



# **CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS**

*Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016  
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL*

AUÃ KIAHLA PALMARES ARAÚJO OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE KRIGAGEM NO MODELO DE PREVISÃO DE VIBRAÇÕES  
GERADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS

Palmas - TO

2017

Auã Kiahla Palmares Araújo Oliveira

APLICAÇÃO DE KRIGAGEM NO MODELO DE PREVISÃO DE VIBRAÇÕES  
GERADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS

Projeto apresentado como requisito parcial da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCCI) do curso de Engenharia de Minas,

Orientador: Prof. Mestre Rodrigo Meireles Mattos Rodrigues.

Coorientador: Prof. Mestre Vinicius Gouveia de Miranda.

Palmas – TO

2017

Auã Kiahla Palmares Araújo Oliveira

APLICAÇÃO DE KRIGAGEM NO MODELO DE PREVISÃO DE VIBRAÇÕES  
GERADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS

Projeto apresentado como requisito parcial da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCCI) do curso de Engenharia de Minas,

Orientador: Prof. Mestre Rodrigo Meireles Mattos Rodrigues.

Coorientador: Prof. Mestre Vinicius Gouveia de Miranda.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. M.e Rodrigo Meireles Mattos Rodrigues  
Orientador  
Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

---

Abreviação de Professor. Abreviação da Titulação. Nome do Avaliador  
Interno  
Nome da Instituição onde trabalha

---

Abreviação de Professor. Abreviação da Titulação. Nome do Avaliador  
Externo  
Nome da Instituição onde trabalha

Palmas – TO

2017

*“Lembre-se da sabedoria da água:  
Ela nunca discute com o obstáculo,  
simplesmente o contorna”.*

(Augusto Cury)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me dá forças todos os dias e me mostrar o caminho da sabedoria, o qual estou seguindo.

A minha mãe Lusilene Alves Araújo e ao meu pai Paulo de Oliveira Santos, por acreditarem na minha educação maternal e por apoiarem os meus sonhos.

A todos meus familiares que torceram por mim, em especial ao meu irmão Pedro Timothéo.

A minha namorada por sempre estar presente no incentivo e na conquista dos meus sonhos.

Aos meus amigos de fé que conquistei ao longo desses anos de faculdade, por me aturarem e sempre estenderam suas mãos em momentos difíceis, em especial a Adriana Raniely, Bruno Henrique, Carlos Henrique, Erick Torres, Fernanda Almeida, Fellype Menezes, Jair Kleinubing, João Pedro, Letycia Duarte, Matheus Mota, Marcos Almeida, Louhane Milhomem, Lindaiane Mota, Pedro Neto, Thalyson Magalhães, Vitor Hugo, e Waltudes Fernando.

Ao meu orientador e companheiro Rodrigo Meireles, pelos ensinamentos sobre geologia e vida.

Ao meu coorientador e parceiro Vinicius Miranda, pela paciência, tempo e dedicação.

Ao corpo docente de engenharia de minas do CEULP/UiBra, muito obrigado pela orientação e companheirismo dentro e fora do ambiente acadêmico.

A todos que contribuíram de alguma forma direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

OLIVEIRA, Auã Kiahla Palmares Araújo. **APLICAÇÃO DE KRIGAGEM NO MODELO DE PREVISÃO DE VIBRAÇÕES GERADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS: UM CONCEITO GEOESTATÍSTICO**. 2017. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas/TO, 2017.

No pressuposto trabalho busca-se analisar a eficiência da aplicação dos métodos geoestatísticos dedicado a previsão de vibrações geradas pelo desmonte de rocha utilizando explosivos. O objetivo é construir modelos matemáticos através de dados levantados em campo de pequena escala, onde irá se verificar se o método da krigagem ordinária é ou não mais eficiente que o método da regressão proposto por Dowding em 1985; comparar bibliograficamente as variáveis que serão utilizadas nos métodos de regressão e krigagem ordinária para a previsão de vibrações. Todo o estudo será desenvolvido através de revisões bibliográficas por meio de sites relacionados ao tema, artigos científicos, normas regulamentadoras e literaturas específica da área, com a intenção de se determinar a melhor proposta para a previsão de vibrações, utilizando a nova proposta geoestatística x regressão.

**Palavras-chave:** Vibrações. Desmonte de rocha. Krigagem ordinária.

## **ABSTRACT**

OLIVEIRA, Auã Kiahla Palmares Araújo. **APPLICATION OF KRIGAGEM IN THE MODEL OF FORECASTING VIBRATIONS GENERATED BY ROCK REMOVAL WITH EXPLOSIVES: A GEOSTATISTIC.** 2017. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas/TO, 2017.

In the assumption, this work seeks to analyze the efficiency of the application of geostatistical methods dedicated to the prediction of vibrations generated by the rock dismantling using explosives. The objective is to construct mathematical models through data collected in small-scale field, where it will be verified if the method of ordinary kriging is or not more efficient than the regression method proposed by Dowding in 1985; to compare bibliographically the variables that will be used in the methods of regression and ordinary kriging for the prediction of vibrations. The entire study will be developed through bibliographic reviews through sites related to the theme, scientific articles, regulatory norms and literature specific to the area, with the intention of determining the best proposal for the prediction of vibrations, using the new geostatistical proposal x regression.

**Keywords:** Vibrations. Rock blasting. Ordinary kriging.

## LISTA DE ILUTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos de um plano de fogo em bancada a céu aberto.....	15
Figura 2 – Zonas associadas a um furo de um desmonte.....	16
Figura 3 – Riscos de má sequenciação entre linhas.....	19
Figura 4 – Sistema de bancadas.....	20
Figura 5 – Afastamento em função do diâmetro do furo.....	23
Figura 6 – Estado de flexão de uma bancada com distintas relações H/A.....	24
Figura 7 – Espaçamento em função do afastamento.....	25
Figura 8 – Redução da subfuração com a inclinação dos furos.....	26
Figura 9 – Vantagens dos furos inclinados.....	27
Figura 10 – Exemplo de um MHS de uma onda, deslocamento em função do tempo.....	30
Figura 11 – Tipos de ondas mecânicas.....	31
Figura 12 – Comportamento da onda P.....	33
Figura 13 – Comportamento da onda S.....	34
Figura 14 – Comportamento da onda R.....	35
Figura 15 - Comportamento da onda L.....	36
Figura 16 – Componentes do movimento sísmico (T= Transversal, L= Longitudinal e V= Vertical).....	36
Figura 17 - Gráfico de distância em função do tempo, com base nas velocidades de propagação das ondas P, S, R e vibrações do ar nas camadas carboníferas da região de Hunter Valley, Austrália.....	38
Figura 18 – Dispositivos utilizados para a detecção de ondas áreas e terrestres.....	39
Figura 19 – Velocidade de pico da partícula em função da distância escalonada.....	41

Figura 20 - Gráfico log-log da velocidade de pico da partícula em função da distância escalonada.....	42
Figura 21 - Processo de regressão linear e translação dá reta para um nível de 95% de segurança.....	43
Figura 22 - Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.....	44
Figura 23 – Limite de velocidade de partícula (RI 8507:1980).....	45
Figura 24 – Exemplo de histograma.....	49
Figura 25 – Parâmetros de adequação para um modelo de variograma.....	51
Figura 26 – Modelos de variogramas com patamar: A) esférico, exponencial e gaussiano. B) cúbico, pentaesférico e efeito de furo, conforme disponível em Olea (1999, p. 76-79).....	53
Figura 27 – Modelo de variograma de potência (sem patamar).....	54
Figura 28 – Comportamento do variograma teórico e experimental.....	55
Figura 29 – fluxograma de um processo de estimativa geoestatística.....	57
Figura 30 – Representação esquemática da aquisição dos dados.....	60
Figura 31 - Exemplo da análise de resíduos através do software SPSS.....	62
Figura 32 - Esquema de simulação da carga de explosivo.....	68
Figura 33 - Níveis de ondas captadas através do aplicativo O-pitblast versão 1.4. ....	69
Figura 34 - Distribuição dos dados, PPV em função da distância escalonada....	70
Figura 35 - Gráfico de log(PPV) em função de log(DE).....	70
Figura 36 - Validação do modelo através da análise de resíduos – Regressão.....	72
Figura 37 - Semivariância em função da distância.....	73
Figura 38 – Semivariância em função da distância.....	74

Figura 39 - Variograma experimental definido a partir do conjunto de dados...	75
Figura 40 - Definição das características do variograma experimental.....	76
Figura 41 - Definição do variograma teórico.....	77
Figura 42 - Validação do modelo através da análise de resíduos – Krigagem Ordinária.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetro dos furos baseados na capacidade das caçambas.....	22
Tabela 2 – Comprimento da subfuração recomendada em termos do afastamento.....	26
Tabela 3 – Velocidade de propagação das ondas P e S.....	32
Tabela 4 – Limites de velocidade de partícula (RI 8507:1980).....	46
Tabela 5 – Modelos teóricos de ajuste de variogramas com patamar.....	52
Tabela 6 - Média dos PPVs em função da Distância Escalonada (SD).....	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características elétricas dos detonadores elétricos.....	18
Quadro 2 – Fatores que influenciam os níveis de vibração.....	29
Quadro 3 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência .....	45
Quadro 4 - Exemplo do Teste de Normalidade.....	63
Quadro 5 - Exemplo de quadro estatístico gerado pelo software SPSS.....	63
Quadro 6 - Resultados apresentados pelo SPSS.....	78

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 PROBLEMA EXISTENTE.....	16
1.2 HIPÓTESES.....	16
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>17</b>
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>1.4 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>18</b>
<b>2 REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
2.1 DESMONTE DE ROCHA A CÉU ABERTO COM EXPLOSIVOS.....	19
2.2 PLANO DE FOGO A CÉU ABERTO.....	19
2.3 EXPLOSIVOS.....	20
2.4 SISTEMA DE INICIAÇÃO DE DETONAÇÃO.....	21
<b>2.4.1 Detonadores Elétricos</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4.2 Detonadores não Elétricos</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.3 Detonadores Eletrônicos</b> .....	<b>24</b>
2.5 BANCADAS.....	25
2.6 DIÂMETRO DAS PERFURAÇÕES.....	26
2.7 AFASTAMENTO.....	27
2.8 ESPAÇAMENTO.....	29
2.9 SUBFURAÇÃO.....	30
2.10 TAMPÃO.....	32
2.11 VIBRAÇÃO GERADA POR DESMONTE DE ROCHA COM O USO DE EXPLOSIVOS.....	33
2.12 CARACTERIZAÇÃO DE UMA ONDA.....	34
2.13 TIPOS DE ONDAS.....	36
<b>2.13.1 Ondas Internas</b> .....	<b>37</b>
<b>2.13.2 Onda P</b> .....	<b>37</b>
<b>2.13.3 Onda S</b> .....	<b>38</b>
<b>2.13.5 Onda R</b> .....	<b>39</b>
<b>2.13.6 Onda L</b> .....	<b>40</b>
2.14 MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO.....	41
2.15 ESTIMATIVA DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO.....	45
2.16 LEI DE ATENUAÇÃO.....	45
2.17 NORMATIVAS PARA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS.....	48
<b>2.17.1 Norma Brasileira (NBR 9653)</b> .....	<b>49</b>
2.18 MÉTODOS ESTATÍSTICOS.....	51

2.18.1 Média Aritmética .....	52
2.18.2 Variância.....	52
2.18.3 Desvio Padrão .....	52
2.18.4 Coeficiente de Dispersão .....	53
2.18.5 Histograma .....	53
2.19 MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS .....	54
2.19.1 Variograma .....	55
2.19.2 Elaboração do Variograma.....	55
2.19.3 Variograma com Patamar .....	56
2.19.4 Variograma sem Patamar .....	58
2.19.5 Ajuste do Variograma .....	59
2.20 KRIGAGEM .....	60
2.20.1 Krigagem Ordinária.....	62
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>64</b>
3.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	64
3.2 TRATAMENTO DOS DADOS (Método tradicional de regressão) .....	65
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS (Krigagem Ordinária).....	66
3.4 ANÁLISE DOS MODELOS PREVISIONAIS.....	67
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>69</b>
4.1 LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA .....	69
4.2 TRATAMENTO DOS DADOS – METODO TRADICIONAL DE REGRESSÃO.....	70
4.3 TRATAMENTO DOS DADOS – KRIGAGEM ORDINÁRIA .....	73
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desmonte de rocha é um ramo da engenharia que envolve uma série de atividades sequenciadas, envolvendo atividades como perfuração e carregamento de explosivos. Considerando especificamente o desmonte, determinadas operações envolvem metodologias detalhadas e resultados com grande influência na dinâmica do planejamento efetivo do desmonte de rocha. Se observamos em detalhe, é possível analisar uma série de parâmetros que influenciam na eficiência do processo de fragmentação. Este processo de acordo com Hustrulid (1999) se inicia quando um explosivo é detonado em um furo, gerando um estado dinâmico de tensões seguida de uma violenta expansão gasosa, gerando toda uma classe de efeitos secundários não desejados, como a onda aérea e as vibrações terrestres.

As ondas aéreas e as vibrações terrestres representam o resultado de um processo de detonação que pode ser validado como eficiente ou ineficiente. Essa validação é baseada em uma lógica que segue dois tipos de análise: a de eficiência ambiental e a de eficiência técnica.

Considerando a eficiência ambiental, a análise é justificada por normas e regras jurídicas que definem os critérios de tolerância em relação a execução dos serviços de desmonte de rocha. Esses critérios são determinados principalmente por observações empíricas e coleta de dados com instrumentos adequados.

Já em relação a eficiência técnica, os critérios de avaliação usam princípios que analisam os insumos e técnicas utilizados para a detonação e as características do produto final do desmonte.

Focando detalhadamente as técnicas utilizadas no desmonte, alguns parâmetros são empregados justamente para avaliar a capacidade e a eficiência das ondas mecânicas de vibração como fator de efetividade na fragmentação das rochas.

No caso deste trabalho, a intenção é de avaliar a captação da dispersão das ondas mecânicas com instrumentos, de modo a deduzir por meio da aplicação de métodos geoestatísticos se uma possível configuração dessa dispersão pode indicar maior ou menor eficiência no desmonte de rochas utilizando-se explosivos.

### 1.1 PROBLEMA EXISTENTE

É possível se aplicar krigagem ordinária ao estudo de previsão de vibrações geradas por desmonte de rocha fornecendo melhores resultados no qual foi proposto por Dowding (método de regressão)?

### 1.2 HIPÓTESES

H1: O uso da técnica geoestatística poderá prever de maneira mais fiel as vibrações terrestres geradas pelo desmonte de rochas.

H2: A krigagem é uma ferramenta bastante utilizada em grandes áreas da engenharia para interpolação espacial. Sua aplicação é precisa visto que, esse método faz suas estimações a partir das tendências (características) espaciais.

H3: O método geoestatístico dá uma maior minimização dos erros da estimação das vibrações geradas pelo desmonte de rocha através da aplicação de krigagem de ordinária, utilizando o uso total da disposição dos dados.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Encontrar o melhor método para a estimação da previsão de vibrações geradas por desmonte de rochas utilizando explosivos. Aplicando-se os métodos de regressão x krigagem ordinária.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Captar ondas geradas pelo impacto do disco no solo através do aplicativo O-pitblast versão 1.4 para se iniciar o tratamento dos dados.
- Construir e analisar modelos matemáticos para a previsão de desmonte de rocha que possa ter um comportamento mais próximo da realidade que incorpore as variáveis regionalizadas do campo geométrico a ser estudado.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA**

Através de levantamentos sismográficos, pode-se estimar a velocidade que as ondas irão se propagar no meio através do método da lei de atenuação. No entanto, existem outras metodologias que podem ser empregadas para esse tipo de avaliação, como no caso o uso da krigagem ordinária que provém dos métodos geoestatísticos. A aplicação da krigagem para o estudo da previsão de vibrações é bastante restrita de bibliografia e em virtude disso a proposta deste trabalho é apontar o método mais eficaz para este tipo de análise, que será através da construção de modelos matemáticos, onde serão comparados o método tradicional (regressão) e o método geoestatístico.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 DESMONTE DE ROCHA A CÉU ABERTO COM EXPLOSIVOS

Hustrulid (1999) declara que o desmonte de rocha é uma ciência aplicada em duas grandes áreas, as operações mineiras e as obras geotécnicas. Sua principal função é fragmentar e deslocar o material fragmentado, gerando um volume escavado remanente, com o mínimo ou nenhum distúrbio ao meio ambiental. O processo de fragmentação se inicia quando um explosivo é detonado em um furo, gerando um estado dinâmico de tensões seguida de uma violenta expansão gasosa, suficiente para fragmentar e mover a rocha, gerando toda uma classe de efeitos secundários não desejados, como a onda aérea e as vibrações terrestres.

### 2.2 PLANO DE FOGO A CÉU ABERTO

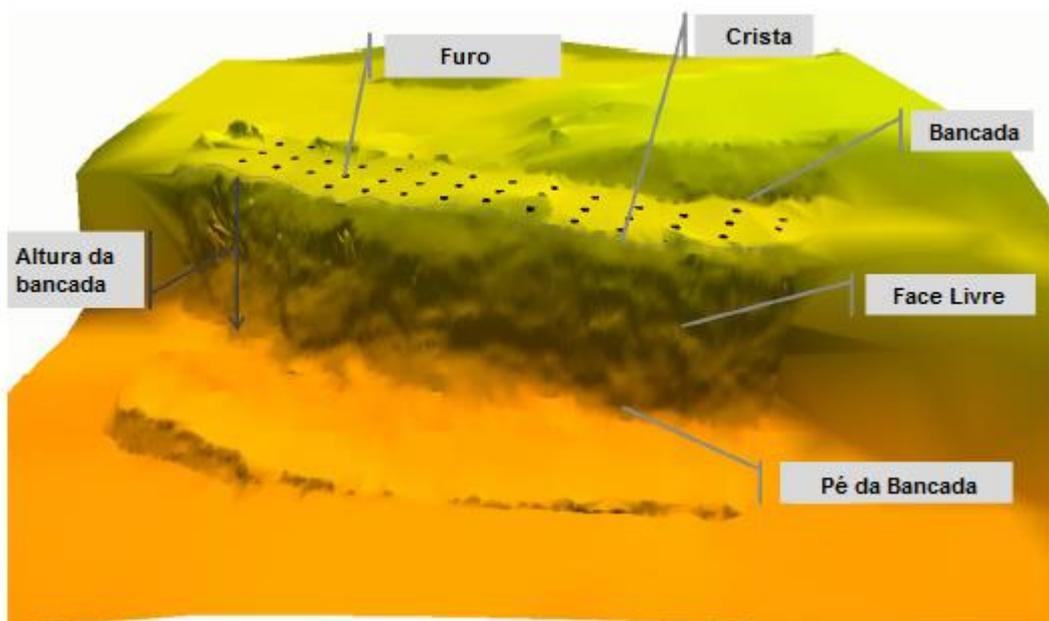
De acordo com Bhandari (1997), considera-se que os desmontes eficientes resultam da escolha correta do dimensionamento do plano de fogo, do uso correto dos explosivos, dos critérios específicos de fragmentação e de controles ambientais na área detonada. O quesito indispensável para qualquer desmonte é que ele seja fácil de se ajustar e que seja capaz de melhorar os resultados operacionais de um determinado projeto.

No cálculo e dimensionamento de desmonte de rochas, as variáveis controláveis são classificadas nos seguintes grupos (JIMENO et al, 2003):

- a) Geométricas  
*(Diâmetro, comprimento de carga, rocha, espaçamento, etc)*
- b) Físico-química do explosivo  
*(Tipo de explosivo, potência, energia, sistema de escorvamento, etc)*
- c) Temporização  
*(Tempo de retardo e sequência de iniciação)*

A figura abaixo irá representar de forma esquemática um plano de fogo e os termos técnicos utilizados que serão discorridos ao longo deste trabalho:

Figura 1: Elementos do plano de fogo em bancada a céu aberto.



Fonte: Adaptado de GOMES (2016).

### 2.3 EXPLOSIVOS

Darling (2011) define os explosivos como um composto ou conjunto de compostos que podem agir a partir de impactos, calor, fricção ou choque, e que quando iniciados, acabam liberando uma grande quantidade de energia sob a forma de choque, gás e calor.

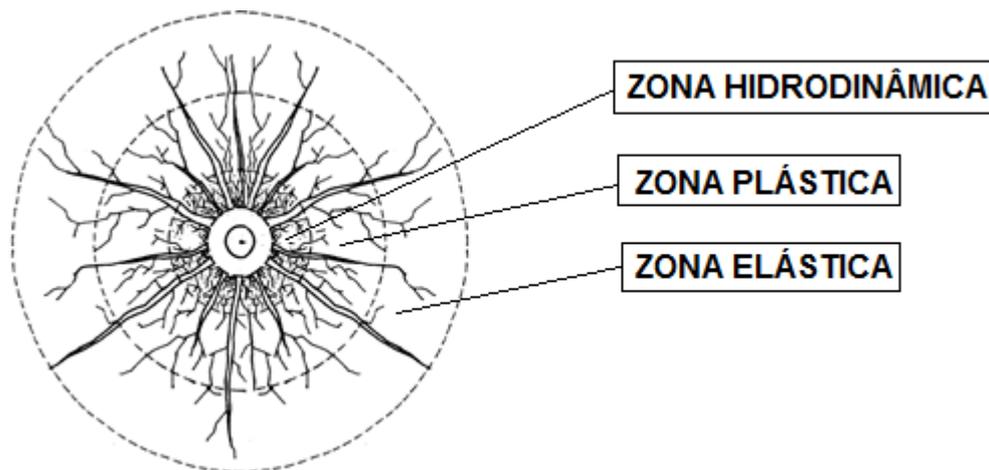
Podemos afirmar em total acordo com a Unión Española de Explosivos (1999), que quando um explosivo está confinado em um furo e inicia o seu processo de detonação, surgem dois efeitos distintos que favorecem a geração de fissuras e fragmentação do maciço rochoso. O primeiro é o resultado da onda de choque, que se espalha através do maciço rochoso a uma velocidade entre 3000 a 5000 m/s dependendo do tipo de rocha. A segunda é a consequência da produção de gases, que entram pelas fissuras formadas na primeira etapa empurrando a rocha.

Em torno de um furo em processo de detonação, é possível identificar três zonas fundamentais (GOMES, 2016):

a) Zona hidrodinâmica: é a zona onde a pressão dos gases é superior à resistência à compressão do maciço, provocando a pulverização da rocha;

- b) Zona plástica: é a zona onde a pressão dos gases excede o limite elástico do maciço, provocando deformações plásticas. Geram-se também fendas radiais muito intensas promovidas pelas tensões de tração tangenciais;
- c) Zona elástica: é a zona onde as tensões provocadas pela detonação não ultrapassam o limite elástico da rocha. A dissipação de energia é baixa, desencadeando a propagação de vibrações no maciço a grandes distâncias.

