

**Geoestatística Aplicada ao Estudo de Vibrações  
Geradas por Desmontes de Rochas com Explosivos**

**PAULO JOSÉ COSTA COUCEIRO JÚNIOR  
VINICIUS GOUVEIA DE MIRANDA**

DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

ANÁLISE DE DADOS COM VARIABILIDADE ESPACIAL

PDEMGEO07

Docentes

Joaquim Eduardo Sousa Góis  
Jorge Manuel Cabral Machado de Carvalho

Porto, 2017

*(Página intencionalmente em branco)*

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>VIBRAÇÕES GERADAS POR DESMONTE DE ROCHAS.....</b>	<b>4</b>
2.1	DISTÂNCIAS ESCALONADAS OU REDUZIDAS.....	5
2.1.1	<i>Dispersão Estadística da Velocidade Pico de Partícula.....</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Tratamento Estatístico: Método de Regressão Linear.....</i>	<i>8</i>
<b>3</b>	<b>GEOESTATÍSTICA APLICADA AOS ESTUDO DAS VIBRAÇÕES.....</b>	<b>9</b>
3.1	VARIÁVEIS REGIONALIZADAS .....	9
3.2	O VARIOGRAMA .....	10
3.2.1	<i>Modelos e Propriedades do Variograma .....</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Anisotropias.....</i>	<i>13</i>
3.3	VARIOGRAMAS APLICADOS ÀS VIBRAÇÕES.....	13
3.3.1	<i>Considerações sobre Variogramas Associados às Vibrações.....</i>	<i>13</i>
3.3.2	<i>Efeito da Distribuição Espacial do Ponto de Detonação.....</i>	<i>14</i>
3.3.3	<i>Efeito da Carga Máxima Instantânea .....</i>	<i>17</i>
3.3.4	<i>Dificuldades e limitações .....</i>	<i>21</i>
3.3.5	<i>Variograma Parametrizado.....</i>	<i>21</i>
3.4	MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO KRIGAGEM .....	22
3.4.1	<i>Krigagem Ordinária.....</i>	<i>23</i>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>24</b>
4.1	PEDREIRA JURUAÇU, PERUS, SÃO PAULO – BRASIL.....	24
4.1.1	<i>Variogramas Experimentais .....</i>	<i>26</i>
4.1.2	<i>Leis de Atenuação.....</i>	<i>27</i>
4.1.3	<i>Construção de Isomapas de Vibrações .....</i>	<i>29</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>33</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A liberação abrupta de energia proveniente da detonação de cargas explosivas em desmonte de rochas e sua interação com o meio confinante podem ser percebidas através de uma sucessão de eventos físico-mecânicos. Uma destas manifestações – entre outras como a fragmentação, movimento do material fragmentado, ruído e calor, entre outros – se apresenta sob a forma de ondas de choque, que rapidamente se atenuam à um estado sísmico ou elástico de propagação, que se deslocam radialmente a partir do ponto de detonação.

As características das ondas sísmicas geradas por desmontes de rochas com explosivos podem ser extremamente complexas. Incorporam vários tipos de ondas – como as de corpo e superfície – e todas as classes de reflexões e refrações que podem ocorrer no interior dos meios de propagação que atravessam. Ainda assim, a onda resultante pode se tornar muito mais complexa. Na grande maioria dos desmontes de rochas, as cargas explosivas contidas nos furos são detonadas em uma sequência de tempos de retardo de milissegundos – com uma precisão que dependerá do tipo de detonador empregado – entre cada carga explosiva. Isto faz que haja diferenças bem marcadas nos tempos de chegada dos sinais sísmicos, solapando a chegada das frentes de ondas e, conseqüentemente, dos diferentes tipos de ondas contidas nos sinais individuais de cada um dos furos detonados.

Esta manifestação, em algumas circunstâncias, pode ocasionar danos a estruturas próximas ou outros incômodos; além de que, é causa permanente de conflitos com os habitantes que vivem nas zonas vizinhas a estas operações (Jimeno et al., 1995). Assim que, nos dias atuais, é inconcebível a realização de grandes projetos de engenharia – onde há zonas urbanizadas e/ou estrutura sensíveis presentes – sem a realização de trabalhos de caracterização de leis de atenuação do terreno, comportamentos anisotrópicos e um posterior controle dos níveis de vibrações obtidas das detonações (Couceiro, 2013).

Dada estas sensibilidades, um maior conhecimento sobre o efeito anisotrópico das vibrações é de grande importância no controle dos efeitos sísmicos gerados por desmonte de rochas. Sabe-se, por outro lado, que a geologia e as características geomecânicas do meio de propagação exercem uma grande influência em como as vibrações se atenuam ao longo da propagação das ondas sísmicas. Frequentemente se observa um comportamento anisotrópico ou heterogêneo da atenuação dependendo da direção de propagação analisada. Nesse sentido, a aplicação de técnicas de geoestatística na interpolação espacial do fenômeno vibratório pode lançar uma maior luz no entendimento anisotrópico da propagação das ondas sísmicas geradas por desmontes de rocha com explosivos.

## 2 VIBRAÇÕES GERADAS POR DESMONTE DE ROCHAS

A tarefa de realizar previsões sobre os níveis de vibrações produzidos por uma detonação a uma dada distância, em base aos fundamentos físicos do fenômeno vibratório originário de uma detonação, é extremadamente difícil devido a que os maciços rochosos não são constituídos por um meio elástico isotrópico perfeito (Persson et al., 1994). Entretanto, através de estudos específicos das vibrações é possível determinar, em termos estatísticos, as leis que governam a atenuação das ondas sísmicas no terreno estudado em distintos níveis de confiança. Entre várias técnicas disponíveis, como por exemplo o estudo de

ondas elementais, o uso de distâncias escalonadas ou reduzidas é frequentemente usada para estudar as leis de atenuações dominantes em uma determinada região do espaço estudado.

## 2.1 Distâncias Escalonadas ou Reduzidas

Durante os anos que se seguiram aos primeiros testes com explosões nucleares, investigadores do *Engineering Research Associates* (1952; 1953) aplicaram conceitos derivadas do teorema  $\pi$  de Buckingham, cuja ideia se baseia na análise adimensional dos parâmetros derivados do fenômeno (Langhaar, 1951), para estudar e modelar os fenômenos sísmicos associados às vibrações geradas pelos testes nucleares. Este teorema afirma que um parâmetro antecedente a outro pode ser elevado a qualquer potência, multiplicados entre si, ademais de que qualquer parâmetro possa ser considerado função de qualquer outro parâmetro adimensional (Dowding, 1985).

Em consequência da aplicação deste teorema, o conceito de distância escalonada foi estabelecido. Ambraseys e Hendron (1968) sugeriram utilizá-las em estudos de previsão de vibrações geradas por desmontes de rocha com uso de explosivos (Dowding, 1985). Assim, uma expressão para o estudo das leis de atenuação pode ser determinando através da seguinte relação:

$$\frac{PPV}{C} = K \left[ (\rho C^2)^{1/3} \frac{D}{Q^{1/3}} \right]^\beta \quad (2.1)$$

Onde  $K$  e  $\beta$  são constantes de ajuste estatístico;  $PPV$  é a velocidade pico de partícula;  $\rho$  e  $C$  são as densidades e velocidade sísmica do meio de propagação, respectivamente;  $D$  é distância entre o ponto de observação e a detonação; e  $Q$  é a carga máxima instantânea ou por retardo – que é tradicionalmente definida como aquela que detona dentro de uma janela de tempo de 8ms. Ademais, o parâmetro adimensional a direita da equação (2.2) é definida como Distância Escalonada:

$$SD = (\rho C^2)^{1/3} \frac{D}{Q^{1/3}} \quad (2.2)$$

O uso das distâncias escalonadas no processo estatístico de previsão dos níveis de vibração é indispensável, uma vez que se deseja avaliar os efeitos da abrupta liberação de energia do explosivo em um dado instante de tempo e distância da detonação.

Considerando, pois, que a variação das densidades e velocidades sísmicas nas rochas é praticamente nula frente a forte variação proporcionada pela distância e a energia liberada pelo explosivo (Dowding, 1985), se pode incorporar aquela pequena variação,  $\rho C^2$ , a constante  $K$ . Finalmente, a fórmula (2.1) pode ser escrita em um formato mais conhecido, como:

$$PPV = K \left[ \frac{D}{Q^{1/3}} \right]^\beta \quad (2.3)$$

Segundo Hendron e Ambraseys (1968), Dowding (1985), Villano e Charlie (1993) e outros autores, estes parâmetros produzem relaciones bastante consistentes (Silva-Castro, 2012).

Entretanto, a versão mais amplamente utilizada da distância escalonada tanto em análises, estudos e código de regulamentação é a sua forma quadrática, onde a relação distância carga se mantem através da raiz quadrada. Assim que

$$PPV = K \left[ \frac{D}{Q^{1/2}} \right]^{\beta} \quad (2.4)$$

A equação (2.4) é uma particularização da equação geral que se derivou da investigação de Nicholls et al. (1971), publicado no Bulletin 656 da *Bureau of Mines*, onde se apresentou os resultados obtidos das análises realizadas em 171 detonações em 26 pedreiras distintas nos EUA (Silva-Castro, 2012). De forma mais generalizada, autores como Attwell et al. (1965), Holmberg e Persson (1978), Shoop e Daemen (1983) estudaram os fenômenos sísmicos gerados por detonações através da análise estatística de regressão múltipla, com o qual, a seguinte formulação é apresentada:

$$PPV = K \cdot Q^{\alpha} \cdot D^{\beta} \quad (2.5)$$

Onde os coeficientes  $K$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidos empiricamente através de ensaios *in situ*.

### 2.1.1 Dispersão Estadística da Velocidade Pico de Partícula

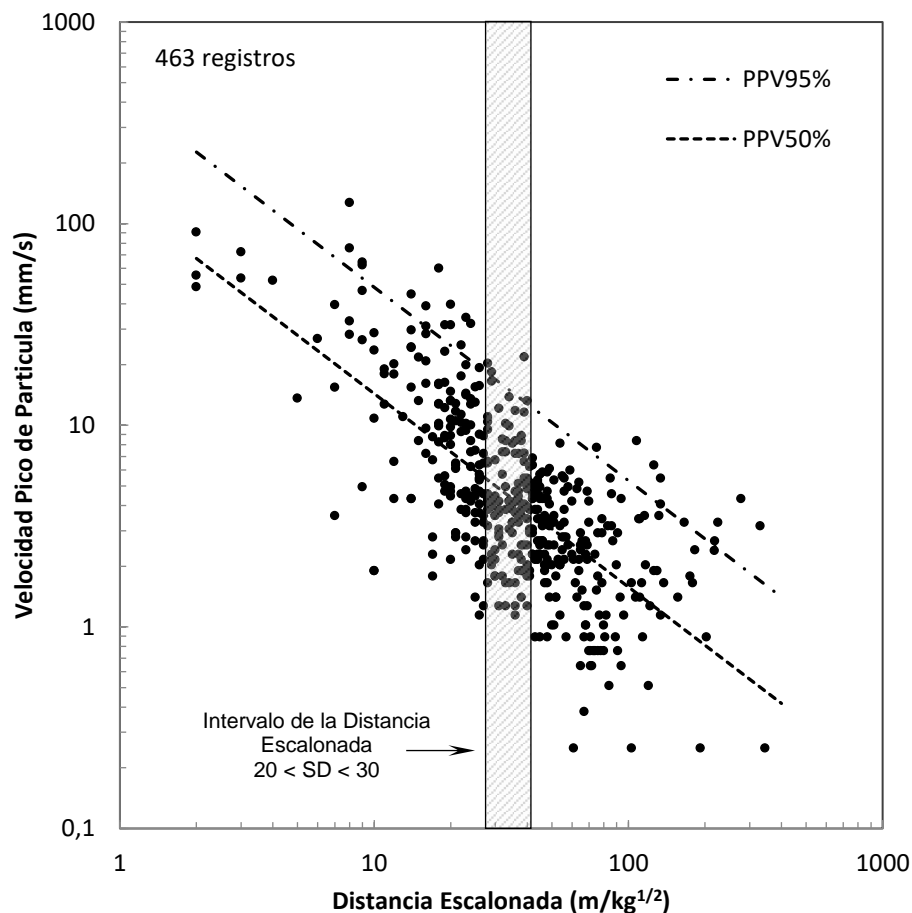
Um estudo para determinar a lei de atenuação das amplitudes das vibrações geradas por desmonte de rochas com explosivos em um determinado terreno acarreta, entre outras coisas, a compilação e posterior manipulação estatística dos dados coletados experimentalmente. A análise de uma coleção ou população de dados – pares de distâncias escalonadas e sua respectiva velocidade pico de partícula – resulta numa boa representação da dispersão sobre a linha média de regressão (Dowding, 1985).

A dispersão das velocidades pico de partículas observados em uma dada distancia escalonada é o resultado de uma complexa combinação de fatores que favorecem a variação dos resultados médios esperados. Esta variação é dependente de parâmetros controláveis e não controláveis tais como: condições geológicas, distintos tipos de explosivos e geometria e cargas, distintos tipos de ondas sísmicas geradas, geometria de fogo, confinamento e sequencia de iniciação, ademais de erros de medição e dispersão dos tempos dos detonadores (Holmberg et al., 1984; Dowding, 1985).

De forma muito evidente, a grande dispersão dos pares de pontos – distância escalonada quadrática e velocidade pico de partícula representados na **Figura 2.1**–, coletados durante 463 detonações na fase inicial das obras de escavação para a construção do terceiro jogo de eclusas do Canal de Panamá, demonstra o efeito da dispersão na análise de obtenção das leis de atenuação do terreno. Muitos fatores contribuem para este nível de dispersão, uma vez que distintos explosivos, diagramas de fogo, zonas de monitoramento, sequência de iniciação, etc. foram utilizados durante estas detonações (Couceiro, 2013).

