

**GISELLE RAMIREZ CANEDO**

**MAPA DE ISO-VELOCIDADES  
UMA FERRAMENTA PARA O CONTROLE DAS VIBRAÇÕES NAS PEDREIRAS**

São Paulo  
2013

**GISELLE RAMIREZ CANEDO**

**MAPA DE ISO-VELOCIDADES**

**UMA FERRAMENTA PARA O CONTROLE DAS VIBRAÇÕES NAS PEDREIRAS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a obtenção do Título de  
Doutora em Engenharia.

São Paulo  
2013

**GISELLE RAMIREZ CANEDO**

**MAPA DE ISO-VELOCIDADES**

**UMA FERRAMENTA PARA O CONTROLE DAS VIBRAÇÕES NAS PEDREIRAS**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para a obtenção do Título de  
Doutora em Engenharia.

Área de concentração:  
Engenharia de Minas

Orientador:  
Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston

São Paulo  
2013

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de agosto de 2013.

Assinatura do autor \_\_\_\_\_

Assinatura do orientador \_\_\_\_\_

#### FICHA CATALOGRÁFICA

**Ramirez Canedo, Giselle**

**Mapa de iso-velocidades: uma ferramenta para o controle das vibrações nas pedreiras / G. Ramirez Canedo. -- versão corr. -- São Paulo, 2013.**

**161 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.**

**1. Mapa de iso-velocidades 2. Controle ambiental em mineração 3. Vibrações do terreno 4. Sismologia (Monitoramento) 5. Equações carga distancia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu grande amor, meu filho, ao meu amado esposo, aos meus pais e ao meu irmão.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston, pelo direcionamento deste trabalho e pelas oportunidades de superação profissional que me concedeu, muito obrigada.

Ao professor e amigo Michiel Schage pela valiosíssima ajuda em todas as etapas desta pesquisa.

Aos colegas do LACASEMIN, em especial, Renata, Neusa, Patricia, Camila, Seiji, Mateus, Lilian, Alexandre e Cristiane pela ajuda prestada no trabalho de campo e durante os cinco anos do doutorado e de estágio no laboratório.

Aos Engenheiros da pedreira Juruaçu, Leonardo Motta e Aron Muniz, pela oportunidade de fazer as medições na pedreira, e por estar sempre disponíveis quando eu precisava.

Aos técnicos e trabalhadores da Embu, Tatiane, Thiago, Joel e Saul que me ajudaram no trabalho de campo.

Aos professores do Departamento de Minas que foram meus professores e que tiveram a paciência de me ensinar tudo o referente à Engenharia de Minas que hoje eu sei.

Aos professores do curso de Engenharia de Segurança em especial a José João Barrico, Eduardo Sansone, Ricardo Metzner, Cristiane Queiroz e Francisco Kulcsar, obrigada pela amizade e pelo que me ensinaram.

Ao Alain, meu esposo e Dani, meu pequeno príncipe, por todo o amor e apoio mesmo nas horas de ausência.

Aos meus sogros Betty e Guillermo que me deram todo o apoio desde que cheguei ao Brasil para que concluísse meus estudos.

Aos meus amigos cubanos e brasileiros que sempre me deram apoio nos momentos difíceis e estiveram ao meu lado nos momentos bons.

A minha família que mesmo estando longe são meu exemplo e inspiração. Obrigada por tanto amor e apoio em todos meus anos de estudo. E por me incentivar a ser uma pessoa cada vez melhor.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa concedida.

*“La naturaleza influye en el hombre, y este hace  
a la naturaleza alegre o triste, o elocuente, o  
muda, o ausente o presente, a su capricho”*

José Martí

## RESUMO

Com o crescimento urbano ao redor das minerações surgiram novos problemas como o desconforto dos vizinhos com vibrações, que podem provocar danos nas estruturas das casas, a poeira, os ultralanchamento, a sobrepressão atmosférica, entre outros. Atualmente no Brasil as restrições ambientais são cada vez mais rígidas e são exigidos mais monitoramentos sismográficos como medida de controle ambiental. A Geosonic Inc. foi a primeira a usar o sistema de mapa de iso-velocidades, mas seu uso não é prática corrente no Brasil devido ao elevado custo de instrumentação e de operação no campo. Iramina (2002) desenvolveu um método com equações de carga-distância simulando um mapa de iso-velocidades. O objetivo deste trabalho é verificar a metodologia proposta por Iramina (2002), que construiu mapas de iso-velocidades usando oito monitoramentos unidirecionais para oito detonações diferentes e sequenciais numa mesma bancada e analisar alternativas para a construção dos mapas de iso-velocidade. Neste trabalho foram monitoradas quatro detonações e em cada uma delas, quatro direções diferentes foram selecionadas utilizando um total de 20 sismógrafos. As detonações avaliadas foram todas na mesma bancada e com características similares. Para cada direção foram estimados os parâmetros da equação carga-distância e foram construídos e comparados diferentes mapas de iso-velocidade. Conclui-se que a disposição dos geofones deve-se adequar aos objetivos do monitoramento. Oito a quinze geofones alinhados são adequados para uma curva carga-distância. Sessenta e quatro ou mais geofones, bem distribuídos espacialmente, podem gerar um mapa de iso-velocidades referente a uma única detonação. A alta variabilidade das características dos maciços rochosos parece não permitir bons resultados quando os sismógrafos não são bem distribuídos ao redor da detonação.

Palavras chave: Mapa de iso-velocidades, controle ambiental, equações carga distância, vibrações do solo, monitoramento sismográfico



## ABSTRACT

The urban growth around the open pit mines causes some problems hard to solve due to possible damage to structures built as result of unwanted ground vibration propagation, blast overpressure, flyrocks, water contamination and also particulate matter dispersion. Currently in Brazil, the environmental constraints are increasingly rigid and it is required seismographic monitoring as a measure of environmental control. Geosonic Inc. was the first to use the iso-seismic maps, but this technique is not commonly used in Brazil due to the high cost of instrumentation and field operation. Iramina (2002) developed a model of vibration predictor equations that simulates an iso-seismic map. Thus, the objective of this work is to verify the methodology developed by Iramina (2002), who implemented an iso-seismic map from eight unidirectional measurements in eight different and sequential detonations in the same bench and analyze alternatives for the construction of iso-seismic maps. Herein were monitored four detonations with four directions in each and 20 seismographs at most. All detonations were monitored in the same bench and with similar characteristics. For each direction were estimated the parameters of the vibration predictor equations and from these equations were obtained and compared different iso-seismic maps. Then, it is concluded that the arrangement of geophones should suit to the objectives of monitoring. In this sense, eight to fifteen aligned geophones are suitable for a good load-distance curve, sixty-four geophones or more spatially well distributed, must generate a iso-seismic map corresponding to a single detonation. The high variability of the characteristics of the rock mass does not seem to allow good results when the seismograph are not well distributed around the detonation. .

Keywords: Iso-seismic map, environment control, vibration predictor equations, ground vibrations, seismograph monitoring.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Localização de 11 sismógrafos no Koroun III .....	23
Figura 2- Mina de cobre Sarcheshmeh .....	25
Figura 3- Mapa da localização dos pontos monitorados por Wu e You (2011) ....	26
Figura 4- Mapa de Iso-velocidade da Geosonics .....	28
Figura 5- Mapas de Iso-velocidade resultado da metodologia de Iramina (2002)	30
Figura 6- Mapa de iso-velocidade simulando um modelo ideal de distribuição dos pontos de monitoramento.....	31
Figura 7- Mapa de iso-linhas de níveis de ruído diurno e noturno estimados para o futuro após a implantação da mineração .....	32
Figura 8- Caverna perto de pedreira do Tourah .....	33
Figura 9- Mapa de contorno da bancada superior da pedreira do Tourah .....	34
Figura 10- Mapa de contorno da bancada inferior da pedreira do Tourah .....	34
Figura 11- Fraturamento da rocha nas proximidades da carga explosiva .....	37
Figura 12- Resumo dos mecanismos de fragmentação da rocha .....	38
Figura 13- Fragmentação e deslocamento da rocha.....	42
Figura 14- Detonação de uma bancada com ultralançamento .....	43
Figura 15- Diagrama de distribuição da energia de detonação .....	46
Figura 16- Movimento ondulatório senoidal.....	47
Figura 17- Tipos de ondas.....	50
Figura 18- Modificações das vibrações ao se propagarem por terrenos de diferentes estruturas e características.....	55
Figura 19- Sismógrafo digital modelo SSU 3000EZ+ .....	63
Figura 20- Geofone do sismógrafo fixado no solo para medição .....	64
Figura 21- Localização da pedreira Juruaçu .....	77
Figura 22- Perfuratrizes hidráulicas na pedreira Juruaçu .....	79
Figura 23- Britagem na pedreira Juruaçu .....	79
Figura 24- Sismógrafo modelo SSU 3000EZ+ em campo.....	82
Figura 25- Sismógrafo modelo SSU 3000LC em campo.....	82
Figura 26- Bancada monitorada .....	85
Figura 27- Localização das detonações monitoradas .....	87
Figura 28-Detonação e distribuição de sismógrafos 16.10.2012.....	88
Figura 29-Detonação e distribuição de sismógrafos dia 7.11.2012.....	88
Figura 30-Detonação e distribuição de sismógrafos dia 16.11.2012.....	89
Figura 31- Detonação e distribuição de sismógrafos dia 28.11.2012.....	89
Figura 32- Mapa de Iso-velocidade da detonação do dia 16.10.2012.....	93
Figura 33- Mapa de Iso-velocidade da detonação 7.11.2012 .....	93
Figura 34- Mapa de Iso-velocidade da detonação 16.11.2012.....	94
Figura 35- Mapa de Iso-velocidade da detonação 28.11.2012.....	94
Figura 36- Mapa de Iso-velocidade com todos os pontos reais monitorados.....	95