Figura 2: Zonas associadas a um furo de um desmonte.



Fonte: Adaptado de COUCEIRO (2013).

Gomes (2016) discorre que os acontecimentos que ocorrem na zona hidrodinâmica, plástica e elástica, resultam em impactos ao meio ambiente e a segurança da área a ser desmontada. Os riscos citados pelo autor é o ultra lançamento, onda área e vibrações, produção de gases e poeiras, e a possível instabilidade do maciço rochoso.

#### 2.4 SISTEMA DE INICIAÇÃO DE DETONAÇÃO

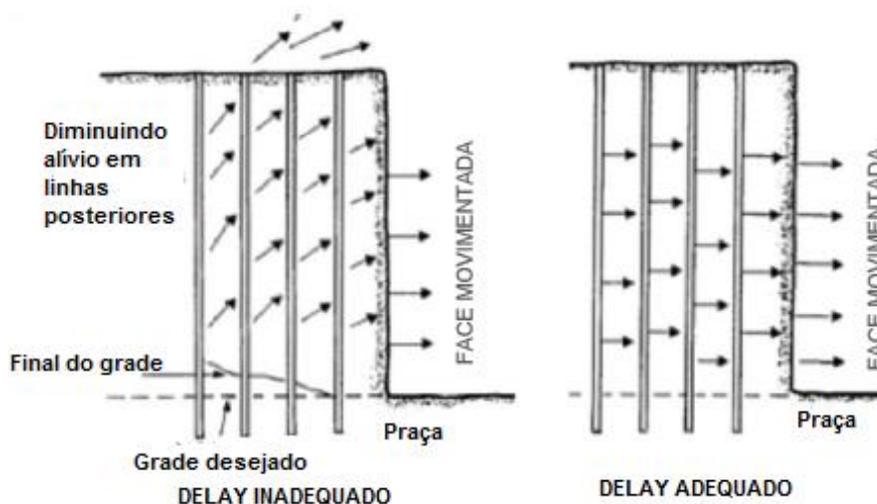
A sequência de detonação dos diversos furos que constituem o plano de fogo afigura-se de maneira importante para o controle das vibrações, definindo a direção da projeção do material e conseqüentemente a forma da pilha do desmonte. Assim, o objetivo da sequência é que as vibrações originadas com o plano de fogo não excedam o limite pré-estabelecido por lei no espaço envolvente e que a pilha de desmonte fique disposta no local pretendido tomando

a forma adequada para que os equipamentos de carga e transporte possam realizar os seus ciclos de atividade de forma otimizada (REIS, 2016).

Bhandari (1997) menciona que se o intervalo de detonação entre os furos de uma mesma linha for maior que 8 milissegundos, as vibrações formadas não iram se acumular, desta maneira facilitara a previsão das vibrações obtidas, pois o furo com maior quantidade de explosivos e que irá gerar a maior vibração no local do desmonte.

Andrews (apud BHANDARI, 1997, p.184) menciona que o intervalo de tempo entre duas linhas deverá ser de duas a três vezes superior ao intervalo de tempo das detonações entre furos. Caso contrário poderá ocorrer o risco de ultra lançamentos. A figura 3 demonstra tal resultado:

Figura 3: Riscos de má sequenciação entre linhas.



Fonte: Adaptado de BHANDARI (1997).

#### 2.4.1 Detonadores Elétricos

São dispositivos que originam a detonação a partir de uma corrente elétrica conduzida através de detonadores conectados por fios elétricos. Esse tipo de detonador apresenta um exterior de cobre ou alumínio que leva consigo explosivos primários, secundários, dois fios metálicos, material para efeito de isolamento e um retardo, caso seja aplicável.

Do ponto de vista elétrico os detonadores são classificados de acordo com o impulso de ignição ou de energia por unidade de resistência elétrica que se

precisa para provocar a inflamação do detonador pirotécnico. Assim, os detonadores são chamados de sensíveis (S), insensíveis (I) e altamente insensíveis (AI) (JIMENO, 2003). As características elétricas dos detonadores são indicadas no Quadro 1.

Quadro 1: Características elétricas dos detonadores elétricos.

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS DETONADORES	TIPO DE DETONADOR		
	S	I	AI
RESISTÊNCIA DE PONTE ( $\Omega$ )	1,2-1,6	0,4-0,5	0,03-0,05
IMPULSO DE IGNIÇÃO (mWs/ $\Omega$ )	0,8-3	8-16	1.100-2.500
CORRENTE DE SEGURANÇA (A)	0,18	0,45	4
CORRENTE DE IGNIÇÃO EM SÉRIE (A)	1,2	2,5	25

Fonte: UNIÓN EXPLOSIVOS RIO TINTO, S.A. (1999).

Reis (2016) define os atributos da seguinte maneira:

- a) Resistência de Ponte: Resistência elétrica do material semicondutor;
- b) Impulso de Ignição: Pressão exercida pela ignição por unidade de resistência;
- c) Corrente de Segurança: Máxima intensidade de corrente que atravessa a ponte do detonador sem o detonar;
- d) Corrente de Ignição em Série: Intensidade mínima que ao conectar 5 detonadores, assegura a detonação dos mesmos.

A principal desvantagem desses detonadores são os agentes externos, radiofrequência ou descarga elétricas de relâmpagos. Em função de sua sensibilidade, pode ocorrer detonação indesejada dos fatores externos que foram citados. Vázquez (apud REIS, 2016, p.18) cita a distância segura para o uso de detonadores elétricos sensíveis.

#### 2.4.2 Detonadores não Elétricos

Segundo a Unión Española de Explosivos (1999), os sistemas de iniciação não elétricos são versáteis e fáceis de se manusear. A alma desse sistema, consiste da iniciação de uma onda de choque de baixa velocidade de

detonação de aproximadamente 2000 m/s conduzida a um tubo de plástico chamado tubo de transmissão.

Esta onda de choque não tem qualquer influência sobre a coluna de explosivo contido no furo de perfuração, permitindo iniciação no fundo da mesma, uma vez que a quantidade de matéria reativa nele contido é tão pequena que a superfície exterior do tubo permanece intacta durante a etapa da onda de detonação.

Diferente dos detonadores elétricos, este não ocorre risco de detonar por conta de radiofrequências ou fontes elétricas, onde acaba sendo uma vantagem da sua utilização. A desvantagem que ele apresenta é que não se consegue verificar se os furos estão corretamente conectados sem ser através de uma confirmação visual.

### **2.4.3 Detonadores Eletrônicos**

Devido à sua grande precisão, os detonadores eletrônicos representam um grande passo na melhoria dos planos de fogo, pois o mesmo ajuda a obter um maior controle nos processos de fragmentação, controle de vibrações e ultra lançamentos.

Os detonadores eletrônicos foram criados a partir da disponibilidade dos microeletrônicos no mercado. Bem como o sistema de iniciação elétrica, este sistema consiste de fios elétricos, porém o detonador de sistema eletrônico funciona em base de sinais digitais que se originam a partir de um aparelho de iniciação que está localizado a uma longa distância, ao contrário do sistema por corrente elétrica.

Esses detonadores de última geração apresentam uma segurança que não permite a detonação da próxima linha caso um ou mais furos não tenham iniciado ou iniciado de forma incorreta. Assim é esperável que esses tipos de detonadores tenham um melhor controle do desmonte, permitindo um melhor planejamento do plano de fogo.

## 2.5 BANCADAS

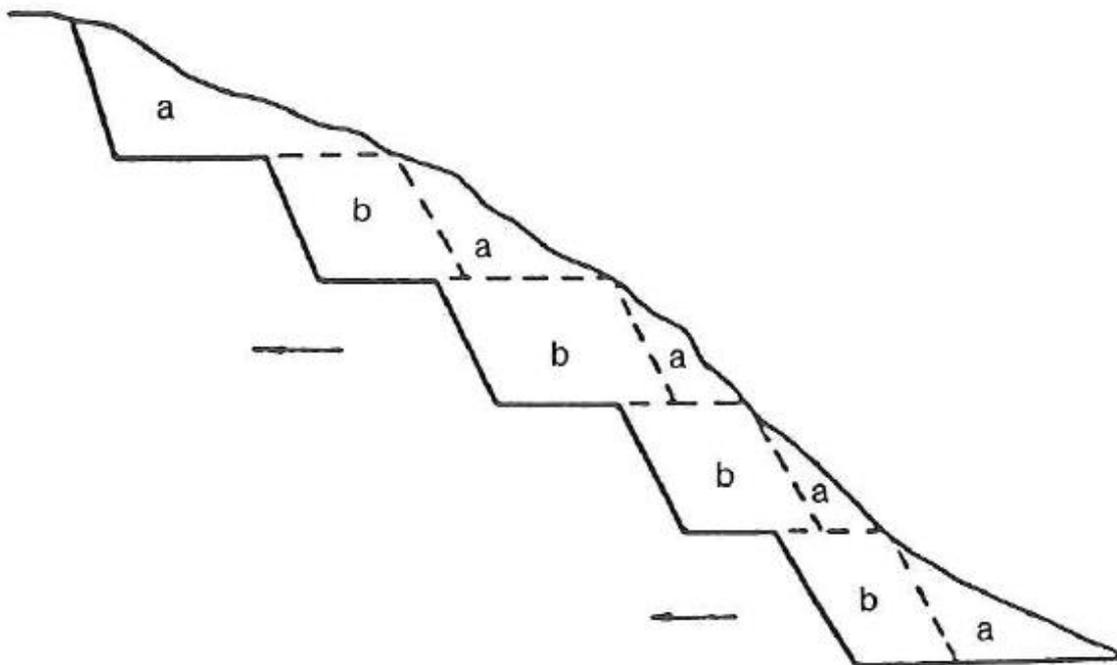
A forma mais simples e habitual para a execução de um desmorte e através do sistema de bancadas. Este sistema é usado geralmente na exploração de rochas industriais (pedreiras), minerações a céu aberto ou escavações em geral (UNIÓN ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS, 1999).

A bancada é composta por três diferentes superfícies:

- a) Face: Superfície vertical ou sub vertical deixada pelo desmorte de rocha.
- b) Berma de trabalho: Local onde se opera os equipamentos de carregamento e transporte.
- c) Berma superior: Área onde os equipamentos de perfuração operam.

Por meio desse sistema, a figura abaixo mostra a representação de um conjunto de bancadas.

Figura 4: Sistema de bancadas.



Fonte: UNIÓN ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS (1999).

Segundo Bhandari (1997), as alturas mais usuais em pedreiras ou minerações a céu aberto são de 15 a 20m, porém as de 10 a 18m são consideradas mais econômicas e menos perigosas de se trabalhar. Se a altura

da bancada for muito alta, aumentará o risco de gerar desvios na perfuração, ultra lançamentos, má fragmentação e vibrações excessivas.

A altura da bancada e a profundidade do furo é decidida com base na altura máxima de corte da caçamba, depois de ter devidamente em conta a subfuração necessária e a inclinação do furo (GORKHALE, 2010). A fórmula apresentada abaixo, foi proposta para fixar alturas de bancadas em minerações que utilizam a combinação de carregamento e transporte.

Sabendo que:

H = é a altura da bancada em metros

Cc = a capacidade da caçamba em metros cúbicos

$$H = 10 + 0,57(Cc - 6) \quad (\text{Equação 1})$$

Hustrulid (1999) defende que para o desmonte a céu aberto, o quociente entre a altura da bancada e o afastamento seja  $\geq 1$ , porém para o desmonte a céu aberto habitual o valor é  $\geq 1,6$ . No entanto, Jimeno et al (2003) definem que esse quociente seja  $\geq 3$ , pois o mesmo elimina a geração de matacos e repés.

## 2.6 DIÂMETRO DAS PERFURAÇÕES

Baseado nos comentários de Jimeno et al (2003) entre outros, podemos verificar que o diâmetro de perfuração irá depender de vários fatores: fragmentação desejada, tipo de explosivo, vibração permitida no terreno, produção horária, características da rocha, altura da bancada, etc. É importante ressaltar que o diâmetro e os equipamentos de carregamento, transporte e britador devem estar bem dimensionados para que não ocorra problemas de produção, inatividade e nem um grande número de equipamentos indesejados.

Nas práticas de lavra a céu aberto, a taxa de perfuração e a taxa de remoção da rocha detonada devem coincidir. Deste modo, o diâmetro dos furos está vagamente relacionado com a capacidade da caçamba, conforme a tabela a seguir (GORKHALE, 2010):

Tabela 1: Diâmetro dos furos baseados na capacidade das caçambas.

Capacidade da caçamba da pá em m <sup>3</sup>	Diâmetro do furo em mm
4.5	76–127
7.5	127–215
9.17	171–250
11.5	200–270
15.3	229–311
20	250–349
35	270–381
50	311–445

Fonte: Adaptado de GORKHALE (2010).

## 2.7 AFASTAMENTO

O afastamento é a unidade de medida em metros que representa a distância da boca do furo até a face livre efetiva e é o parâmetro mais crucial na geometria de um plano de fogo (BHANDARI, 2003; HUSTRULID, 1999; JIMENO et al, 2003).

Segundo Jimeno et al (2003), o cálculo de afastamento pode ser feito de diversas maneiras. Ao longo dos anos foram desenvolvidos vários estudos e os resultados obtidos através das combinações eram bem próximos. Esses estudos indicaram que o afastamento tem uma relação com o diâmetro do furo, pois o mesmo tem implicação direta na carga de explosivo de cada furo, indicando uma relação proporcional entre diâmetro - carga de explosivo – afastamento.

Se o afastamento for excessivamente grande, somente fissuras serão desenvolvidas no maciço rochoso. Não haverá separação, portanto, nenhuma fragmentação ocorrerá. A energia liberada pela detonação do explosivo é necessária para causar fortes vibrações mecânicas na massa rochosa. Em contraposição, se o afastamento for muito pequeno, os gases escapam para a superfície da bancada com a velocidade muito alta e os fragmentos da rocha perto da face serão lançados no ar violentamente causando problemas de ultra lançamento, que podem ser desastrosos ou fatais em muitos casos (GORKHALE, 2010).

Bhandari & Vutukuri (apud BHANDARI, 1973, p. 193) chegaram a seguinte fórmula através de uma análise de dados de detonações de 100 minas a céu aberto, tendo em mente que D é o diâmetro em milímetros e A é o afastamento em metros.

$$A = 0,024D + 0,85 \quad (\text{Equação 2})$$

Porém Konya (1985) alega que para se determinar os parâmetros do afastamento, devemos utilizar a densidade específica do explosivo e da rocha junto ao diâmetro do furo.

$$A = 0,012 * \left( \frac{2 \cdot \rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right) * D \quad (\text{Equação 3})$$

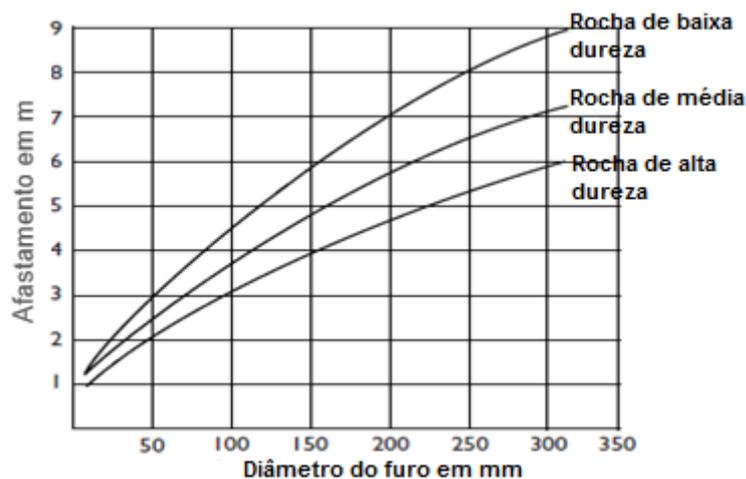
Sendo:

$\rho_e$  = Densidade específica do Explosivo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_r$  = Densidade específica da rocha ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Já GORKHALE (2010) demonstra através da figura 5 que o afastamento pode ser definido a partir de uma relação entre a dureza da rocha e o diâmetro do furo.

Figura 5: Afastamento em função do diâmetro do furo.



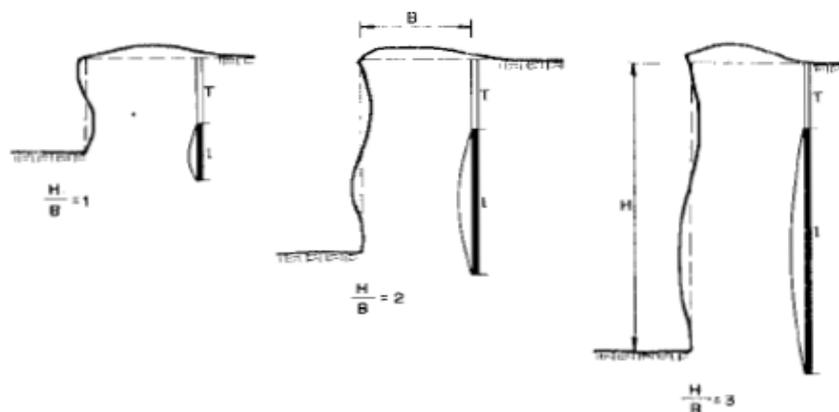
Fonte: Adaptado de GORKHALE (2010).

Ash (apud JIMENO et al, 2003, p. 205) determina que quando o quociente entre a altura da bancada e o afastamento for grande, o deslocamento e a deformação da rocha se tornaram fáceis. Tal relação elimina os problemas de fragmentação, sobreescavação, vibrações excessivas e repés, onde na figura 6 podemos observar algumas dessas afirmações.

A analogia ótima que ele determina é:

$$\frac{H}{A} \geq 3 \quad (\text{Equação 4})$$

Figura 6: Estados de flexão de uma bancada com distintas relações H/A.



Fonte: JIMENO et al (2003).

## 2.8 ESPAÇAMENTO

É a distância existente entre dois furos de uma mesma fileira. É importante lembrar que para os trabalhos de mineração, o espaçamento será maior que o afastamento, pois na grande maioria das operações se requer uma fragmentação pequena, entretanto, existem técnicas para gerar fragmentação grosseira para arrecifes e portos, neste caso se utiliza o espaçamento maior que o afastamento.

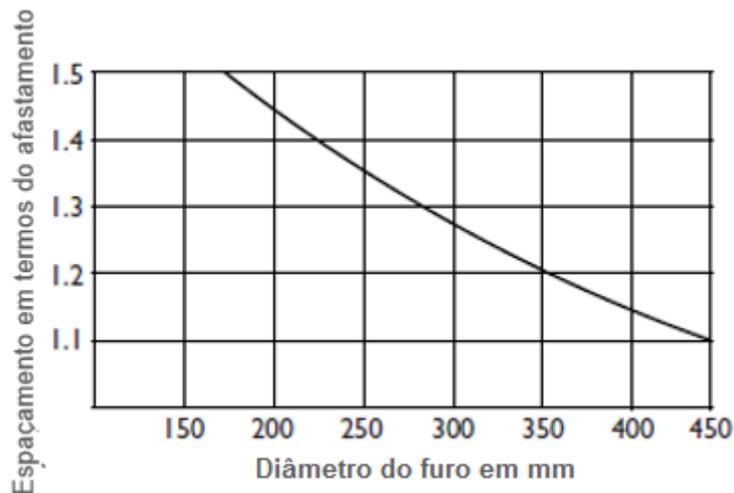
O espaçamento é calculado em função do afastamento, profundidade do furo, localização relativa da espoleta entre cargas adjacentes e também depende do intervalo de tempo de iniciação (BHANDARI, 1997).

Bhandari & Vutukuri (BHANDARI, 1973, p. 198) através de análises de desmontes de rocha de várias minas a céu aberto, encontraram uma relação entre o espaçamento e o afastamento, ela é denominada pela seguinte fórmula:

$$E = 0,9A + 0,91 \quad (\text{Equação 5})$$

No entanto Gorkhale (2010) cita que o espaçamento pode variar em 1,1A a 1,5A devido aos diferentes diâmetros que podem ser utilizados na perfuração; sendo que o valor de 1,1A é mais apropriado para furos de grande diâmetro enquanto 1,5A seria mais adequado para furos de menor diâmetro. O gráfico abaixo demonstra tal relação:

Figura 7: Espaçamento em função do afastamento.



Fonte: Adaptado de GORKHALE (2010).

Hustrulid (1999) e Bhandari (1997) mencionam que o espaçamento irá variar de acordo com o diâmetro e o afastamento, pois o afastamento leva em consideração as propriedades dos explosivos e o diâmetro do furo. Ambos estabeleceram uma comparação entre espaçamento e afastamento, onde o quociente deverá cumprir a seguinte premissa:

$$1 \leq \frac{E}{A} \leq 1,5 \quad (\text{Equação 6})$$

## 2.9 SUBFURAÇÃO

A subfuração é o comprimento abaixo do nível da bancada ou de um determinado *grade* a ser alcançado.

Segundo Jimeno et al (2003), se a subfuração for pequena, irá causar a aparição de repés e aumentará os custos com desmontes secundários. Porém, se a subfuração é excessiva poderá ocorrer:

- a) Aumento dos custos de perfuração e detonação.
- b) Aumento no nível de vibrações.
- c) Fragmentação excessiva na parte alta da bancada inferior, o que provocará problemas na perfuração do mesmo e afetará nas zonas finais de corte da estabilidade dos taludes.
- d) Aumento do risco de sobreescavação na componente vertical de movimento do material, gerando assim maiores crateras.

Gorkhale (2010) explana que o comprimento ideal da subfuração irá depender da resistência da rocha. A tabela 2 apresenta o comprimento da subfuração a ser usada de acordo com as diferentes resistências das rochas:

Tabela 2: Comprimento da subfuração recomendada em termos do afastamento.

CLASSIFICAÇÃO DE DUREZA DAS ROCHAS	SUBFURAÇÃO EM ROCHAS EM CONDIÇÕES INTACTAS	SUBFURAÇÃO EM ROCHAS EM CONDIÇÕES FRATURADAS
Rocha de baixa dureza	0,1A a 0,2A	0,07A a 0,15A
Rocha de média dureza	0,3A	0,25A
Rocha de alta dureza	0,4A a 0,5A	0,3A a 0,4A

Fonte: Adaptado de GORKHALE (2010).