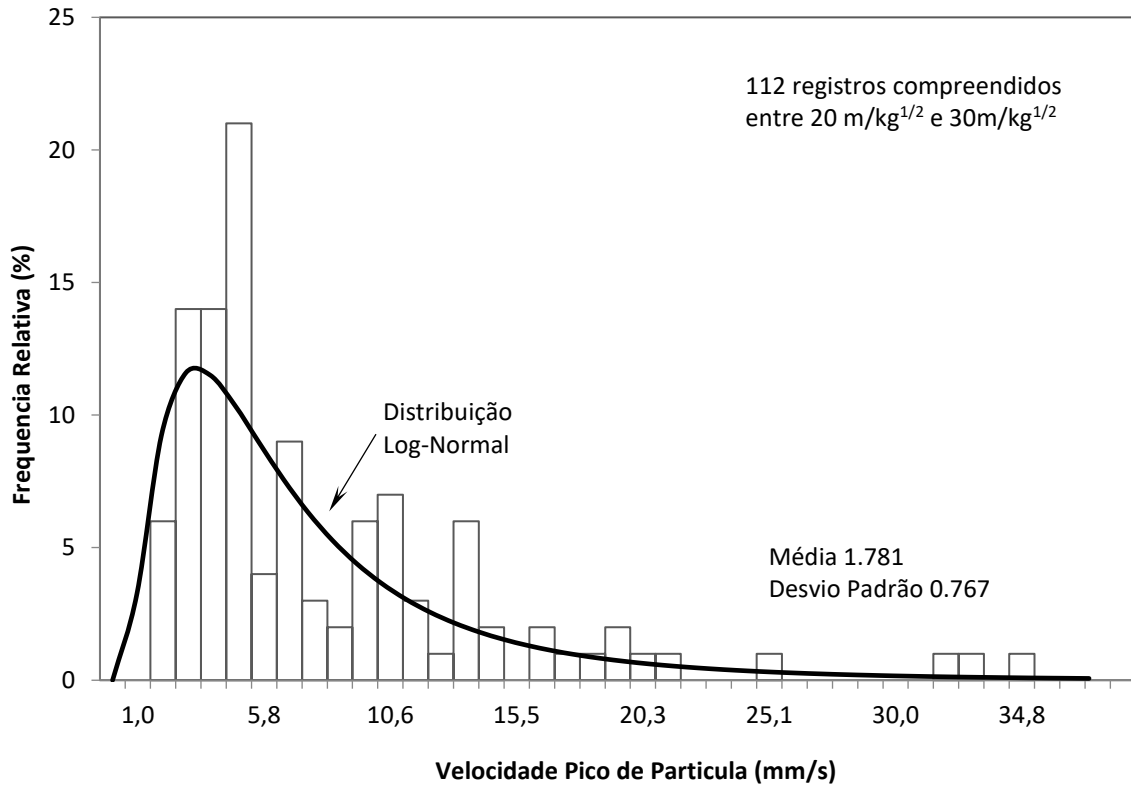
Quando se estuda a probabilidade de ocorrência da velocidade pico de partícula em uma dada distância escalonada – resultante da combinação de cargas, distâncias e propriedades elásticas do médio de propagação – observamos que os resultados se acomodam mais

confortavelmente como uma distribuição log-normal (Dowding, 1985). Na **Figura 2.2** se apresentam as ocorrências relativas das velocidades pico de partícula para uma distância escalonada quadrática de  $25 \text{ m/kg}^{1/2} \pm 5$ . Pode-se apreciar a acomodação da frequência relativa de ocorrência dos valores de velocidade pico de partículas em uma distribuição log-normal.



**Figura 2.1.** Variação das velocidades pico de partículas nas obras de escavação para a construção do terceiro jogo de eclusas do Canal de Panamá (Couceiro, 2013).

Uma vez entendida a natureza da dispersão do fenômeno vibratório, uma importante conclusão emerge; a que a dispersão pode ser prevista e estar sujeita ao controle (Konya e Walter, 1990). Nesta mesma linha, Holmberg et al. (1984) afirmam que a dispersão tem que ser considerada quando se deseja prever os possíveis níveis das amplitudes das vibrações para uma dada distância escalonada. Por conseguinte, o nível de confiança é uma decorrência da nuvem de dispersão dos dados estudados; logo, as leis de atenuação obtidas nas análises destes dados podem ser representadas em diversos níveis de confiança. Normalmente, o de 50% provem da regressão linear por mínimos quadrados e os níveis de maior confiança, 84% ou 95%, por exemplo, provem do incremento das unidades dos desvios padrão que se incluem ao desvio de 50%.



**Figura 2.2.** Distribuição das velocidades pico de partículas entre as distâncias escalonadas  $20 < D/Q^{1/2} < 30$  (Couceiro, 2013).

### 2.1.2 Tratamento Estatístico: Método de Regressão Linear

Uma vez de posse do conjunto de dados experimentais resultantes de uma série de detonações, se procede ao tratamento estatístico necessário para calcular a lei de atenuação correspondente. Uma regressão linear – normalmente calculada através do método dos mínimos quadrados – sobre os logaritmos das velocidades pico de partículas e distância escalonadas é aplicada com o fim de obter os parâmetros de ajuste da equação matemática que representa o modelo de previsão dos níveis de vibrações de um desmonte de rochas com o uso de explosivos.

A fim de exemplificar a aplicação do método dos mínimos quadrados, tomar-se-á como base a forma mais comum da equação que define estatisticamente a lei de atenuação:

$$PPV = K[SD]^{\beta} \quad (2.6)$$

Onde  $PPV$  é a velocidade pico de partícula;  $SD$  é a distância escalonada selecionada para a análise;  $K$  e  $\beta$  são constantes oriundas do ajuste linear obtido da análise de regressão e que representam as propriedades elásticas do meio, geometria do fogo, sequência de iniciação, entre outros.

Logo, ao tomar o logaritmo de ambos lados da equação (2.6), observamos que a equação resultante pode ser representando em uma reta



$$\log PPV = \log K + \beta \log SD \quad (2.7)$$

Onde  $\beta$  é a pendente da linha e  $\log K$  é o ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas. Assim, a pendente da reta vem dada pela tangente do ângulo de inclinação

$$\beta = \tan \theta \quad (2.8)$$

Que para uma quantidade  $n$  de dados, pode-se escrever como:

$$\beta = \frac{\sum(\log SD)(\log PPV) - \frac{\sum \log SD \sum \log PPV}{n}}{\sum(\log SD)^2 - \frac{(\sum \log SD)^2}{n}} \quad (2.9)$$

Onde o coeficiente  $\beta$  é sempre negativo quando as distâncias escalonadas são orientadas do menor para o maior, ou seja, da esquerda para a direita no eixo das abscissas.

Por outro lado, a constante  $K$  vem como consequência de fazer que  $\log SD = 0$ , que significa dizer que  $SD = 1$ . Logo

$$K = \exp\left(\frac{\sum \log \hat{u}}{n} - \beta \frac{\sum \log SD}{n}\right) \quad (2.10)$$

A lei de atenuação ou propagação com 50% de confiança do projeto em análise pode ser obtida rapidamente com este procedimento. Se adicionalmente calculamos o desvio padrão, se pode ajustar a lei obtida para atender outros níveis de confiança, como podem ser os de 84% ou 95%.

### 3 GEOESTATÍSTICA APLICADA AOS ESTUDO DAS VIBRAÇÕES

#### 3.1 Variáveis Regionalizadas

Segundo Yamamoto e Landim (2013), Matheron define uma variável regionalizada como qualquer função numérica com uma distribuição espacial que varia de um lugar para outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função determinística. Quer dizer, uma variável regionalizada tem por função caracterizar as fenomenologias associadas a uma distribuição particular no espaço através de variáveis que dependam de um valor e de sua posição espacial. Por outro lado, Journel e Huijbregts, (1978) ainda acrescentam que o entendimento de uma variável regionalizada como uma variável distribuída no espaço é puramente descritiva e não envolve qualquer interpretação probabilística.

A aplicação da teoria das variáveis regionalizadas é vasta e não está restrita ao campo da mineração. A extensão deste conceito em outros campos de estudo é frequentemente observada, como por exemplo, a densidade populacional no campo da demografia ou a medida de índices de chuvas em pluviometria, entre outras (Journel e Huijbregts, 1978). No caso das respostas sísmicas geradas por desmontes de rocha com o uso de explosivos, como pode ser a amplitude de vibração ou a velocidade pico de partícula, não é diferente. As variáveis intrínsecas que caracterizam as vibrações podem ser entendidas como uma variável que apresenta uma regionalização transitória.

O caráter transitório da variável regionalizada associada às vibrações geradas por desmontes está intimamente relacionada ao seu caráter temporal. Esse caráter se deve à deformação elástica sofrida pelo meio de propagação como resultado de um fenômeno físico temporal e transitório, resultante da passagem de ondas sísmicas geradas pela detonação da carga explosiva. Assim, a variável regionalizada assumirá uma propriedade característica e não permanente em um determinado ponto do espaço.

Tomando a velocidade pico de partícula como a propriedade regionalizada resultante das vibrações, ter-se-ia que sua amplitude em um ponto  $x_1$  do espaço é a realização particular de uma variável aleatória  $Z(x_1)$  definida no ponto  $x_1$ . De tal modo, denomina-se função aleatória  $Z(x)$  o conjunto de amplitudes de vibração  $Z(x)$  para todos os pontos  $x$  pertencentes ao espaço regionalizado. Segundo Yamamoto e Landim (2013), a interpretação probabilística de uma variável regionalizada, como realização particular de certa função aleatória  $Z(x)$ , terá um significado operacional quando for possível inferir toda ou parte da lei de probabilidades que define essa função aleatória na sua totalidade.

Neste sentido, o estudo e a representação das propriedades estruturais das variáveis regionalizadas para a resolução de problemas de estimativa através de métodos de interpolação, como a Krigagem, é o principal objetivo da teoria das variáveis regionalizadas. Para tanto, um processo de modelagem representativo do fenômeno estrutural sob estudo, capaz de representar a correlação dos valores no domínio considerado, é necessário. Assim que o variograma surge como uma ferramenta fundamental para o estudo das variáveis regionalizadas.

### 3.2 O Variograma

O conhecimento quantitativo da correlação espacial de um fenômeno regionalizado é de fundamental importância no entendimento e descrição de suas propriedades ao longo do espaço estudado. Sua quantificação pode ser desenvolvida através de variogramas (Huijbregts, 1975; Yamamoto e Landim, 2013), que são funções que descreve o grau de dependência espacial de um campo espacial aleatório ou processo estocástico  $Z(x)$ .

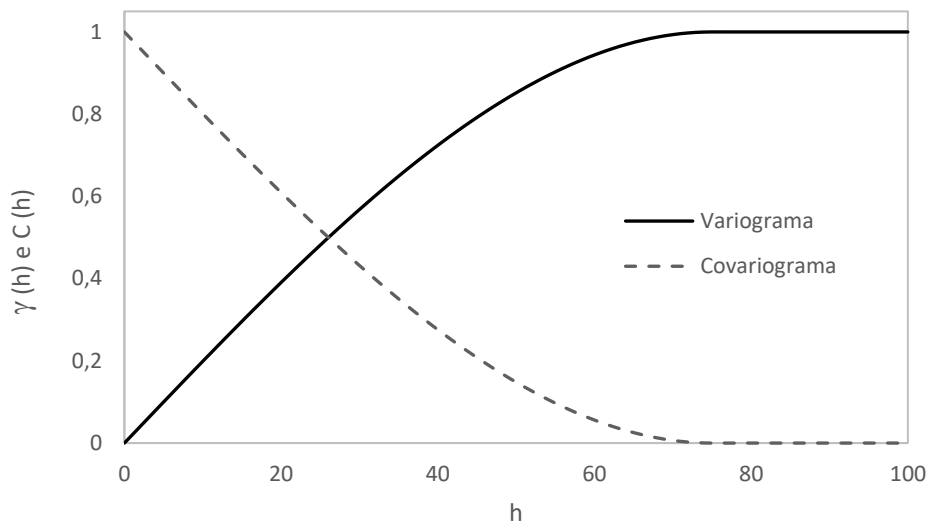
A definição clássica da função variograma  $2\gamma(h)$  é aquela da esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores associados à variável regionalizada em pontos específicos no espaço separadas por uma distância  $h$ , conforme a seguinte expressão:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (3.1)$$

Entretanto, sua forma mais maleável em termos computacionais, assume

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (3.2)$$

Onde  $2\gamma(h)$  é a função variograma,  $n$  é o número de pares de pontos separados por uma distância  $h$ ,  $Z(x)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $x$  e  $Z(x+h)$  é o valor da variável regionalizada no ponto  $(x+h)$ . A distância  $h$  pode estar associada, ademais, com uma direção específico, transformando-se assim em um vetor  $\mathbf{h}$ , com direção e longitude definidos. Por outro lado, os termos semivariograma e variograma são usados frequentemente de forma intercambiada. Por definição,  $\gamma(h)$  é o semivariograma, sendo  $2\gamma(h)$ , portanto, chamado de variograma. Entretanto, neste texto se adotará o termo variograma para referir-se a  $\gamma(h)$ .



**Figura 3.1:** Relação entre as funções variograma e covariância.

De forma similar ao variograma, pode-se definir a função covariância  $C(h)$  dos valores assumidos pela variável regionalizada em pontos específicos no espaço separados por uma distância  $h$ . Entretanto, a aplicação de variogramas nos cálculos de interpolação por meio de Krigagem é preferível à covariância, devida a uma maior estabilidade estatística (imparcial e consistente). A relação entre ambas funções pode ser estabelecida ao aplicar algumas propriedades estatísticas, chegando, pois, à seguinte expressão:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (3.3)$$

Se espera que a variância das diferenças nos valores da variável regionalizada entre pontos muito próximos seja pequena, uma vez que estes valores devem ser muito próximos um do outro. Igualmente, a grandes distâncias, se espera uma menor correlação entre os valores da variável regionalizada e, portanto, uma maior variância.

Em condições reais de aplicação, normalmente se define o variograma segundo uma direção predefinida, estabelecendo um caráter vetorial tanto às distâncias  $h$  quanto à correlação das propriedades regionalizadas (Yamamoto e Landim, 2013).

### 3.2.1 Modelos e Propriedades do Variograma

Os modelos teóricos de variogramas são ferramentas fundamentais para calcular os valores correspondentes às correlações espaciais a uma dada distância do espaço em estudo, os quais são necessários para complementar o sistema de equações de Krigagem. O variograma deve ser representada por uma função matemática contínua devido a necessidade de representar a correlação espacial existente em qualquer ponto do espaço regionalizado, permitindo o cálculo correspondente ao valor de  $\gamma(h)$  para uma determinada distância  $h$ , fato que não necessariamente é possível através de variogramas experimentais, por apresentar certa variabilidade, dispersão e/ou descontinuidades.