Figura 37- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações D, E, J, O das diferentes detonações. ....	102
Figura 38- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações A, F, K e P das diferentes detonações. ....	102
Figura 39- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações B, G, L e M das diferentes detonações. ....	103
Figura 40- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações C, H, I e N das diferentes detonações. ....	103
Figura 41- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações C, D, E, F, H, I, J e O das diferentes detonações. ....	104
Figura 42- - Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações A, B, G, K, L, M, N e P das diferentes detonações. ....	105
Figura 43- Mapa de iso-velocidade simulado com direções perfeitamente ortogonais e equações carga distância com maior atenuação das vibrações....	106
Figura 44- Mapa de iso-velocidade simulado com direções perfeitamente ortogonais e equações carga distância com menor atenuação das vibrações. .	107
Figura 45- Mapa real de iso-velocidade com três iso-linhas (16.10.2012) .....	109
Figura 46- Mapa real de iso-velocidade com três iso-linhas (7.11.2012) .....	109
Figura 47- Mapa real de iso-velocidade com três iso-linhas (16.11.2012) .....	110
Figura 48- Mapa real de iso-velocidade com três iso-linhas (28.11.2012) .....	110
Figura 49- Mapa de iso-velocidade simulado com metodologia de Iramina (2002) com três iso-linhas .....	111
Figura 50- Mapa de iso-velocidade simulado com metodologia de Iramina (2002) com três iso-linhas .....	111
Figura 51- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (16.10.2012) .....	113
Figura 52- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (7.11.2012) .....	113
Figura 53- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (16.11.2012) .....	114
Figura 54- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (28.11.2012) .....	114

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Distribuição da energia da detonação .....	45
Gráfico 2- Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.....	71
Gráfico 3- Equações carga-distância do sentido Norte .....	98
Gráfico 4- Equações carga-distância do sentido Leste .....	99
Gráfico 5- Equações carga-distância do sentido Sul.....	100
Gráfico 6- Equações carga-distância do sentido Oeste .....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Correlação e erro dos modelos estudados por Kamali e Ataei (2010) ..	24
Tabela 2- Quantidade máxima de explosivo correspondente a uma única detonação.....	27
Tabela 3- Aspectos negativos e impactos da mineração a céu aberto .....	58
Tabela 4- Critérios para a avaliação de danos a edificações .....	60
Tabela 5- Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.....	70
Tabela 6- Especificações dos sismógrafos utilizados nos monitoramentos .....	83
Tabela 7- Data da calibração dos sismógrafos .....	84
Tabela 8- Características dos desmontes monitorados .....	86
Tabela 9- Detonação dia 16/10/2012. Carga Máxima por Espera 90 Kg .....	90
Tabela 10- Detonação dia 7/11/2012. Carga Máxima por Espera 102 Kg .....	90
Tabela 11- Detonação dia 16/11/2012. Carga Máxima por Espera 98 Kg .....	91
Tabela 12- Detonação dia 28/11/2012. Carga Máxima por Espera 98 Kg .....	91
Tabela 13- Equações carga distância (16.10.2012) .....	96
Tabela 14- Equações carga distância (7.11.2012) .....	96
Tabela 15- Equações carga distância (16.11.2012) .....	96
Tabela 16- Equações carga distância (28.11.2012) .....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira De Normas Técnicas
<b>AFTES</b>	<i>Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain</i>
<b>ANFO</b>	<i>Ammonium Nitrate / Fuel Oil</i>
<b>BS</b>	<i>British Standards</i>
<b>CETESB</b>	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
<b>DE</b>	Distância Escalonada
<b>DIN</b>	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<b>EPUSP</b>	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>HP</b>	<i>Hewlett Packard</i>
<b>ISEE</b>	International Society of Explosive Engineers
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>LACASEMIN</b>	Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração
<b>MATLAB</b>	<i>Matrix Laboratory</i>
<b>NBR</b>	Norma Brasileira Registrada
<b>OSMRE</b>	<i>Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement</i>
<b>PECE</b>	Programa de Educação Continuada da EPUSP
<b>PMI</b>	Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
<b>RBC</b>	Rede Brasileira de Calibração
<b>RC</b>	Razão de Carregamento
<b>SiBiNet</b>	Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo
<b>USBM</b>	<i>United States Bureau of Mines</i>
<b>UTM</b>	<i>Universal Transverse Mercator</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude da onda
a	Fator local (intercepção com eixo vertical)
$a_{m\acute{a}x}$	Aceleração máxima
b	Fator local (inclinação da reta)
C	Coeficiente Global C
$C_r$	Velocidade da onda de choque na rocha
$C_e$	Velocidade da onda de choque no explosivo
D	Distância horizontal entre o ponto de medição e o ponto mais próximo da detonação
e	Constante de Euler (2,71881828)
$E_d$	Energia liberada na detonação
E	Modulo de Young
f	Frequência
$I_e$	Impedância do explosivo
$I_r$	Impedância da rocha
k	Fator local (intercepção com eixo vertical)
L	Componente longitudinal da velocidade da partícula
P	Onda primaria ou de compressão
$\phi$	Ângulo entre a linha de progressão da detonação e a posição do captador
$\phi_e$	Diâmetro do explosivo
$\phi_f$	Diâmetro do furo
Q	Carga máxima por espera
R	Distância do ponto de captação ao centro da detonação
$R^2$	Fator de correlação
S	Onda transversal ou de cisalhamento
$S_f$	Espaçamento entre os furos
SP	Sobrepresão
T	Período
T	Componente transversal da velocidade da partícula

$t_e$	Tempo de retardo efetivo
$t_n$	Tempo de retardo nominal
$v$	Velocidade da partícula
$V$	Componente vertical da velocidade da partícula
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima
$V_p$	Velocidade de propagação da onda longitudinal
VPP	Velocidades de Pico das Partículas
$V_s$	Velocidade de propagação da onda transversal
$w$	Velocidade angular da onda
$y$	Deslocamento
$\varepsilon^*$	Energia transferida à rocha
$\eta_1$	Rendimento teórico da detonação em função da impedância dos meios
$\eta_2$	Rendimento teórico da detonação em função dos diâmetros do explosivo e do furo
$\lambda$	Cumprimento da onda
$\pi$	Número Pi (3,14159265359)
$\rho_e$	Massa específica do explosivo
$\rho_r$	Massa específica da rocha
$\rho_{rocha}$	Densidade da Rocha
$\nu$	Coefficiente de Poisson



# SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1- OBJETIVO .....	18
1.2- JUSTIFICATIVA .....	18
1.3- ESTRUTURA DA TESE .....	19
<b>2- REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	22
2.1- MONITORAMENTOS SISMOGRÁFICOS .....	22
2.2- CONCEITOS BÁSICOS DA DINÂMICA DAS DETONAÇÕES .....	35
<b>2.2.1- Dinâmica das detonações</b> .....	<b>35</b>
2.3- TRANSFERÊNCIA DA ENERGIA NA ROCHA .....	39
2.4- BALANÇO ENERGÉTICO TOTAL .....	41
2.5- VIBRAÇÕES DO TERRENO .....	46
<b>2.5.1- Parâmetros das ondas.</b> .....	<b>47</b>
2.6- PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A VIBRAÇÃO .....	52
<b>2.6.1- Geologia local e características da rocha.</b> .....	<b>52</b>
<b>2.6.2- Carga máxima por espera</b> .....	<b>53</b>
<b>2.6.3- Distância da detonação</b> .....	<b>54</b>
<b>2.6.4- Razão de carregamento</b> .....	<b>55</b>
<b>2.6.5- Tipos de explosivos</b> .....	<b>56</b>
<b>2.6.6- Tempos de retardo</b> .....	<b>57</b>
2.7- DANOS PROVOCADOS PELAS VIBRAÇÕES AO MEIO AMBIENTE ...	57
2.8- DANOS PROVOCADOS NAS EDIFICAÇÕES .....	59
2.9- RESPOSTA HUMANA AS VIBRAÇÕES.....	60
2.10- SISMÓGRAFOS DE ENGENHARIA E SEUS COMPONENTES.....	61
<b>2.10.1- Sismógrafos de engenharia para detonações</b> .....	<b>62</b>
<b>2.10.2- Sismógrafos de engenharia digitais</b> .....	<b>62</b>
<b>2.10.3- Geofone ou sensor de vibração</b> .....	<b>63</b>
<b>2.10.4- Microfones</b> .....	<b>63</b>
<b>2.10.5- Acelerômetros</b> .....	<b>64</b>

2.11-	EQUAÇÃO CARGA- DISTÂNCIA .....	65
2.12-	NORMAS E CRITÉRIOS DE CONTROLE DA VIBRAÇÃO DE TERRENO .....	67
<b>2.12.1-</b>	<b>Normas internacionais .....</b>	<b>67</b>
<b>2.12.2-</b>	<b>A Norma Brasileira (NBR) 9653 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) .....</b>	<b>69</b>
<b>2.12.3-</b>	<b>CETESB D7.013.....</b>	<b>74</b>
<b>3-</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>76</b>
3.1-	METODOLOGIA .....	76
3.2-	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PEDREIRA MONITORADA.....	77
3.3-	CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA.....	80
<b>3.3.1-</b>	<b>Geologia regional .....</b>	<b>80</b>
<b>3.3.2-</b>	<b>Geologia local .....</b>	<b>81</b>
3.4-	MONITORAMENTOS.....	81
<b>3.4.1-</b>	<b>Sismógrafos utilizados .....</b>	<b>81</b>
3.5-	CARACTERÍSTICAS DAS MEDIÇÕES .....	85
<b>4-</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
4.1-	MAPAS DE ISO-VELOCIDADES.....	91
4.2-	EQUAÇÕES CARGA-DISTÂNCIA .....	96
4.3-	MAPAS DE ISO-VELOCIDADE PELO Método DE IRAMINA (2002)....	101
4.4-	SIMULAÇÃO COM DIREÇÕES PERFEITAMENTE ORTOGONAIS ....	105
4.5-	COMPARAÇÃO DOS MAPAS DO MONITORAMENTO COM OS MAPAS SIMULANDO A METODOLOGIA DO IRAMINA (2002).....	107
4.6-	MAPAS COM VARIAÇÃO NA QUANTIDADE DE PONTOS .....	112
<b>5-</b>	<b>DISCUSSÕES.....</b>	<b>115</b>
5.1-	COMPARAÇÃO DE 4 MAPAS DE ISO-VELOCIDADES, CADA UM DE 20 PONTOS, PARA 4 DETONAÇÕES NA MESMA BANCADA.....	115
5.2-	OBTENÇÃO DE EQUAÇÕES CARGA – DISTÂNCIA, PARA 4 DIREÇÕES EM CADA UMA DAS 4 DETONAÇÕES. ....	117
5.3-	SIMULAÇÃO DA TÉCNICA DE IRAMINA.....	119
5.4-	COMPARAÇÃO DE MAPAS GERADOS COM 20 PONTOS E MAPAS PELA METODOLOGIA DE IRAMINA (2002).....	121
5.5-	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM RELAÇÃO AO NÚMERO DE PONTOS DE CAPTAÇÃO.....	121

<b>6- CONCLUSÕES</b> .....	123
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	125
<b>APÊNDICE A- RESULTADOS DAS SISMOGRAFIAS DAS QUATRO DETONAÇÕES MONITORADAS.</b> .....	133
<b>APÊNDICE B- RELATÓRIO DE SISMOGRAFIA OBTIDO DO SISMOGRAFO SN-3707.</b> .....	137
<b>APÊNDICE C- CÁLCULOS E GRÁFICOS DAS CURVAS CARGA - DISTÂNCIA DAS QUATRO DETONAÇÕES MONITORADAS.</b> .....	137
<b>APÊNDICE D- DIVISÃO DA ÁREA MONITORADA EM QUADRANTES.</b> .....	150
<b>APÊNDICE E- DIVISÃO DA ÁREA MONITORADA EM OITANTES.</b> .....	151
<b>ANEXO 1- CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS UTILIZADOS NO MONITORAMENTO</b> .....	152

## 1- INTRODUÇÃO

No passado, as minerações em geral se localizavam longe das concentrações urbanas, e com o passar dos anos, houve a necessidade de se ocupar novos espaços o que resultou na convivência diária entre o homem da cidade e a mineração.