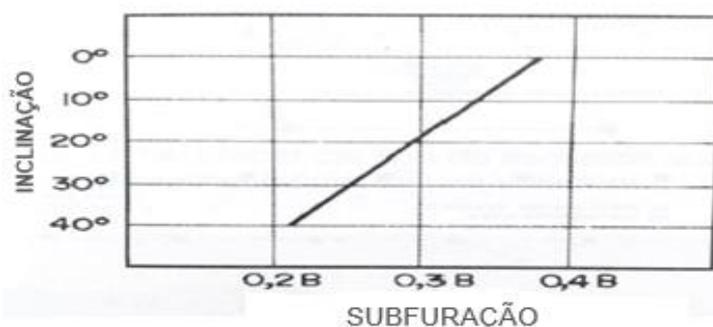
Podemos notar que em rochas que estão em condições intactas sem fraturas ou falhas, as subfurações variam de 0,1A a 0,5A conforme a dureza da rocha. Já em rochas mais fraturadas, a subfuração pode variar entre 0,07A e 0,4A.

Já Jimeno et al (2003) e Bhandari (1997) concordam que a subfuração deve ser regida da seguinte maneira, podendo haver exceções, como por exemplo, o caso de rochas estratificadas.

$$Sb = 0,3 + 0,5A \quad (\text{Equação 7})$$

Jimeno et al (2003) fizeram uma relação entre a inclinação do furo e a subfuração e chegaram à conclusão de quanto maior for a subfuração menor será o ângulo de inclinação do furo e vice-versa. A figura 7 representa a relação desses dois parâmetros.

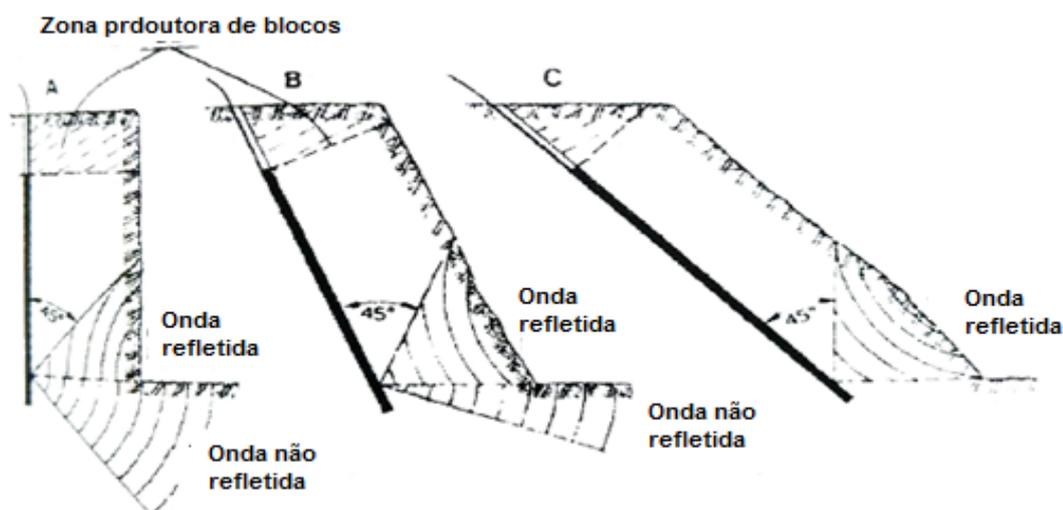
Figura 8: Redução da subfuração com a inclinação de furos.



Fonte: Adaptado de JIMENO et al (2003).

Conforme a figura 9, podemos notar a importância da inclinação do furo, pois o mesmo tem efeito direto com a onda de choque. Se aumentada a inclinação do furo, conseqüentemente a onda de choque na base do talude será maior, fazendo que isso se torne uma vantagem no processo de desmonte de rochas.

Figura 9: Vantagens dos furos inclinados.



Fonte: Adaptado de JIMENO et al (2003).

## 2.10 TAMPÃO

O tampão se localiza na parte superior da perfuração e não é carregado com explosivos, idealmente o espaço pode ser preenchido com material inerte com dimensões que se aproximam de 1/17 a 1/25 do tamanho do diâmetro, conforme Jimeno et al (2003). Sua principal função é confinar os gases que são gerados quando o desmonte inicia e também exercer fricção na parede do furo para causar uma força oposta a detonação, fazendo com que os gases se propaguem em meio as fraturas da rocha.

Bhandari (1997) preserva a seguinte fórmula para se determinar o intervalo do tamponamento, sendo "A" o afastamento:

$$0,7A < T < 1A \quad \text{(Equação 8)}$$

## 2.11 VIBRAÇÃO GERADA POR DESMONTE DE ROCHA COM O USO DE EXPLOSIVOS

Uma fração da energia liberada durante a detonação de uma carga explosiva se manifesta em forma de ondas de choque, que por sua vez se convertem em ondas sísmicas à medida em que estas se propagam radialmente através do maciço rochoso. Do ponto de visto mecânico, Halliday et al (2012) define que as vibrações formam um movimento oscilatório e são resultantes da perturbação de uma partícula que está em estado de equilíbrio estável. Konya (1985) por sua vez, afirma que as vibrações são ondas sísmicas que propagam energia através do terreno.

Sabemos que todo desmonte de rocha com o uso de explosivos, seja aplicado tanto no ramo da mineração como no das obras civis, irá causar uma série de efeitos negativos ao meio ambiente como a disseminação de partículas, propagação de gases na atmosfera, ultra lançamentos, poeiras e principalmente vibrações no terreno. O excesso de vibrações também pode causar danos estruturais. Em conformidade com Vazquez (1986), a onda de baixa frequência (0 a 10 Hz) é um agente externo extremamente perigoso para a geração de danos a estruturas civis próximas do desmonte.

Konya (1985) descreve que os níveis de vibração causados pelo desmonte de rocha com explosivos, podem ser ligados por diversos fatores. Ele afirma que se o desmonte for igual em todos os planejamentos, ele sempre apresentará resultados diferentes de si, pois cada desmonte se encontrara em diferentes situações no campo por conta da geologia local. O quadro 2 elenca todos os fatores que influenciam nos níveis de vibrações provocadas pelo desmonte de rocha.

Quadro 2: Fatores que influenciam os níveis de vibração.

Afastamento	Número de reforçadores
Espaçamento	Composição dos detonadores
Subfuração	Reforçadores
Profundidade do furo	Fatores geológicos
Altura do tampão	Números de furos por linhas
Material do Tampão	Tipo de iniciador
Presença de materiais inertes no furo para diminuir a razão de carga	Retardo entre linhas
Geometria da Carga	Retardos entre furos
Altura da coluna de explosivo	Precisão do iniciador
Tipo de rocha	Distância a estrutura ou ponto de medição
Propriedade físicas da rocha	Ângulo de inclinação do furo
Energia do explosivo	Energia realmente transmitida

Fonte: Adaptado de KONYA (1985).

## 2.12 CARACTERIZAÇÃO DE UMA ONDA

As ondas de choque provocadas pelo desmonte de rocha, são divididas em três categorias segundo Dowding (1985): Compressão, cisalhamento e superfície. Os deslocamentos dessas ondas são descritos a partir das três componentes perpendiculares do movimento, que é a componente longitudinal (L), vertical (V) e transversal (T). Esses três tipos de ondas citadas se subdividem em ondas internas e ondas de superfície.

Klen (2010) e Silva (2012) descrevem que as ondas mecânicas são tridimensionais, progressivas e se propagam de maneira esférica no meio. As mesmas, originam-se de um deslocamento de uma parte em um meio elástico em relação a sua posição de origem, com esse deslocamento acaba ocorrendo o movimento oscilatório. Devido as propriedades do meio elástico, quando as ondas se propagam, não ocorre transporte de massa, volume e nem mudança de sentido na propagação da onda, porém carregam consigo as energias potenciais e cinéticas.

As passagens de ondas sísmicas em um maciço rochoso produzem em cada ponto um movimento oscilatório chamado vibração. Segundo Sanchidrián e Muñiz (2000), uma das formas mais simplificadas de se analisar as vibrações é através do movimento harmônico simples (M.H.S). As equações básicas para deslocamento, velocidade, aceleração, frequência e período são:

$$x = A \cos(\omega t + \phi) \quad (\text{Equação 9})$$

$$v = -A\omega \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (\text{Equação 10})$$

$$a = -A\omega^2 \text{cos}(\omega t + \phi) \quad (\text{Equação 11})$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (\text{Equação 12})$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{T} \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo:

$x$ = O deslocamento da partícula;

$A$ = O deslocamento máximo da partícula em relação a sua posição de origem (m);

$v$ = E a velocidade no qual a partícula se desloca;

$a$ = Variação na velocidade da partícula;

$f$ = Número de oscilações em um certo período de tempo;

$\omega$ = Velocidade angular;

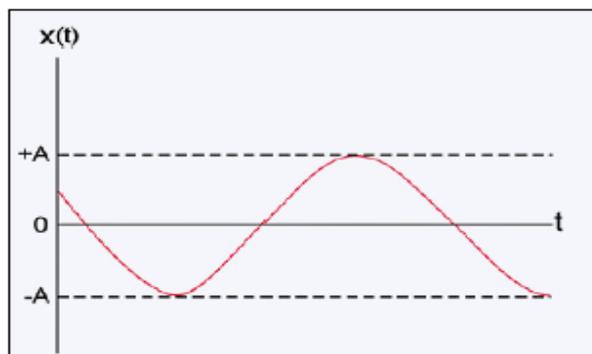
$\phi$ = Ângulo de fase;

$K$ = Constante de força do movimento harmônico simples;

$m$ = massa em meio da propagação de onda;

$T$ = período.

Figura 10: Exemplo de um MHS de uma onda, deslocamento em função do tempo.



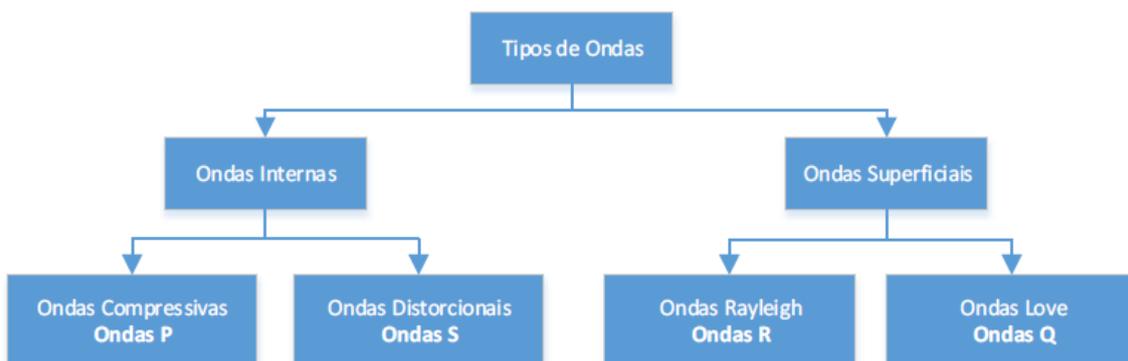
Fonte: e-física (2007).

Segundo Gomes (2016), as fórmulas apresentadas do MHS são inadequadas para se descrever o fenômeno vibratório provocado por desmonte de rocha com explosivos, pois este é composto por diferentes tipos de ondas com características diferentes entre si, o que gera uma maior complexidade de estudo do fenômeno.

### 2.13 TIPOS DE ONDAS

A partir do desmonte de rocha, várias vibrações dispersam-se no meio elástico do terreno, elas são compostas por ondas com diferentes características e são identificadas a partir do sismógrafo. Como já foi dito, cada onda possui seu perfil e a partir disso elas são classificadas da seguinte maneira:

Figura 11: Tipos de ondas mecânicas.



Fonte: GOMES (2016).

É importante ressaltar que as velocidades das ondas sísmicas no meio em que se propagam, irão depender do contexto geológico, pois grande parte das matérias do meio apresentam certa heterogeneidade e a partir disso geram alterações no modo de propagação das ondas nos locais que elas avançam. A tabela 3 demonstra as velocidades de propagação de acordo com o contexto litológico.

Tabela 3: Velocidade de propagação das ondas P e S.

	Velocidade da onda (m/s)	
	Compressiva (P)	Cisalhante (S)
<b>Calcário</b>	2000-5900	1000-3100
<b>Rochas Metamórficas</b>	2100-3500	1000-1700
<b>Basalto</b>	2300-4500	1100-2200
<b>Granito</b>	2400-5000	1200-2500
<b>Areia</b>	500-2000	250-850
<b>Argila</b>	400-1700	200-800

Fonte: Adaptado de DOWDING (1985).

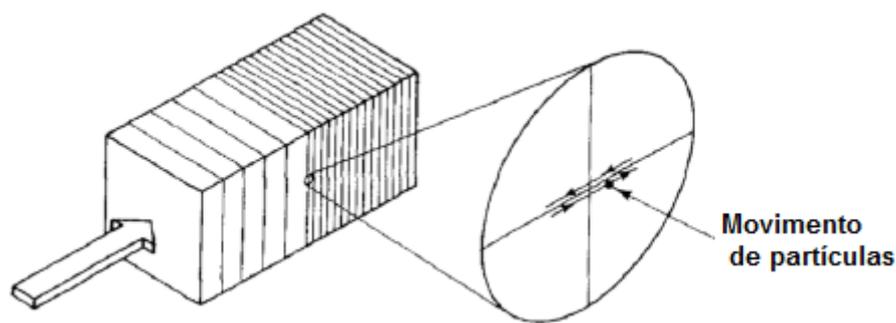
### 2.13.1 Ondas Internas

As ondas internas se subdividem em ondas primárias (P) ou longitudinais e transversais (S). São caracterizadas pelo seu movimento esférico no maciço rochoso e por induzirem um alto nível de energia libertado.

### 2.13.2 Onda P

É chamada de longitudinal pois o movimento da partícula acontece na mesma direção em que ela se desloca no meio. Também podem ser definidas como compressivas por causa da deformação de volume que acontece na rocha na mesma direção de propagação da onda, sem que ocorra a alteração do material. De acordo com Sanchidrian e Muñiz (2000), as ondas P podem chegar a uma velocidade de 1500 a 6000 m/s para grande parte das rochas, já para as rochas intemperizadas ou muito fraturadas a onda é bem menor, podendo variar entre 150 a 1300 m/s. Gomes (2016) menciona que esse tipo de onda é caracterizado por possuir baixas amplitudes e altas frequências.

Figura 12: Comportamento da onda P.



Fonte: Adaptado de DOWDING (1985).

A velocidade da onda P, de acordo com Sanchandrián e Muñiz (2000), pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$C_p = \left[ \frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)} \right]^{1/2} = \left[ \frac{\lambda+2G}{\rho} \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

$C_p$  = Velocidade da onda P;

$E$  = Módulo elástico;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson;

$\rho$  = Densidade;

$G$  e  $\lambda$  = São as constantes de Lamé.

### 2.13.3 Onda S

As ondas secundárias, também chamadas de ondas de cisalhamento ou transversais, são nomeadas assim pois geram de uma deformação perpendicular (transversal) que a rocha sofre na direção da propagação da onda, sem modificar o volume do maciço rochoso. Klen (2010) afirma que essas ondas podem chegar a 3500 m/s e se propagam apenas em meios sólidos, pois os materiais líquidos não sofrem os esforços de cisalhamento. Gomes (2016) diz que a velocidade de propagação desse tipo de onda está entre 60 a 70% das velocidades da onda P. Sendo assim, Sanchidrian e Muñiz (2000) determina a velocidade da onda S da seguinte maneira:

$$C_s = \left( \frac{G}{\rho} \right)^{1/2} = \left[ \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 15})$$

Sendo:

$C_s$ = Velocidade da onda S;

$E$ = Módulo elástico;

$\nu$ = Coeficiente de Poisson;

$\rho$  = Densidade;

$G$ = Constante de Lamé.

Figura 13: Comportamento da onda S.



Fonte: Adaptado de DOWDING (1985).

#### 2.13.4 Ondas Superficiais

Gomes (2016) determina que as ondas superficiais são caracterizadas por se propagarem nas falhas, contatos geológicos e na superfície do terreno, induzindo consigo vibrações bidimensionais. Possuem grande amplitude e duração, porém possuem baixa frequência. As ondas superficiais mais importantes são as ondas R (Rayleigh) e ondas Q (Love).

#### 2.13.5 Onda R

Dowding (1985) explana que a onda R é a mais complicada, pois ela reproduz um movimento tanto na direção paralela como na vertical a sua direção de propagação. Miller et al (apud JIMENO, 2003, p. 381) afirmam que as ondas Rayleigh transportam consigo 70 a 80% da energia total do desmonte. Klen (2010) considera que as ondas Rayleigh são as que possuem maior potencial de

danos a estruturas, pois provocam um efeito chamado ressonância que é devido a sua frequência ser muito próxima das frequências naturais das estruturas, que variam entre 4 e 20 Hz. Sua velocidade é de cerca 90% da onda S, podendo ser calculada pela equação 16 (SANCHINDRIÁN e MUÑIZ, 2000):

$$C_R \approx C_S = \left[ \frac{0,86 + 1,14\nu}{1 + \nu} \right] \quad (\text{Equação 16})$$

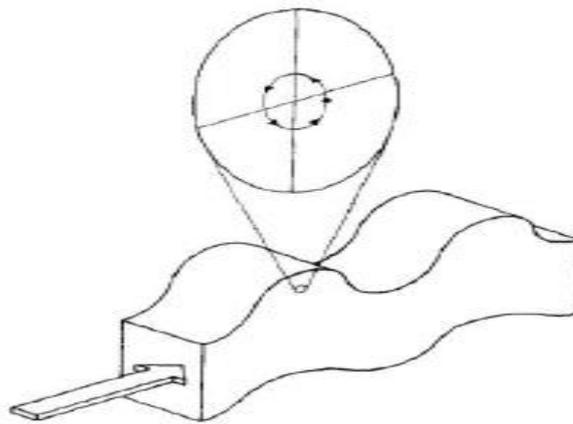
Onde:

$C_R$ = Velocidade da onda R;

$C_S$ =Velocidade da onda S;

$\nu$ = Coeficiente de Poisson.

Figura 14: Comportamento da onda R.

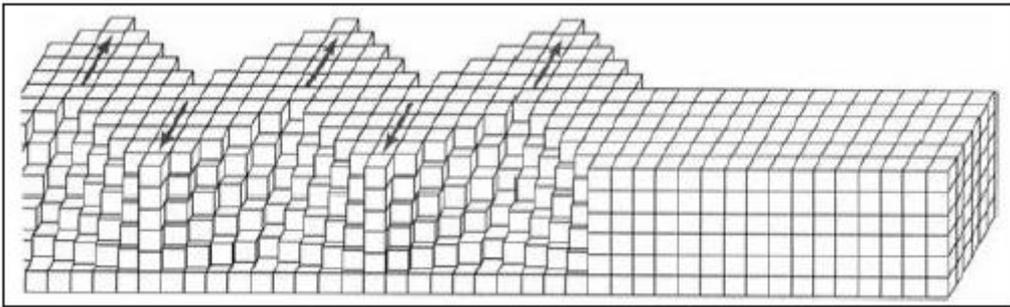


Fonte: DOWDING (1985).

### 2.13.6 Onda L

Silva (2012) alega que as ondas Love, também chamadas de ondas de torção, são caracterizadas devido as suas deformações momentâneas na superfície. Elas apresentam um movimento idêntico as ondas R, porém no eixo horizontal e com um movimento retrógrado elíptico sem a presença de nenhuma componente vertical desse movimento. Além disso, elas exibem uma velocidade superior à das ondas R.

Figura 15: Comportamento da onda L.

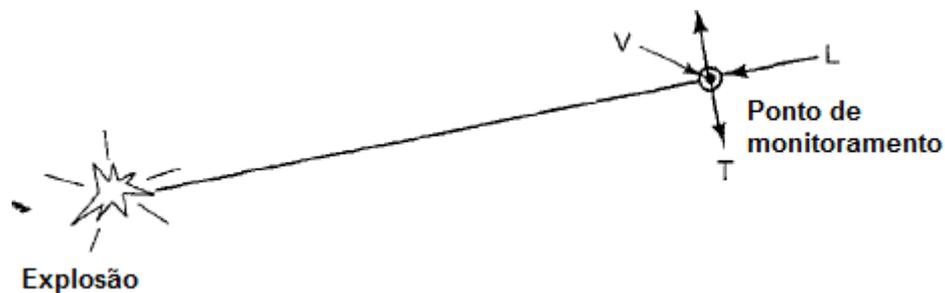


Fonte: W3 (2000).

## 2.14 MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO

Richards e Moore (2000) especificam que o dispositivo de avaliação sismográfica deve ser adequado para fornecer leituras da velocidade máxima instantânea das partículas, já que apresentam parâmetros identificáveis através da captação direta do(s) geofone(s). Dowding (1985) explana que os sismógrafos registram a passagem de três componentes ortogonais do movimento ondulatório (Transversal, longitudinal e vertical) em concordância com a ilustração a seguir, e nenhuma das três componentes domina o processo sempre.

Figura 16: Componentes do movimento sísmico (T=transversal, L=Longitudinal e V=Vertical).



Fonte: Adaptado de DOWDING (1985).

A componente de pico varia de acordo com cada desmonte e o valor máximo da velocidade de vibração de qualquer uma dessas três componentes

ortogonais aferidas durante um certo intervalo de tempo, passa a ter o nome de pico de componente de velocidade de vibração de partícula, denominado  $V_p$ . A velocidade de vibração máxima de partícula ou resultante da velocidade de vibração de partícula ( $VR$ ), é padronizado para a norma nacional de cada país, baseado na determinação dos limites de vibrações em determinada área.

