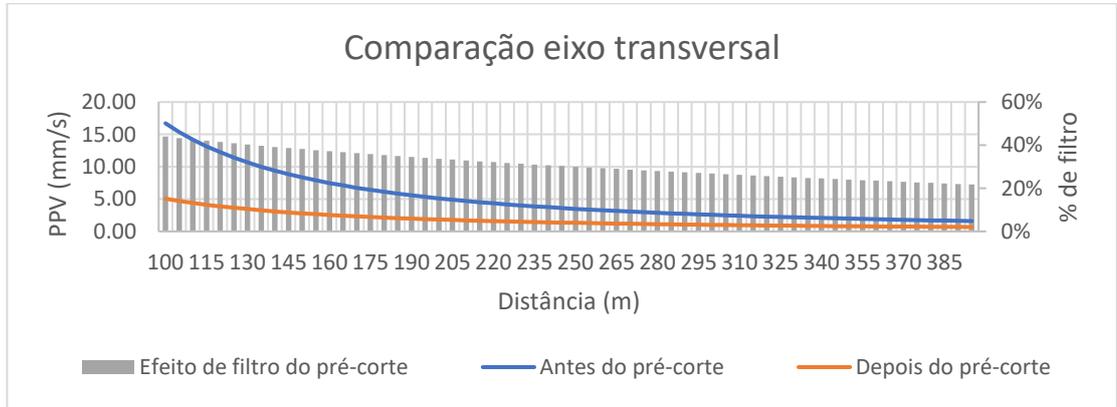
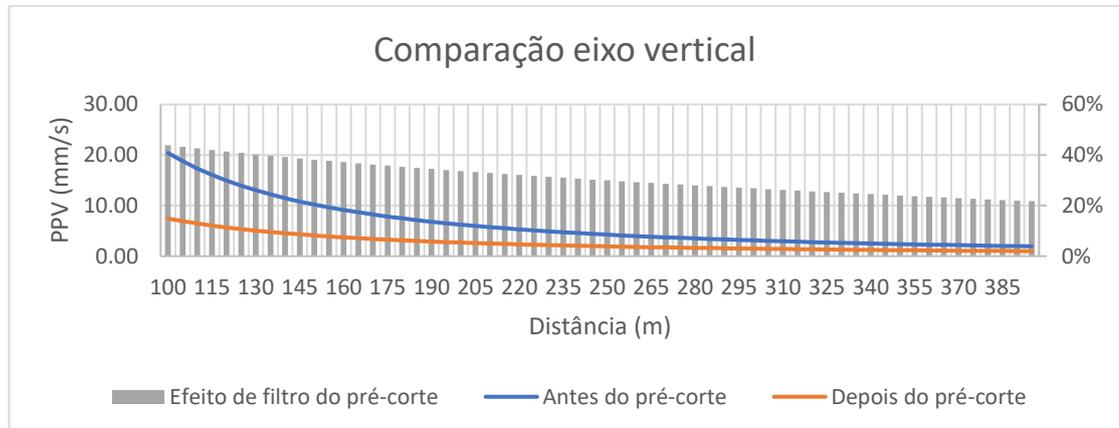


Figura 43- Comparação do efeito do pré-corte para longas distâncias no eixo vertical.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A partir da observação desses gráficos, é possível verificar que a estimativa de filtro do pré-corte utilizado nesse ensaio para os eixos longitudinal, transversal e vertical possuem um comportamento semelhante. Isso ocorre, pois, os três eixos possuem uma capacidade de filtro máxima de aproximadamente 44% da onda de choque quando a distância é de 100 metros entre a fonte geradora e o ponto de medição e gira em torno de 22% quando essa distância é de 395 metros. Entretanto, quando avaliamos em números absolutos temos que a 100 metros de distância essa redução da vibração nos eixos longitudinal, transversal e vertical é, respectivamente, 18mm/s, 10mm/s e 6mm/s. Já, quando a distância é de 365 metros essa diferença é de 0.3mm/s, 0.6mm/s e -0.1mm/s.

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como principal objetivo propor uma metodologia para a medição da capacidade do filtro do pré-corte para curtas e longas distâncias. A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento dessa metodologia foi possível verificar a sua aplicabilidade. Com isso, teve-se a oportunidade de avaliar a capacidade de filtro de um plano de fogo de pré-corte específico utilizada na mina na qual o estudo foi realizado.

Dessa forma, a partir dos resultados apresentados nessa dissertação é possível concluir que o pré-corte apresentado consegue reduzir a vibração induzida tanto para curtas como longas distância. Ao analisarmos as três componentes (longitudinal, transversal e vertical) da onda de choque a uma distância de 365m entre a carga explosiva e o ponto de monitoramento é possível perceber que as três componentes têm um comportamento semelhante, potencial de filtro de 22%, sendo uma redução em número absoluto para o eixo longitudinal de 0.3mm/s, o eixo transversal de 0.6mm/s e do eixo vertical de -0.1mm/s.

Quando essa análise é feita a uma distância de um metro esse potencial foi menor nos eixos longitudinal e vertical com 58%, sendo uma redução absoluta de 10455mm/s e 6089mm/s. Já, para essa mesma distância na componente transversal há 62% de capacidade de filtro do pré-corte analisado, com número absoluto de redução de 9109mm/s. Além disso, com os números apresentados podemos concluir que a capacidade de filtro desse pré-corte é maior nas proximidades da carga explosiva.