O crescimento ao redor das minerações fez com que novos problemas surgissem devido ao desconforto que pode ser causado a vizinhos e os danos às estruturas em consequência da propagação de vibrações do terreno, da sobrepressão atmosférica e dos ultralanchamentos. Pode ocorrer também a dispersão de material particulado.

Existem normas limitando os níveis de vibração e ruído como forma de proteção às propriedades vizinhas e essas restrições ambientais vêm se tornando mais rígidas. Cada vez mais são exigidos os monitoramentos sismográficos para auxílio em disputas judiciais entre empresas e a população. Neste contexto, o objetivo de um monitoramento sismográfico deve ser não apenas melhorar o desempenho das detonações quanto a custos e produtividade, mas também ajudar a mitigar os efeitos ambientais e diminuir os conflitos sociais.

A empresa Geosonic Inc. gerou os primeiros mapas de iso-velocidades. Nesta metodologia instala-se mais de uma centena de sensores triaxiais ao redor do local de uma detonação, e o efeito de uma carga explosiva é rastreado à medida que a onda de vibração se afasta do local da detonação. Iramina (2002) desenvolveu um método híbrido com oito equações de carga distância simulando um mapa de iso-velocidades.

Com o mapa de iso-velocidades, podem-se detectar as tendências multidirecionais da propagação das vibrações associadas a uma única detonação. Isto oferece uma vantagem com relação às medições com apenas um ou dois

sismógrafos, como é feito na maioria das pedreiras e minerações em áreas urbanas do Brasil.

### 1.1- OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é verificar a metodologia proposta por Iramina (2002), que construiu mapas de iso-velocidades usando oito monitoramentos unidirecionais (nas direções aproximadas norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste) para oito detonações diferentes e sequenciais numa mesma bancada e analisar alternativas para a construção dos mapas de iso-velocidade.

### 1.2- JUSTIFICATIVA

Uma das maiores preocupações dos engenheiros de minas é a de melhorar o desempenho das detonações no que se refere a custos e produtividade, mitigando os efeitos ambientais e os conflitos com a sociedade.

Uma ferramenta para entender e controlar os danos que podem decorrer das vibrações associadas a detonações é o registro sismográfico de vários pontos espalhados ao redor da detonação. Desta forma poderão se fazer ajustes ao plano de fogo para minimizar os efeitos indesejáveis das vibrações.

Nos Estados Unidos a Geosonics Inc. utiliza os mapas de iso-velocidades, mas no Brasil o uso destes mapas não é uma prática corrente, apesar de ser conhecida como útil ferramenta de análise e gestão. O motivo são os altos custos de instrumentação e trabalho de campo.

Iramina (2002) propôs uma metodologia mais simples com menos custos de instrumentação e de operação no campo, e a possível validação desta metodologia através desta pesquisa ajudará na disseminação de monitoramentos de melhor confiabilidade, com uma relação custo-benefício que se adapta melhor à realidade do Brasil.

O LACASEMIN- Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração do Departamento de Minas e Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) é o único órgão a ter suficiente experiência nesta área no Brasil, com uma tese de livre docência, um doutorado e um mestrado sobre o tema. Além disso, a captação de recursos de vários projetos ao longo de 11 anos permitiu um investimento do LACASEMIN de cerca de 400.000,00 reais para execução deste projeto, incluindo a compra de mais de duas dezenas de sismógrafos em 2012, o que proporcionou ao autor os recursos técnicos para a realização desta pesquisa.

Ressalta-se que esta pesquisa foi efetuada sem qualquer auxílio de órgãos financiadores estaduais ou federais, mas apenas com fundos de reserva oriundos dos cursos de especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho do Programa de Educação Continuada (PECE) da EPUSP e de treinamentos e consultorias, desenvolvidos pela equipe do LACASEMIN.

### 1.3- ESTRUTURA DA TESE

A fase inicial do doutorado foi a pesquisa bibliográfica. Foram realizadas buscas na internet utilizando palavras chave como monitoramento sismográfico, sismógrafos de engenharia, mapas de iso-velocidades, vibrações do solo, impacto ambiental das pedreiras em zonas urbanas, etc. No Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo (SiBiNet), também foi feito um levantamento das revistas nacionais e internacionais, teses e dissertações na

biblioteca do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da EPUSP. Parte desta pesquisa bibliográfica é apresentada no capítulo 2, no qual se focam os diferentes trabalhos de monitoramentos sismográficos encontrados na literatura nacional e internacional, alguns apresentados em congressos e outros sendo artigos de revistas. Estes artigos apresentam o monitoramento sismográfico sem o uso do mapa de iso-velocidade como ferramenta de análise, mas com outras ferramentas como métodos empíricos de análise. Também são apresentados os resultados de alguns trabalhos nos quais foi utilizada a ferramenta dos mapas de iso-velocidade para o controle das vibrações do terreno produto das detonações em pedreiras. É apresentado um resumo sobre vibrações, abordando-se como se distribui a energia das detonações, que parte desta energia se transforma em vibrações do solo e que tipos de onda compõem a vibração. Também se apresentam instrumentos de medição como sismógrafos de engenharia, e a metodologia das equações carga distância como modelo empírico de análise da atenuação das ondas numa direção. São apresentadas as normas internacionais e nacionais que regulam as vibrações geradas pelas detonações, com os limites para as vibrações.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia da pesquisa e a descrição do local onde foram realizados os monitoramentos, com uma apresentação geral do processo produtivo e da litologia da área da pedreira. São apresentados os instrumentos utilizados, as características das detonações monitoradas, a localização das detonações e a localização dos pontos de captação.

No capítulo 4 são apresentados os principais resultados de velocidades de pico das partículas (VPP) em cada ponto de captação e a construção dos mapas de iso-velocidades utilizando os valores captados nas detonações monitoradas, e a análise dos mapas de iso-velocidades da simulação do método do Iramina (2002). Finalmente é apresentada a comparação entre os mapas reais e os simulados.

No capítulo 5 apresentam-se as principais análises realizadas com os mapas e as equações obtidas.

No capítulo 6 é feita uma síntese das principais conclusões.



## 2- REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1- MONITORAMENTOS SISMOGRÁFICOS

Na literatura foram encontrados vários artigos publicados em revistas ou apresentados em congressos onde foram descritos monitoramentos sismográficos realizados em minas a céu aberto ou subterrâneas. Na maioria dos casos os estudos foram feitos com o fim de avaliar os danos que as detonações utilizadas no desmonte de rochas podiam ocasionar às edificações nas vizinhanças da mina.

Para o Elseman (2000) o objetivo era a medição e análise da vibração do solo e dos níveis de ruído nas detonações numa pedreira de calcário da *Egyptian Cement Company*. Foi analisado o efeito do método de iniciação do explosivo, na intensidade das vibrações do solo e sobre a pressão atmosférica.

Segundo Elseman (2000) foram utilizados um sismógrafo SSU-2000DK e dez microsismógrafos SSU. As detonações estudadas foram planejadas para abranger todas as faces da pedreira nas bancadas superiores e inferiores, tendo como objetivo obter melhores dados sobre a propagação da vibração e seu efeito sobre o prédio mais próximo à pedreira. No total foram monitoradas 15 detonações com características diferentes de carga máxima por espera, número de furos, carga total, etc.

Dos resultados dos monitoramentos Elseman (2000) concluiu que a maior parte das frequências encontravam-se entre 5 e 30 Hz e que a área em torno do prédio estudado se caracterizava por baixas frequências (71,4% inferior a 10 Hz), e que o nível de vibrações era seguro para o edifício. Também concluiu que a iniciação elétrica produzia maior nível de vibrações no solo e maior taxa de atenuação em comparação com a iniciação com o cordel detonante.

Outros autores estudados que realizaram trabalhos de monitoramento foram Kamali e Ataei (2010). O objetivo da sua pesquisa era prever a velocidade pico das partículas (VPP), causada por operações de detonação nas escavações da usina e barragem Karoun III no Irã.

Kamali e Ataei (2010) utilizaram sismógrafos modelo UVS500 da Nitro Nobel que foram localizados em 11 locais conforme figura 1. No total obteve o resultado de 28 eventos nesta região.