Para se determinar a resultante máxima da velocidade de vibração da partícula, se utiliza a seguinte formula:

$$VR = \sqrt{VL^2 + VT^2 + VV^2} \quad (\text{Equação 16})$$

No qual:

$VR$  = Velocidade resultante de vibração de pico da partícula;

$VL$  = Velocidade longitudinal da vibração;

$VT$  = Velocidade transversal da vibração;

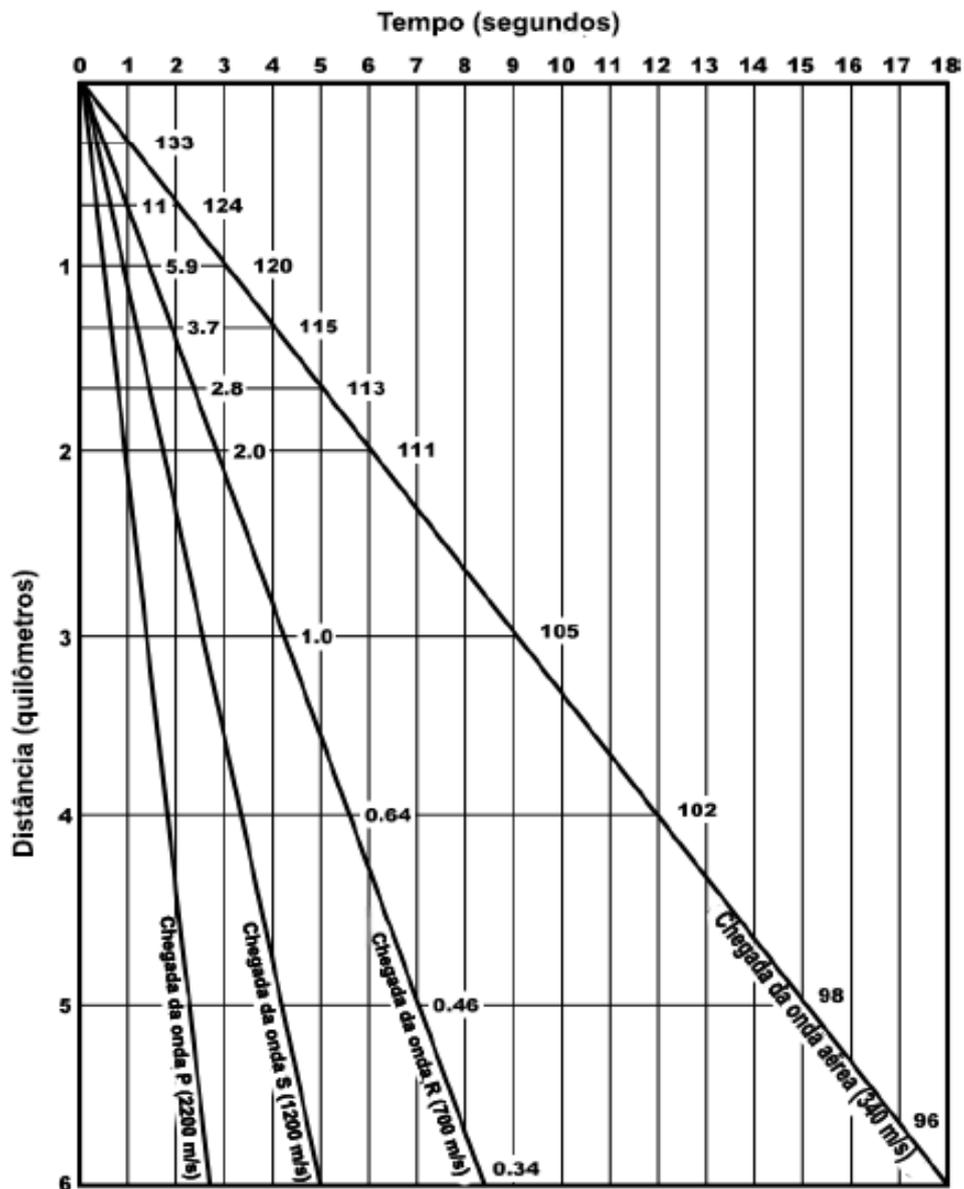
$VV$  = Velocidade vertical da vibração.

O dispositivo disposto para medir as vibrações de um desmonte é composto de 4 componentes: transdutor, gravador, sistema de temporização e sistema de armazenamento.

O principal componente do sismógrafo é o transdutor, que é composto por um ímã suspenso dentro de uma bobina. Existem muitos tipos de transdutores. Quando o ímã reage a um movimento, o movimento relativo entre o ímã e a bobina gera uma corrente. A corrente de saída é proporcional ao movimento do ímã e, por sua vez, o movimento do ímã é proporcional ao deslocamento, velocidade da partícula ou aceleração no solo. A maioria dos dispositivos em operação usa transdutores eletrônicos compostos por materiais piezoelétricos. Esses materiais, quando sujeitos a forças transitórias, geram correntes elétricas proporcionais a acelerações, velocidades ou deslocamentos. Esta corrente é calibrada para uma faixa específica de movimento (Silva-Castro, 2012, p. 10 *apud* BOLLÍNGER).

O equipamento operacional necessita de tempo de gravação aceitável para se capturar o fenômeno vibratório a partir de uma determinada distância do local de desmonte. O tempo de captação das ondas torna-se variável de acordo com as características geológicas da área. A próxima figura demonstra a distância em função do tempo, com base nas velocidades de propagação das ondas nas camadas carboníferas da região de Hunter Valley, Austrália.

Figura 17: Gráfico de distância em função do tempo, com base nas velocidades de propagação das ondas P, S, R e vibrações do ar nas camadas carboníferas da região de Hunter Valley, Austrália.



Fonte: RICHARDS e MOORE (2000).

Em comunicação verbal do engenheiro de minas Gustavo Hollanda durante o curso de desmonte de rochas da empresa *O-pitblast* (Palmas-TO, outubro de 2016), citou-se uma série de exigências para garantir a qualidade de captação e reprodutibilidade dos dados captados pelo sismógrafo em campo:

- a) O geofone necessita ser posicionado no terreno de modo a obter uma fixação retilínea sobre a base do substrato de solo/rocha, se porventura o encaixe não for possível, utilizar uma sapata de gesso;
- b) O sismógrafo necessita de capacidade de armazenamento suficiente para captar as ondas vibracionais gerados no desmonte de rocha em intervalos de  $\Delta_T = 10s$ , tempo usual utilizado para analisar a propagação das vibrações;
- c) O limite de medição da velocidade de partículas do sismógrafo necessita ser superior ao limite de captação de impulsos de vibrações provocados pelo desmonte de rocha;
- d) O geofone deve ser direcionado para a face livre do desmonte, de modo a maximizar a captação e a qualidade dos dados vibracionais.

Figura 18: Dispositivos utilizados para a detecção de ondas terrestres e aéreas.



Autoria: STÉFANI NUNES DA SILVA (2016).

## 2.15 ESTIMATIVA DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO

Para que se possa obter a previsão das vibrações, uma série de presunções já foram desenvolvidas com a finalidade de se fazer estimativas dos níveis de ondas provocadas pelo desmonte de rochas aplicado a mineração ou a obras civis. Portanto, a lei de atenuação foi elaborada para prever tais níveis em uma determinada área através do acompanhamento sismográfico. Este modelo se fundamenta em dados efetivos a partir da mensuração das velocidades de partículas geradas no desmonte de rochas com explosivos, em que o resultado final será quantificado em PPV (Velocidade máxima de partícula). Diversos os testes realizados demonstraram ser o melhor critério para avaliação de danos de acordo, com Hamman et al (1990).

A lei de atenuação se baseia em equações onde são abordados dados reais do local, como a distância de observação do geofone em direção a face livre do desmonte, parâmetros geométricos do plano de fogo e fatores geológicos, de tal forma que se possa prever os níveis de vibrações quando iniciado o processo de detonação. Devido a tais razões, Miranda et al (2017) alega que grande parte dos projetos de desmonte que possam gerar vibrações próximo a comunidades, estruturas civis ou minerações próximos a áreas urbanas, são passíveis de monitoramento constantes da lei de atenuação para que as vibrações geradas estejam de acordo a norma nacional de cada país.

## 2.16 LEI DE ATENUAÇÃO

A literatura propõe diversos artifícios e equações para se prever os níveis de vibrações. Grande parte dos autores relacionam a magnitude do deslocamento oscilatório gerado pelo desmonte junto a distância de observação do geofone direcionado ao desmonte, características do maciço rochoso e da massa de total de explosivos utilizados no procedimento para

Dowding (1985) um dos primeiros autores do ramo, demonstra que é possível se calcular a lei de atenuação da seguinte maneira:

$$V = K \left( \frac{D}{Q_{máx}^{1/2}} \right)^{\beta} \quad \text{(Equação 17)}$$

Sendo:

$V$  = Velocidade máxima de partícula (mm/s);

$D$  = Distância do desmonte em relação ao ponto de observação (m);

$Q_{máx}$  = Carga máxima de explosivos por espera (kg);

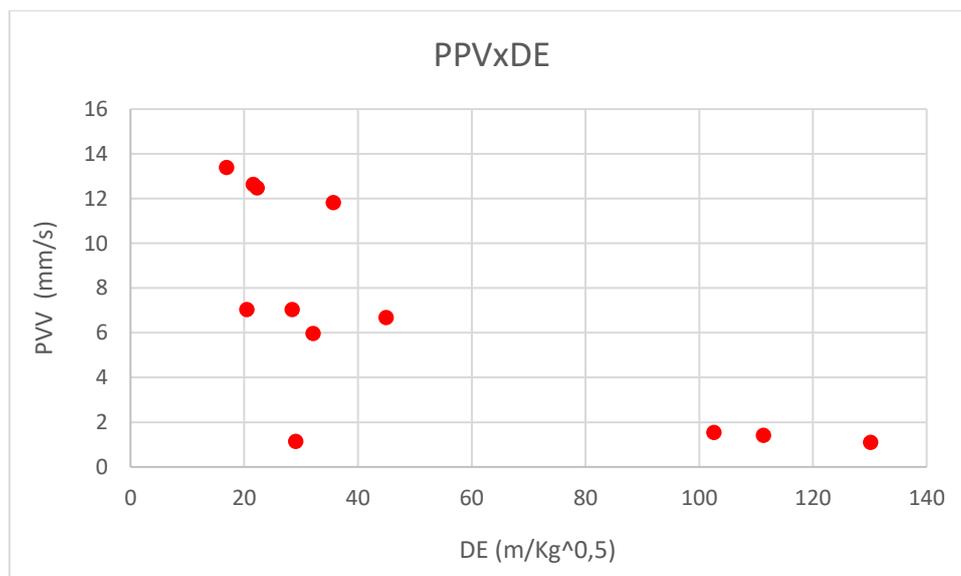
$K$  = Regressor influenciado pela propagação de ondas sísmicas no terreno;

$\beta$  = Regressor de correção da distância escalonada;

$\frac{D}{Q_{máx}^{1/2}} = DE = \text{Distância escalonada.}$

Com base nos dados obtidos no campo, é capaz de se demonstrar a representação dos dados da velocidade máxima de partícula em função da distância escalonada, conforme o exemplo a seguir:

Figura 19: Velocidade de pico da partícula em função da distância escalonada.



Fonte: Criação própria.

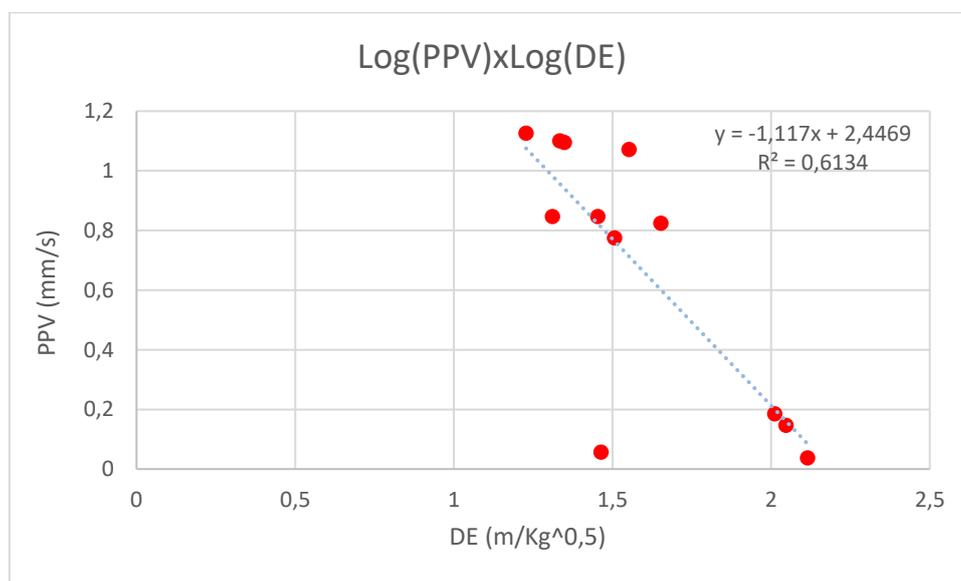
Como se trata de dados com distribuição estatística log-normal, os dados não podem ser ajustados por uma reta, mas sim por uma curva potencial. Então aplica-se a linearização dos dados para se empregar a técnica da regressão. Neste caso, a linearização dos dados é utilizada para garantir (ou ao menos acentuar) a natureza linear do modelo, como é o caso do comportamento da velocidade máxima de partícula em função da distância escalonada. Tal forma é

possível graças a utilização de logaritmos, onde Dowding (1985) apresenta da seguinte forma:

$$v = K(DE)^\beta \Leftrightarrow \log v = \log k + \beta * \log DE \quad (\text{Equação 18})$$

A partir dessa análise, podemos observar que as variáveis estão arranjadas a uma equação linear onde o  $\log k$  concebe a intercepção da reta no eixo y e  $\beta$  representa o coeficiente angular da reta, conforme demonstra a figura 20.

Figura 20: Gráfico log-log da velocidade de pico da partícula em função da distância escalonada.



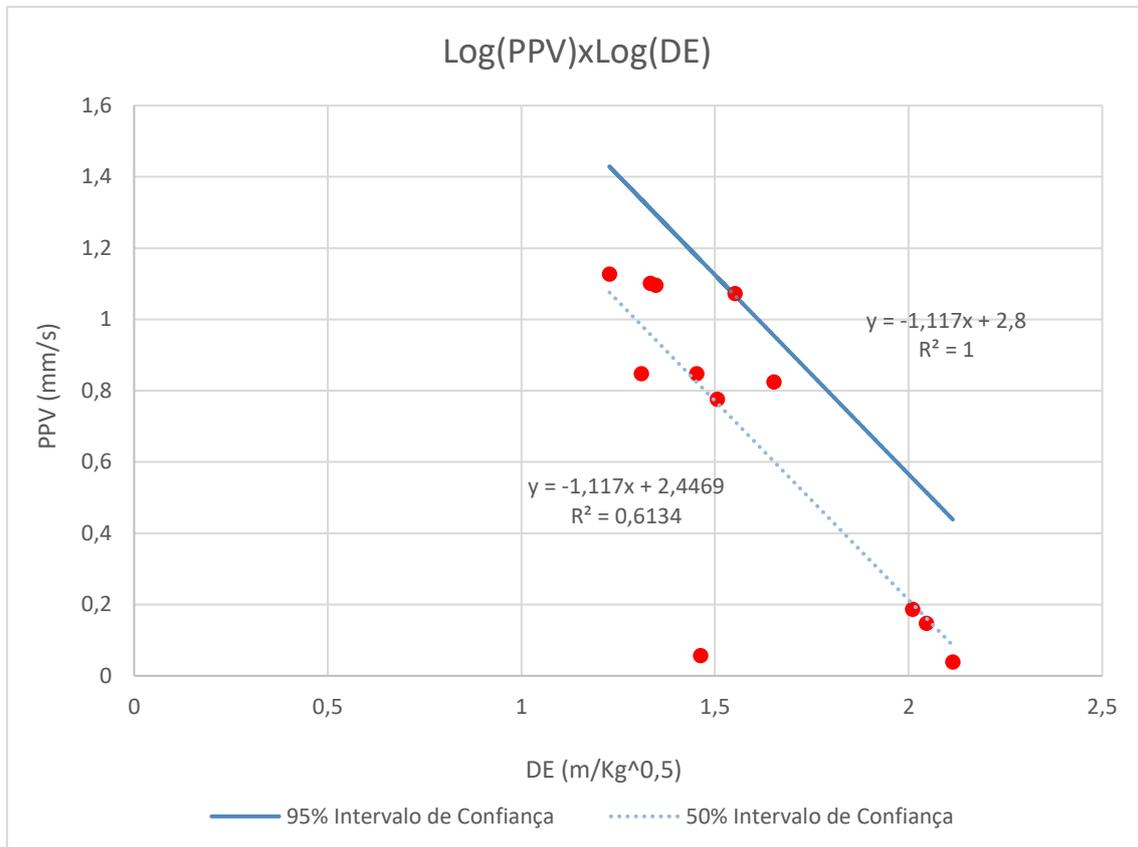
Fonte: Criação própria.

A partir da adaptação dos dados para uma tendência linear, utiliza-se a regressão com a ideia de se obter um melhor ajuste de dados na reta, pois a partir dela podemos estimar o modelo linear que irá se ajustar melhor aos pontos.

Dowding (1985) e Hustrulid (1999) asseguram que se fizer o deslocamento da reta preservando o seu coeficiente angular, de forma que 95% dos dados estejam alocados sobre ela, é admissível e razoável se estimar com 95% de segurança as vibrações de uma determinada área de desmonte utilizando explosivos, a figura 21 ilustra essa afirmação. No entanto a OSMRE (apud HUSTRULID, 1999, p. 274) afirma que para se ter tal confiança, devem

sem reunidos em média 30 pares de dados para se obter um grau aceitável de confiabilidade.

Figura 21: Processo de regressão linear e translação dá reta para um nível de 95% de segurança.



Fonte: Criação própria.

Assim sendo, podemos apontar as variáveis  $k$  e  $\beta$ , formando então a lei de atenuação.

GOMES (2016) afirma que quando estabelecida a lei de atenuação, ela só será verdadeira quando o tipo de explosivo for o mesmo que foi utilizado para a definição do mesmo.

## 2.17 NORMATIVAS PARA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS

As normativas foram criadas com intuito de se estabelecer regras para solucionar problemas gerados por um determinado processo. A seguir veremos

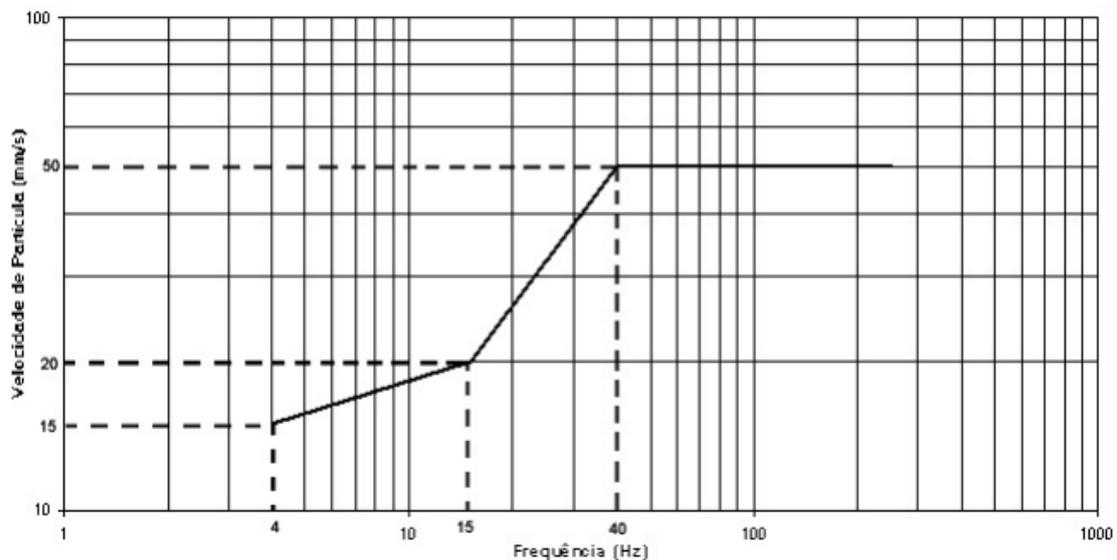
algumas normas utilizadas por dois países e suas recomendações para se avaliar o procedimento de estudo das vibrações.

### 2.17.1 Norma Brasileira (NBR 9653)

Originada em 1986 e com a última versão revisada em 2005, a NBR 9653 apresenta uma série de procedimentos que tem por finalidade mitigar os riscos provocados pelo desmonte de rocha com o uso de explosivos em minerações ou lugares próximos a áreas urbanas, sendo constituída principalmente por parâmetros de segurança para as vizinhanças envolvidas no processo. A norma se refere apenas a vibrações, ruídos e ultra lançamentos derivados do processo de desmonte.

A próxima figura e quadro apresentam critérios para a velocidade máxima de partícula em função da frequência. Sendo acima dos limites estabelecidos pela norma, as ondas podem provocar vibrações excessivas na área, podendo gerar possíveis danos.

Figura 21: Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.



Fonte: NBR 9653 (2005).

Quadro 3: Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.

Faixa de Frequência	Limite de Velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s
NOTA -Para valores de frequência abaixo de 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico)	

Fonte: NBR 9653 (2005).

Como define a norma, para as frequências abaixo de 4Hz, se utiliza como critério o limite de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm. Esse critério é definido através da distância máxima na qual a partícula se propaga em qualquer uma das três componentes do movimento sísmico (Transversal, longitudinal e vertical). Para em ocasiões especiais em que não se possa utilizar o monitoramento sismográfico, a NBR 9653 declara as seguintes exigências:

$DE \geq 40 \text{ m/kg}^{0,5}$  para  $D \leq 300$  da área a ser desmontada (Equação 19)

### 2.17.2 Normativa Americana (RI8507)

A normativa americana é baseada em um relatório chamado *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting*, que foi feito a partir de pesquisas realizadas em mais de 200 desmontes de rocha em minerações a céu aberto. Tal pesquisa também levou em consideração os tipos de estruturas de casas e a determinada frequência que a onda pode se chegar até as mesmas.

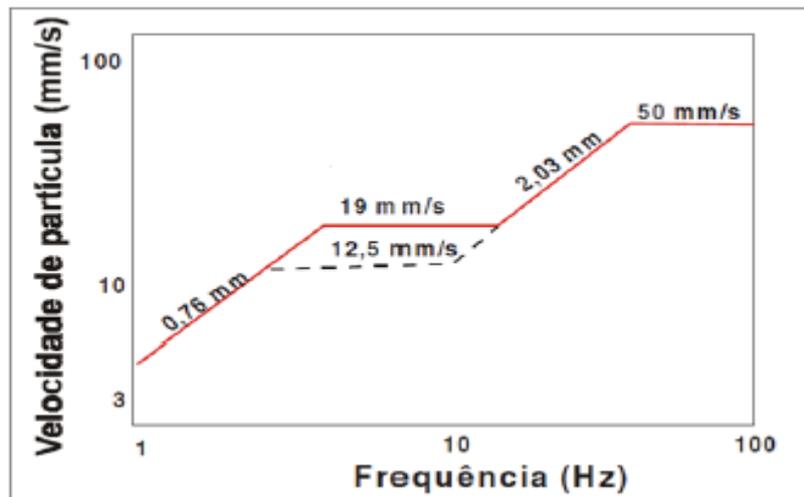
O relatório foi elaborado por Siskind, Koop e Dowding, e foi publicado em 1980. Os cientistas fizeram a seguinte proposta através das análises:

Tabela 4: Limites de velocidade de partícula (RI 8507: 1980).

Tipo da estrutura	Velocidade de partícula de pico (mm/s)	
	Baixas frequências < 40 Hz	Altas frequências > 40 Hz
Casas modernas – paredes internas pré-moldadas em gesso, sem revestimento	19	50
Casas velhas – paredes internas com gesso ou revestimento de madeira	12,7	50

Fonte: BACCI et al (2003).

Figura 23: Limite de velocidade de partícula (RI 8507:1980).



Fonte: Bacci et al (2003).

Segundo Bacci et al (2003), a linha vermelha no gráfico é a referência adotada pela OSM (*Office for Surface Mining Reclamation and Enforcement*) para situações normais de desmonte. Já a linha pontilhada é uma sugestão dada pela USBM (*United States Bureau of Mines*) para paredes internas com revestimento.