Uma grande diversidade de modelos de variogramas teóricos podem ser encontrados na literatura relacionada. Dependendo da natureza da variável regionalizada que se propõe a representar, um determinado modelo de variograma torna-se mais adequado que outros. Contudo, entre tantos modelos disponíveis, os que comuns são:

$$\text{Esférico:} \quad \gamma(h) = C_o + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{para } h < a$$

$$\gamma(h) = C_o + C \quad \text{para } h \geq a$$

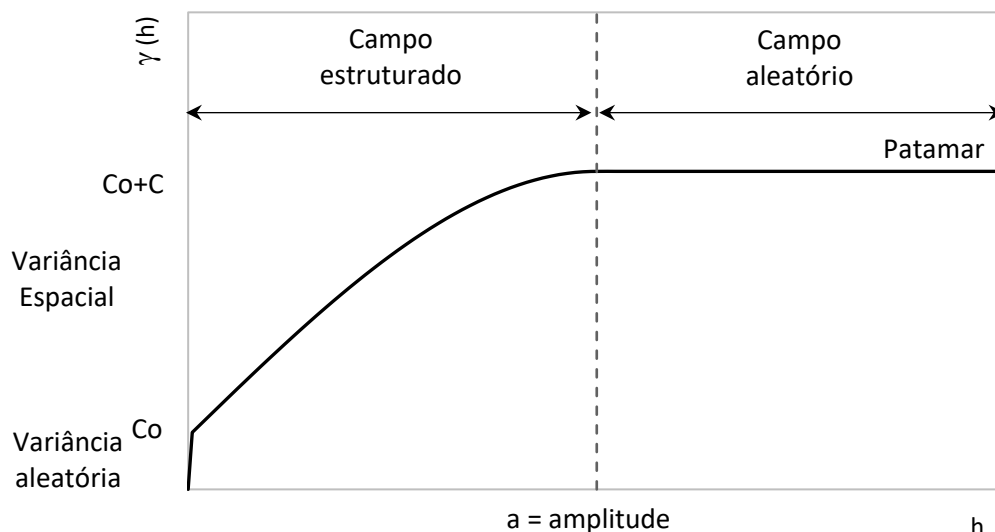
$$\text{Gaussiano:} \quad \gamma(h) = C_o + C \left[ 1 - \exp \left( -\frac{h^2}{a^2} \right) \right]$$

$$\text{Linear:} \quad \gamma(h) = C_o + ah$$

Onde  $\gamma(h)$  é a função variograma;  $h$  é a distância;  $C$  é o patamar;  $C_o$  é o efeito pepita; e  $a$  é a amplitude.

A interpretação do variograma permite obter parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas. As principais propriedades do variograma, que podem ser vistas na **Figura 3.2**.

A amplitude  $a$  é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes; representa, por outro lado, uma área de influência onde se reflete o grau de homogeneização entre os pontos georreferenciados. Quanto maior a amplitude, ou seja, maior a área de influência, maior será o alcance da correlação entre pontos georreferenciados. Outro parâmetro é o Patamar, que é definido como o valor de variância no qual o variograma se estabiliza. Entretanto, existem variogramas que não existe patamar, pois a correlação entre os pontos georreferenciados existem infinitamente, ou pelo menos, em todos os pontos amostrados. O efeito pepita, por outro lado, é o valor da função variograma na origem,  $h = 0$ . É de se esperar que duas amostras tomadas no mesmo ponto ou muito próximas uma da outra,  $h \sim 0$ , gerassem o mesmo valor da função  $\gamma(h)$ . Entretanto, dada a variabilidade do fenômeno estudado, ou mesmo erros de amostragem ou análise, pode-se obter valores diferentes de zero para o efeito pepita.



**Figura 3.2:** Principais propriedades típicas de um variograma

### 3.2.2 Anisotropias

Os variogramas determinadas ao longo de diferentes direções do espaço regionalizado podem mostrar variações distintas devido à anisotropia. A anisotropia pode ser classificada em três tipos: (a) geométrica: quando a amplitude varia com a distância, mas sem sofrer mudanças no patamar; (b) zonal: quando o patamar se mantém constante enquanto a amplitude varia com a direção; normalmente se observa tal fenômeno quando se trabalha com um conjunto de dados que atravessam vários estratos geológicos; e (c) mista: quando tanto o patamar quanto a amplitude variam com a direção.

### 3.3 Variogramas Aplicados às Vibrações

É de fundamental importância compreender o comportamento físico e estatístico das vibrações produzidas por desmontes de rochas com explosivos na construção de variogramas. Neste sentido, se abordaram duas possíveis técnicas de construção de variogramas a partir de um conjunto de dados regionalizados transitórios, ou seja, velocidades pico de partículas, sendo definidos como Variograma de Referência Normalizado e Variograma Parametrizado.

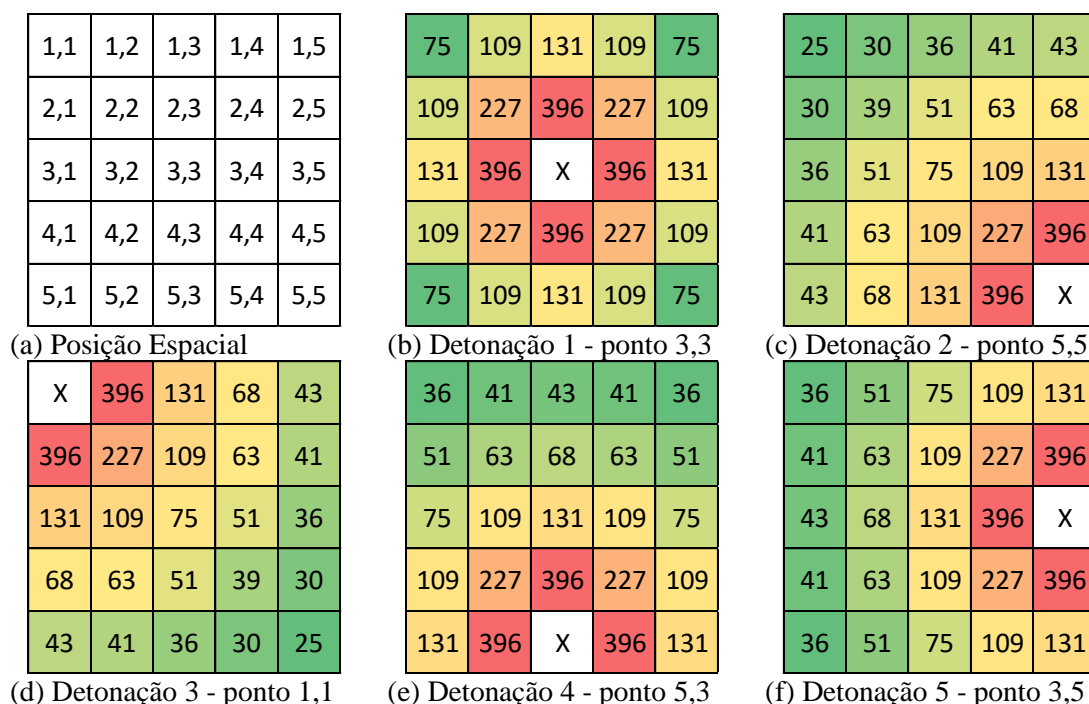
#### 3.3.1 Considerações sobre Variogramas Associados às Vibrações

Quando disparadas cargas explosivas em um desmonte de rochas, a contribuição efetiva à energia sísmica liberada na detonação pode ser percebida através da carga máxima instantânea. Portanto, para uma dada carga máxima instantânea georreferenciada, esperaria-se que as amplitudes das vibrações geradas atenuassem a medida em que as ondas sísmicas se propagassem radialmente a partir do ponto de detonação. Como resultado, os pontos georreferenciados de monitoramento sismográfico registrariam velocidades de partículas proporcionais à carga máxima instantânea e inversamente proporcional à distância do ponto de detonação. Assumindo essa velocidade pico de partícula como uma propriedade transitória regionalizada associada àquela carga máxima instantânea, poder-se-ia aplicar conceitos geoestatísticos para prever uma velocidade de partícula em outro ponto do espaço não conhecido a priori.

Ao analisar a correlação das variáveis regionalizadas oriundas das vibrações geradas por desmontes de rocha por explosivos em uma direção determinada, em um meio isotrópico, ter-se-ia um variograma resultante não limitado por um patamar. Isso significa que  $\gamma(h)$  incrementa continuamente, marcando uma diferença fundamental entre o variograma e a covariância. Esta última só existe para variáveis estacionárias e limitadas por um patamar (Armstrong, 1998). Tal comportamento sugere o uso modelos de variogramas não limitados, tais como linear ou exponencial, por exemplo, ou combinações lineares de modelos de variograma onde se permita um ajuste mais fino para distâncias pequenas e não limitados para maiores distâncias. Modelos que não atingem o patamar, e continuam aumentando enquanto a distância aumenta, são utilizados para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão (Camargo, 1998).

### 3.3.2 Efeito da Distribuição Espacial do Ponto de Detonação

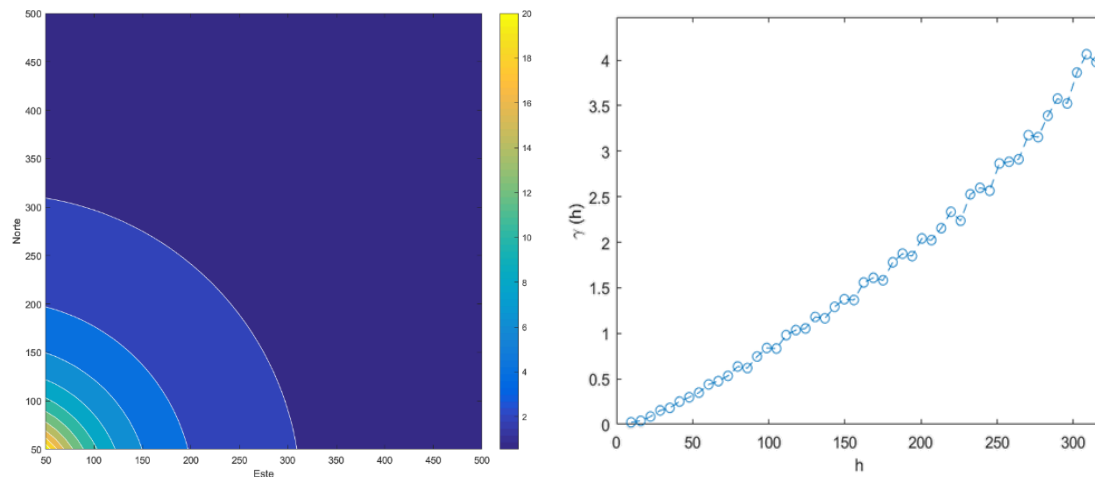
Por outro lado, a clara dependência da amplitude assumida pelas variáveis regionalizadas transitórias nos pontos de monitoramento sismográfico com a distância à detonação e sua carga máxima, torna a tarefa de construção de variogramas experimentais bastante complexa. Ao contemplar um conjunto de dados oriundos de várias detonações – de distintas localizações e cargas máximas –, é de se esperar que em um ponto específico do espaço se observe distintos valores de amplitude. Tal comportamento de dependência pode ser apreciado em um simples exemplo, onde o meio de propagação é homogêneo e isotrópico, como o mostrado na **Figura 3.3**.



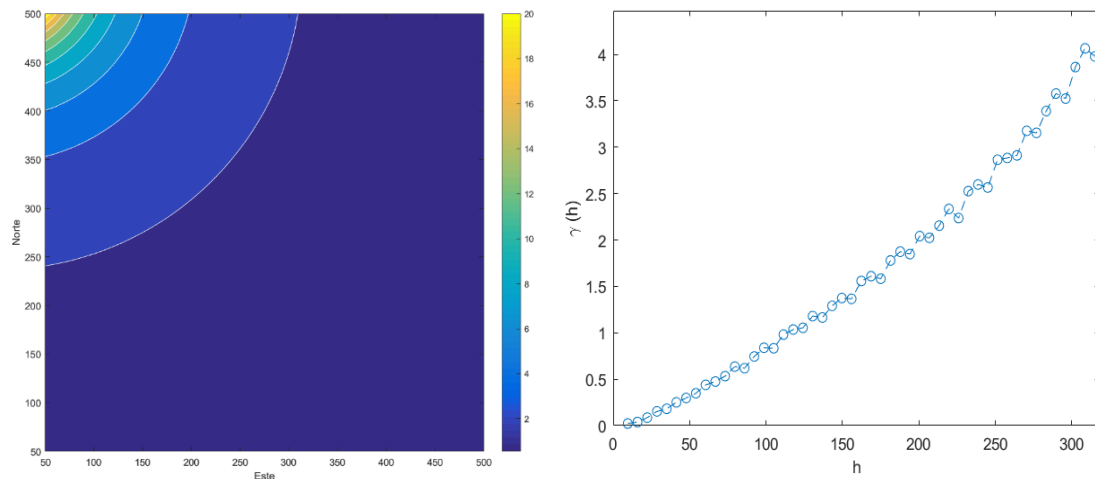
**Figura 3.3:** Exemplo da dependência dos valores assumidos pela variável regionalizada das vibrações (velocidade pico de partícula) para detonações de 25kg disparadas em distintas posições.

Se apresentam simulações das vibrações geradas por 5 detonações localizações nas posições (1,1), (3,3), (3,5), (5,3) e (5,5), ambas com uma carga máxima instantânea de 25kg.

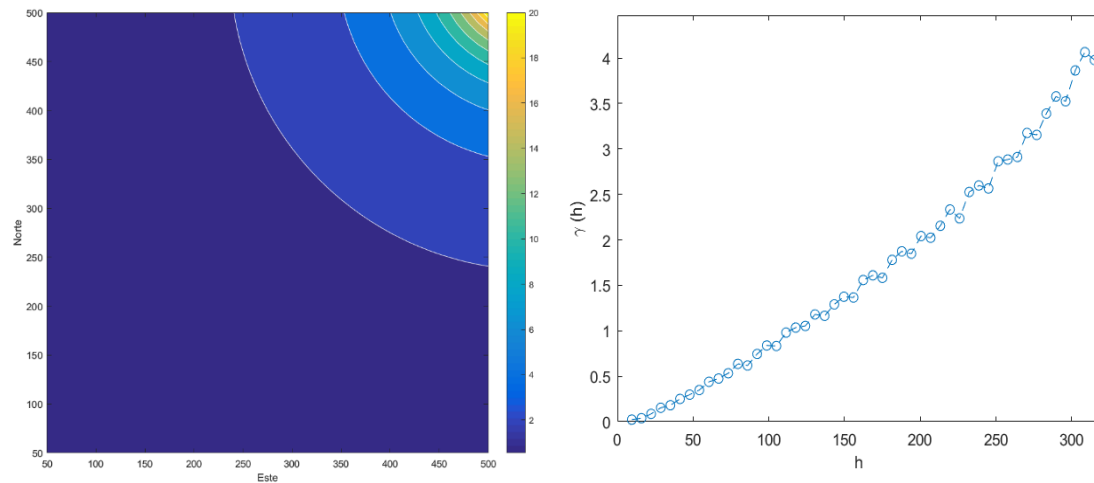
Cada posição georreferenciada apresenta distintos valores para a velocidade pico de partícula devido a sua distância ao ponto de origem da liberação da energia sísmica. Ao comparar as vibrações geradas no ponto (1,3) para cada uma das cinco simulações, se percebe que os valores assumidos como variáveis regionalizadas são 131 mm/s, 36 mm/s, 131 mm/s, 43 mm/s e 75mm/s para as detonações 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Assim que a realização de um variograma sobre o conjunto de todas essas detonações geraria um comportamento aleatório nos valores de  $\gamma(h)$  à medida em que se varia a distância  $h$ . Neste sentido, a construção de variogramas sobre uma população de dados oriundos de várias detonações deve ser realizada com precaução, usando técnicas especiais para compensar ou incluir o efeito da localização do disparo da carga explosiva.