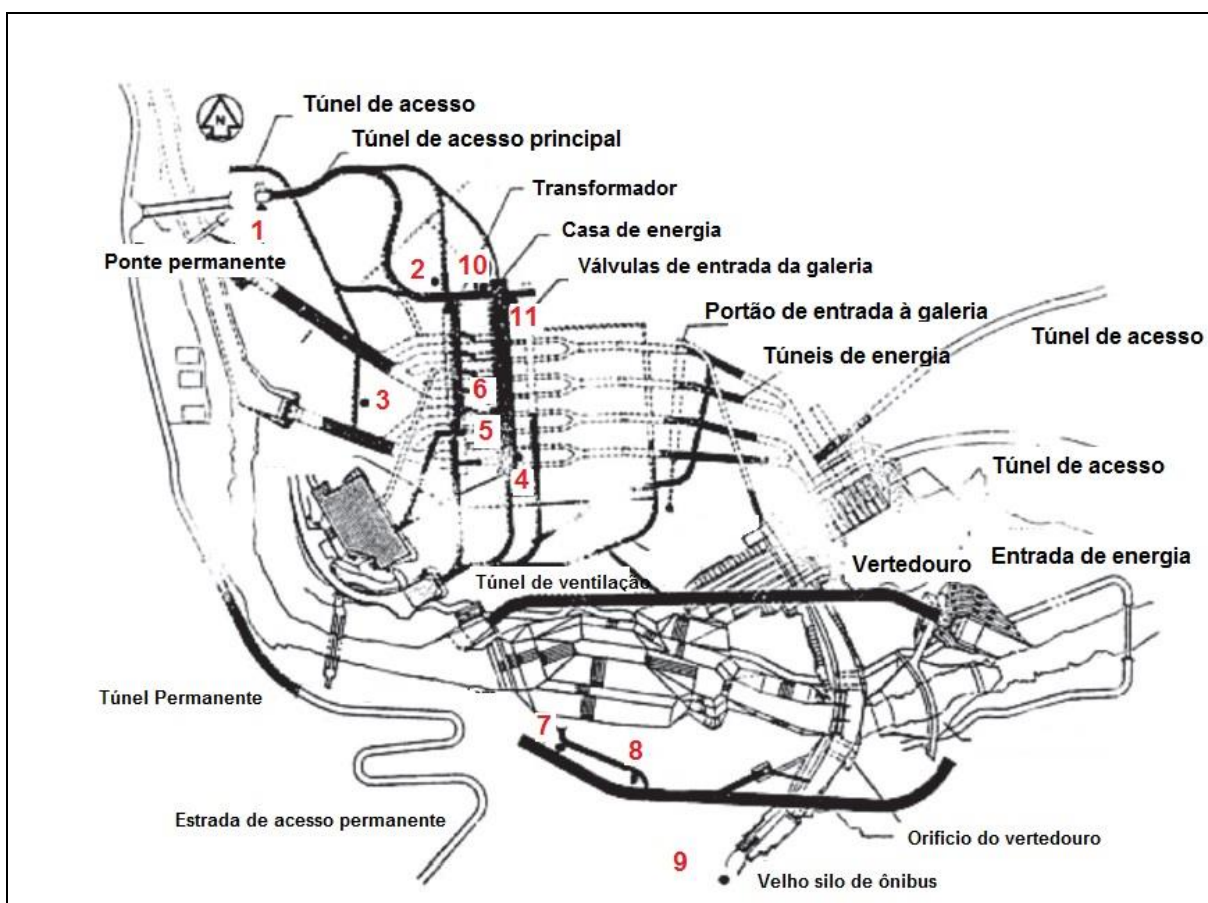


Figura 1- Localização de 11 sismógrafos no Koroun III  
Fonte: Kamali e Ataei, 2010 (adaptado)

Os autores não especificam os locais das detonações que foram monitoradas, mas uma característica interessante da pesquisa é que para determinar o valor da velocidade pico das partículas (VPP) utilizaram três técnicas: estatística, empírica e redes neurais. Finalmente os resultados foram interpretados e comparados.

Primeiro foi utilizada a análise de regressão multivariada como abordagem estatística. Em seguida, foi determinado a VPP através de modelos empíricos e por último, foi aplicado um modelo de rede neural artificial. No modelo de rede neural artificial a carga máxima por espera, a carga do furo, a distância do local da detonação, a direção do fogo, o comprimento dos furos, o número de furos, o atraso total em milissegundos, o número de intervalos de atraso e a carga média específica foram levados em consideração como parâmetros de entrada e consequentemente, a VPP como parâmetro de saída. Os resultados das técnicas foram interpretados a partir de dois pontos de vista. Em primeiro lugar, a correlação entre os dados observados e os preditos, e em segundo lugar o erro total entre os dados observados e os preditos.

A análise de regressão multivariada teve uma correlação satisfatória, mas seu erro de estimativa foi comparativamente muito elevado. O modelo empírico teve correlação confiável e um pequeno erro de estimativa e no final, os resultados do método empírico foram mais confiáveis do que os da análise de regressão multivariada. Em geral, a abordagem de rede neural artificial mostrou uma correlação muito elevada e um erro muito pequeno.

Segundo Kamali e Ataei (2010) os resultados indicaram que o modelo de rede neural artificial é o melhor para a previsão do VPP, em comparação com outras abordagens. (Conforme Tabela 1).

Tabela 1-Correlação e erro dos modelos estudados por Kamali e Ataei (2010)

Modelo Preditivo	Correlação R <sup>2</sup>	Média do erro ao quadrado
Rede Neural Artificial	0,98	9,19
Análise de Regressão Multivariada	0,94	5443,67
Modelo Empírico	0,92	60,44

Fonte: Kamali e Ataei, 2010

Outros autores que realizaram monitoramentos sismográficos utilizando diferentes modelos e comparando-os foram Ghasemi; Ataei e Hashemolhosseini (2012). Para fazer o estudo foram monitorados 30 detonações com quatro sismógrafos PDAS-100. Todas as detonações tinham características similares.

Segundo os autores a vibração do solo é uma parte integrante do processo de detonação das rochas nas minas, o que pode causar sérios danos às estruturas existentes nas proximidades. Portanto, a previsão das vibrações desempenha um papel importante na minimização dos impactos ambientais e a velocidade pico da partícula (VPP) é um importante preditor para a vibração do solo.

Ghasemi; Ataei e Hashemolhosseini (2012) apresentam um modelo de lógica fuzzy desenvolvido para prever VPP baseado em dados coletados a partir de detonações na mina de cobre Sarcheshmeh, localizada no sudoeste do Irã (figura 2). O modelo fuzzy preditivo foi implementado no MATLAB (Matrix Laboratory) usando o algoritmo de Mandani.

Inicialmente a VPP foi determinada pelos métodos empíricos convencionais e pela análise de regressão múltipla. Em seguida, foi realizada uma análise comparativa entre os resultados do modelo fuzzy e do método empírico. Os resultados indicaram a alta capacidade preditiva do modelo fuzzy, o qual indica que o mesmo pode ser usado como um indicador de confiança no estudo das vibrações nas minas.

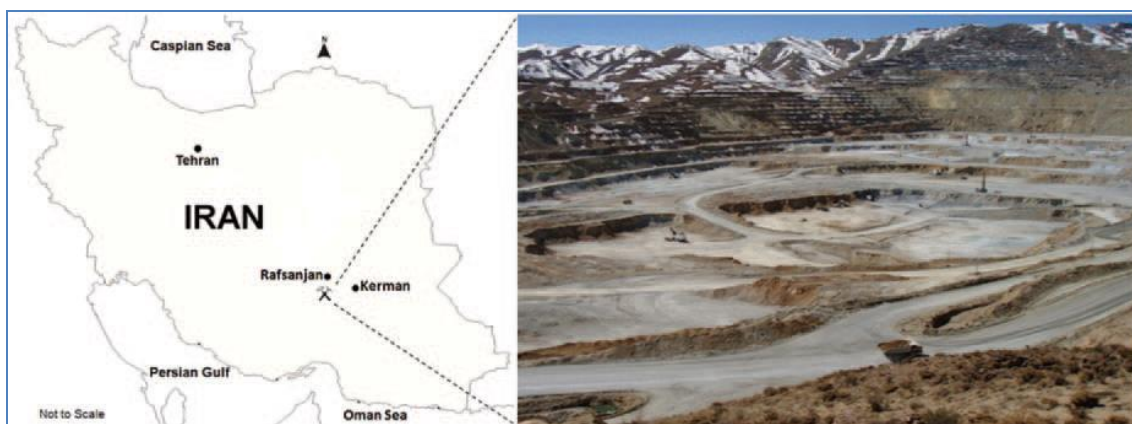


Figura 2- Mina de cobre Sarcheshmeh  
Fonte: Ghasemi; Ataei e Hashemolhosseini, 2012

Wu e You (2011) desenvolveram um estudo com o objetivo de manter a segurança e estabilidade dos tuneis subterrâneos, na mina Tongkeng na China. Os autores realizaram o monitoramento sismográfico de cinco detonações, utilizando sismógrafos Blasmate III da InstanTEL. Os sismografos foram localizados em 4 pontos estratégicos da mina, conforme figura 3. Os autores não especificaram os locais das detonações no seu artigo.

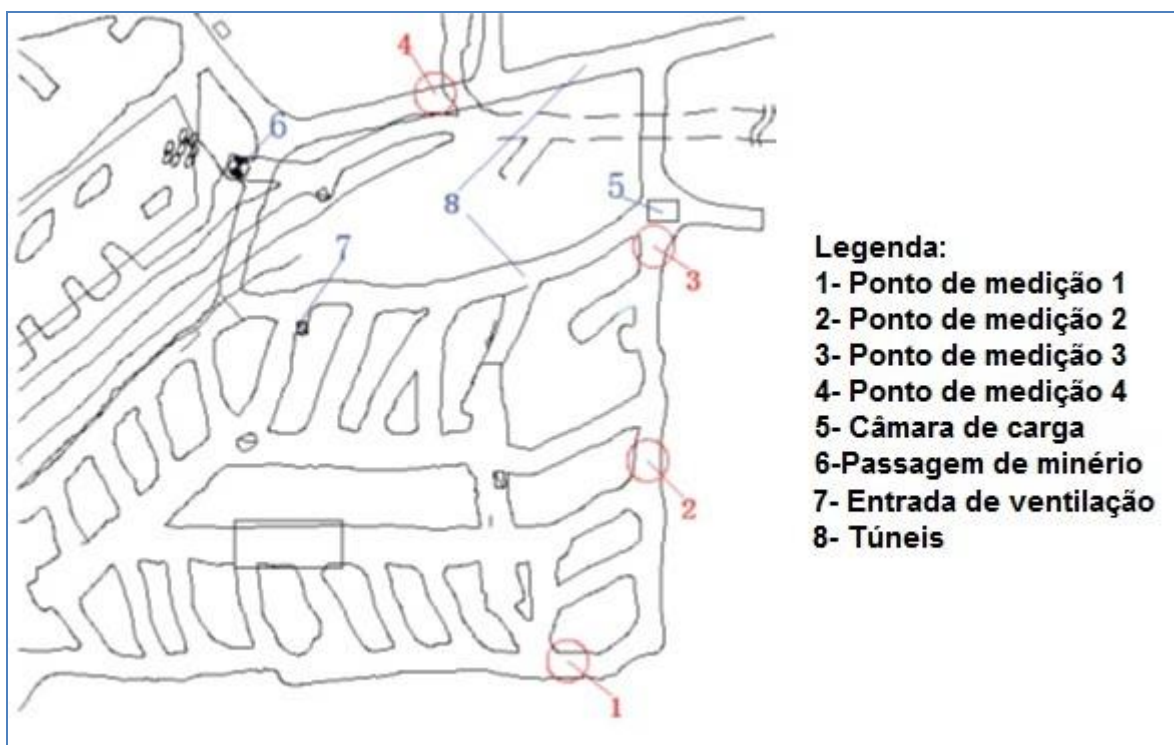


Figura 3- Mapa da localização dos pontos monitorados por Wu e You (2011)  
Fonte: Wu, 2011