## 2.18 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Estatística é um conjunto de métodos e processos quantitativos que serve para estudar e medir os fenômenos coletivos (Falco, 2008, p. 13 apud BERNONVILLE).

Como estamos acostumados, a estatística é bastante utilizada em pesquisas sobre o crescimento populacional, eleições, opiniões públicas, condições socioeconômicas, dentre outros. Apesar disso, a mesma pode ser englobada em diversos âmbitos que apresentem qualquer processo de variabilidade.

Para se fazer a análise da dispersão dos dados, uma gama de técnicas foram desenvolvidas para poder se interpretar os fenômenos, dentre elas está a média aritmética, variância, desvio padrão, coeficiente de dispersão e o histograma. As informações processadas, podem ser representadas através de gráficos, tabelas, curvas e etc.

### 2.18.1 Média Aritmética

Utilizada para demonstrar uma medida de tendência de um determinado fenômeno.

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i) \div (n) \quad \text{(Equação 20)}$$

Sendo:

$\bar{x}$  = Média aritmética;

$x_i$  = Valor estudado;

$n$  = Número de valores.

### 2.18.2 Variância

Guerra (1988) afirma que a variância é a medida de dispersão mais importante da estatística, pois ela fornece a ideia de quão disperso os valores  $x_i$  estão em relação ao seu valor médio.

$$S^2 = (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2) \div (n - 1) \quad \text{(Equação 21)}$$

Sendo:

$S^2$  = Variância;

$x_i$  = Valor estudado;

$n$  = Número de valores.

### 2.18.3 Desvio Padrão

De acordo com Correa (2003), o desvio padrão possui alta precisão em sua análise e é empregado para se determinar a variabilidade dos dados em relação à média. Se o desvio padrão for alto, indica que os dados estão disseminados por um grande conjunto de valores. Ser for baixo, indica que os dados estão próximos da média ou do seu valor esperado.

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{(Equação 22)}$$

Sendo:

$S$  = Desvio padrão;

$S^2$  = Variância.

### 2.18.4 Coeficiente de Dispersão

Indica o grau de variabilidade do fenômeno estudado. Falco (2008) explana que alguns analistas determinam que se o coeficiente de dispersão for maior ou igual a 30%, indica que o conjunto de dados são heterogêneos e a sua média tem pouco significado. Se menor ou igual a 30%, indica que os conjuntos de dados são homogêneos e que a sua média tem um grande significado.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad (\text{Equação 23})$$

Sendo:

CV = Coeficiente de dispersão;

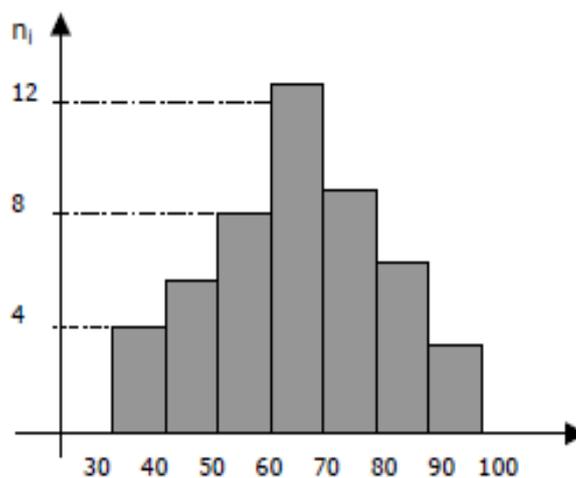
S = Desvio padrão;

$\bar{x}$  = Média aritmética.

### 2.18.5 Histograma

Correa (2006) considera o histograma como uma representação gráfica formada por um conjunto de retângulos, onde sua base é localizada no eixo horizontal. Esta ferramenta possibilita a análise das características do fenômeno, ou seja, ele determina as frequências dos dados através de intervalos para que se possa interpretar de maneira mais clara e compreensível o comportamento das variáveis estudadas.

Figura 24: Exemplo de histograma.



Fonte: CORREA (2006).

## 2.19 MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS

É um conjunto de técnicas estatísticas que tem por finalidade estimar valores de uma determinada variável regionalizada (VR) que está distribuída fisicamente no espaço ou tempo. De modo geral, Guerra (1998) propõe os objetivos da geoestatística a partir da seguinte maneira:

- a) Ser capaz de extrair dados desordenados a partir da sua distribuição no espaço, gerando gráficos de variabilidade e obtendo a medida de correlação entre pontos no campo geométrico. Estes objetivos se determinam através da análise do variograma.
- b) Também ser capaz de determinar com precisão toda as estimativas através dos dados teóricos. Tal fato se determina através da krigagem.

Tudo se iniciou em 1960 quando o professor Georges Matheron, oriundo da *École Supérieure des Mines* de Paris, apresentou uma serie de publicações sobre a Teoria Das Variáveis Regionalizadas, e, em 1967 foi cofundador da primeira Escola de Geoestatística na França. Sua inspiração foi graças aos trabalhos pioneiros de H. J. de Wijs e Daniel G. Krige, engenheiro de minas que trabalhou em minerações de ouro na África do Sul. Por sua grande contribuição no ramo através de seus estudos sobre as VRs, Matheron recebeu o título de criador da geoestatística. André G. Journel e Michael David, ex alunos de Matheron, foram os responsáveis pela divulgação da geoestatística na América do Norte, através dos livros *Mining Geostatistics* (Journel; Huijbregts, 1978) e *Geoestatistical Ore Reserve Estimation* (David, 1978).

De acordo com Yamanoto e Landim (2013), foi partir de 1980 que a geoestatística teve sua metodologia ampliada para diversos campos de atuação, pois além da lavra e pesquisa mineral no qual foi a área de estudos de Matheron, Wijs e Krige (1951); ela foi aplicada a cartografia, climatologia, geotecnia, hidrogeologia, pedologia, geologia ambiental e de petróleo, agricultura de precisão, análise espacial de crimes e etc. Ultimamente grande parte dos softwares utilizados para a elaboração de mapas, apresentam a ferramenta geoestatística, como é o caso do ArcGIS, OASIS Geosoft, QGIS, DATAMINE e Surfer.

### 2.19.1 Variograma

Imagine uma variável regionalizada coletada em diversos pontos “i”, e que elas estejam alocadas em uma região delimitada pelo estudo. É admissível afirmar de acordo com Yamanato e Landim (2013), Guerra (1988), Clark (1979) e Correia (2010), que os valores de cada VR estarão relacionados de alguma forma a partir das distâncias situadas entre elas, onde é possível admitir que a influência entre as variáveis de estudo é maior quanto menor for a distância entre os pontos. Em concordância total com Guerra (1998), variograma é definido como uma ferramenta estatística para estudar as dispersões a partir de dois pontos no espaço. A definição do variograma influencia na escolha da técnica de aplicação da krigagem, que determinará os resultados e conclusões do projeto. Segundo Landim (2006) a formula do semivariograma para distribuições das variáveis, equivale a equação 22. O termo semivariograma gera confusão terminológica na geoestatística, no entanto sempre se refere a divisão da média das diferenças elevado ao quadrado dividido por dois:

$$y(n) = \frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i)^2 \quad (\text{Equação 24})$$

Sendo:

n = número de pares distanciados a uma distância;

$x_{i+h}$  = valor da variável no ponto i+h;

$x_i$  = valor da variável no ponto i.

### 2.19.2 Elaboração do Variograma

Em conformidade com Guerra (1988), existem três tipos de variogramas:

- a) Variograma experimental: É adquirido a partir do aglomerado de amostras provenientes da amostragem realizada, sendo o único conhecido.
- b) Variograma teórico: Baseado em funções matemáticas e lógicas estatísticas, geralmente utilizado como parâmetro de ajuste do variograma experimental.
- c) Variograma verdadeiro: É o variograma real do fenômeno de estudo, porém sempre desconhecido.

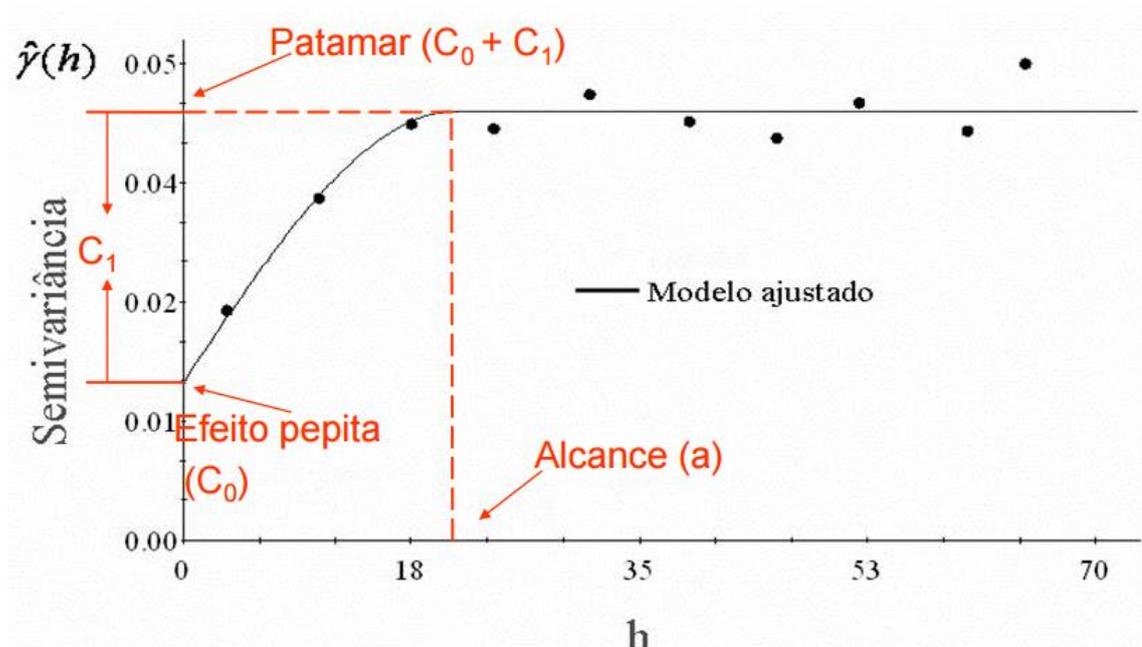
Dentre os modelos teóricos de variogramas, os mais utilizados são os modelos com patamar. Dentre os quais se destacam os modelos gaussiano, potencial e

exponencial. No entanto, os modelos lineares e logarítmicos são empregados com menos frequência e não apresentam patamar em sua estrutura.

### 2.19.3 Variograma com Patamar

O variograma apresenta algumas características, como a amplitude, patamar e efeito pepita. Tais parâmetros são essenciais para a adequação de um modelo ao variograma conforme a figura 25 demonstra:

Figura 25: Parâmetros de adequação para um modelo de variograma.



Fonte: LANDIM (2006).

Correia (2010), descreve o patamar ( $C_0 + c$ ) como a variância máxima, que é quando  $y(h)$  atinge um determinado nível, onde o variograma se torna ajustável. Os dados acima do patamar não apresentam nenhuma correlação com as variâncias de amostragem. A amplitude ou alcance ( $a$ ), é a distância onde o modelo consegue atingir o patamar. Já o efeito pepita ( $C_0$ ) é devido a dispersão das variáveis no espaço ou da escala de amostragem. E  $C_1$  ou  $C$ , representa a variância espacial.

Os modelos teóricos para ajuste de variogramas são citados em Olea (apud Yamamoto e Landim, 2013, p.42). As equações para as definições dos modelos teóricos são ilustradas na tabela abaixo:

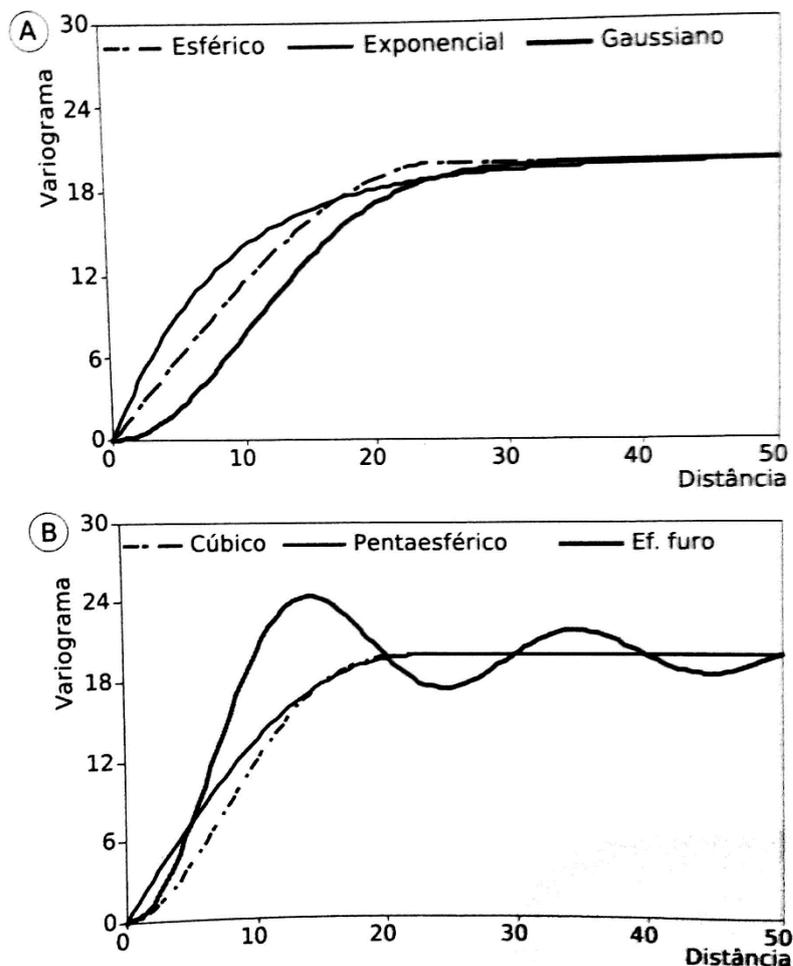
Tabela 5: Modelos teóricos de ajuste de variogramas com patamar.

Modelo	Equação
Esférico	$\begin{cases} \gamma(h) = C_o + C \left[ 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_o + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Exponencial	$\gamma(h) = C_o + C \left[ 1 - \exp \left( -\frac{h}{a} \right) \right]$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_o + C \left[ 1 - \exp \left( -\left( \frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]$
Cúbico	$\begin{cases} \gamma(h) = C_o + C \left[ 7 \left( \frac{h}{a} \right)^2 - \frac{35}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^5 - \frac{3}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^7 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_o + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Pentaesférico	$\begin{cases} \gamma(h) = C_o + C \left[ \frac{15}{8} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{5}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^3 + \frac{3}{8} \left( \frac{h}{a} \right)^5 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_o + C & \text{para } h \geq a \end{cases}$
Efeito furo	$\gamma(h) = C_o + C \left[ 1 - \frac{\text{sen} \pi(h/a)}{\pi(h/a)} \right]$

Fonte: YAMAMOTO e LANDIM (2013).

É importante ressaltar que os três primeiros modelos teóricos explicam grande parte dos fenômenos espaciais e que todos os variogramas teóricos com ou sem efeito pepita apresentam o  $\gamma(0) = 0$ . Quando ajustado de maneira correta, os modelos apresentam a seguinte forma:

Figura 26: Modelos de variogramas com patamar: A) esférico, exponencial e gaussiano. B) cúbico, pentaesférico e efeito de furo, conforme disponível em Olea (1999, p. 76-79).



Fonte: YAMANOTO E LANDIM (2013).

#### 2.19.4 Variograma sem Patamar

De acordo com Guimarães (2004), podemos ter um variograma em que as variáveis de  $h$  crescem sem limites, ou seja, o variograma a ser definido não apresentará patamar. Olea (apud YAMANOTO e LANDIM, 2013, p. 43) afirma que quando a amostragem dos dados é insuficiente ou incompleta, o variograma experimental também não exibirá patamar.

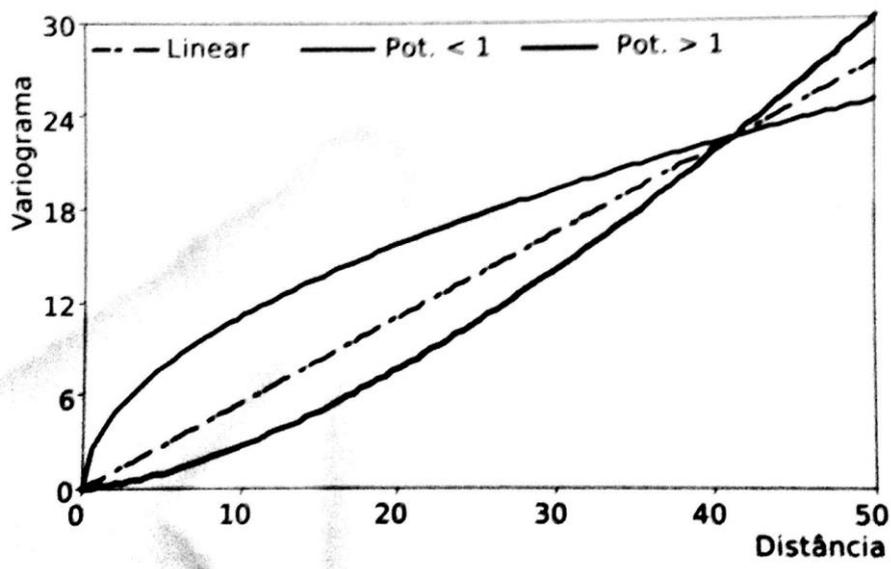
O modelo teórico para os variogramas que não apresentem patamar, pode ser definido da seguinte maneira:

$$y(h) = \alpha h^\beta, \text{ com } 0 < \beta < 2 \quad (\text{Equação 25})$$

Utilizando  $\beta = 1$ , ocorre o modelo variograma linear. O caso extremo da potência  $\beta$  igual a 0 corresponde ao modelo de variograma efeito pepita puro (YAMANTO

e LANDIM, 1997).  $\alpha$  é uma variável positiva que multiplica a distância que é elevada ao fator  $\beta$  que já foi definido. O modelo dos variogramas sem patamar, apresentam da seguinte maneira:

Figura 27: Modelo de variogramas de potência (sem patamar).

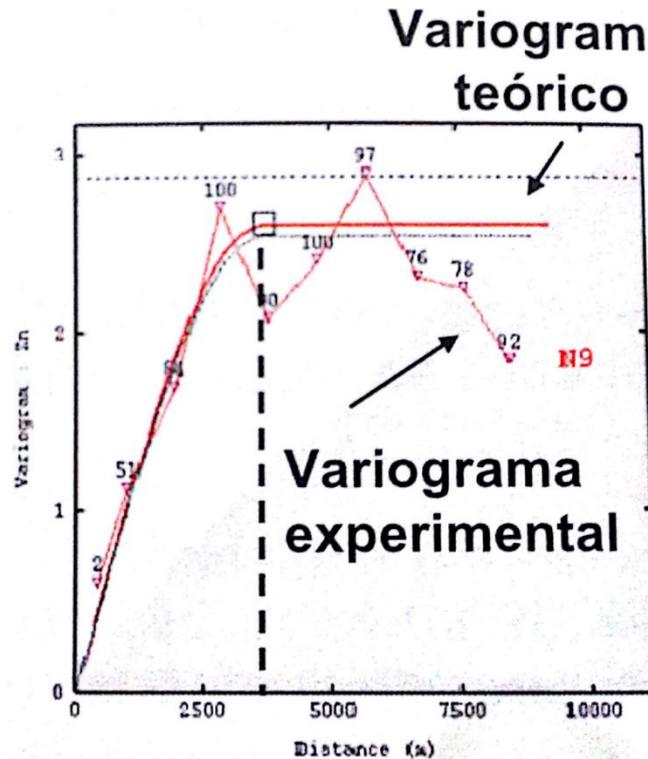


Fonte: YAMANOTO e LANDIM (2013).

### 2.19.5 Ajuste do Variograma

Clark (1979) e Guerra (1988) admitem que para se fazer a estimativa do fenômeno estudado é necessário ajustar uma série de variogramas teóricos que passem a ser correlacionados aos variogramas experimentais. Para se fazer tal ajuste, é necessário definir um modelo intrínseco, que é determinado com o auxílio do variograma experimental. A figura 27 demonstra o comportamento de um variograma teórico e experimental:

Figura 28: Comportamento do variograma teórico e experimental.



Fonte: Adaptado de RIBEIRO e ASSIS (2007).

Guerra (1988) ressalta que:

- O variograma experimental apresenta curva de “dentes de serra” em seu gráfico;
- O variograma experimental é calculado a partir de 1/2, 1/3 ou 1/4 do campo geométrico;
- O variograma real apresenta características matemáticas bastante precisas;
- É necessário no mínimo 30 pares para que o variograma experimental desempenhe um bom papel.

## 2.20 KRIGAGEM

Clark (1979) declara krigagem como o processo que possibilita a estimação de variáveis que estão distribuídas no espaço ou tempo, com base nos valores adjacentes que se localizam no campo geométrico.