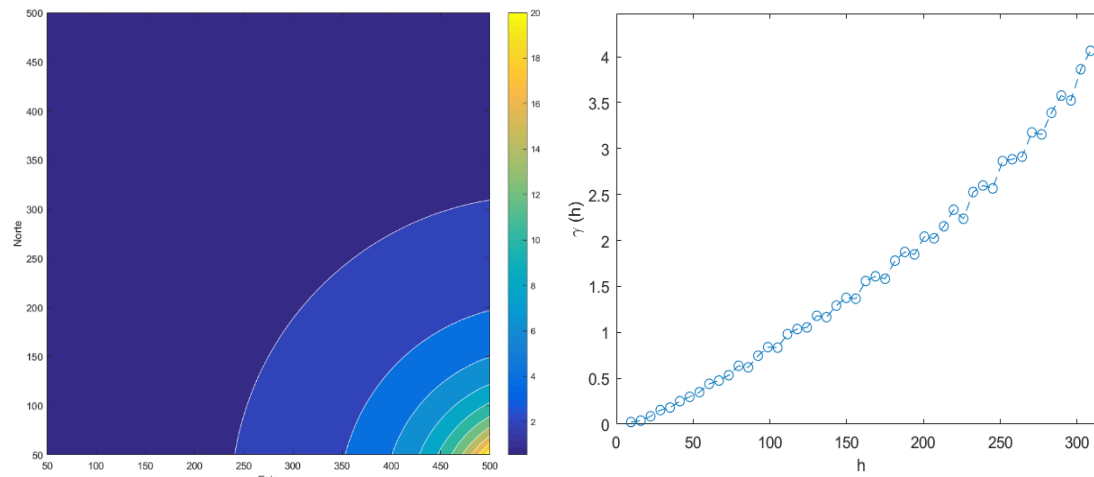
(a) Isomapa de vibrações (mm/s) e seu correspondente variograma para uma detonação localizada nas coordenadas (0,0) e com MIC de 25kg.



(b) Isomapa de vibrações (mm/s) e seu correspondente variograma para uma detonação localizada nas coordenadas (0,550) e com MIC de 25kg.



(c) Isomapa de vibrações (mm/s) e seu correspondente variograma para uma detonação localizada nas coordenadas (550,550) e com MIC de 25kg.



(d) Isomapa de vibrações (mm/s) e seu correspondente variograma para uma detonação localizada nas coordenadas (550,0) e com MIC de 25kg.

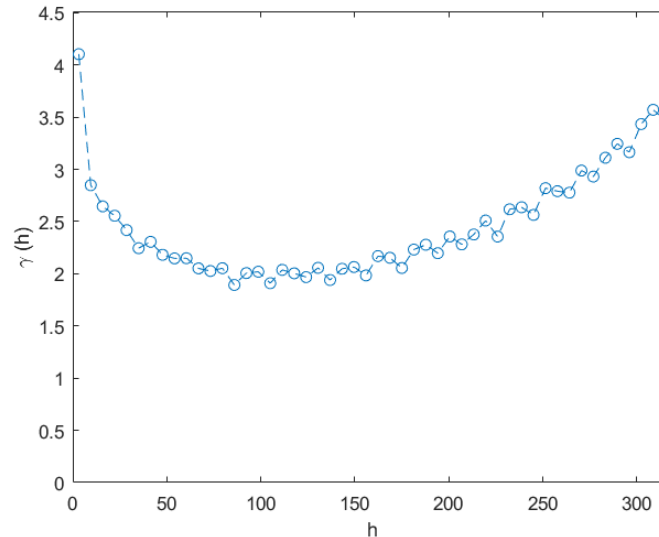
**Figura 3.4:** Representação de isomapas de vibração para quatro detonações simetricamente distribuídas por um espaço homogêneo e isotrópico, e seus correspondentes variogramas.

Com o ânimo de exemplificar estas ideias, se apresentam os resultados de quatro detonações geradas artificialmente. Cada detonação foi realizada em uma localização simétrica com relação a outra, como se pode observar nos isomapas da **Figura 3.4**. Por simplicidade, se assume que o terreno ou meio de propagação é homogêneo e isotrópico, obtendo em consequência, uma atenuação simétrica para cada uma das quatro detonações. Fica evidente, ademais, que os variogramas correspondentes a cada detonação são idênticos, como esperado. Essa igualdade de variogramas é o resultado da propagação das ondas sísmicas geradas por detonações simetricamente distribuídas no espaço estudado, em um meio isotrópico e homogêneo.

Entretanto, ao coletar vibrações reais em um programa de estudo de vibrações geradas por desmontes de rochas com explosivos, dispor-se-ia normalmente de uma coleção de dados oriundas de detonações localizadas em distintas posições do espaço georreferenciado. Assim, uma pergunta de interesse seria: que aspecto teria um variograma calculado



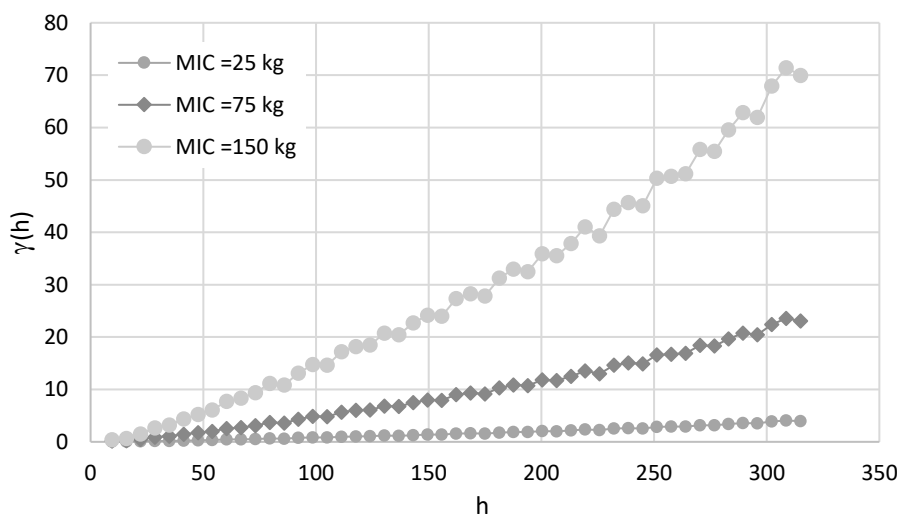
sobre toda a população de dados? Dada a variabilidade do valor assumido pela variável regionalizada em um ponto específico do espaço, oriunda de cada detonação, se obtém um variograma tal como o representado na **Figura 3.5** **Figura 3.9**. Espera-se, pois, um efeito similar ao “efeito pepita”, inviabilizando uma correta interpolação dos fenômenos sísmicos originados por um desmonte de rocha com o uso de explosivos em caso de aplicação de métodos de Krigagem.



**Figura 3.5:** Variograma combinado dos quatro desmontes apresentados.

### 3.3.3 Efeito da Carga Máxima Instantânea

Ao realizar as simulações do exemplo anterior para outras duas cargas máximas, a saber 75kg e 150kg, e calcular os variogramas correspondentes, se obtém os resultados apresentados na **Figura 3.6**. O efeito de proporcionalidade entre os três variogramas é evidente. Tal comportamento sugere que a quantidade de energia liberada pela detonação, ou seja, a carga máxima instantânea, é proporcional à escala do variograma. É de se esperar, entretanto, que o grau de diferença de escala entre ambos variogramas seja proporcional aos coeficientes de atenuação das amplitudes das ondas sísmicas e as correspondentes cargas máximas instantâneas.



**Figura 3.6:** Variogramas para cargas de 25kg, 75kg e 150kg.

No caso de se assumir a carga máxima de referência  $Q_{ref}$ , do qual se origina o variograma correspondente, chamado de “variograma de referência”, pode-se estabelecer um procedimento de proporcionalidade com o fim de gerar um variograma específico para uma outra carga máxima instantânea  $Q_i$  em base ao variograma de referência.

Uma vez que se obtém um variograma tipo, para uma carga máxima de referência  $Q_{ref}$ , se pode ajustar seus valores através de um fator de ajuste estatístico para obter o variograma respectivo a uma carga máxima distinta,  $Q_i$ . Como a função variograma  $2\gamma(h)$  é definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância  $h$ , o coeficiente de ajuste entre dois variogramas oriundos de duas cargas máximas distintas é definido como a razão entre as velocidades de pico de partículas geradas por cada uma das cargas máximas ao quadrado, tal como

$$A_i = \left( \frac{PPV_i}{PPV_{ref}} \right)^2 \quad (3.4)$$

Uma vez que se conhece as propriedades estatísticas do conjunto de dados experimentais de um estudo de vibrações, seria possível conhecer a lei de atenuação correspondente, que adotaria a seguinte forma para o caso de uma distância escalonada quadrática:

$$PPV_{ref} = K \left( \frac{D}{\sqrt{Q_{ref}}} \right)^\beta \quad (3.5)$$

Ao escrever a equação (3.5) para uma carga máxima distinta  $Q_i$ , se obtém como consequência

$$PPV_i = K \left( \frac{D}{\sqrt{Q_i}} \right)^\beta \quad (3.6)$$

Como trata-se de uma lei de atenuação válida para a mesma direção, as propriedades estatísticas dos fatores de ajuste do modelo, como a constante  $K$  e  $\beta$ , se mantem as mesmas para ambos casos. Logo, ao dividir a equação (3.6) por (3.5)

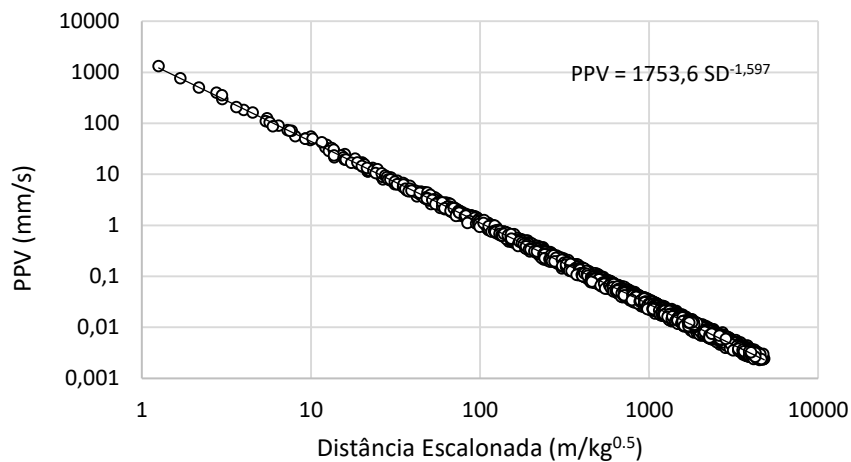
$$A_i = \left( \frac{PPV_i}{PPV_{ref}} \right)^2 = \left[ \frac{K \left( \frac{D}{\sqrt{Q_i}} \right)^\beta}{K \left( \frac{D}{\sqrt{Q_{ref}}} \right)^\beta} \right]^2 = \left( \frac{Q_{ref}}{Q_i} \right)^\beta \quad (3.7)$$

Podemos concluir que o fator de multiplicação é função apenas das cargas máxima relativas e o coeficiente da lei de atenuação. Ao expandir a equação (3.7) para o caso geral, onde os parâmetros da carga e da distância sejam variáveis independentes, tais como  $PPV = K \cdot Q^\alpha \cdot D^\beta$ , podemos escrever que

$$A_i = \left( \frac{Q_{ref}}{Q_i} \right)^{2\alpha} \quad (3.8)$$

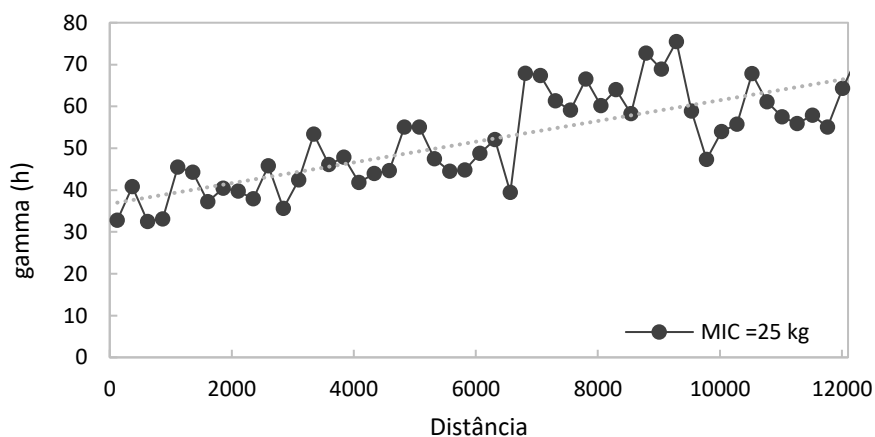
Como se pode verificar, para o caso de uma distância escalonada quadrática, as relações entre  $\alpha$  e  $\beta$  são predefinidas como  $\alpha = \beta/2$ , e para a distância escalonada cúbica, de  $\alpha = \beta/3$ .

Tomemos desta vez um alinhamento de pontos de monitoramento sismográfico georreferenciados, com o qual se pretende observar o efeito da carga máxima instantânea na morfologia dos variogramas para uma mesma direção. Assim que se construiu uma distribuição de velocidades pico de partículas artificiais gerada por distintas cargas máximas instantâneas, a saber de 25kg, 75kg e 150kg, sobre esse alinhamento de pontos, com distâncias entre 10 e 15.000m. Como resultado dessa distribuição artificial, se obtém sua correspondente lei de atenuação (**Figura 3.7**).