O modelo mostrado por Wu e You (2011) para a análise das vibrações foi o de combinar a fórmula de Sadaovsk (Equação 1) com a estabilidade das galerias nos pontos monitorados através do Coeficiente Global C (*Comprehensive Coefficient Method*). Seu objetivo foi determinar a quantidade máxima de explosivo a ser utilizado nas detonações em função de diminuir as vibrações nos pontos monitorados conforme tabela 2.

$$VPP = k \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^b \quad (1)$$

Onde:

$VPP$  = velocidade de pico das partículas (mm/s)

$k$  e  $b$  = coeficientes do local (adimensional)

$Q$  = Carga máxima por espera para uma única detonação (kg)

$R$ : Distância do ponto de captação ao centro da detonação(m).

Tabela 2- Quantidade máxima de explosivo correspondente a uma única detonação

Coeficiente Global (C)	Velocidade máxima da Vibração (mm/s)	Quantidade máxima de explosivo correspondente a uma única detonação. (Kg)
2	1000	-
3	700	-
4	450	5832
5	300	2760
6	200	1187
7	150	651
8	100	280

Fonte: Wu, 2011

Além destes artigos foram encontrados na bibliografia publicações de outros autores como: Armstrong (2001), Egan et al. (2001), Murthy et al. (2003), Tariq (2003), Dallora Neto (2004), Murthy e Dey (2004), Rai e Singh (2004), Araujo Neto (2006), Dallora Neto e Ferreira (2006), Alcludia et al. (2007), Ribeiro e Ferreira (2007), Valencia (2007), Khaled; Rahman e Makarem (2007b), Dallora Neto; Ferreira e Dourado (2008), Afeni e Osasan (2009), Castillo e Vizcarra (2009), Khandelwal e Singh (2009), Koppe et al. (2009), Adetoyinbo et al. (2010), Arora e Dey(2010), Elevli e Arpaz (2010), Kujur (2010), Pal e Brahma (2010), França et al. (2011), Louro (2009), Sadeghee e Khoshrou (2011), Hamidi; Vraksin e Nikraz (2011), Ma; Hao e Wang et al. (2011), Alvares-Vigil et al. (2012), Haibo et al. (2012) e Rao (2012). Todos eles realizaram monitoramentos sismográficos com objetivos similares utilizando geralmente o modelo empírico na determinação dos valores predictivos de VPP nas minas a céu aberto ou subterrâneas. Porém nenhum deles utilizou a ferramenta dos mapas de iso-velocidades nos seus trabalhos.

Na bibliografia é difícil encontrar exemplos da aplicação de mapas de iso-velocidades face a dificuldade de uma mesma empresa posuir um número elevado de sismógrafos.

A empresa *Geosonics Inc.*, produtora e comercializadora de sismógrafos, desenvolveu um sistema chamado de “*Iso-seismic map*” para medir o efeito da vibração do solo em torno de uma mina através da instalação de uma centena ou mais sismógrafos. Este sistema permite gravar as vibrações em numerosos locais ao redor do local da detonação.

A ampla distribuição de sismógrafos permite que as medições sejam também feitas em casas que ficam em um raio de várias centenas de metros da operação de desmonte. A distribuição desta grande quantidade de sismógrafos finalmente proporciona a informação de como contribui a geologia em torno de uma mina nos danos das estruturas vizinhas. Na figura 4 observa-se um exemplo de mapa de iso-velocidade elaborado pela Geosonics.

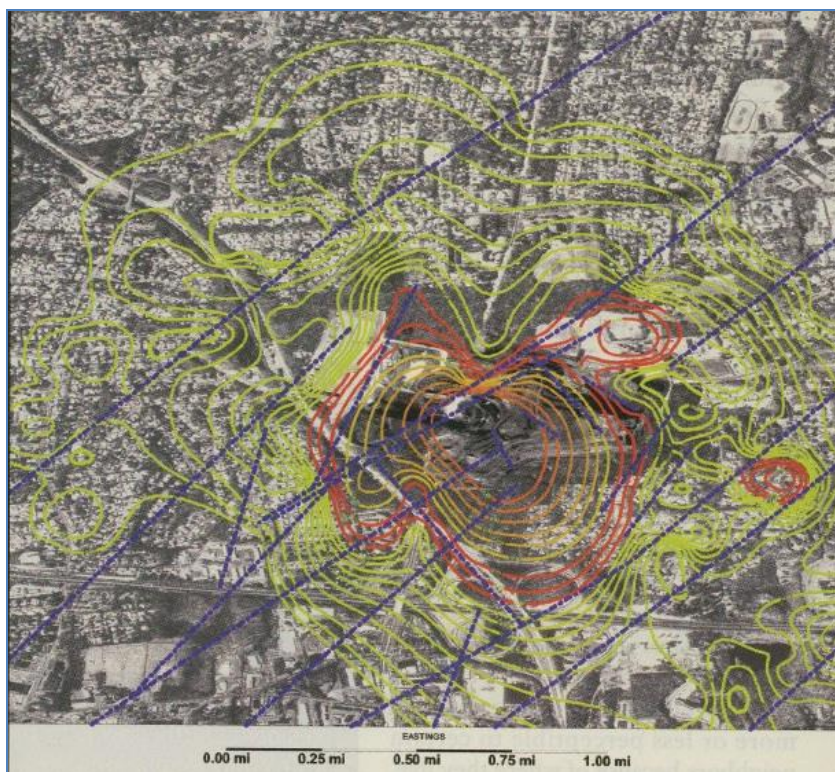


Figura 4- Mapa de Iso-velocidade da Geosonics  
Fonte: Reil, 1998

Iramina (2002) adaptou os mapas da Geosonics para as condições reais de uma pedreira no estado de São Paulo onde se tinha um reduzido número de sismógrafos disponíveis (cerca de 8 do modelos SSU Micro-Seismograph e 1 SSU DK2000 da Geosonics). Foram instalados em linha, em oito detonações sucessivas e se usou a hipótese de que as detonações poderiam (numa visão macro) ser consideradas como um único ponto para as atenuações de campo distante. Para o campo próximo esta aproximação obviamente não é válida, definindo-se campo próximo àquela área cujo raio é da ordem de grandeza de duas vezes a distância entre os pontos extremos das detonações.

Segundo Iramina (2002) no campo próximo, as interações das ondas de choque são muito complexas e muito dependentes de fatores como topografia, litologia e características geomecânicas do maciço rochoso. Para o campo distante, o amortecimento da onda pode ser simulado por equações carga-distância mais simples.

Iramina (2002) partiu da hipótese de que o uso de equações de carga-distância poderia proporcionar gráficos semelhantes aos obtidos pelo método do sistema Iso-Seismic. Segundo Iramina (2002) com os valores de velocidade de vibração de partículas resultante de um desmone, pode-se correlacioná-las com as distâncias (entre o centro do plano de fogo e o local de captação) e com as cargas de explosivos detonados por espera. Com isto pode-se estabelecer leis de propagação específicas para cada tipo de rocha presente numa mineração, e ainda, estabelecê-las para cada direção relevante do espaço. Uma quantidade razoável de pontos monitorados permite a obtenção de pontos num gráfico que por ajuste de curva origina uma equação relacionando a carga máxima por espera, a distância ao ponto de detonação e a velocidade de vibração da partícula. As etapas do método do Iramina (2002) foram:

- 1- Monitorar quatro detonações em quatro direções com a mesma origem e perpendiculares entre si.
- 2- Plotar em planta todos os pontos monitorados e os valores de vibração.



- 3- Obter equação carga-distância para cada uma das direções.
- 4- Interpolar pontos intermediários das retas obtidas.
- 5- Gerar iso-linhas para as 4 direções, obtendo-se um mapa de tendências da vibração.
- 6- Verificar o comportamento da vibração a partir de estas 4 direções.
- 7- Verificar se há erro de extrapolação devido ao pequeno número de pontos.
- 8- Fazer novas medições adicionando quatro novas direções, intermediárias às quatro iniciais.
- 9- Construir o mapa final, com a adição das novas direções.

Nas figuras 5 e 6 observam-se os mapas obtidos por Iramina (2002), o primeiro com os valores reais dos monitoramentos e o segundo simulando o modelo ideal de distribuição para as oito direções escolhidas, ambos no sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*).