Portanto, com os números apresentados podemos concluir que a capacidade de filtro desse pré-corte é maior nas proximidades da carga explosiva e que com o aumento da distância os resultados da vibração induzida tendem a se igualar mesmo com a realização do pré fissuramento. Como continuidade desse desenvolvimento técnico é sugerido a realização de uma medição em um desmonte representativo, bem como a realização de estudos comparativos com outros perfis de pré-corte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AADNOY, B.; LOOYEH, R. *Mecânica de rochas aplicada: perfuração e projetos de poços*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas: Procedimento*. NBR 9653. Rio de Janeiro, 2018.
- CINTEX. *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Maio 2006.
- CONTRERAS, Willy José Pérez. *Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones: Mina Ares*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Universidade Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru, 2009.
- CUNNINGHAM, C. V. B. *The effect of timing precision on control of blasting effects*. In: HOLMBERG, A. (ed.). *Proceedings of Explosives and Blasting Technique*. Rotterdam: Balkema, 2000. p. 123-127.
- DATATRAP. *MREL Blasting Instrumentation*. Kingston, Canadá, 2024. Disponível em: [https://mrel.com/blasting\\_instrumentation/datatrap.html](https://mrel.com/blasting_instrumentation/datatrap.html). Acesso em: 18 ago. 2024.
- MACIEL, Maria Clara Barbosa de Oliveira; FREIRE, José Avelino. *Explosivos e acessórios de iniciação utilizados no desmonte de rochas*. 2018.
- DINIS DA GAMA, C. *Ruídos e vibrações ligados à utilização dos explosivos*.
- DORNELLES, Felipe Tavares. *Controle e previsão de vibrações e ruídos gerados por desmonte de rochas com explosivos*. Projeto apresentado à disciplina de Projeto Integrado de Mineração II, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, RS, 2013.
- EDWIN, Jesús et al. *Modelamiento de vibraciones por campo cercano para mitigar los impactos en el talud mediante el método de cross hole*. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Peru, 2021.
- GOMES, Lucas R. *Influência do acoplamento de geofone nos parâmetros de vibração*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 34, n. 8, p. 1165-1186, 1977.

- HOPLER, R. B. *ISEE Blaster's Handbook*. 17. ed. Cleveland, Ohio: International Society of Explosives Engineers, 1998. 742 p.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics. *Suggested methods of determining the point load strength index*. ISRM Committee on Laboratory Tests. *International Journal of Rock Mechanics*, 1985.
- JIMENO, C. L. & LOPEZ, E. J. *Manual de Perforación y Voladuras de Rocas*. Madrid: Geomining Technological Institute of Spain, 1994.
- KONYA, C. J. *Blast Design*. Montville: International Development Corporation, 1995.
- KOPPE, J.C. et al. *CETEM – Manual de Agregados para a Construção Civil*. 2009.
- Lopes, Gustavo S. et al, 2021, *Correlating blast vibrations and geomechanical properties to determine damage profiles and improve wall conditions in open pit mining*. Annals of the Brazilian Academy of Sciences.
- MCKENZIE, C. K. *Limits Blast Design: Controlling Vibration, Gas Pressure & Fragmentation*. Blastechnology. Queensland, Australia.
- McKENZIE, C. K.; HOLLEY, K. G. A study of damage profiles behind blasts. *International Society of Explosives Engineers*, v. 2, 2004.
- McKenzie, C. K.; Scherpenisse, C. R.; Arriagada, J.; Jones, J. Application of computer-assisted modelling to final wall blast design. *Proceedings of the AusIMM Explo '95 Conference*, Brisbane, 4-7 set. 1995. p. 285-292.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Editora PINI, 1994.
- MICROMATE INSTANTEL. *VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações*. Belo Horizonte, 2024. Disponível em: <https://www.vmasismo.com.br/sismografo-instantel-micromate>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- MUNARETTI, Henrique. *Avaliação da utilização de ANFO fabricado in situ em pedreira de calcário*. 1997. [dissertação] – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- ONDA MECÂNICA. UOL, Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/ondas-mecanicas.htm>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- PANGUE, Vergara. *Manual de voladura de Enaex*. Disponível em: <https://es.slideshare.net/AlfredoPangue/manual-de-tronadura-enaex>. Acesso em: 29 ago. 2024.

- PEREIRA, R. C.; SANTOS, M. B. G. *Gerenciamento de riscos nas atividades de desmonte de rochas com explosivos*. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa/PB, 2016.
- PERSSON, A. Roger H.; JAIMIN, L. *Rock blasting and explosives engineering*. São Paulo, 1996. p. 55.
- QUISE, Wilber Ancca. *Modelamiento del parámetro velocidad pico partícula, a partir del monitoreo de vibraciones por voladura para la reducción del daño al macizo rocoso, usando registros sísmicos – Mina Untuca*. 2017. Tese de graduação, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Peru.
- RICARDO, H. de S. et al. *Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rocha*. São Paulo: Ed. Pini, 1990. p. 176.
- RORKE, A. J. *An evaluation of precise short delay periods on fragmentation in blasting*. Viena: European Federation of Explosive Engineers, 2007.
- SCIENCELEARN. *Seismic Wave*. Internet. Disponível em: <http://sciencelearn.org.nz/>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- SHERIFF, R. E. *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. 4. ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2002
- SILVA, V. *Desmonte de rochas*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2019. 352 p. ISBN 85-797-5336-8.
- SILVEIRA, Leandro Geraldo Canaan. *Controle de vibrações e pressão acústica no desmonte de rochas com explosivos: estudo de caso em uma mina do Quadrilátero Ferrífero*. 2017. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- VELASQUEZ, Luiz F. *Prediction of blast-induced ground vibrations: a comparison between empirical and artificial-neural-network approaches*. Theses and Dissertations - Mining Engineering. University of Kentucky, 2023.