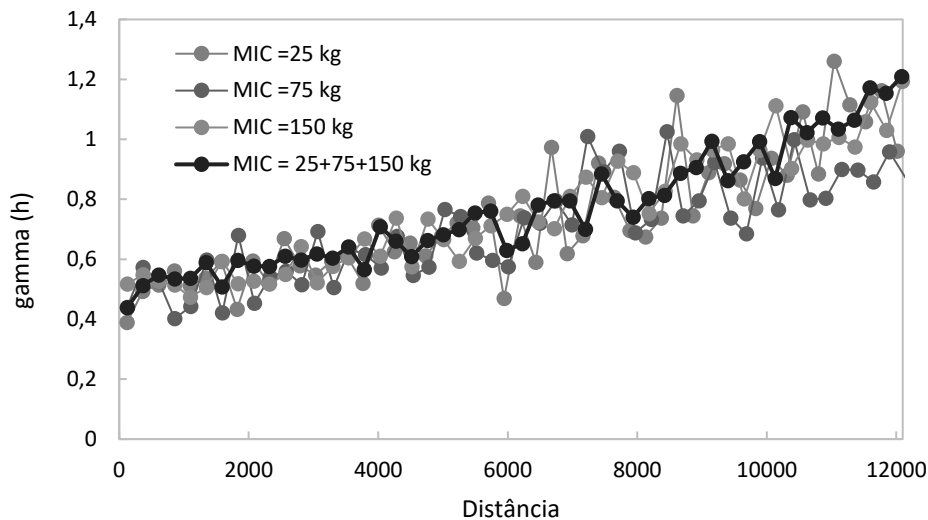
**Figura 3.7:** Lei de atenuação artificial usada para calcular variogramas para distintas cargas máximas.

Baseando-se neste conjunto de dados artificiais, se obtém o variograma correspondente a um desmorte com 25kg de carga máxima instantânea, tal como pode ser apreciado **Figura 3.8**. Se pode observar a mesma tendência de um variograma sem a presença de um patamar definido. Tal comportamento é esperado ao considerar o comportamento físico e estatístico do fenômeno de atenuação das amplitudes de vibração geradas por um desmorte de rocha.



**Figura 3.8:** Variograma para uma carga máxima de 25kg.

Ao simular detonações para as demais cargas máximas instantâneas, tais como 75kg e 150kg, e calcular seus correspondentes variogramas individuais, ademais do variograma do conjunto de dados combinados (25, 75 e 150kg), e dividi-los pela variância correspondente, se observa a tendência de se obter um variograma normalizado comum (**Figura 3.9**).



**Figura 3.9:** Variogramas individuais e normalizados pela variância da velocidade pico de partícula para cargas máximas de 25, 75 e 150kg e para um conjunto combinado das mesmas.

Tal variograma normalizado é definido como:

$$\gamma_n(h) = \frac{\gamma(h)}{\sigma^2} \quad (3.9)$$

Onde  $\gamma_n(h)$  é o variograma normalizado;  $\sigma^2$  é a variância dos dados regionalizados; e  $\gamma(h)$  é o variograma de referência.

Em termos morfológicos, a influência de escala sugere que a estimação de um ponto utilizando dois variogramas semelhantes, diferenciando-se unicamente em sua escala, geram dois valores muito similares, mas diferentes quanto as suas correspondes variâncias de Krigagem (Revuelta e Lopez Jimeno, 1997).

Finalmente, uma vez exposto o comportamento de escala e semelhança dos variogramas quando normalizados pela variância dos dados, pode-se estabelecer uma relação geral para a construção de variogramas específicos para qualquer carga máxima instantânea. Logo, a relação entre o variograma de referência normalizado e o variograma desejado assume a seguinte forma:

$$\gamma_i(h) = \sigma_n^2 \left( \frac{Q_n}{Q_i} \right)^{2\alpha} \gamma_n(h) \quad (3.10)$$

Onde  $\gamma_i(h)$  é o variograma associado a carga máxima  $Q_i$ ;  $\gamma_n(h)$  é o variograma normalizado pela  $\sigma_n^2$ , associado à carga máxima instantânea normalizada  $Q_n$ ;  $\alpha$  é o coeficiente

de atenuação obtido pelo cálculo da lei de atenuação;  $\sigma_n^2$  é a variância obtida sobre a população original de dados usadas para calcular o variograma de referência.

### 3.3.4 Dificuldades e limitações

Uma dificuldade patente neste método é a necessidade de dispor de uma grande quantidade de dados experimentais para realizar o ajuste do variograma experimental. Na prática, não é comum dispor de um número suficiente de sismógrafos para registrar uma quantidade aceitável de leituras experimentais para calcular um variograma experimental. Uma alternativa poderia ser a realização de distintos disparos com a mesma carga máxima instantânea e medir as vibrações sempre nos mesmos pontos georreferenciados, ou muito próximos entre si. Outra possibilidade seria aumentar a disponibilidade de pontos àqueles medidos experimentalmente com a inclusão de pontos artificiais, sempre quando as inclusões desses pontos experimentais não alterem significativamente as propriedades estatísticas originais dos dados experimentais em cada ponto georreferenciado de monitoramento sismográfico.

### 3.3.5 Variograma Parametrizado

Dado que dispor de uma quantidade suficiente de dados experimentais para cada carga máxima instantânea localizadas em uma mesma ou similares localizações é extremamente difícil, apresenta-se como alternativa a opção de trabalhar sobre distâncias parametrizadas, ou seja, distâncias escalonadas. Tal estratégia permite incrementar fortemente a quantidade de dados disponíveis para a construção do variograma. Entretanto, a localização espacial do conjunto de dados experimentais é fundamental para a definição da direção regionalizada em questão.

As localizações dos pontos regionalizadas, quando analisadas sob a ótica das distâncias escalonadas, são funções unicamente da relação entre a distância euclidiana entre a detonação e os pontos de monitoramento sismográfico e carga máxima instantânea do desmonte em questão. Cada ponto georreferenciado passa a ser localizado através da distância escalonada correspondente a este ponto. Isso significa que as velocidades pico de partícula em que se estrutura a construção do variograma são dependentes de uma regionalização parametrizada.

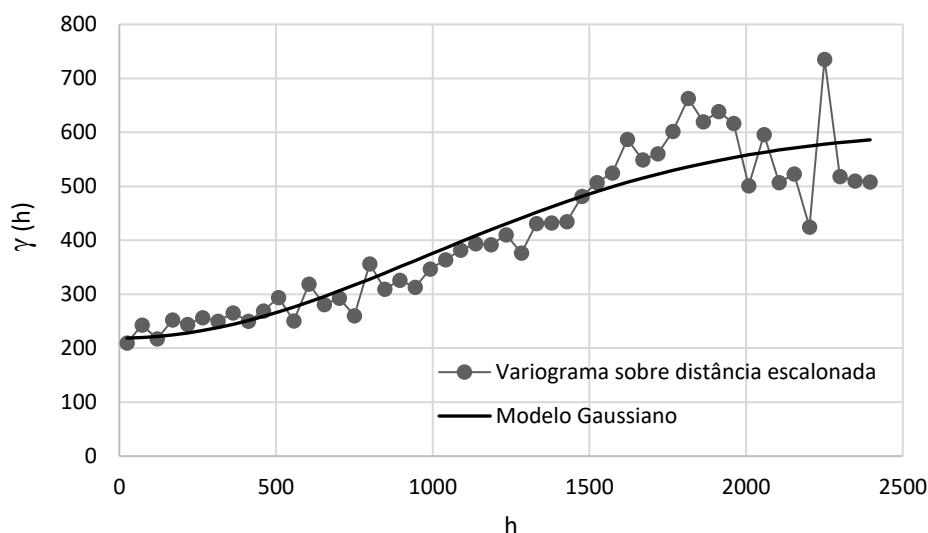
Para uma correta aplicação de variogramas parametrizados, torna-se necessária a correspondente parametrização da região espacial com a carga máxima instantânea correspondente. Como consequência, devem-se transformar as coordenadas dos pontos georreferenciadas para coordenadas parametrizadas. Partindo da distância Euclidiana entre a detonação e o ponto de monitoramento, que pode ser escrita através da seguinte equação:

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2} \quad (3.11)$$

Onde  $D_i$  é a distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitoramento;  $x_i$  e  $y_i$  são as coordenadas dos pontos de monitoramento;  $x_B$  e  $y_B$  são as coordenadas do ponto de detonação. E da distância escalonada  $SD$ , que é definida como uma relação entre a distância Euclidiana e a carga máxima instantânea  $Q$ , onde para uma relação quadrática, a distância escalonada forma a seguinte forma

$$SD_i^{x,y} = \frac{D_i}{\sqrt{Q_i}} \quad (3.12)$$

Portanto, dada esta definição, um variograma construído sobre a base de distâncias escalonadas necessita ser aplicado sobre uma base de coordenadas parametrizadas, tal como definida por (3.12).



**Figura 3.10:** Variograma calculado sobre as distâncias escalonadas correspondentes as cargas máximas de 25, 75 e 150kg, sobre esse alinhamento de pontos, com distâncias entre 10 e 15.000m e o correspondente ajuste de um modelo Gaussiano.

Tomando o mesmo exemplo do alinhamento de pontos de monitoramento sísmográfico georreferenciados, para dados artificiais gerados para cargas máximas instantâneas de 25kg, 75kg e 150kg, se procede ao cálculo das distâncias escalonadas correspondentes a cada um dos pontos georreferenciados. Em seguida, se pode estabelecer o variograma parametrizado correspondente, tal como ilustrado na **Figura 3.10**. Observando o modelo resultante, a presença de um patamar parece ser evidente, um comportamento não observado quando se calcula o variograma sobre as posições georreferenciadas diretamente. Entretanto, um estudo do comportamento anisotrópico dos variogramas parametrizados é necessário para uma correta interpolação dos valores regionalizados em um ponto do espaço. Sua correta implementação no método de Krigagem deve ser estudada futuramente.

### 3.4 Método de Interpolação Krigagem

A Krigagem é um método regressão usado comumente em geoestatística para interpolar linearmente pontos regionalizados no espaço. O termo foi cunhado pela escola francesa de geoestatística em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano e pioneiro na aplicação de técnicas estatísticas em avaliação mineira, Daniel G. Krige (Yamamoto e Landim, 2013). A diferença básica entre a Krigagem e outros métodos de interpolação é a forma como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. O processo é similar ao de interpolação por média móvel ponderada, no entanto, aqui os pesos são determinados pela análise espacial baseada no variograma experimental (Camargo, 1998).

A Krigagem é um método de estimação linear que permite o cálculo de um atributo não conhecido em um ponto do espaço regionalizado em base a uma ponderação de valores que conhecidos de sua vizinhança. O cálculo desses valores de ponderação, ou pesos, se realizam ao minimizar a condição de variância, significando que, embora possam existir diferenças ponto a ponto entre o valor medido e o estimado, essas diferenças devem ser mínimas. Logo

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x)[Z(x_i) - m(x_i)] \quad (3.13)$$

Onde  $Z^*(x)$  é o valor estimado;  $m(x)$  é a média do atributo  $z(x)$ ; e  $\lambda_i(x)$  são os pesos a serem determinados no processo de cálculo. Dessa forma, o objetivo é determinar os pesos de Krigagem  $\lambda_i(u)$ , tal que:

$$\sigma^2(u) = Var\{Z^*(u) - Z(u)\} \quad (3.14)$$

Essa variância deve ser minimizada sob a condição de não-tendenciosidade.

### 3.4.1 Krigagem Ordinária

A Krigagem Ordinária é necessária quando se pretende estimar um valor ou atributo regionalizado em um determinado ponto do espaço baseando-se em valores conhecidos em sua vizinhança, mas sem conhecer a média estacionária  $m$ . Assim, o estimador da Krigagem Ordinária, como resultado de uma combinação linear dos pesos dos valores conhecidos de sua vizinhança, é definido como:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3.15)$$

Onde  $Z^*(x_0)$  é o atributo estimado no ponto  $x_0$  como o resultado da combinação linear dos pesos  $\lambda_i$  associados aos atributos conhecidos  $Z(x_i)$  nos pontos  $x_i$ .

Portanto, ao minimizar a condição de variância com a restrição de que a somatória dos pesos seja unitária, pode-se estabelecer o sistema de equações necessárias que definem a Krigagem Ordinária, tal como

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

Que em sua forma matricial, assume a seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \cdots & \gamma_{1,n} & 1 \\ \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} & \cdots & \gamma_{2,n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n,1} & \gamma_{n,2} & \cdots & \gamma_{n,n} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{0,1} \\ \gamma_{0,2} \\ \vdots \\ \gamma_{0,n} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

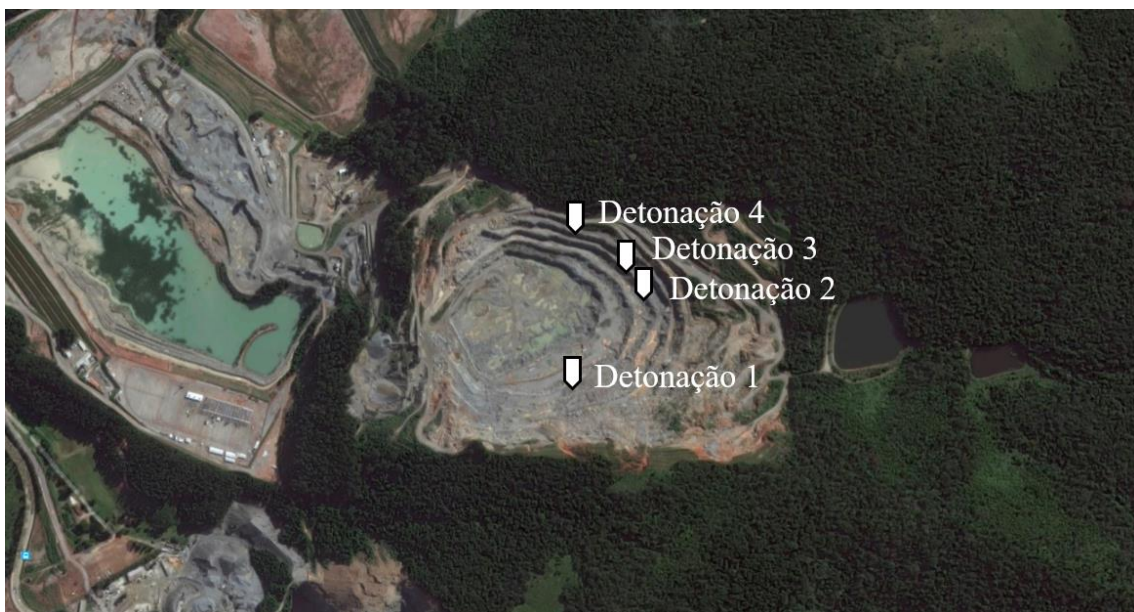
Onde  $\lambda_n$  são os pesos a serem assignados aos valores de dados e  $\mu$  o parâmetro de Lagrange;  $\gamma_{n,n}$  são os valores da função gama do variograma entre os pontos conhecidos do espaço regionalizado e  $\gamma_{0,n}$  são os valores da função gama do variograma entre os pontos conhecidos e o ponto a estimar.