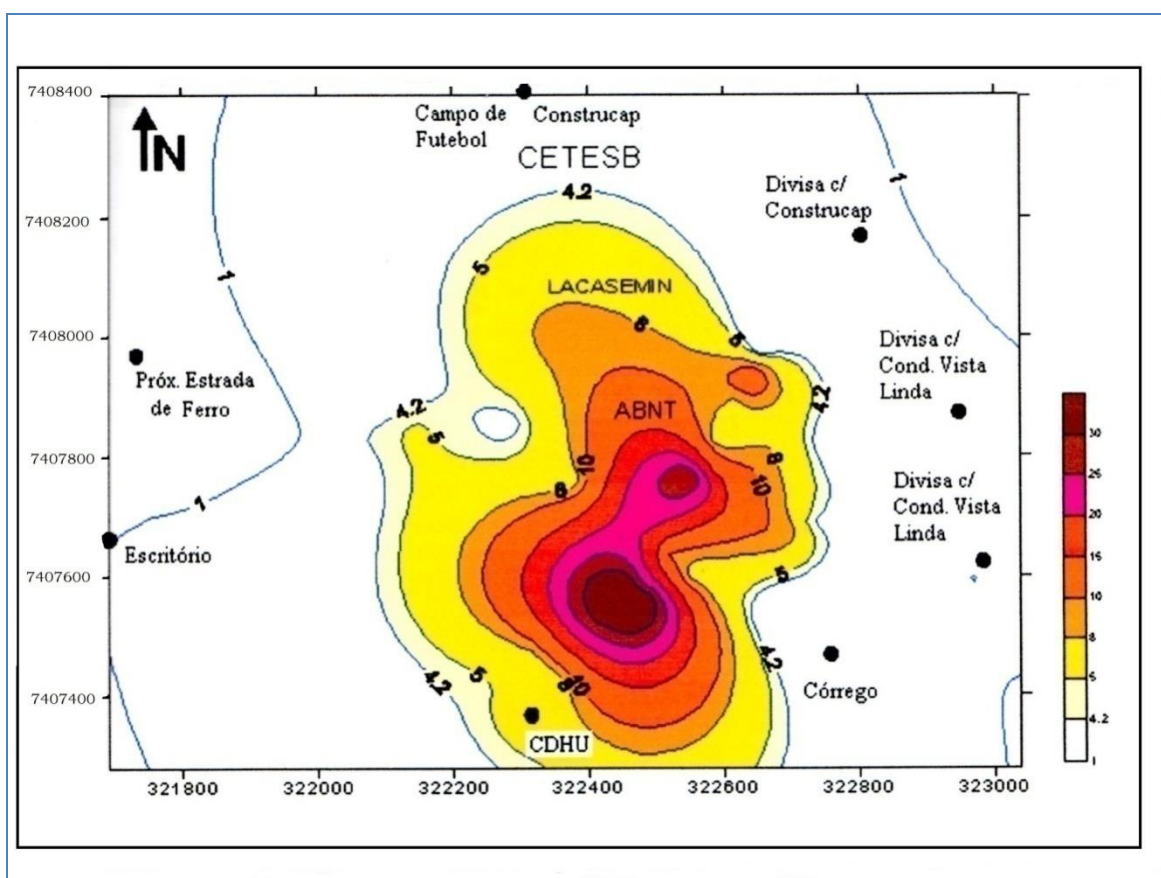


Figura 5- Mapas de Iso-velocidade resultado da metodologia de Iramina (2002)  
Fonte: Iramina, 2002

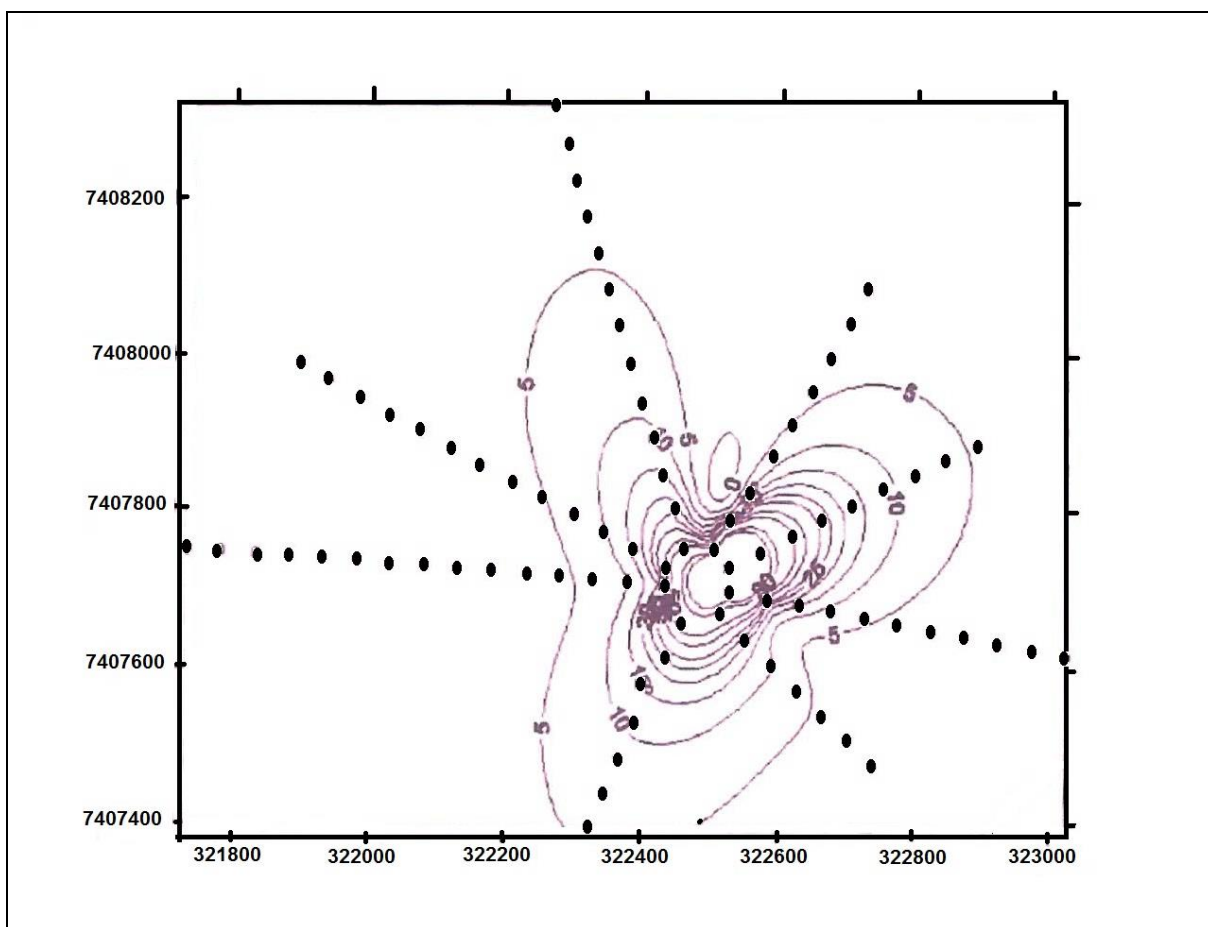


Figura 6- Mapa de iso-velocidade simulando um modelo ideal de distribuição dos pontos de monitoramento

Fonte: Iramina, 2002

Uma outra aplicação dos mapas de iso-linhas, foi feita por Schrage (2005), na área de ruído ambiental. O objetivo de Schrage (2005) foi a formulação de mapas contendo curvas de iso-ruído, com cores representando cada faixa de nível de pressão sonora, para se ter uma boa visualização espacial.

O estudo foi realizado em uma área do estado do Rio de Janeiro onde pretendia se instalar um empreendimento mineiro e onde vários estudos tinham definido que a lavra seria subterrânea. No trabalho se realizaram medições de ruído nos períodos diurno e noturno para posteriormente definir possíveis fontes de ruído após o início das atividades mineiras. O autor elaborou os mapas de ruído (Figura 7) antes e depois da instalação da mineração.

Os mapas obtidos permitiram uma fácil e clara visualização da distribuição espacial do ruído o que permitiu analisar o ruído atual e a previsão dos níveis de ruído após a implantação do empreendimento. No trabalho o autor também comenta exemplos de utilização dos mapas de iso-ruído no estudo do ruído aeronáutico.

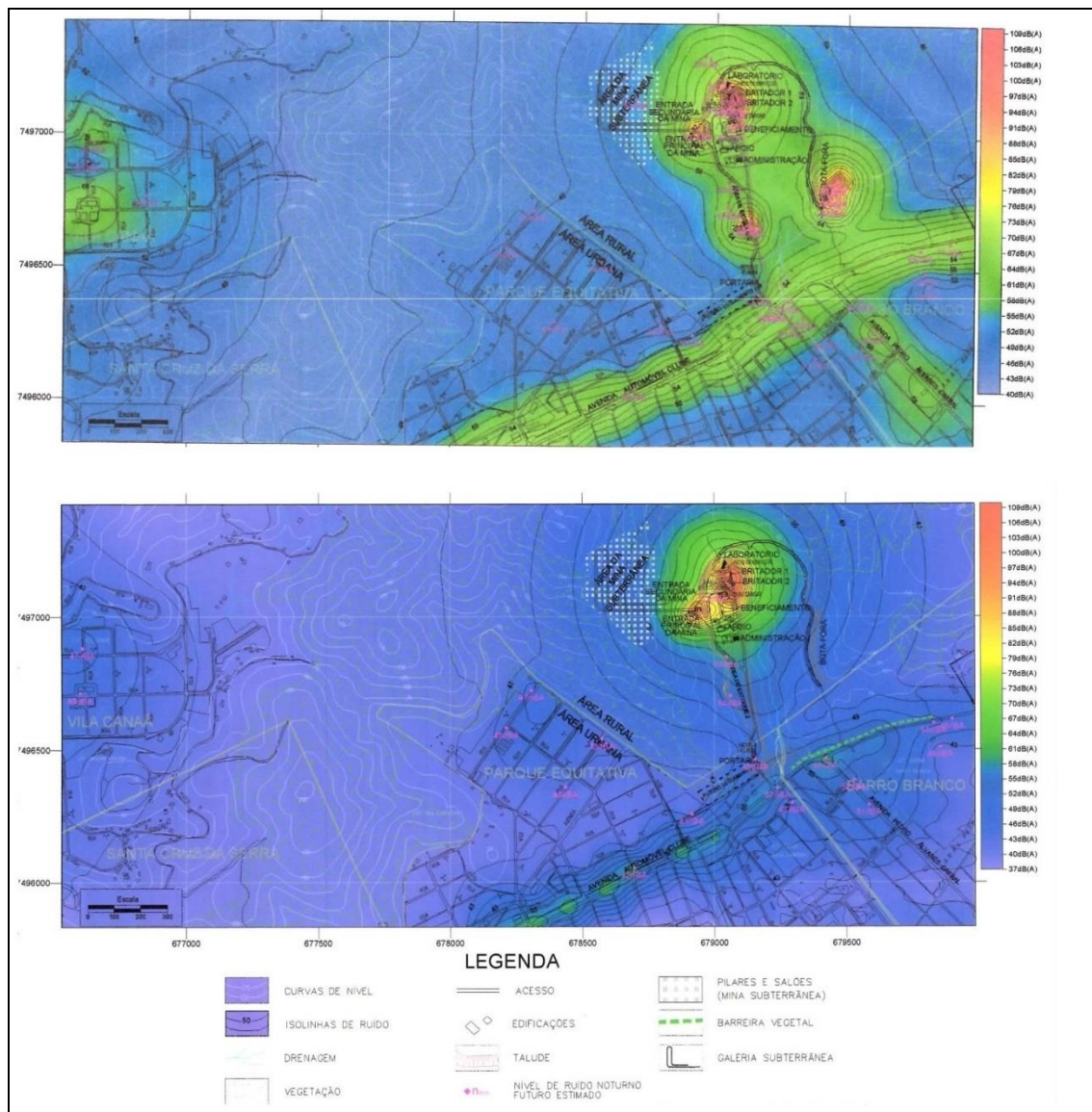


Figura 7- Mapa de iso-linhas de níveis de ruído diurno e noturno estimados para o futuro após a implantação da mineração  
Fonte: Schrage, 2005

Khaled; Rahman e Bagy (2007a) realizaram monitoramentos na pedra de calcário do Tourah, Cairo, Egito. Foram realizados monitoramentos sismográficos para avaliar as vibrações nas áreas circundantes onde existem cavernas

históricas (figura 8). As autoridades locais tinham estabelecido muitas restrições para as operações de detonações, a fim de proteger as cavernas dos efeitos das vibrações. Uma dessas restrições era diminuir a carga de explosivos a 3 toneladas no máximo por detonação. Com o máximo permitido de VPP de 5,0 mm/segundo, aumentaria o custo das operações e diminuiria a produtividade da pedreira.