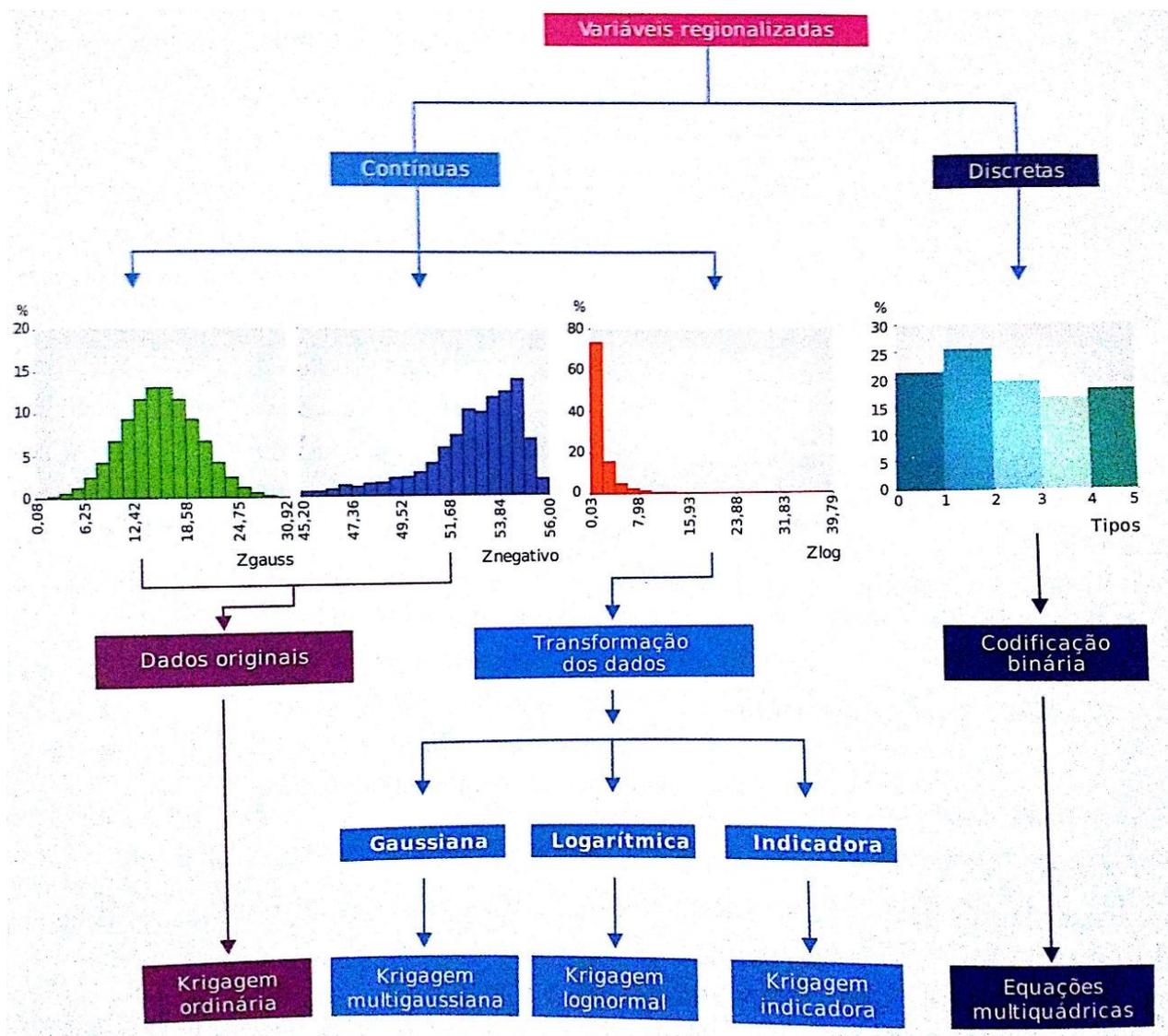
Grego (20--) adverte que o inverso do quadrado da distância e o método de krigagem se assemelham, pois tem em comum a determinação das variáveis a partir da interpolação dos dados, porém as suas metodologias de estimação

são diferentes. A diferença é que, enquanto o método do inverso do quadrado da distância determina que os seus pontos têm sua influência local reduzida a partir da distância, a krigagem determina que seus dados são definidos com base em sua dependência espacial, que é determinada a partir do semivariograma e a partir disso são encontrados seus pesos ótimos.

Segundo Landim (2006), diferente dos outros métodos de aferição de variáveis espaciais, a krigagem carrega consigo o erro de estimação, o que a difere dos outros algoritmos utilizados. Para se utilizar essa ferramenta, não se exige que distribuição dos dados sejam normais, porém em uma distribuição não simétrica, os valores anômalos devem ser considerados, já que a krigagem é um estimador linear.

A metodologia da geoestatística consegue determinar uma série de técnicas de estimativas, porém a mais utilizada é a krigagem ordinária. A figura 29 demonstra um esquema do processo de estimativa a partir das variáveis regionalizadas.

Figura 29: fluxograma de um processo de estimativa geoestatística.



Fonte: YAMANOTO e LANDIM (2013).

### 2.20.1 Krigagem Ordinária

Em conformidade com Guerra (1988), quando se desconhece o valor da média de um sistema de krigagem, ela passa a receber o nome de krigagem ordinária. Para se fazer este tipo de estimativa deve-se atribuir um valor real desconhecido que é determinado por  $V$ . O valor estimado ( $V^*$ ) é calculado a partir de  $n$  amostras que são conhecidas a partir de suas coordenadas. Os valores serão representados por um conjunto, de maneira linear, semelhante ao método de ponderação pelo inverso das distâncias.

$$V^* = P_1X_1 + \dots + P_nX_n, P_i \text{ é o peso concedido a qualquer amostra } i. \quad (\text{Equação 26})$$

Como já mencionado, é notório que exista um erro a esse estimador que é determinado por:

$$E^* = V - V^* \quad (\text{Equação 27})$$

A intenção da krigagem ordinária de acordo com Ribeiro e Assis (2007), é encontrar ponderadores ótimos para que a estimação do erro seja a menor possível. A partir disso se determina um sistema de equações com n+1 incógnitas para n+1 equações, para poder então se determinar o ponto ( $S_0$ ). Tal notação é concedida a partir da seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \bar{y}(S_1, S_1) & \bar{y}(S_1, S_2) & \dots & \bar{y}(S_1, S_n) & 1 \\ \bar{y}(S_2, S_1) & \bar{y}(S_2, S_2) & \dots & \bar{y}(S_2, S_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \bar{y}(S_n, S_1) & \bar{y}(S_n, S_2) & \dots & \bar{y}(S_n, S_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{y}(S_1, S_0) \\ \bar{y}(S_2, S_0) \\ \vdots \\ \bar{y}(S_n, S_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 28})$$

$[S_i, S_i] \qquad \qquad \qquad [\lambda_i] \qquad [S_i, S_0]$

Sendo:

$[S_i, S_i]$  = É a matriz onde estão os valores obtidos a partir do semivariograma, relacionados com as distâncias das amostras estimadas;

$[\lambda_i]$  = Vetor que possui os ponderadores a serem determinados;

$[S_i, S_0]$  = Possui os valores encontrados a partir do semivariograma, onde são referentes as distâncias entre as amostras de estudo e o ponto  $S_0$  a ser definido.

Para que o ponto  $S_0$  possa ser estimado, obtém-se uma combinação linear dos valores dos pontos vizinhos e dos respectivos pesos (LANDIM, 2006).

$$S_0 = \sum \lambda_i S_i \quad (\text{Equação 29})$$

Para se obter a variância do valor estimado em  $S_0$  se utiliza a seguinte formula:

$$S^2 = [\lambda_i]' [S_i, S_0] \quad (\text{Equação 30})$$

Onde:

$[\lambda_i]'$  = vetor transposto dos pesos  $\lambda_i$

$[S_i, S_0]$  = valores encontrados a partir do semivariograma, onde são referentes as distâncias entre as amostras de estudo e o ponto  $S_0$  a ser definido.

### 3 METODOLOGIA

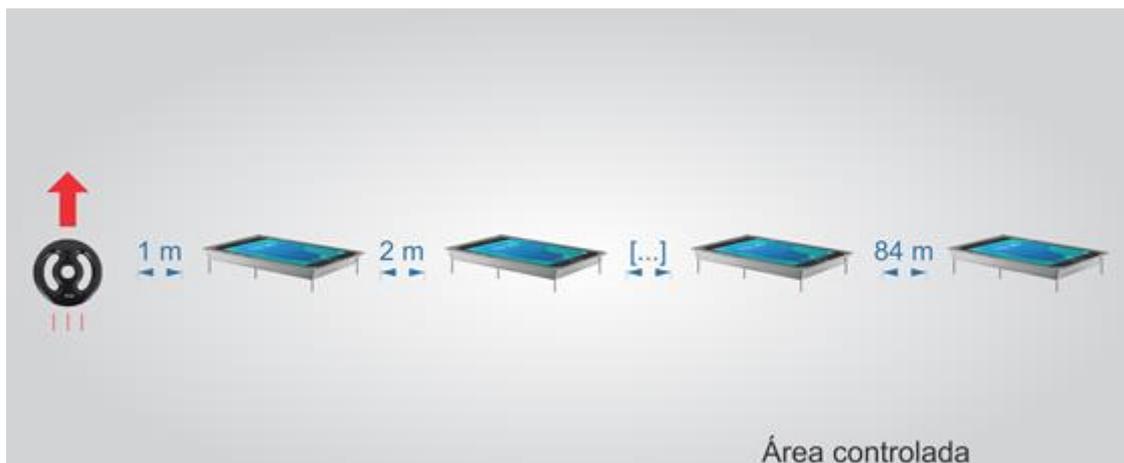
Este trabalho será desenvolvido a partir de revisão bibliográfica de artigos científicos, literatura impressa e sites relacionados ao tema. Com o objetivo de determinar qual a melhor metodologia para a previsão de vibrações ocasionadas por desmonte de rocha com explosivos: Método tradicional de regressão ou krigagem ordinária?

#### 3.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

O levantamento dos dados será realizado em área aberta. A área de estudo será em uma alameda próxima a avenida Palmas Brasil localizada em Palmas-TO. Para a geração das ondas mecânicas, será utilizado um disco de metal de 15 kg. Esse disco será posicionado em diferentes alturas e gerará impactos controlados no local do estudo. As alturas serão definidas em campo para se obter a que força necessária o disco exercerá ao solo quando lançado, para que o aplicativo possa obter a melhor reprodutibilidade dos dados. A intenção principal é gerar diversos padrões de ondas mecânicas que sejam captados adequadamente pelo o aplicativo de celular.

Para a captação das ondas no meio será utilizado o aplicativo “O-pitblast versão 1.4”, rodando diretamente em um smartphone da marca Apple, modelo 5S ou superior. O smartphone será posicionado em uma placa metálica específica para suporte. Essa placa metálica terá as seguintes medidas: 17 cm de comprimento x 9 cm de largura X 2 cm de espessura. Os pés de suporte serão hastes metálicas com 10 cm de comprimento. As hastes metálicas serão cravadas no solo. O posicionamento da placa em relação ao disco metálico será alinhado em relação ao eixo norte-sul e em distâncias escalonadas, iniciando a 1,0 m de distância, depois aumentando progressivamente para 2,0 m, 3,0 m, 6,0 m, 24,0 m até alcançar a distância máxima de 84,0 m. Esse espaçamento segue os parâmetros de Dowding (1985).

Figura 30: Representação esquemática da aquisição dos dados.



Fonte: Criação própria.

O levantamento dos dados pontuais será executado 30 vezes em cada ponto de posicionamento da placa. A intenção é de obter uma amostragem estatística representativa, segundo a recomendação mínima sugerida pela OSMRE (apud HUSTRULID, 1999, p. 274) e Guerra (1988). O dado registrado será o PPV (velocidade máxima de partícula) com unidade de medida em mm/segundo. Os dados serão registrados diretamente no aplicativo, gerando uma tabela de dados que são enviados para e-mail cadastrado após o processo ser concluído. Esses dados serão exportados posteriormente para uma planilha no Excel e salvo no formato .xls.

### 3.2 TRATAMENTO DOS DADOS (Método tradicional de regressão)

Os dados obtidos a partir do levantamento de campo serão manipulados diretamente no software Excel 2016. Inicialmente serão separados 90% dos dados para modelagem e 10% para validação. Os dados utilizados para validação serão plotados em gráfico no software Excel 2016. As velocidades máximas de partículas estarão em função da distância escalonada conforme a literatura propõe. Feito isto, passaremos ao método de regressão, inserindo a linha de tendência para obter a confirmação de uma curva com distribuição log-normal. Essa formula matemática rege a função de definição das componentes  $k$  (regressor influenciado pela propagação de ondas sísmicas no terreno) e  $\beta$  (regressor de correção da distância escalonada).

A segunda parte consistirá da validação do modelo através da análise de resíduos. Para que isso seja realizado, utilizaremos os 10% dos dados que foram reservados anteriormente para essa finalidade. O resíduo se define como a diferença entre os valores registrados e os valores modelados.

A terceira e última parte é a comprovação de que os resíduos são oriundos de um modelo. De acordo com Miranda (2016), para que o modelo utilizado possa ser reconhecido como modelo, vamos comprovar que o intervalo de confiança para média contém o 0 e também que os dados sigam uma distribuição normal. Para a comprovação da normalidade utilizaremos o contraste de hipótese de Shapiro-Wilk através do software SPSS (mas observando-se que uma tendência a normalidade será suficiente para a acreditação do modelo), em conformidade com Miranda et al (2017).

### 3.3 TRATAMENTO DOS DADOS (Krigagem Ordinária)

O método de tratamento será com os mesmos dados utilizados no método de regressão. Similar ao processo anterior, utilizaremos 90% dos dados para modelar e 10% para validar, e também, comprovar que os resíduos são derivados de um modelo.

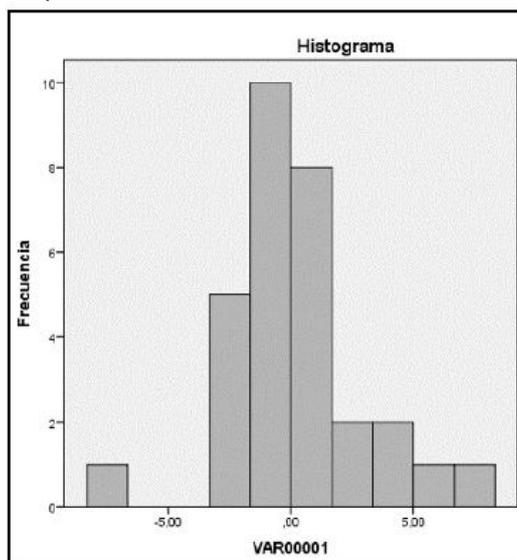
Primeiramente irá se utilizar 90% dos dados para o processo de modelação, e a partir do Excel 2016 se determinará o semivariograma das variáveis de estudo para que se possa assimilar a influência dos PPV em função das distâncias escalonadas no campo granítico. Logo em seguida será aplicada a técnica de krigagem ordinária para se fazer a estimação dos valores que estão distribuídos na área, com base em valores adjacentes estabelecidos a partir dos testes de campo, utilizando-se também o Excel 2016.

Estabelecidos os valores de estimação através da krigagem ordinária, irá se fazer a análise de resíduos, utilizando-se os 10% dos dados de validação que foram reservados para este ato. Lembrando que o resíduo é a diferença entre os valores registrados e os valores modelados. Assim feito, irá se avaliar o intervalo de confiança para que média contenha o 0 e que o dado tenha uma tendência normal (para tal, utilizaremos o contraste de Shapiro-Wilk no qual o software SPSS simulara a hipótese).

### 3.4 ANÁLISE DOS MODELOS PREVISIONAIS

Primeiramente vamos demonstrar que as técnicas aplicadas podem ser consideradas modelo do ponto de vista matemático e estatístico. Para ser considerado modelo a análise dos dados provenientes dos resíduos devem seguir uma distribuição normal (ou pelo menos ter uma tendência a normalidade) e tem que ser centrados em zero. Primeiramente iremos gerar e analisar o histograma através do software SPSS.

Figura 31: Exemplo da análise de resíduos através do software SPSS.



Fonte: Miranda et al (2017).

O histograma pode nos dar uma ideia da distribuição dos dados. A confirmação estatística será feita através do contraste de hipótese de Shapiro-Wilk. Para tal também utilizaremos o software SPSS conforme o quadro abaixo. Para o contraste rejeitar em favor da alternativa (hipótese alternativa: Os dados seguem uma distribuição normal) o valor sigma deverá superar 0,05. Aqui realçamos a rigorosidade desse contraste de hipótese, que apenas se decanta pela hipótese alternativa na evidente falta de dúvidas com relação a normalidade. Assumiremos uma tendência a normalidade uma vez que o histograma nos dê indícios disso que o valor sigma, mesmo sem alcançar o 0,05 se mova superando o valor inicial de 0,01.

Quadro 4: Exemplo do Teste de Normalidade.

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
VAR00002	,180	23	,052	,899	23	,024

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fonte: Miranda et al (2017).

Uma vez comprovando-se que ambas técnicas atendem os requisitos para serem considerados modelos, analisaremos os estatísticos descritivos gerados pelo SPSS. Nesse ponto poderemos confirmar que o intervalo de confiança para a média contenha o zero e conhecer a variância dos dados.

Quadro 5: Exemplo de quadro estatístico gerado pelo software SPSS.

		Estadístico	Error estándar
VAR00002	Media	,4840	,32894
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior Límite superior	-1,982 1,1662
	Media recortada al 5%	,3842	
	Mediana	-,0230	
	<b>Varianza</b>	2,489	
	Desviación estándar	1,57753	
	Mínimo	-1,62	
	Máximo	4,59	
	Rango	6,21	
	Rango intercuartil	1,45	
	Asimetría	1,057	,481
	Curtosis	,673	,935

Fonte: Miranda et al (2017).

O modelo que apresentar a menor variância da análise de resíduos, será a técnica que terá melhor eficiência para a previsão de vibrações em área controlada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 LOCAL E PERÍODO DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

A coleta dos dados foi realizada dia 09/07/2017 em uma área contendo pedregulhos e um solo bem compactado próxima a avenida Palmas Brasil, localizada no estado do Tocantins.

O intuito principal da primeira parte deste levantamento, foi mensurar PPVs a partir de um teste em pequena escala. O disco empregado na realização deste trabalho, foi utilizado para gerar impactos no solo, para que o aplicativo O-pitblast pudesse fazer a leitura das vibrações geradas no local. As alturas utilizadas no lançamento do mesmo foram de 1, 2 e 2,5m, onde as mesmas simularam a carga de explosivo.

Figura 32: Esquema de simulação da carga de explosivo.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na realização do trabalho foi definido que as leituras seriam feitas a 1, 2, 3, 6, 24 e 84m conforme Dowding (1985) define. Porém quando se chegou na distância de 24m o aplicativo não conseguiu mensurar os níveis de vibração devido à baixa intensidade de impacto que o disco exercia no solo, portanto o aparelho de medição não conseguiu captar tais ondas.

Figura 33: Níveis de ondas captadas através do aplicativo O-pitblast versão 1.4.



Fonte: Arquivo pessoal.

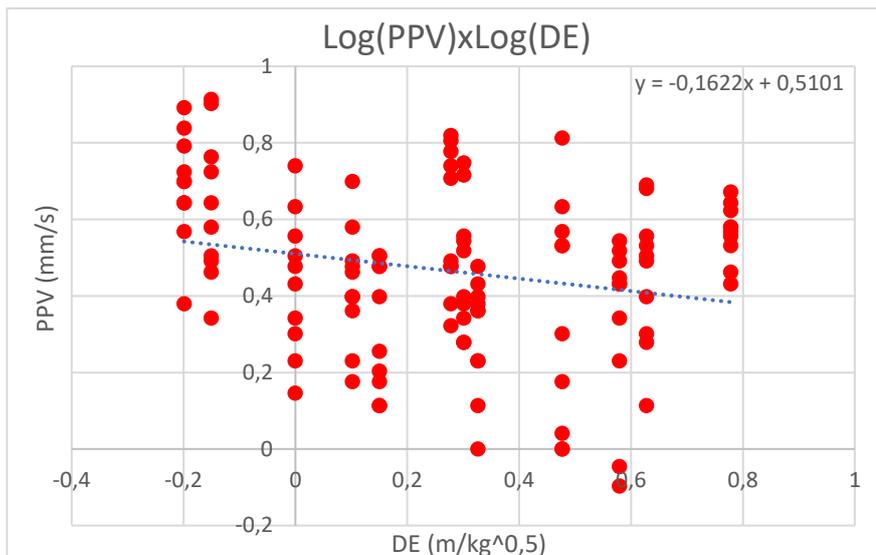
Logo a este ocorrido, a distância de 84m também foi descartada, então acabou-se totalizando 120 dados coletados, com a proposta de que seria 30 dados coletados a cada distância que foi definida.

#### 4.2 TRATAMENTO DOS DADOS – METODO TRADICIONAL DE REGRESSÃO

Foram tratados 120 dados no software Excel 2016 conforme o Apêndice “A” demonstra. O nome dado ao arquivo foi “Método de Regressão”.

Primeiramente foi realizado o cálculo da distância escalonada, definida por “SD”, que é a distância de monitoramento sobre a raiz quadrada da carga. Depois aplicou-se a linearização dos dados do ponto máximo de partícula e na distância escalonada. Tal arranjo é feito para garantir a natureza linear do modelo utilizando-se os logaritmos.

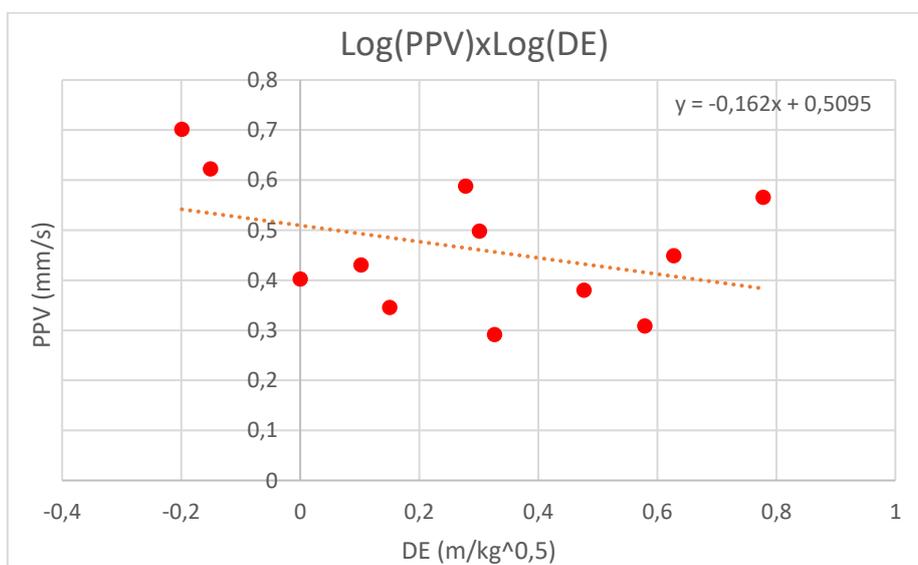
Figura 34: Distribuição dos dados, PPV em função da distância escalonada.



Fonte: Criação própria.

Na figura 32 podemos ver que existem vários dados no eixo y que correspondem a uma única abscissa. Podemos utilizar a média dos valores que possui mesma abscissa uma vez que pela definição de regressão linear de Gujarati e Porter (2010), esse é o ponto aproximado pela regressão uma vez que os dados que entre si compartilham mesma abscissa e gozam da homocedasticidade (variância constante) e perturbação estocástica nula. Tirado as médias o novo gráfico fica como a seguir.

Figura 35: Gráfico de log(PPV) em função de log(DE)



Fonte: Criação própria.