## 4 ESTUDO DE CASO

Com o intuito de estudar a aplicação dos conceitos geoestatísticos desenvolvidos neste trabalho, realizou-se a coleta de campanhas sismográficas de detonações publicadas no meio acadêmico com o intuito de reestudados sob a ótica da geoestatística. Neste sentido, se apresenta uma reanálise do caso da Pedreira Juruáçu, em São Paulo, Brasil (Canedo, 2013).

### 4.1 Pedreira Juruáçu, Perus, São Paulo – Brasil

O estudo publicado por Canedo (2013) sobre a construção de isomapas de vibrações resultantes de uma campanha sismográfica realizada na Pedreira Juruáçu, localizada em São Paulo, Brasil (**Figura 4.1**), é reestudado com o intuito de verificar alguns dos conceitos desenvolvidos neste trabalho. Uma das maiores vantagens deste estudo foi o uso de ao menos 20 sismógrafos distribuídos em distintas direções em cada uma das quatro detonações realizadas.



**Figura 4.1:** Imagem aérea da Pedreira Juruáçu, São Paulo, Brasil, e as localizações dos quatro desmontes.

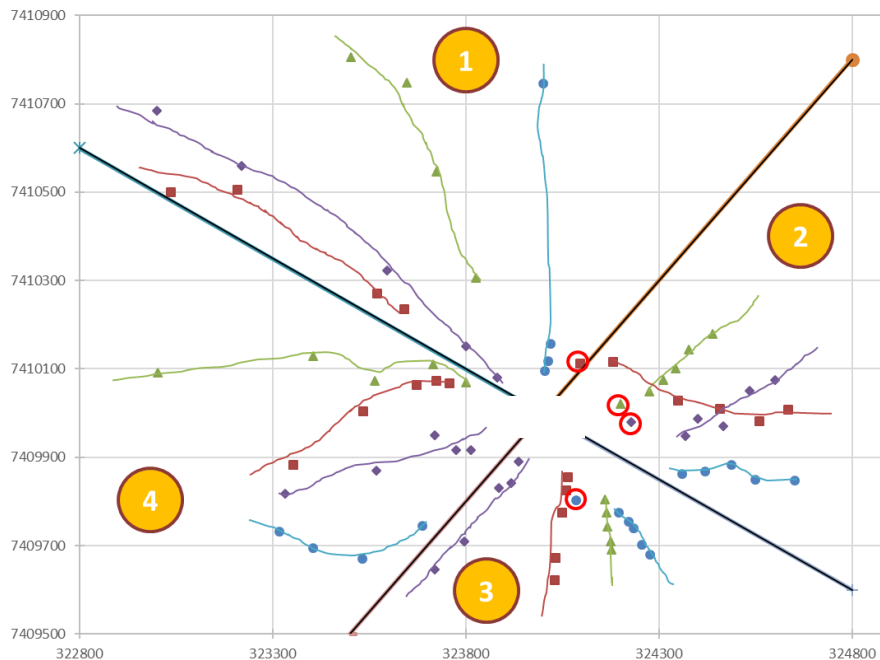


Quatro detonações com configurações geométricas similares foram executadas e devidamente monitoradas. Como consequência, os consumos específicos e cargas máximas instantâneas foram da mesma ordem de grandeza, ainda que as diferenças nas cargas máximas instantâneas joguem um papel fundamental na ponderação de energia sísmica liberada pela detonação. Por outro lado, tal como comenta Canedo (2013), pôde-se perceber que as detonações foram sequencias e realizadas na mesma bancada (cota), das quais 3 estiveram mais próximas umas das outras e uma mais distante, contornando a bancada, quase meia cava de distância (**Figura 4.1**). Um resumo dos dados das detonações é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos Desmontes

Nº do Desmorte	Fogo 1	Fogo 2	Fogo 3	Fogo 4
Q (kg)	90	102	98	98
PF (kg/m <sup>3</sup> )	0,986	0,970	1,031	0,997
Malha (m x m)	2,80 x 2,60	2,80 x 2,50	2,80 x 2,50	2,80 x 2,50
Alt. Banco (m)	10,5	12,3	12	11,5

Quatro alinhamentos específicos nas direções Norte, Leste, Sul e Oeste foram estabelecidos para cada detonação (**Figura 4.2**). Observou-se que a escolha das distâncias ou posições de cada sismógrafo em referência à posição da detonação não foram otimizadas para obter as melhores relações estatísticas para as análises de vibração. Segundo Canedo (2013), dificuldades para instalar os sismógrafos em determinadas localizações foram uma das razões. Ainda assim, os resultados experimentais coletados dispõem de grande relevância devido ao fato de dispor de 20 sismógrafos para cada uma das detonações. Um total de 76 monitoramentos foram realizados, dos quais, 3 registros com vibrações inferiores a 0.40 mm/s foram eliminados neste trabalho, restando 73 registros.



**Figura 4.2:** Representação dos pontos de monitoramento sísmográfico nos respectivos quadrantes. Os pontos marcados com um círculo vermelho são as localizações das detonações.

#### 4.1.1 Variogramas Experimentais

Os variogramas foram calculados em base aos dados sismográficos obtidos durante a campanha sismográfica. Entretanto, devido à pouca quantidade de dados disponíveis para realizar o cálculo dos variogramas experimentais, se simularam um adicional de 100 dados sismográficos artificiais para cada um dos pontos de monitoramento experimental disponível. Tal artifício permitiu a ampliação dos dados sísmicos de 76 a 7676 pontos, dos quais 7600 são artificiais. Os dados artificiais foram gerados através de números aleatórios com propriedades estatísticas similares aos dados reais, de forma que a representatividade estatística global não fosse desvirtuada pela inclusão destes dados artificiais.

Uma vez com uma disponibilidade de dados suficientes, se procedeu à obtenção dos variogramas experimentais específicos para cada quadrante, a saber Norte, Leste, Sul e Oeste, juntamente com os seus respectivos ajustes teóricos (**Figura 4.3**). Os variogramas teóricos foram obtidos usando o modelo linear:

$$\gamma(h) = C_o + \alpha h$$

Chegando aos seguintes parâmetros:

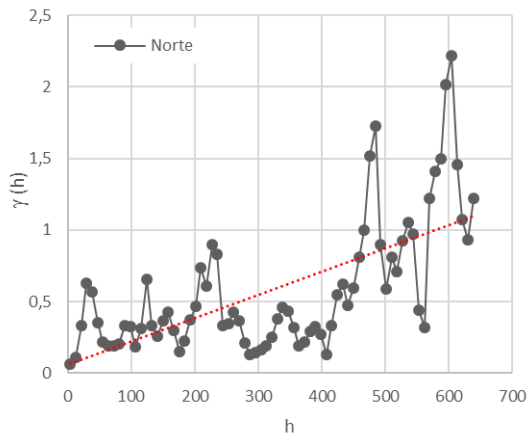
Tabela 2. Modelo Linear Normalizado

Quadrante	$\alpha$	$C_o$	$\sigma^2$
Norte	0,0016	0,0619	0,743
Leste	0,0040	-0,0927	144,4138
Sul	0,0002	0,9495	45,8901
Oeste	0,0019	0,2551	1,0049

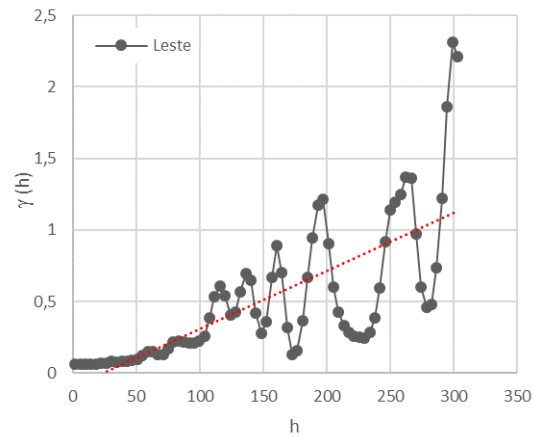
Se observa, em geral, que os variogramas apresentam uma tendência infinita com a clara exceção do variograma relativo ao quadrante sul. O quadrante Sul apresenta um comportamento de efeito pepita bastante acentuado. Tal comportamento é o resultado da observação de uma grande aleatoriedade nos dados coletados devido diversos fatos como a localização dos disparos e pontos de monitoramento sismográfico, geometria da cava, entre outros como a disposição muito próxima dos pontos de monitoramento sismográficos nesta região. Tais variabilidades também são observadas nos outros quadrantes, mas de forma menos acentuada. Por tanto, as dificuldades inerentes à obtenção destes variogramas se devem majoritariamente aos seguintes fatores:

- Primeiramente, as detonações estavam localizadas em posições distintas na pedreira, gerando distintas distâncias entre o ponto de disparo e os pontos monitorados. Outra consequência da localização dos desmontes é a sua posição em relação a geometria da cava. Em todos os casos, como esperado, se observou uma maior contribuição sísmica na região localizada atrás da face livre, que como consequência do posicionalmente relativo de cada disparo aos bancos da pedreira. Ambos fatos que influem na aleatoriedade nos pontos amostrados.
- Um segundo ponto está associado às cargas máximas instantâneas. Os dois primeiros disparos apresentaram um MIC de 90kg e 102kg, respectivamente, e a terceira e quarta detonações 98kg, ambas. Ainda que a diferença não seja tão grande, a contribuição da energia liberada pelas detonações contribuiu para uma maior aleatoriedade dos variogramas.

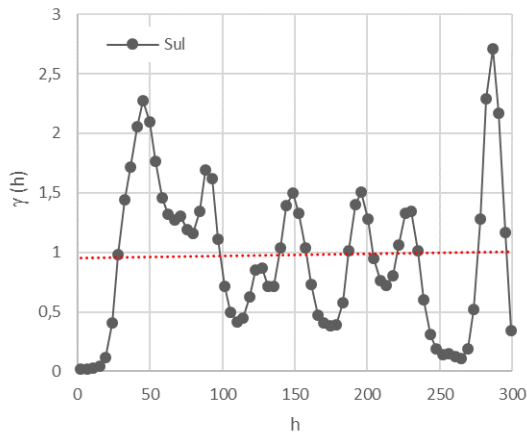
- c) Finalmente, os tempos de micro-retardos e sequência de detonação aplicados em cada desmorte. Segundo Canedo (2013), foram usados na primeira detonação uma combinação de 25/42/42/75ms, na segunda 17/42/42/42/75ms, na terceira 17/42/42/75 e, finalmente, na quarta 25/42/75ms. Não se dispõe da sequência de detonação aplicada. Entretanto, se entende que cada uma delas tiveram uma combinação específica, contribuindo de forma determinada às interações construtivas e destrutivas de interferência de ondas ao largo de sua propagação sobre o terreno estudado.



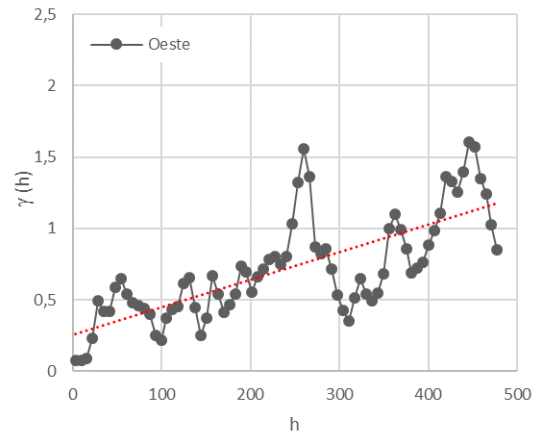
(a) Variograma para o quadrante Norte. Dados experimentais + 100 artificiais.



(b) Variograma para o quadrante Leste. Dados experimentais + 100 artificiais.



(a) Variograma para o quadrante Sul. Dados experimentais + 100 artificiais.



(b) Variograma para o quadrante Oeste. Dados experimentais + 100 artificiais.

**Figura 4.3:** Variogramas experimentais e ajustados para os quadrantes Norte, Leste, Sul e Oeste.

#### 4.1.2 Leis de Atenuação

As leis de atenuação para cada um dos alinhamentos de sismógrafos em cada detonação são apresentadas na Tabela 3 (Canelo, 2013). Em cada desmorte, quatro alinhamentos foram estabelecidos, aqui nomeadas de Norte, Leste, Sul e Oeste, com pelo menos 5 sismógrafos distribuídos em pontos específicos do terreno. Estas leis de atenuação foram usadas para prever as velocidades pico de partícula em cada um dos pontos monitorados

(Tabela 4) com o intuito de comparar os resultados da interpolação por Krigagem sobre os dados reais, ou seja, medidos experimentalmente com sismógrafos, com os estimados através das equações definidas para cada alienação e desmonte.

Tabela 3. Leis de Atenuação (Canelo, 2013)

Detonação	Quadrante	Lei de Atenuação	Coefficiente de Correlação
1	Norte	PPV = 53,304 SD <sup>-0,874</sup>	0,85
1	Leste	PPV = 650,01 SD <sup>-1,488</sup>	0,90
1	Sul	PPV = 12681 SD <sup>-2,445</sup>	0,99
1	Oeste	PPV = 1958,6 SD <sup>-1,702</sup>	0,72
2	Norte	PPV = 25,172 SD <sup>-0,691</sup>	0,82
2	Leste	PPV = 1651,7 SD <sup>-1,697</sup>	0,98
2	Sul	PPV = 71,455 SD <sup>-1,018</sup>	0,93
2	Oeste	PPV = 1683,7 SD <sup>-1,676</sup>	0,90
3	Norte	PPV = 2685,0 SD <sup>-1,750</sup>	0,90
3	Leste	PPV = 90,484 SD <sup>-0,757</sup>	0,98
3	Sul	PPV = 492,76 SD <sup>-1,436</sup>	0,87
3	Oeste	PPV = 3768,6 SD <sup>-1,906</sup>	0,73
4	Norte	PPV = 3395,1 SD <sup>-1,882</sup>	0,95
4	Leste	PPV = 1805,6 SD <sup>-1,688</sup>	0,99
4	Sul	PPV = 83,056 SD <sup>-0,893</sup>	0,76
4	Oeste	PPV = 386,94 SD <sup>-1,324</sup>	0,80

Os coeficientes de correlação entre as velocidades pico de partículas medidos e estimados com estas leis de atenuação apresentaram valores superiores a 98%, especificamente os valores de 0,998, 0,989, 0,987 e 0,999 respectivos às detonações 1, 2, 3 e 4.