Figura 8- Caverna perto de pedreira do Tourah  
Fonte: Khaled; Rahman e Bagy (2007a)

Khaled; Rahman e Bagy (2007a) utilizaram quatro instrumentos da marca REF TEK, modelo 130-SMA. Estes foram agrupados de forma linear, de modo a estimar a taxa de atenuação de VPP com o aumento da distância para o campo próximo (4 detonações) e o campo distante (10 detonações). Todas as detonações tiveram características semelhantes exceto o modo de iniciação e os retardos que variaram para cada uma.

Foram elaborados mapas de contorno para as bancadas inferior e superior da pedreira no campo próximo e no afastado (figuras 9 e 10) o que ajudou à pedreira, não só a permanecer aberta, mas também para ser prorrogada sua vida útil, ao convencer às autoridades de que as operações de detonação eram seguras, em relação às cavernas históricas.

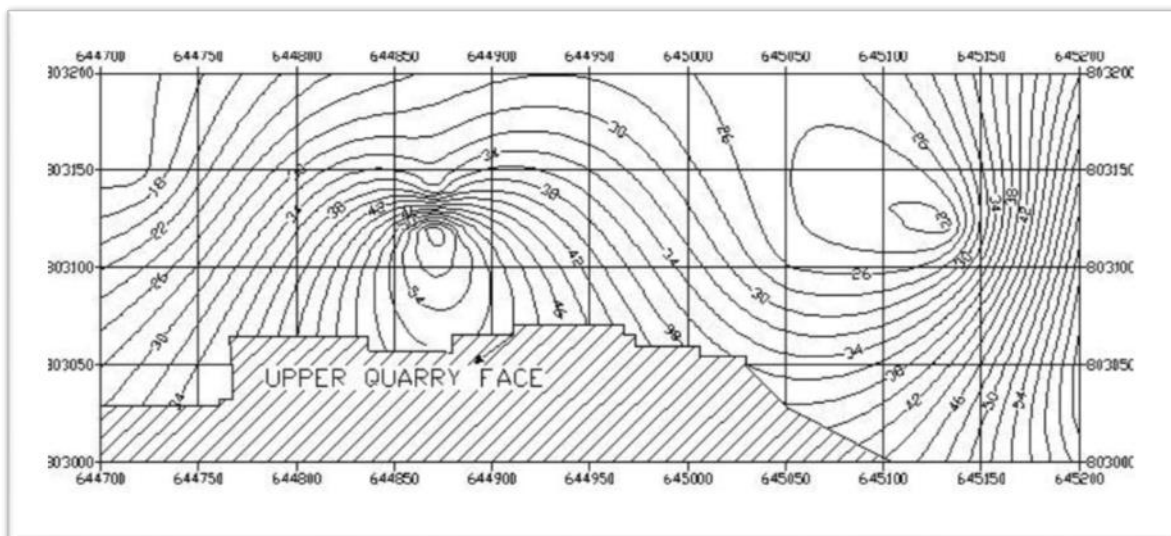


Figura 9- Mapa de contorno da bancada superior da pedra do Tourah  
 Fonte: Khaled; Rahman e Bagy (2007a)

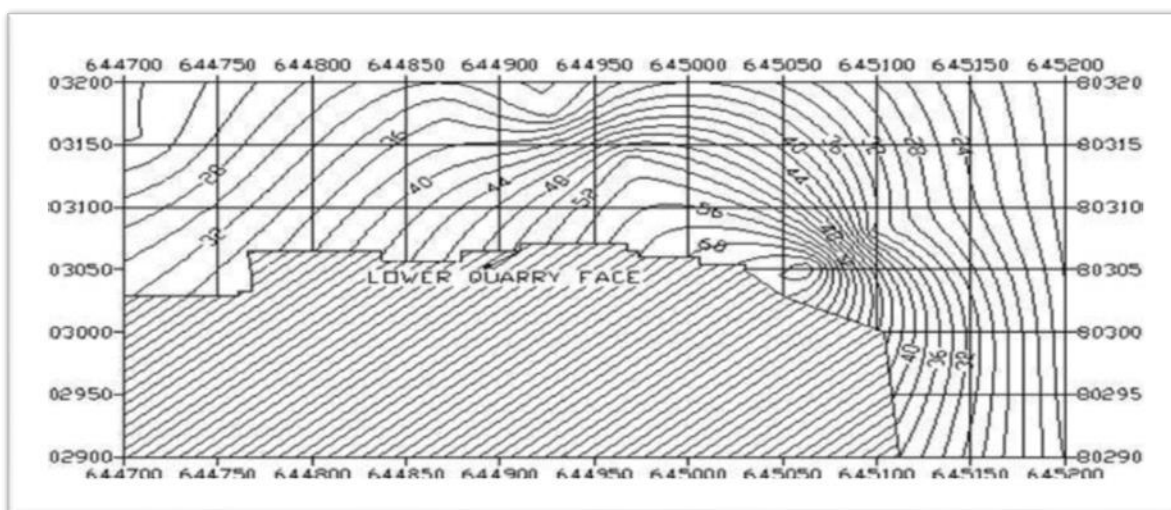


Figura 10- Mapa de contorno da bancada inferior da pedra do Tourah  
 Fonte: Khaled; Rahman e Bagy (2007a)

## 2.2- CONCEITOS BÁSICOS DA DINÂMICA DAS DETONAÇÕES

### 2.2.1- Dinâmica das detonações

A característica essencial de uma detonação é a de liberar, em um tempo brevíssimo, uma grande quantidade de energia nas formas de onda de choque, de pressão de gases e de aumento de temperatura.

A interação entre o explosivo e o maciço rochoso circundante durante e imediatamente após a detonação é função das propriedades da detonação do explosivo e das propriedades físicas e dinâmicas do maciço rochoso adjacente.

Para se determinar corretamente os tipos e quantidades de explosivos, deve-se ter um conhecimento aprofundado sobre a dinâmica da detonação. A detonação de uma carga explosiva num maciço rochoso apresenta duas fases distintas, ambas se iniciando no mesmo instante e se desenvolvendo em frações de segundo (milissegundos). Uma é dez vezes mais rápida que a outra, e a primeira é a fase dinâmica, correspondente à ação das ondas de choque no maciço rochoso. A outra é a fase quase estática. Esta última é aquela devida ao trabalho mecânico realizado pelos gases provenientes da reação química do explosivo (CANDIA, 2004).

Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) e Konya (1995) identificaram nessas duas fases diferentes mecanismos para a fragmentação da rocha, que são:

- Pulverização e quebra (“*crushing*”)
- Fraturamento radial (“*radial fracturing*”)
- Fraturamento por liberação de pressão (“*pressurefracturing*”)
- Fraturamento por reflexão ou lasqueamento (“*spalling*”)

- Extensão das fissuras geradas pelo gás e/ou das fissuras pré-existentes
- Ruptura por flexão
- Fraturamento por cisalhamento ao longo das fissuras geradas pela onda de choque e das fissuras pré-existentes
- Colisões em movimento rápido (“*in-flight collisions*”)

A propagação da energia liberada na rocha inicia-se na frente de detonação, através de uma onda de choque que atinge um pico de pressão (cerca de 1,82 GPa) suficiente para quebrá-la e deformá-la ao redor dos furos. A onda de choque age na zona moída que geralmente não ultrapassa o diâmetro da carga explosiva (BERTA, 1985).

Durante a propagação da onda de choque, a rocha em torno do furo é submetida a uma intensa compressão radial, que provoca forças de tração tangenciais na frente da onda. Quando as tensões ultrapassam a resistência à tração da rocha, começa a formação de uma zona densa de fraturas radiais em torno da zona moída (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995).

Segundo Berta (1985), essas fraturas podem ser observadas num raio de 4 a 6 vezes o diâmetro da carga explosiva, na chamada zona fraturada, definindo a fase dinâmica da detonação. Na figura 11 observa-se o aspecto do fraturamento e deformação da rocha nas proximidades da detonação.

Os mecanismos de fragmentação da rocha que podem ser atribuídos ao componente de choque da energia liberada por um explosivo são: pulverização e quebra, fraturamento radial, fraturamento por liberação de pressão e lasqueamento.