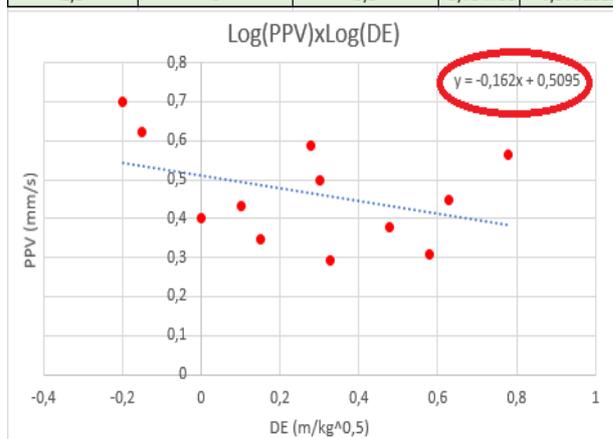
Inicialmente foram separados 90% dos dados para modelagem e 10% para validação. A segunda parte consistiu da validação do modelo através da análise de resíduos. Isso foi realizado graças aos 10% dos dados que foram reservados anteriormente para essa finalidade. Recordando que o resíduo é a diferença entre o valor registrado e o valor modelado. Pode-se observar que os dados que foram reservados para esta finalidade estão na coluna “modelo” como mostra na figura 34. Para iniciar o tratamento foram filtrados no Excel 2016 apenas os dados da validação. Fazendo isto, definimos a equação de previsão de PPV a partir do gráfico, sendo ela:

$$PPV = 10^{(0,5095 - 0,162 * \log SD)} \quad (\text{Equação 24})$$

Aplicando na fórmula, temos os seguintes resultados apresentados da Previsão de PPVs e de resíduos.

Figura 36: Validação do modelo através da análise de resíduos – Regressão.

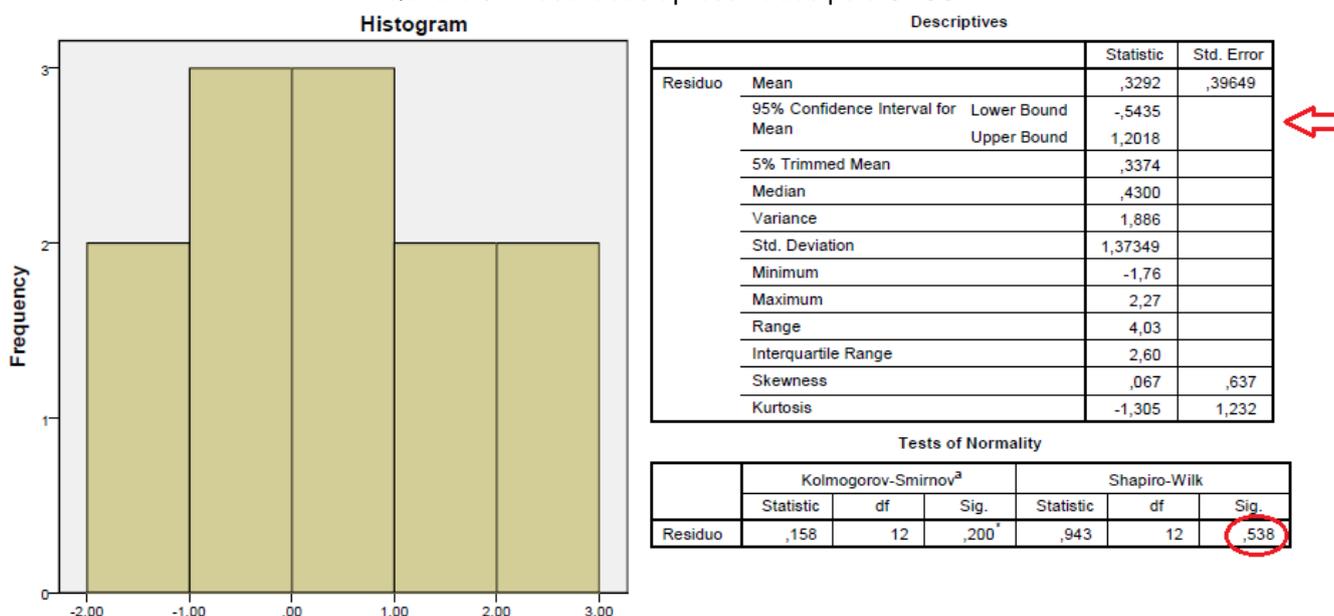
Carga (Kg)	Distância (m)	PPV (mm/s)	SD	Log10 SD	LOG10 PPV	Modelo	PPV - Sis.	PPV - Mod	Residuo
1	1	5,5	1	0	0,740362689	validacao	5,50	3,23	2,27
2	1	5,3	0,707107	-0,150514998	0,72427587	validacao	5,30	3,42	1,88
2,5	1	3,7	0,632456	-0,198970004	0,568201724	validacao	3,70	3,48	0,22
1	2	1,9	2	0,301029996	0,278753601	validacao	1,90	2,89	-0,99
2	2	1,3	1,414214	0,150514998	0,113943352	validacao	1,30	3,06	-1,76
2,5	2	2,5	1,264911	0,102059991	0,397940009	validacao	2,50	3,11	-0,61
1	3	1,5	3	0,477121255	0,176091259	validacao	1,50	2,71	-1,21
2	3	2,3	2,12132	0,326606257	0,361727836	validacao	2,30	2,86	-0,56
2,5	3	5,1	1,897367	0,27815125	0,707570176	validacao	5,10	2,91	2,19
1	6	3,6	6	0,77815125	0,556302501	validacao	3,60	2,42	1,18
2	6	3,2	4,242641	0,627636253	0,505149978	validacao	3,20	2,56	0,64
2,5	6	3,3	3,794733	0,579181246	0,51851394	validacao	3,30	2,60	0,70



Fonte: Criação própria.

Para que o modelo utilizado possa ser reconhecido como modelo, vamos comprovar que o intervalo de confiança para média contém o 0, que os dados sigam uma distribuição normal e também passem na análise de normalidade, onde o valor terá que ser igual ou superior a 0,05. A partir dos resultados dos resíduos da figura 34, foi verificado se os mesmos são oriundos de um modelo através do software SPSS. Os resultados apresentados foram:

Quadro 6: Resultados apresentados pelo SPSS.



Fonte: Criação própria.

A partir dos dados apresentados destacados em vermelho, foi concluído que os dados analisados foram reconhecidos como um modelo de acordo com Miranda et al (2017), pois apresentam o intervalo que contém o zero, onde o mesmo está inserido entre -0,5435 a 1,2018. A análise de normalidade da hipótese de Shapiro-Wilk foi positiva pois apresentou um resultado superior a 0,05 (para um nível de significância de 95%) que é parâmetro utilizado para rejeitar a hipótese nula.

#### 4.3 TRATAMENTO DOS DADOS – KRIGAGEM ORDINÁRIA

Inicialmente foi o construído o variograma no Excel 2016 para que posteriormente pudesse ser feito o tratamento dos dados através da krigagem.

O tratamento inicial começou a partir das médias dos PPVs constituídos por cada distância escalonada já definida. Os valores são:

Tabela 6: Média dos PPVs em função da Distância Escalonada (SD)

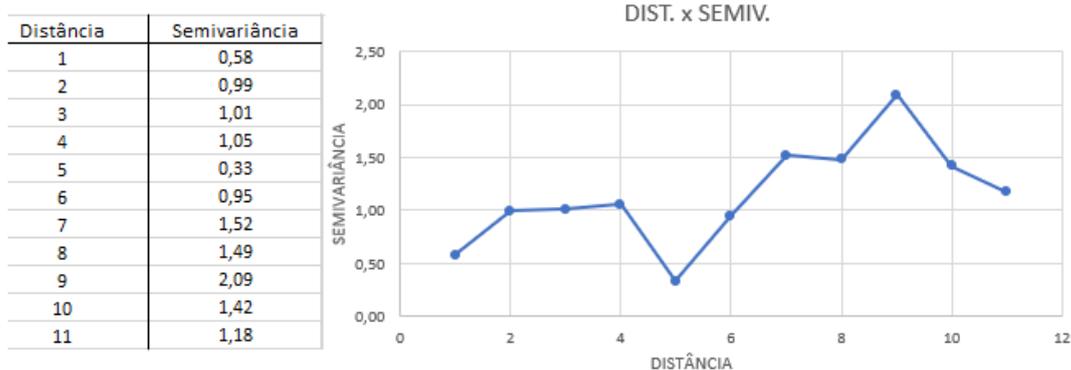
SD	Média PPV
0,63	5,27
0,71	4,62
1,00	2,68
1,26	2,87
1,41	2,34
1,90	4,23
2,00	3,36
2,12	2,07
3,00	2,93
3,79	2,27
4,24	3,06
6,00	3,73

Fonte: Criação própria

Pela pouca quantidade de pontos foi feita a desconsideração do “passe constate” para que o variograma experimental pudesse ser gerado, e embora esse processo não esteja estatisticamente validado aqui foi assumido como uma aproximação do procedimento. Os dados obtidos a partir da média dos PPVs estão representados no Apêndice “B” deste trabalho.

As distâncias testadas no 1º ato para se obter as semivariâncias, foram de 1 a 11m. A figura seguir demonstra o comportamento do variograma experimental a partir das distâncias testadas:

Figura 38: Semivariância em função da distância

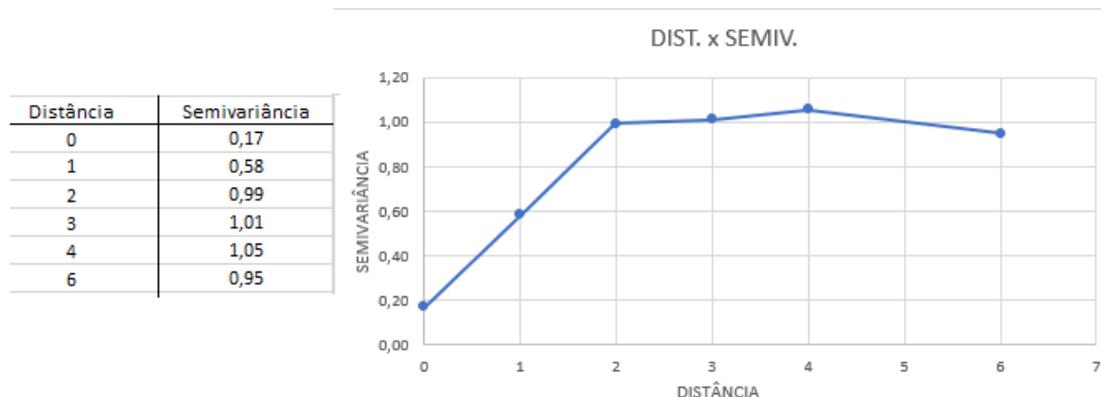


Fonte: Criação própria

Na figura 38 podemos notar que no ponto da distância de 5m a covariância dos dados diminui, o que não tem sentido físico, pois quanto maior for a distância, menor é a influência entre elas, o que se levar a acreditar que esse valor é atípico, por isso descartado do estudo. De 7m em diante podemos notar um pico no gráfico, possivelmente pela baixa quantidade de amostras para representar um semivariograma, logo também desconsiderado

Segundo Revuelta e Jimeno (1997) para se calcular o semivariograma, devemos utilizar a metade da distância amostrada, pois se utilizarmos grandes distâncias geraram poucos pares de amostras, sendo que isso não tem caráter estatístico representativo. Feita a afirmação, optou-se em trabalhar com 6 dados porem na distância de 5m foi descartado devido ser uma anomalia, e também se determinou o prolongamento dos dados no eixo y através da função solver do Excel 2016. O variograma experimental a seguir representa o conjunto de dados obtidos:

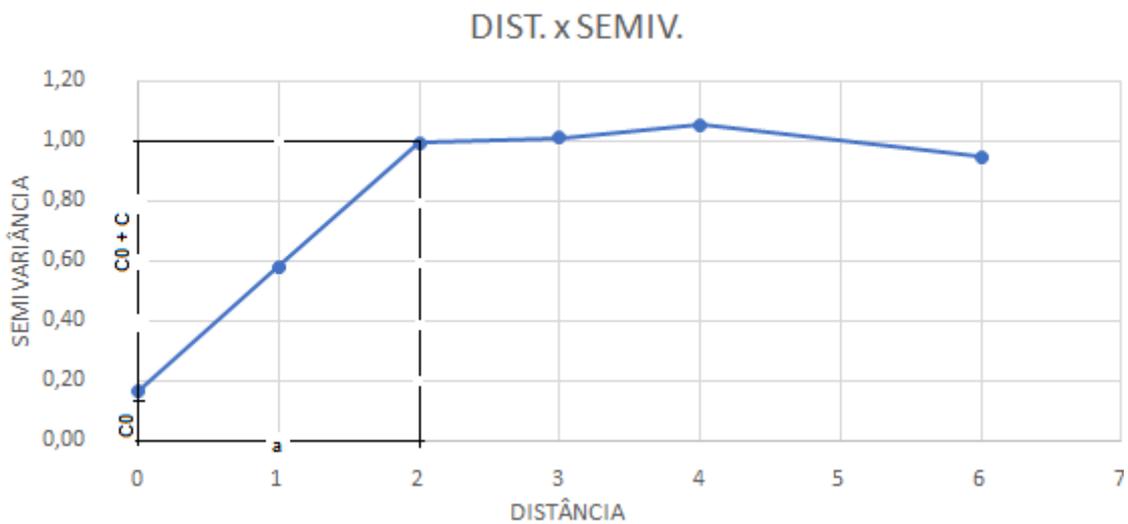
Figura 39: Variograma experimental definido a partir do conjunto de dados



Fonte: Criação própria

Depois da criação do semivariograma experimental foi determinado o efeito pepita, alcance e patamar. A figura 40 demonstra como foi feita a extração dos dados:

Figura 40: Definição das características do variograma experimental.



Fonte: Criação própria.

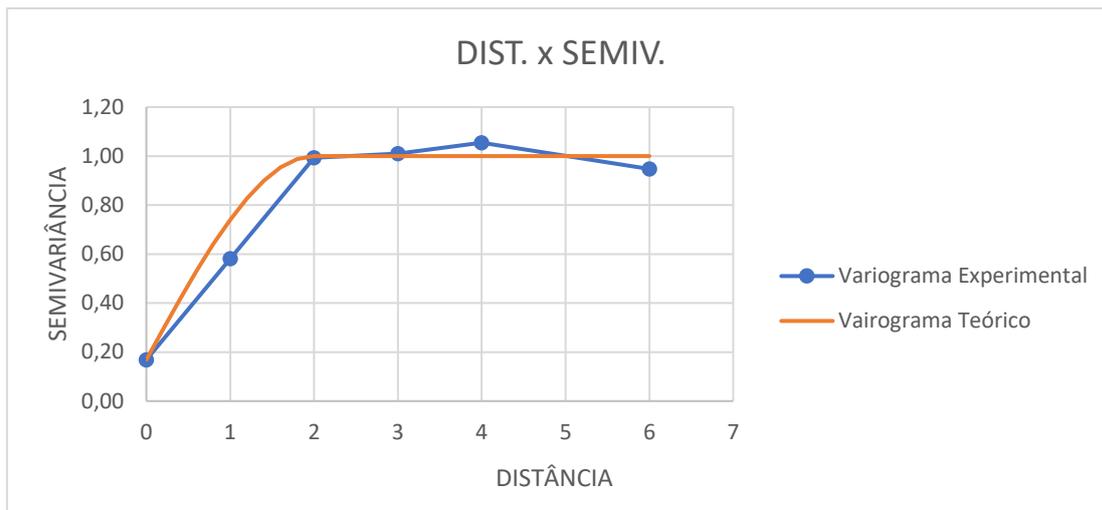
Após a análise do gráfico foi determinado que para esse semivariograma os parâmetros estabelecidos foi de 0,17 para C0 (efeito pepita), 0,83 para C0+C (patamar) e 2 para a amplitude (a). Para a determinação do variograma teórico, foi utilizado o modelo esférico para se ajustar o mesmo. A formula e as restrições que regem o modelo são:

$$y(h) = C0 + C \left[ 1,5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \quad (\text{Equação 25})$$

$$y(h) = C0 + C \text{ para } h \geq a \quad (\text{Equação 26})$$

Prontamente, o variograma teórico apresentou a seguinte forma conforme rege as equações acima:

Figura 41: Definição do variograma teórico.



Fonte: Criação própria.

Após a finalização da determinação do variograma teórico, foi iniciada o tratamento dos dados da krigagem ordinária. Inicialmente foram separados 90% dos dados para modelagem e 10% para validação. A segunda parte consistiu do tratamento dos dados e a terceira e última é da validação do modelo através da análise de resíduos

A princípio se determinou a média dos PPVs em função da distância escalonada conforme a tabela 6, logo para foi criado uma tabela das distâncias escalonadas entre todos os possíveis pares para se estimar a célula "PONTO". Adiante para se calcular os pesos utilizados na krigagem, é preciso decidir qual o padrão de continuidade espacial que irá ser utilizado no fenômeno proposto, no caso o modelo esférico. Escolhido a função da covariância na qual irão ser tratado os dados, é possível se fazer a construção das matrizes "VARIOGRAMA" e "PONTO", conforme as formulas e restrições das equações 25 e 26. Como se trata de krigagem ordinária, é feita a adição de mais uma equação no sistema para que a soma dos pesos seja igual a 1. Então para que a resolução do sistema se torne possível e mais simples, o parâmetro de Langrage é inserido (de uma forma que não altere as igualdades), por este modo é que se aparece a linha e a coluna de "1" e o "0" como pivô. O termo Lagrangiano é inserido somente para criar uma variável artificial, porém não altera os valores. Então para se encontrar o valor estimado, utilizamos a matriz inversa da tabela "VARIOGRAMA" que é multiplicada pelos pesos da tabela "PONTO". Logo se gera resultados para cada

peso que depois são multiplicados pela variável de estudo (PPVs) e somados para se obter a solução do fenômeno de estudo. O Apêndice “C” demonstra com base no que foi dito.

Após determinado o modelo da previsão da krigagem, foi feito a análise de resíduos, que é a diferença entre o valor gerado e o valor modelado. Os resultados obtidos foram:

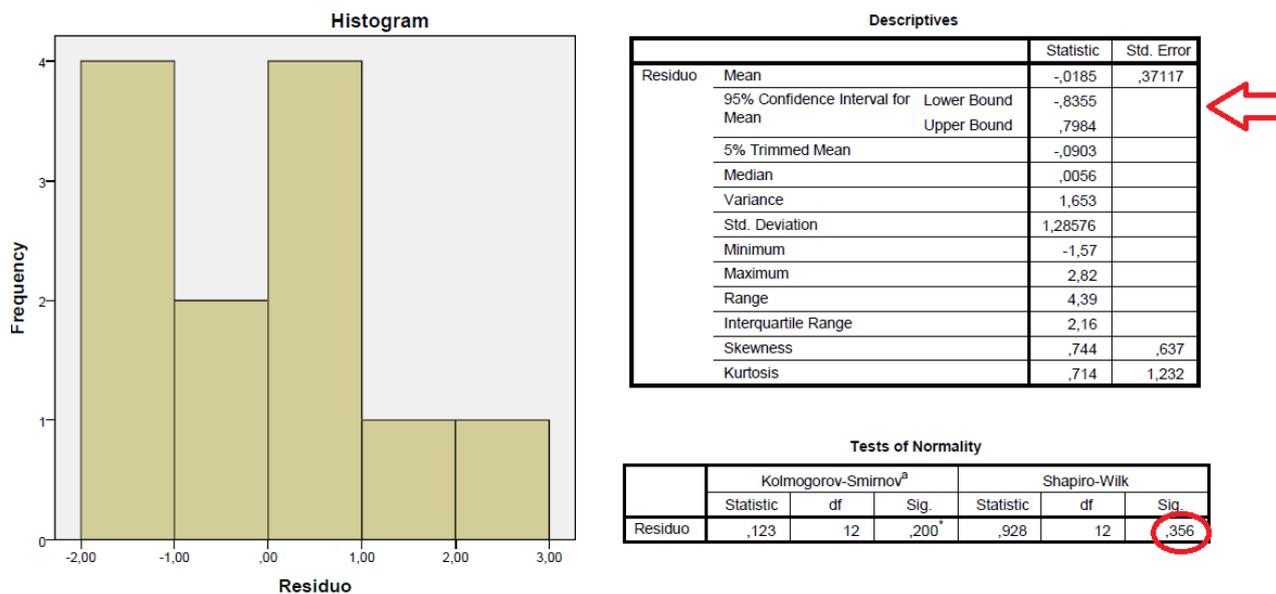
Figura 42: Validação do modelo através da análise de resíduos – Krigagem Ordinária.

Carga (Kg)	Distância (m)	PPV (mm/s)	SD	Log10 SD	LOG10 PPV	Modelo			PPV - Sis.	Modelo	Resíduo
1	1	5,5	1	0	0,740362689	validacao			5,50	2,68	2,82
2	1	5,3	0,707106781	-0,150514998	0,72427587	validacao			5,30	4,62	0,68
2,5	1	3,7	0,632455532	-0,198970004	0,568201724	validacao			3,70	5,27	-1,57
1	2	1,9	2	0,301029996	0,278753601	validacao			1,90	3,36	-1,46
2	2	1,3	1,414213562	0,150514998	0,113943352	validacao			1,30	2,34	-1,04
2,5	2	2,5	1,264911064	0,102059991	0,397940009	validacao			2,50	2,87	-0,37
1	3	1,5	3	0,477121255	0,176091259	validacao			1,50	2,93	-1,43
2	3	2,3	2,121320344	0,326606257	0,361727836	validacao			2,30	2,07	0,23
2,5	3	5,1	1,897366596	0,27815125	0,707570176	validacao			5,10	4,23	0,87
1	6	3,6	6	0,77815125	0,556302501	validacao			3,60	3,73	-0,13
2	6	3,2	4,242640687	0,627636253	0,505149978	validacao			3,20	3,06	0,14
2,5	6	3,3	3,794733192	0,579181246	0,51851394	validacao			3,30	2,27	1,03

Fonte: Criação própria.

A partir dos resultados dos resíduos da figura 42, foi verificado se os mesmos são provenientes de um modelo através do software SPSS. Os resultados foram:

Quadro 6: Resultados apresentados pelo SPSS.



Fonte: Criação própria.

A partir dos dados apresentados, se conclui de acordo com Miranda et al (2017) que os dados analisados são reconhecidos como modelo pois apresentam o intervalo que contém o zero, que está entre -0,8355 e 0,7984. A análise de normalidade da hipótese de Shapiro-Wilk foi positiva pois apresentou um resultado superior a 0,05 (para um nível de significância de 95%) que é parâmetro utilizado para rejeitar a hipótese nula.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo investigar a eficácia dos métodos geoestatísticos aplicado a previsão de vibrações, tendo em vista a necessidade de ter um método que faça uma melhor previsão das ondas provenientes do desmonte de rocha com o uso de explosivos.

Em virtude disso, foi elaborado um sistema em escala reduzida para se analisar a eficácia dos métodos de regressão e de krigagem ordinária. Executado os dois métodos, foi notado que ambas as técnicas de previsão apresentaram o intervalo de confiança centrado em zero e uma distribuição normal comprovada na hipótese de Shapiro-Wilk, superando 0,05. Porventura o método geoestatístico apontou uma menor variância na sua previsão, em uma diferença de 0,233 do método de regressão, o que nos dá a evidência de que esta ferramenta foi mais precisa para a previsão de vibrações vista neste trabalho.