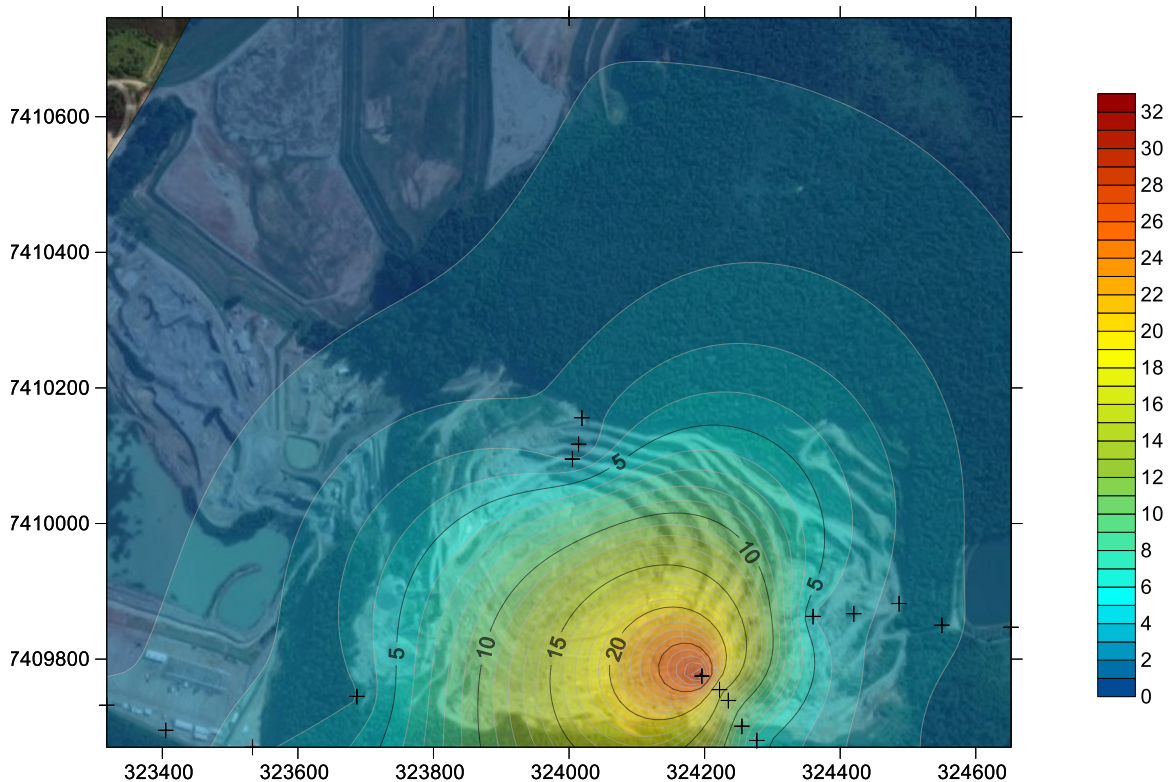
Tabela 4. Relação de PPVs experimentais e previstos

Quadrante	Fogo 1		Fogo 2		Fogo 3		Fogo 4	
	PPV Exp. (mm/s)	PPV Previsto (mm/s)	PPV Exp. (mm/s)	PPV Previsto (mm/s)	PPV Exp. (mm/s)	PPV Previsto (mm/s)	PPV Exp. (mm/s)	PPV Previsto (mm/s)
Norte	0,95	0,95	1,97	2,13	2,90	2,64	2,22	2,36
	2,70	2,22	1,84	1,79	1,59	1,35	1,91	1,78
	1,84	2,44	1,46	1,32	0,25	0,89	0,76	0,61
	2,98	2,57	1,21	0,95	0,60	0,71	0,38	0,46
	-	-	0,64	0,83	-	-	-	-
Leste	3,87	4,21	16,70	18,29	20,26	18,01	52,32	46,01
	3,37	3,16	15,70	13,44	14,80	13,18	7,49	6,87
	2,73	2,40	8,00	7,75	10,29	10,69	4,06	3,87
	2,40	1,98	5,03	4,82	9,46	8,62	2,48	2,56
	1,27	1,47	3,56	3,44	7,11	7,02	2,03	2,05
Sul	30,48	29,51	2,29	2,23	6,03	7,18	4,20	4,50
	16,00	16,44	1,91	1,99	7,90	5,95	4,06	4,08
	12,26	12,34	1,80	1,81	3,56	4,94	3,90	3,52
	8,26	7,64	1,50	1,32	3,94	4,18	3,30	2,78
	5,52	5,41	1,02	1,10	3,24	3,79	2,10	2,53

	2,92	3,32	2,60	3,25	2,73	2,75	3,37	3,58
	2,86	1,85	3,56	2,83	2,16	1,92	3,56	3,16
Oeste	1,00	1,33	2,48	2,36	1,21	1,22	2,20	2,66
	1,14	1,10	1,59	1,50	2,03	0,80	2,60	1,81
	-	-	0,83	0,89	0,25	0,38	1,02	1,20

### 4.1.3 Construção de Isomapas de Vibrações

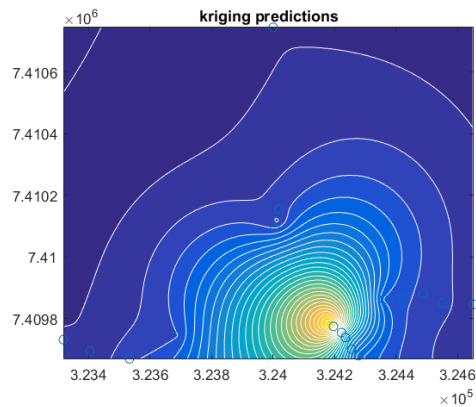
De posse do conjunto de dados coletados em cada uma das quatro direções de cada detonação, procedeu-se à construção dos respectivos isomapas de vibrações. A **Figura 4.4** apresenta o isomapa da primeira detonação em um maior detalhe, superposto a imagem de satélite da pedreira. Os demais mapas são apresentados na **Figura 4.5**. Em geral, se observa em todos os isomapas de vibrações uma tendência a sobrestimar as velocidades pico de partículas nas direções intermediárias aos alinhamentos sismográficos. Isso quer dizer que o método de interpolação por Krigagem, com o uso de um variograma linear, tende a reproduzir uma atenuação mais lenta das amplitudes das vibrações. Por outro lado, essa sobrestimação tende a diminuir com a distância da detonação.



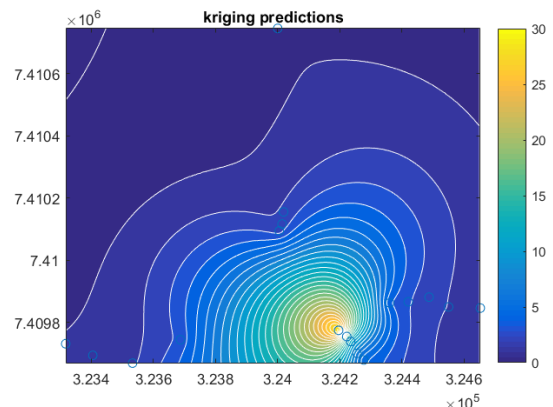
**Figura 4.4:** Isomapa de vibrações resultantes da primeira detonação sobre os pontos medidos nas estações sismográficas.

Com o intuito de comparar os isomapas construídos sobre os pontos monitorados com o construído sobre uma hipotética estimacão, se procedeu a reproduzir cada detonação estimando quais seriam as velocidades pico de partículas em cada ponto georreferenciado onde originalmente se havia monitorado as vibrações. Para tal estimacão, se aplicou as leis de atenuacão obtidas em cada quadrante e cada detonação. As comparações gráficas podem ser observadas na **Figura 4.5**. Os resultados foram bastante similares sejam sob a ótica das estimacões dos PPV em cada ponto, como se pode observar na Tabela 4, como

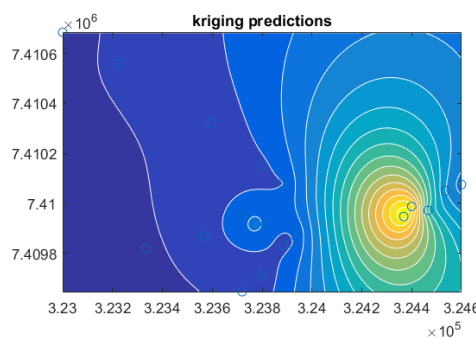
sob a forma final dos isomapas de vibrações, ambos calculados através do método de Krigagem.



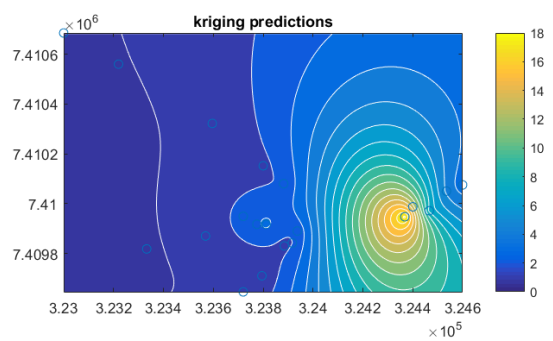
(a) 1º detonação. PPVs experimentais.



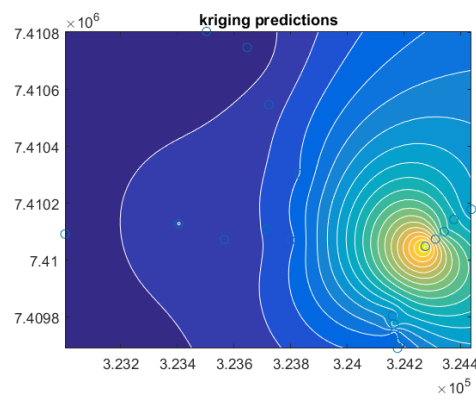
(b) 1º detonação. PPVs previstos.



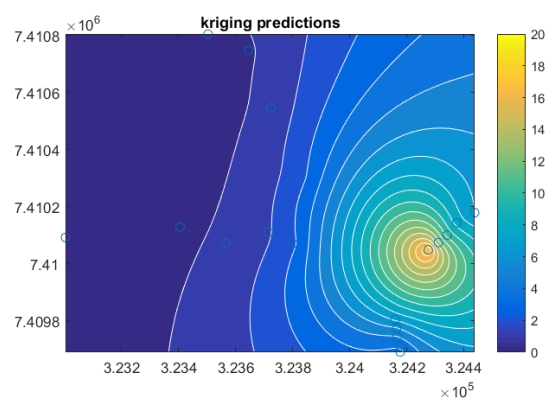
(c) 2º detonação. PPVs experimentais.



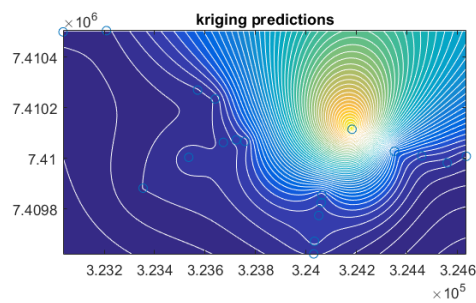
(d) 2º detonação. PPVs previstos.



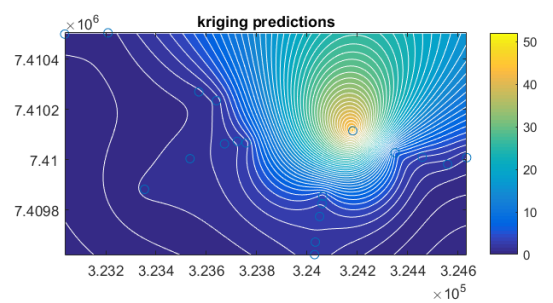
(e) 3º detonação. PPVs experimentais.



(f) 3º detonação. PPVs previstos.



(g) 4º detonação. PPVs experimentais.

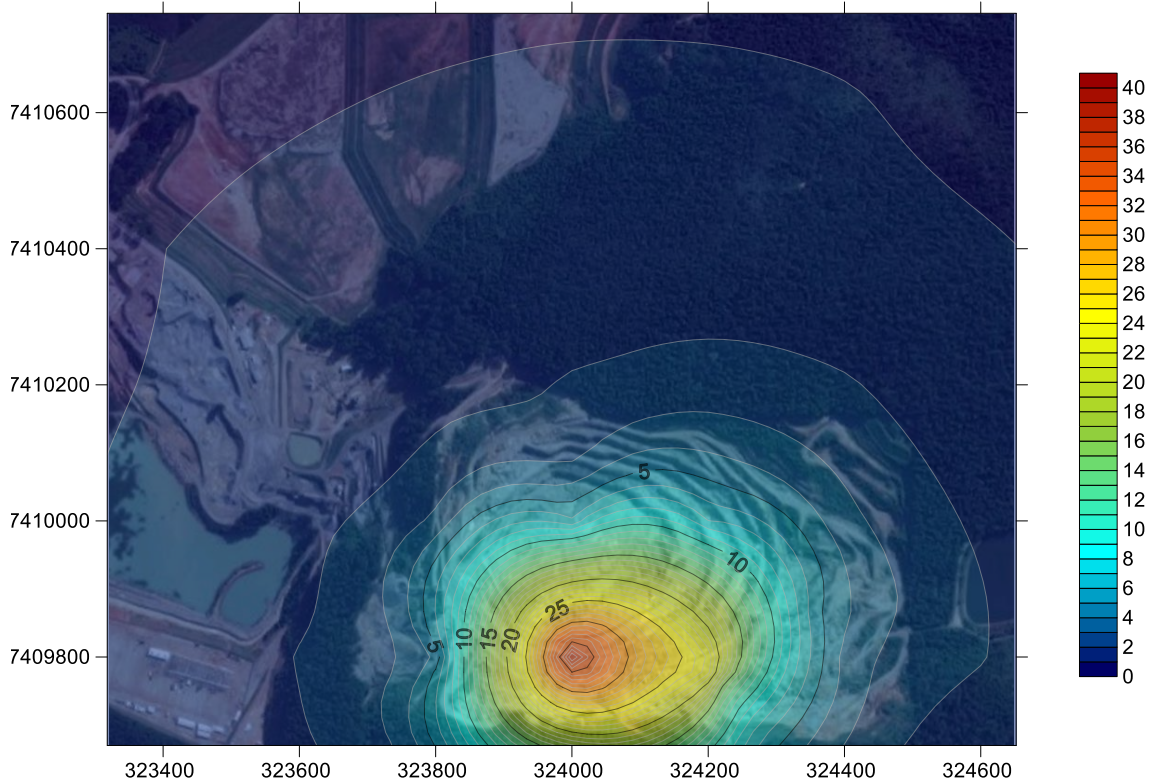


(h) 4º detonação. PPVs previstos.

**Figura 4.5:** Isomapas de vibrações resultantes das quatro detonações com dados medidos (sismógrafos) e com valores estimados (lei de atenuação).