A utilização da ferramenta geoestatística teve sua atuação mais efetiva nos testes realizados. À primeira vista, este método foi o mais favorável, porém é necessário uma série de estudos bem mais aprofundados para se ter uma porcentagem de eficiência no uso deste método aplicado a previsão de vibrações.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9653: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2005. 10 p.
- BACCI, D. L. C. **PRINCIPAIS NORMAS E RECOMENDAÇÕES EXISTENTES PARA O CONTROLE DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS PELO USO DE EXPLOSIVOS EM ÁREAS URBANAS – PARTE II**. Artigo na Revista Escola de Minas. Ouro Preto. 2003.
- BHANDARI, Sushil. **Engineering rock blasting operations**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. 400 p.
- CLARK, Isobel. **PRATICAL GEOSTATISTICS**. Londres: Applied Science Publishers, 1979. 129 p.
- COUCEIRO J., P. J. C. **Análisis Espectral de los Fenómenos Sísmicos Asociados a las Voladuras Subacuáticas**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Etsii Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.
- CORREA, Sonia Maria Barros Barbosa. **Probabilidade e Estatística**. 2. ed. Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003. 116 p.
- CORREIA, Pedro. **Modelo e Estimação: Uma introdução à geoestatística**. Núcleo de Minas do Instituto Superior, NUMIST. 2010, 80p.
- DARLING, Peter. **SME: MINING ENGINEERING HANDBOOK**. 3. ed. Estados Unidos: Society For Mining, Metallurgy, And Exploration, Inc., 2011. 1846 p.
- DOWDING, Charles H. **Blast Vibration Monitoring and Control**. Englewood Cliffs: Prentice-hall, Inc., 1985. 309 p.
- E-FISICA. Ensino de Física On-line. **Movimento Oscilatório**. (2007). [http://efisica.if.usp.br/mecanica/universitario/movimento\\_periodico/mov\\_oscilatorio/](http://efisica.if.usp.br/mecanica/universitario/movimento_periodico/mov_oscilatorio/). Acessado em 15 de março de 2017 – 09h horário local.
- ESPAÑA. UNIÓN ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS. **Manual de empleo de explosivos**. Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A., 1999. 236 p.

FALCO, Javert Guimarães. **Estatística Aplicada**. Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT, 2008. 92 p.

GUERRA, Pedro Alfonso. **Geoestatística operacional**. Brasília: Companhia Brasileira de Artes Gráficas, 1988. 145 p.

GUIMARÃES, Ednaldo Carvalho. **GEOESTATÍSTICA BÁSICA E APLICADA**. Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de estudos estatísticos e biométricos. 2004, 78p.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C.. **Econometria**. 5. ed. Cidade do México: Mcgraw-hill, 2010. 946 p.

GOMES, José Pedro Moreira Andrade. **METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESMONTES COM RECURSO A EXPLOSIVOS**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

GORKHALE, B. V. **Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines**. Londres: Balkema, 2010. 777 p.

GREGO, CÉLIA REGINA. EMBRAPA. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA: UMA INTRODUÇÃO. (20--).

[https://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/eventos/eventos-gerenciais/convencao-da-rede-agricultura-de-precisao-1/convencao-da-rede-de-agricultura-de-precisao1/Apresentacao\\_celia\\_geoestatistica.pdf/view](https://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/eventos/eventos-gerenciais/convencao-da-rede-agricultura-de-precisao-1/convencao-da-rede-de-agricultura-de-precisao1/Apresentacao_celia_geoestatistica.pdf/view).

Acessado em 28 de abril de 2017 – 13h horário local.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 2 - Gravitação, Ondas, Termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012. 352 p.

HAMMAN, Stratton O. et al. **BLASTING DAMAGE AND OTHER STRUCTURAL CRACKING: A GUIDE FOR ADJUSTERS AND ENGINEERS**. New York: American Insurance Services Group Inc., 1999. 71 p.

HUSTRULID, William. **Blasting principles for open pit mining**. Rotterdam: Balkema, 1999. 360 p.

JAIME RIOS VAZQUEZ, 1986, Orlando. **PROGRESS IN STUDYING LOW FREQUENCY VIBRATION WAVES CAUSED BY BLASTING**,2000. 9 p.

JIMENO, Carlos Lopez et al. **MANUAL DE PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS**. Madrid: Etimsa. Ctra. de Burgos, 2003. 464 p.

KLEN, André Monteiro. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS GERADAS EM DESMONTE DE ROCHA PELA DISPERSÃO DOS TEMPOS DE RETARDO UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO**. 2010. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

KONYA. **Manual de voladura**. 1985. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/341016617/manual-de-voladura-konya-pdf>. Acessado em 25 de março de 2017 – 08h horário local.

LANDIM P. M. B 2006. Sobre Geoestatística e mapas. Terra e Didática, 2 (1): 19-33.  
<http://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/CienciadoSolo/gepag/>  
. Acessado dia 07 de abril de 2017

MIRANDA, Vinicius Gouveia de et al. **A New Blast Vibrations Analysis Methodology**. Orlando, 2017, p. 12.

MIRANDA, Vinicius Gouveia de, curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, **Validação de modelos lineares: Uma análise residual**, 2016.

REIS, Pedro Alcides Santos. **Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmonte a Céu Aberto**. 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

REVUELTA, M. Bustillo; JIMENO, C. López. **Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras**. Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A., 1997.

RIBEIRO, Diniz Tamatini; ASSIS, Luiz Carlos de. **Geoestatística Aplicada à Modelagem Geológica**. Agência para o desenvolvimento Tecnológico da

Indústria Mineral Brasileira. Curso de aperfeiçoamento em exploração mineral. ADIMB,2007.

SANCHIDRIÁN, J. A.; MUÑIZ, E. **Curso de Tecnología de Explosivos**. Madrid: Fundación Gomez Pardo, 2000. 557 p.

RICHARDS, A. B.; MOORE, A. J. **BLAST VIBRATION COURSE: MEASUREMENT - ASSESSMENT - CONTROL**. Austrália, 2000.

SILVA, Tiago da Costa. **Avaliação da carga máxima por espera através de lei de atenuação visando à minimização de danos decorrentes das operações de desmonte de rochas nas escavações da Arena Pernambuco**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

SILVA-CASTRO, Jhon Jairo. **BLAST VIBRATION MODELING USING IMPROVED SIGNATURE HOLE TECHNIQUE FOR BENCH BLAST**. 2012. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, University Of Kentucky, Lexington, 2012.

SISKIND, D. E. et al. **Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting**. 1980, 84 p.

W3. Ensino de Geologia Ambiental. **Ondas Sísmicas**. (2000). [http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5\\_Sismos/52\\_Sismologia/5203\\_OndasSi smicas.html/](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5203_OndasSi smicas.html/). Acessado em 17 de março de 2017 – 11h horário local.

YAMANOTO, Jorge Kazuo; LANDIM, Paulo M. Barbosa. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 216 p.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – Dados tratados

Carga (Kg)	Distância (m)	PPV (mm/s)	SD	Log10 SD	LOG10 PPV	Modelo
1	1	1,7	1	0	0,230448921	modelo
1	1	2,2	1	0	0,342422681	modelo
1	1	3,6	1	0	0,556302501	modelo
1	1	1,4	1	0	0,146128036	modelo
1	1	2,7	1	0	0,431363764	modelo
1	1	4,3	1	0	0,633468456	modelo
1	1	3,2	1	0	0,505149978	modelo
1	1	3	1	0	0,477121255	modelo
1	1	2	1	0	0,301029996	modelo
1	1	5,5	1	0	0,740362689	validacao
2	1	2,2	0,707107	-0,150514998	0,342422681	modelo
2	1	3,8	0,707107	-0,150514998	0,579783597	modelo
2	1	8	0,707107	-0,150514998	0,903089987	modelo
2	1	3,2	0,707107	-0,150514998	0,505149978	modelo
2	1	2,9	0,707107	-0,150514998	0,462397998	modelo
2	1	5,8	0,707107	-0,150514998	0,763427994	modelo
2	1	3,1	0,707107	-0,150514998	0,491361694	modelo
2	1	4,4	0,707107	-0,150514998	0,643452676	modelo
2	1	8,2	0,707107	-0,150514998	0,913813852	modelo
2	1	5,3	0,707107	-0,150514998	0,72427587	validacao
2,5	1	6,9	0,632456	-0,198970004	0,838849091	modelo
2,5	1	6,2	0,632456	-0,198970004	0,792391689	modelo
2,5	1	2,4	0,632456	-0,198970004	0,380211242	modelo
2,5	1	5,3	0,632456	-0,198970004	0,72427587	modelo
2,5	1	5	0,632456	-0,198970004	0,698970004	modelo
2,5	1	5	0,632456	-0,198970004	0,698970004	modelo
2,5	1	4,4	0,632456	-0,198970004	0,643452676	modelo
2,5	1	7,8	0,632456	-0,198970004	0,892094603	modelo
2,5	1	4,4	0,632456	-0,198970004	0,643452676	modelo
2,5	1	3,7	0,632456	-0,198970004	0,568201724	validacao
1	2	2,2	2	0,301029996	0,342422681	modelo
1	2	2,4	2	0,301029996	0,380211242	modelo
1	2	3,3	2	0,301029996	0,51851394	modelo
1	2	1,9	2	0,301029996	0,278753601	modelo
1	2	3,6	2	0,301029996	0,556302501	modelo
1	2	5,2	2	0,301029996	0,716003344	modelo
1	2	5,6	2	0,301029996	0,748188027	modelo
1	2	2,5	2	0,301029996	0,397940009	modelo

1	2	3,5	2	0,301029996	0,544068044	modelo
1	2	1,9	2	0,301029996	0,278753601	validacao
2	2	2,5	1,414214	0,150514998	0,397940009	modelo
2	2	3	1,414214	0,150514998	0,477121255	modelo
2	2	1,8	1,414214	0,150514998	0,255272505	modelo
2	2	3	1,414214	0,150514998	0,477121255	modelo
2	2	3,2	1,414214	0,150514998	0,505149978	modelo
2	2	3,2	1,414214	0,150514998	0,505149978	modelo
2	2	1,5	1,414214	0,150514998	0,176091259	modelo
2	2	1,3	1,414214	0,150514998	0,113943352	modelo
2	2	1,6	1,414214	0,150514998	0,204119983	modelo
2	2	1,3	1,414214	0,150514998	0,113943352	validacao
2,5	2	1,5	1,264911	0,102059991	0,176091259	modelo
2,5	2	5	1,264911	0,102059991	0,698970004	modelo
2,5	2	2,3	1,264911	0,102059991	0,361727836	modelo
2,5	2	3	1,264911	0,102059991	0,477121255	modelo
2,5	2	3,1	1,264911	0,102059991	0,491361694	modelo
2,5	2	1,7	1,264911	0,102059991	0,230448921	modelo
2,5	2	2,9	1,264911	0,102059991	0,462397998	modelo
2,5	2	3,8	1,264911	0,102059991	0,579783597	modelo
2,5	2	2,5	1,264911	0,102059991	0,397940009	modelo
2,5	2	2,5	1,264911	0,102059991	0,397940009	validacao
1	3	1	3	0,477121255	0	modelo
1	3	3,7	3	0,477121255	0,568201724	modelo
1	3	3,4	3	0,477121255	0,531478917	modelo
1	3	1,1	3	0,477121255	0,041392685	modelo
1	3	1	3	0,477121255	0	modelo
1	3	4,3	3	0,477121255	0,633468456	modelo
1	3	6,5	3	0,477121255	0,812913357	modelo
1	3	2	3	0,477121255	0,301029996	modelo
1	3	3,4	3	0,477121255	0,531478917	modelo
1	3	1,5	3	0,477121255	0,176091259	validacao
2	3	1	2,12132	0,326606257	0	modelo
2	3	1,3	2,12132	0,326606257	0,113943352	modelo
2	3	1,7	2,12132	0,326606257	0,230448921	modelo
2	3	2,4	2,12132	0,326606257	0,380211242	modelo
2	3	2,5	2,12132	0,326606257	0,397940009	modelo
2	3	1,7	2,12132	0,326606257	0,230448921	modelo
2	3	3	2,12132	0,326606257	0,477121255	modelo
2	3	2,3	2,12132	0,326606257	0,361727836	modelo
2	3	2,7	2,12132	0,326606257	0,431363764	modelo
2	3	2,3	2,12132	0,326606257	0,361727836	validacao
2,5	3	5,5	1,897367	0,27815125	0,740362689	modelo
2,5	3	3	1,897367	0,27815125	0,477121255	modelo
2,5	3	2,1	1,897367	0,27815125	0,322219295	modelo

2,5	3	2,4	1,897367	0,27815125	0,380211242	modelo
2,5	3	6	1,897367	0,27815125	0,77815125	modelo
2,5	3	3	1,897367	0,27815125	0,477121255	modelo
2,5	3	3,1	1,897367	0,27815125	0,491361694	modelo
2,5	3	6,6	1,897367	0,27815125	0,819543936	modelo
2,5	3	6,4	1,897367	0,27815125	0,806179974	modelo
2,5	3	5,1	1,897367	0,27815125	0,707570176	validacao
1	6	4,2	6	0,77815125	0,62324929	modelo
1	6	3,8	6	0,77815125	0,579783597	modelo
1	6	4,4	6	0,77815125	0,643452676	modelo
1	6	3,4	6	0,77815125	0,531478917	modelo
1	6	4,7	6	0,77815125	0,672097858	modelo
1	6	2,7	6	0,77815125	0,431363764	modelo
1	6	3,7	6	0,77815125	0,568201724	modelo
1	6	2,9	6	0,77815125	0,462397998	modelo
1	6	3,8	6	0,77815125	0,579783597	modelo
1	6	3,6	6	0,77815125	0,556302501	validacao
2	6	3,6	4,242641	0,627636253	0,556302501	modelo
2	6	4,9	4,242641	0,627636253	0,69019608	modelo
2	6	3,4	4,242641	0,627636253	0,531478917	modelo
2	6	2,5	4,242641	0,627636253	0,397940009	modelo
2	6	2	4,242641	0,627636253	0,301029996	modelo
2	6	1,3	4,242641	0,627636253	0,113943352	modelo
2	6	1,9	4,242641	0,627636253	0,278753601	modelo
2	6	4,8	4,242641	0,627636253	0,681241237	modelo
2	6	3,1	4,242641	0,627636253	0,491361694	modelo
2	6	3,2	4,242641	0,627636253	0,505149978	validacao
2,5	6	2,7	3,794733	0,579181246	0,431363764	modelo
2,5	6	2,2	3,794733	0,579181246	0,342422681	modelo
2,5	6	2,7	3,794733	0,579181246	0,431363764	modelo
2,5	6	3,5	3,794733	0,579181246	0,544068044	modelo
2,5	6	0,8	3,794733	0,579181246	-0,096910013	modelo
2,5	6	2,8	3,794733	0,579181246	0,447158031	modelo
2,5	6	0,9	3,794733	0,579181246	-0,045757491	modelo
2,5	6	1,7	3,794733	0,579181246	0,230448921	modelo
2,5	6	3,1	3,794733	0,579181246	0,491361694	modelo
2,5	6	3,3	3,794733	0,579181246	0,51851394	validacao

## APÊNDICE B – Cálculo da Semivariância a partir das médias dos PPVs

SD	Média PV	$Y(1) = \frac{\sum(V_i - V)^2}{2N}$	$Y(2) = \frac{\sum(V_i - V)^3}{2N}$	$Y(3) = \frac{\sum(V_i - V)^4}{2N}$	$Y(4) = \frac{\sum(V_i - V)^5}{2N}$	$Y(5) = \frac{\sum(V_i - V)^6}{2N}$	$Y(6) = \frac{\sum(V_i - V)^7}{2N}$	$Y(7) = \frac{\sum(V_i - V)^8}{2N}$	$Y(8) = \frac{\sum(V_i - V)^9}{2N}$	$Y(9) = \frac{\sum(V_i - V)^{10}}{2N}$	$Y(10) = \frac{\sum(V_i - V)^{11}}{2N}$	$Y(11) = \frac{\sum(V_i - V)^{12}}{2N}$
0,632456	5,27	0,42	6,70	5,76	8,54	1,07	3,65	10,24	5,44444444	9	4,889012346	2,351111111
0,707107	4,62	3,78	3,08	5,19	0,15	1,60	6,53	2,85	5,548641975	2,454444444	0,790123457	1,18
1	2,68	0,04	0,11	2,42	0,46	0,37	0,07	0,17	0,142716049	1,114197531	1,42	
1,264911	2,87	0,27	1,87	0,24	0,64	0,00	0,36	0,04	0,751111111	2,09		
1,414214	2,34	3,57	1,02	0,08	0,35	0,01	0,51	1,93	1,49			
1,897367	4,23	0,77	4,69	1,69	3,87	1,39	0,25	1,52				
2	3,36	1,66	0,18	1,19	0,09	0,14	0,95					
2,12132	2,07	0,75	0,04	0,98	2,78							
3	2,93	0,44	0,01	0,64	1,05	0,33						
3,794733	2,27	0,62	2,15									
4,242641	3,06		0,99	1,01								
6	3,73	0,58										

DISTANCIAS	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	PONTO					SD	PPV		
P1	0,00	0,07	0,37	0,63	0,78	1,26	1,37	1,49	2,37	3,16	3,61	5,37	3,16					P1	0,63	5,27	
P2	0,07	0,00	0,29	0,56	0,71	1,19	1,29	1,41	2,29	3,09	3,54	5,29	3,09					P2	0,71	4,62	
P3	0,37	0,29	0,00	0,26	0,41	0,90	1,00	1,12	2,00	2,79	3,24	5,00	2,79					P3	1,00	2,68	
P4	0,63	0,56	0,26	0,00	0,15	0,63	0,74	0,86	1,74	2,53	2,98	4,74	2,53					P4	1,26	2,87	
P5	0,78	0,71	0,41	0,15	0,00	0,48	0,59	0,71	1,59	2,38	2,83	4,59	2,38					P5	1,41	2,34	
P6	1,26	1,19	0,90	0,63	0,48	0,00	0,10	0,22	1,10	1,90	2,35	4,10	1,90					P6	1,90	4,23	
P7	1,37	1,29	1,00	0,74	0,59	0,10	0,00	0,12	1,00	1,79	2,24	4,00	1,79					P7	2,00	3,36	
P8	1,49	1,41	1,12	0,86	0,71	0,22	0,12	0,00	0,88	1,67	2,12	3,88	1,67					P8	2,12	2,07	
P9	2,37	2,29	2,00	1,74	1,59	1,10	1,00	0,88	0,00	0,79	1,24	3,00	0,79					P9	3,00	2,93	
P10	3,16	3,09	2,79	2,53	2,38	1,90	1,79	1,67	0,79	0,00	0,45	2,21	0,00					P10	3,79	2,27	
P11	3,61	3,54	3,24	2,98	2,83	2,35	2,24	2,12	1,24	0,45	0,00	1,76	0,45					P11	4,24	3,06	
P12	5,37	5,29	5,00	4,74	4,59	4,10	4,00	3,88	3,00	2,21	1,76	0,00	2,21					P12	6,00	3,73	
PONTO	3,16	3,09	2,79	2,53	2,38	1,90	1,79	1,67	0,79	0,00	0,45	2,21	0,00					PONTO	3,79	3,3	
VARIOGRAMA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	mu					PONTO			
P1	0,17	0,22	0,40	0,55	0,63	0,85	0,89	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1					K1	1,00		
P2	0,22	0,17	0,35	0,51	0,59	0,82	0,86	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1					K2	1,00		
P3	0,40	0,35	0,17	0,33	0,42	0,69	0,74	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	1					K3	1,00		
P4	0,55	0,51	0,33	0,17	0,26	0,55	0,61	0,67	0,98	1,00	1,00	1,00	1					K4	1,00		
P5	0,63	0,59	0,42	0,26	0,17	0,46	0,52	0,59	0,95	1,00	1,00	1,00	1					K5	1,00		
P6	0,85	0,82	0,69	0,55	0,46	0,17	0,23	0,31	0,79	1,00	1,00	1,00	1					K6	1,00		
P7	0,89	0,86	0,74	0,61	0,52	0,23	0,17	0,24	0,74	0,99	1,00	1,00	1					K7	0,99		
P8	0,93	0,90	0,79	0,67	0,59	0,31	0,24	0,17	0,68	0,97	1,00	1,00	1					K8	0,97		
P9	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95	0,79	0,74	0,68	0,17	0,64	0,84	1,00	1					K9	0,64		
P10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,64	0,17	0,44	1,00	1					K10	0,17		
P11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84	0,44	0,17	0,98	1					K11	0,44		
P12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,17	1					K12	1,00		
PONTO	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0					mu	1,00		
INVERSA	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	mu					SOLUCAO	Krigagem	Solucao	
P1	-11,00	10,70	-0,06	-0,04	-0,07	-0,07	-0,03	0,02	0,19	0,02	0,15	0,19	0,16					K1	0,00	0,00	2,27
P2	10,70	-13,44	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,09	0,05	-0,01	0,01	0,01	0,01					K2	0,00	0,00	
P3	-0,06	2,75	-5,70	3,04	-0,01	0,00	0,00	-0,06	-0,04	0,05	0,01	0,03	0,02					K3	0,00	0,00	
P4	-0,04	0,00	3,04	-8,36	5,37	-0,01	0,00	0,01	-0,12	0,08	-0,01	0,03	0,02					K4	0,00	0,00	
P5	-0,07	0,00	-0,01	5,37	-6,97	1,68	0,00	0,00	-0,15	0,10	0,00	0,04	0,04					K5	0,00	0,00	
P6	-0,07	0,00	0,00	-0,01	1,68	-9,41	7,81	-0,01	-0,06	-0,09	0,11	0,04	0,04					K6	0,00	0,00	
P7	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	7,81	-14,40	6,61	0,01	-0,10	0,09	0,02	0,02					K7	0,00	0,00	
P8	0,02	-0,09	-0,06	0,01	0,00	-0,01	6,61	-7,43	0,95	-0,14	0,02	0,11	0,09					K8	0,00	0,00	
P9	0,19	0,05	-0,04	-0,12	-0,15	-0,06	0,01	0,95	-1,81	1,04	-0,21	0,15	0,12					K9	0,00	0,00	
P10	0,02	-0,01	0,05	0,08	0,10	-0,09	-0,10	-0,14	1,04	-2,70	1,70	0,05	0,07					K10	1,00	2,27	
P11	0,15	0,01	0,01	-0,01	0,00	0,11	0,09	0,02	-0,21	1,70	-2,11	0,24	0,16					K11	0,00	0,00	
P12	0,19	0,01	0,03	0,03	0,04	0,04	0,02	0,11	0,15	0,05	0,24	-0,92	0,24					K12	0,00	0,00	
PONTO	0,16	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02	0,09	0,12	0,07	0,16	0,24	-0,80					mu	0,00		