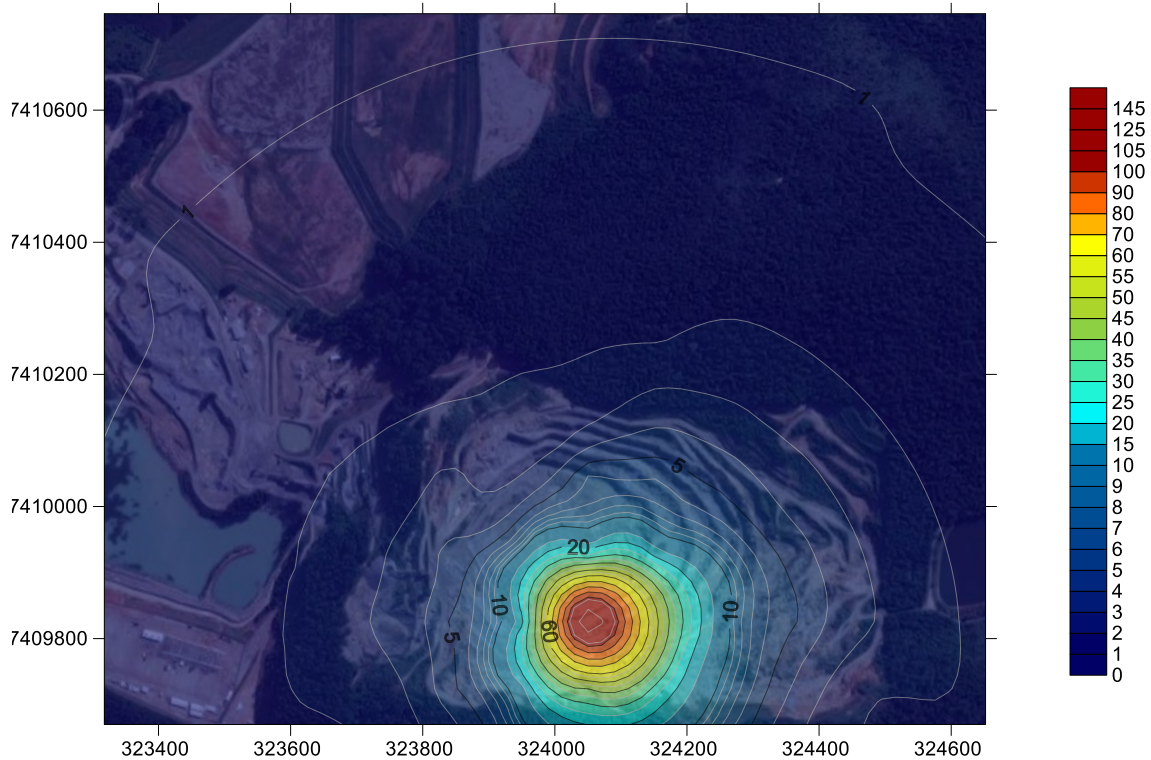
Uma das possíveis razões para a sobrestimação das vibrações entre as direções de alinhamento sismográficos, a parte do comportamento intrínseco da interpolação, se deve ao posicionamento irregular dos pontos de amostragem. A fim de avaliar os resultados das interpolações sobre uma malha de amostragem regular, se utilizou as leis de atenuação predominantes em cada quadrante para estimar as velocidades pico de partículas em uma malha regular de 200m (**Figura 4.6**) e 100m (**Figura 4.7**) em combinação com as posições originais dos sismógrafos. Uma outra vantagem de se aplicar uma malha mais fina de amostragem é a obtenção de uma maior quantidade de informação em pontos mais próximos do desmorte, permitindo obter uma melhor resolução das velocidades pico de partículas.



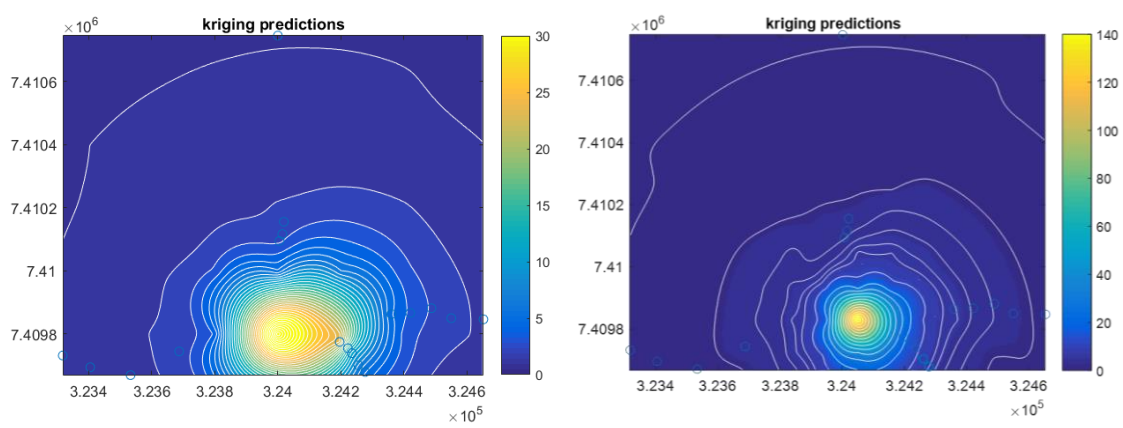
**Figura 4.6:** Isomapa de vibrações resultantes da primeira detonação sobre uma malha regular de 200m combinada com as estações sismográficas reais no terreno.

O resultado obtido com a inclusão de uma malha regular de amostragem aparenta ter melhorado a representatividade da manifestação sísmica resultante do desmorte em comparação com o isomapa gerado somente sobre os pontos originais de medição sismográfica (**Figura 4.8**). Quando se trata de interpolar as vibrações esperadas no espaço em base a um conjunto de dados sísmicos reais – normalmente limitada a um conjunto escasso de pontos –, a chance de desvirtuar as estimativas próximas à detonação é consideravelmente grande. Quer dizer, o ponto de origem da liberação de energia pode não ser reconhecido durante o processo de interpolação, fato observado em todas as construções de mapas realizado sobre os pontos reais monitorados (**Figura 4.5**). Na prática, uma forma de minimizar esse comportamento errôneo seria instalar os primeiros sismógrafos de cada alinhamento de forma equidistante do desmorte. Isso permitiria, durante o processo de interpolação, localizar de forma aproximada a origem da fonte energética do fenômeno estudado. Entretanto, ao aplicar as leis de atenuação dominantes de cada quadrante para estimar as velocidades pico de partículas em pontos regularmente espaçados no terreno,

em combinação com os pontos de monitoramento sismográfico reais, se pôde melhorar a localização da posição ou origem da fonte de energia liberada, ou seja, a detonação. Quanto menor a malha regular aplicada, melhor a precisão de sua localização, por outro lado, uma ideal seria aquela em que sua origem coincide com a posição do desmorte, o que garantiria uma distribuição de pontos amostrais simetricamente proporcionais em todas as direções do espaço.



**Figura 4.7:** Isomapa de vibrações resultantes da primeira detonação sobre uma malha regular de 100m combinada com as estações sismográficas reais no terreno.



(a) Isomapa de vibrações sobre uma malha regular de 200x200m combinada com os pontos de monitoramento sismográfico.

(b) Isomapa de vibrações sobre uma malha regular de 100x100m combinada com os pontos de monitoramento sismográfico.

**Figura 4.8:** Comparação entre isomapas de vibrações resultantes da combinação dos pontos originais de monitoramento sismográfico com as de uma malha regular de amostragem (valores estimados com as leis de atenuação).



## 5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas neste trabalho são:

- a) Cuidados especiais devem ser tomados durante o cálculo dos variogramas experimentais. Quando obtidos sobre posições espaciais georreferenciadas – distâncias euclidianas –, deve-se observar as posições relativas entre a detonação e os pontos de monitoramentos sismográficos. A variação da posição espacial do desmonte gera um comportamento aleatório de velocidade pico de partículas.
- b) O efeito da carga máxima instantânea sobre a morfologia do variograma sugere um efeito de escala. Ao normalizar o variograma pela variância dos dados amostrais, se obtém um variograma padrão ou de referência, que eventualmente pode ser usado para construir variogramas para qualquer carga máxima instantânea.
- c) O cálculo de variogramas sobre a distância escalonada surge como alternativa para parametrizar o efeito das cargas máximas instantâneas e as posições relativas entre detonação e pontos de monitoramento sismográfico. Entretanto, sua direta aplicação pode gerar um comportamento não condizente com a variabilidade natural do fenômeno vibratório e a atenuação frente a uma possível anisotropia do terreno devido ao fato de transportar o fenômeno sísmico real a um variograma unidimensional parametrizado. Uma investigação específica é requerida para uma correta aplicação de variogramas parametrizados pela distância escalonada.
- d) Observou-se, ademais, que o impacto da forma do variograma na interpolação espacial das velocidades pico de partículas, quando o modelo é linear, é mínimo ou nulo. Quer dizer, os valores estimados no espaço sempre são os mesmos ou muito próximos entre si. Entretanto, as diferenças se percebem de forma marcante na variância da Krigagem.
- e) As leis de atenuação – e base às distâncias escalonadas – continuam jogando um papel fundamental no processo de previsão das velocidades pico de partículas geradas por desmontes de rocha com explosivos. Contudo, estas leis de atenuação normalmente definem o comportamento das velocidades de partícula em uma direção específica.
- f) A combinação entre os métodos clássicos de estudo de vibrações combinadas com as técnicas de interpolação geoestatística demonstra ser de grande aplicabilidade no estudo do comportamento anisotrópico das vibrações.
- g) O uso de uma malha regular de amostragem adequada permite interpolar os valores das vibrações ao redor da detonação de forma mais eficaz, localizando a origem da energia sísmica liberada.

Em suma, a combinação de metodologias clássicas de estudo de vibrações com técnicas de interpolação geoestatística melhora sensivelmente o poder preditivo das velocidades pico de partículas em um espaço bidimensional georreferenciado. Esta metodologia permite uma caracterização mais completa do fenômeno sísmico gerado por desmontes de rocha com explosivos e, conseqüentemente, um melhor controle dos níveis de vibrações oriunda das detonações.

## 6 BIBLIOGRAFIA

AMBRASEYS, N. R. & HENDRON, A. J., (1968): "Dynamic Behavior of Rock Masses, Rock Mechanics in Engineering Practice". John Wiley & Sons, Inc., London.

ARMSTRONG, M. (1998): "Basic Linear Geostatistics". Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.

ATTWELL, P. B., FARMER, I.W. & HASLAM, D. (1965): "Prediction of Ground Vibration Parameters from Major Quarry Blasts". Mining & Mineral Eng., Dec. 1965. pp.621-626.

BUCKINGHAM, E. (1915): "The principle of similitude". Nature 96.

CAMARGO, E. C. G. (1998): "Geoestatística: Fundamentos e Aplicações". 5º capítulo do Curso de Geoprocessamento para Projetos Ambientais. 2a. Edição - Revisada e Ampliada. São José dos Campos, SP-Brasil.

CANEDO, G. R. (2013): "Mapa de Iso-Velocidades. Uma Ferramenta para o Controle das Vibrações nas Pedreiras". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Brasil.

COUCEIRO J., P. J. C. (2013). "Análisis Espectral de los Fenómenos Sísmicos Asociados a las Voladuras Subacuáticas". Master Thesis. ETSII Industriales. UPM – Universidad Politécnica de Madrid.

DOWDING, C. H. (1985): "Blast Vibration Monitoring and Control". Northwestern University. Prentice-Hall International Series.

ENGINEERING RESEARCH ASSOCIATES, INC. (1952): "Underground Explosion Test Program Final Report, Volume I: Soil". Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento District, Contract DA-040167.

ENGINEERING RESEARCH ASSOCIATES, INC. (1953): "Underground Explosion Test Program Final Report, Volume II: Rock". Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento District, Contract DA-040167.

HENDRON, A. J. (1977): "Engineering of rock blasting in civil projects". Englewood cliffs, N. J. Prentice Hall Inc, First edition.

HOLMBERG, R. & PERSSON, P. A. (1978): "The Swedish Approach to Contour Blasting". Proceedings of the Fourth Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers, Montville, Ohio.

HOLMBERG, R.; ARNBERG, P. W.; BENNERHULT, D.; FORSSBLAD, L.; GEREBEN, L.; HELLMAN, L.; OLSSON, K.; RUNDQVIST, K.; SJOEBERG, C.; SJOEKVIST; WALLMARK, G. (1984): "Vibrations Generated by Traffic and Building

Construction Activities”. Swedish Council for Building Research (BRF), Report D15:1984, Stockholm, Sweden.

HUIJBREGTS, C. J. (1975): “Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data”. In: Davis, J. C.; McCullagh, M. J. (Eds.). *Display and analysis of spatial data*. New York: J. Wiley. p. 38-53

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; BERMUDEZ, P. G. (2003): “Manual de perforacion y voladura de rocas”. U.D. Proyectos. E.T.S.I. Minas – UPM.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F. J. A. (1995): “Drilling and Blasting of Rocks”. A. A. Balkema. Rotterdam. Brookfield.

JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, CH. J. (1978): “Mining Geostatistics”. Academic Press. Harcourt Brace Jovanovich, Publishers.

KONYA, C. J., and E. J. WALTER (1985): “Seminar on blasting and overbreak control (rock blasting)”. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Contract DTFH 61-83-C-00110. National Technical Information Service. Springfield, VA.

LANGHAAR, H. L. (1951): “Dimensional Analysis and Theory of Models”. Published by John Wiley & Sons, New York.

NICHOLLS, H.R., CHARLES, F.J., DUVALL, W.I. (1971): “Blasting vibrations and their effects on structures”. Bureau of Mines. U.S. Bulletin 656.

PERSSON, P., R. HOLMBERG, & LEE, J. (1994): *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press, London.

REVUELTA, M. B. & LOPEZ JIMENO, C. (1997): “Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras”. U.D. Proyectos. E.T.S.I. Minas – Universidad Politécnica de Madrid.

SHOOP, S. A. & DAEMEN, J. (1983): “Site-specific predictions of ground vibration induced by blasting”. Annual Meeting of SME/AIME.

SILVA-CASTRO, J. J. (2012): “Blast Vibration Modeling Using Improved Signature Hole Technique for Bench Blast”. Lexington, Kentucky. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

VILLANO, E.J., & CHARLIE, W.A. (1993): “Stress wave propagation in unsaturated sands - Vol II Field explosive tests”. Colorado State University, Final Report ESL-TR-92-73.

YAMAMOTO, J. Y.; LANDIM, P. M. B. (2013): “Geoestatística: Conceitos e Aplicações”. Editora Oficina de Textos. Brasil.