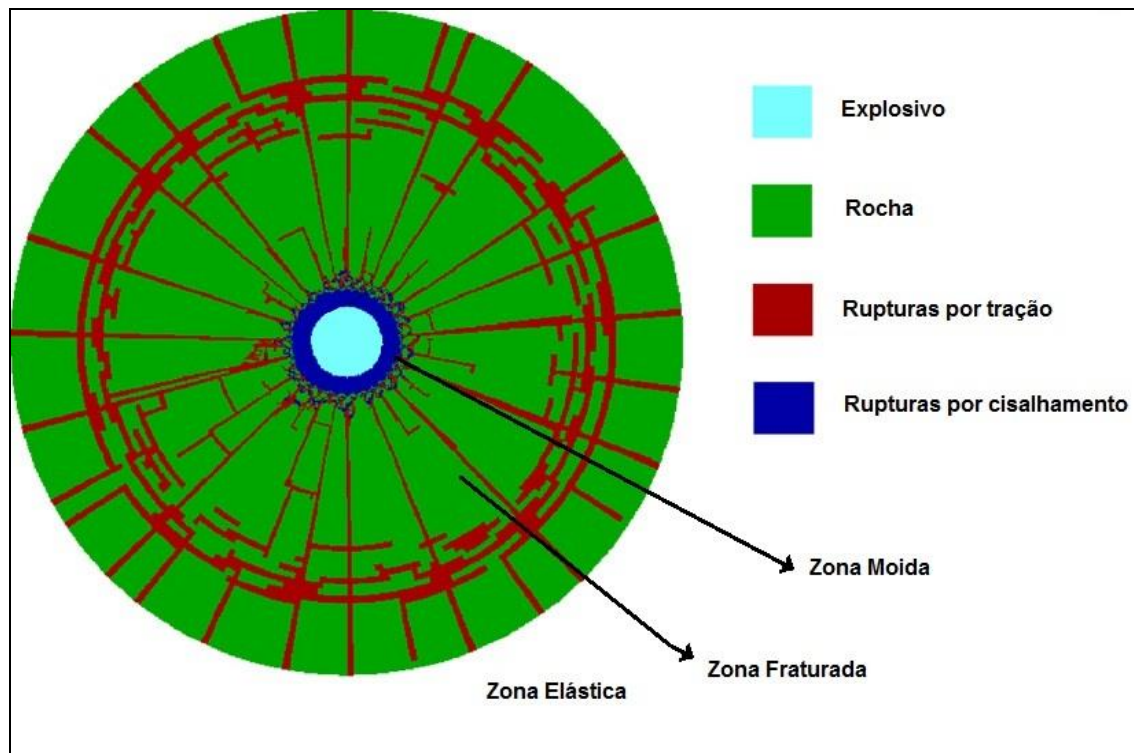


Figura 11- Fraturamento da rocha nas proximidades da carga explosiva  
Fonte: ZHU; MOHANTY E XIE, 2007 (adaptado)

A pulverização e a quebra ocorrem ao redor da parede do furo quando a pressão exercida pela frente da onda de detonação excede a resistência à compressão dinâmica da rocha. A pulverização cessa quando o nível de tensão no pulso cai abaixo do limite elástico da rocha (BERTA, 1985).

O fraturamento radial ocorre após a passagem da onda de choque. Durante ou após a formação das fissuras radiais provocadas pelas forças de tração tangenciais na frente da onda, os gases começam a se expandir e penetrar nas fissuras, aumentando o comprimento das fissuras radiais e criando outras novas, sob a influência da concentração de tensões nas suas extremidades. O número e comprimento das fissuras abertas dependem fortemente da pressão dos gases (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995).

O lasqueamento ocorre quando uma frente da onda de compressão ou de tração é refletida pela superfície livre formando duas ondas, uma de tração e uma de



cisalhamento e ambas as ondas podem aumentar as fissuras pré-existentes e as novas fissuras (BERTA, 1990).

A pressão dos gases do explosivo provoca o desmonte do maciço rochoso, penetrando nas fissuras radiais, e depois nas tangenciais, separando os blocos e lançando toda a massa rochosa para frente. Esta é a fase conhecida como quase estática por se tratar de um processo relativamente lento (cerca de 50 ms, contra os 5 ms da fase dinâmica) (BERTA, 1990).

Com o aumento da distância em relação ao ponto de detonação, a onda de choque atravessa a rocha sem provocar fraturas e sem ultrapassar seu limite de resistência. O comportamento da onda passa, então, ao campo elástico e as deformações constituem-se em vibrações atenuadas (zona elástica) (BERTA, 1990). Na figura 12 representam-se os mecanismos de fragmentação das rochas.

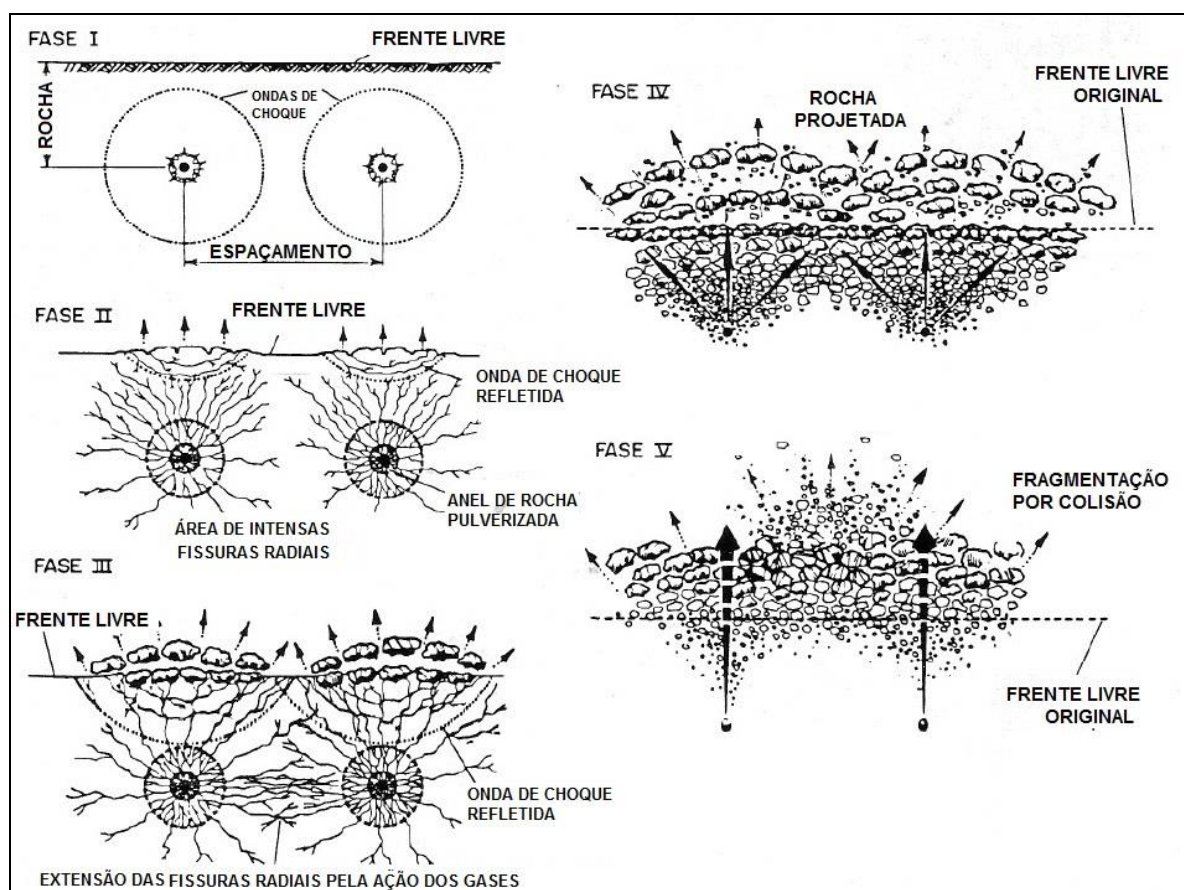


Figura 12- Resumo dos mecanismos de fragmentação da rocha

Fonte: JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995 (adaptado)

### 2.3- TRANSFERÊNCIA DA ENERGIA NA ROCHA

Na dinâmica da detonação a energia liberada produz diversos efeitos na rocha. Para avaliar quanto da energia liberada na reação explosiva é transferida à rocha, é necessário analisar tanto as características do explosivo, como as características da rocha. O rendimento da operação é função da impedância acústica dos dois meios.

A impedância característica de um meio é definida pelo produto entre massa específica e a velocidade de propagação no meio. Assim, a impedância do explosivo ( $I_e$ ) é definida como o produto da sua massa específica ( $\rho_e$ ) pela velocidade da onda de choque no explosivo ( $C_e$ ) e a impedância na rocha ( $I_r$ ) é definida como o produto da sua massa específica ( $\rho_r$ ) pela velocidade da onda de choque na rocha ( $C_r$ ) na rocha.

Segundo Berta (1985), o rendimento teórico é dado pela equação:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(I_e - I_r)^2}{(I_e + I_r)^2} \quad (2)$$

Onde:

$\eta_1$  = rendimento em função da impedância do explosivo e da rocha

$I_e$  = impedância do explosivo ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ).

$I_r$  = impedância da rocha ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ).

Se  $I_e$  e  $I_r$  tendem à igualdade, maior é o rendimento da detonação e a capacidade de transferência de energia depende das características combinadas do explosivo e da rocha.

Outro parâmetro na transferência da energia é a relação entre o diâmetro do furo e o diâmetro da carga explosiva. Quando esta relação tende à igualdade, ou seja, o furo está completamente preenchido, existe um melhor acoplamento entre o explosivo e o furo, e a pressão nas paredes do furo é máxima. Entretanto, a pressão tende a diminuir exponencialmente quando o diâmetro dos furos se distancia do diâmetro do explosivo.

Segundo Berta (1985), o valor da pressão dinâmica nas paredes do furo varia em função da relação diâmetro do furo/diâmetro do explosivo, levando-se em conta que uma diminuição de pressão nas paredes do furo corresponde a uma diminuição da energia transmitida. Assim, deduz-se que a passagem de energia à rocha se dá com um rendimento  $\eta_2$ , que é função da relação entre os diâmetros segundo a relação:

$$\eta_2 = \frac{1}{(e^{\phi_f/\phi_e}) - (e - 1)} \quad (3)$$

Onde:

$\eta_2$  = rendimento da equação em função dos diâmetros

$\phi_f$  = diâmetro do furo (m)

$\phi_e$  = diâmetro do explosivo (m)

$e$  = constante de Euler (2,718281828).

Da relação anterior chega-se à conclusão que o rendimento é máximo quando  $\phi_f$  e  $\phi_e$  se igualam.

Da análise das equações (2) e (3) resulta que, apenas uma parte da energia liberada na detonação, é transmitida à rocha, em função dos rendimentos  $\eta_1$  e  $\eta_2$ . A porcentagem de energia transmitida pode ser aumentada, se intervindo nos parâmetros das equações. Para  $\eta_1$ , pode-se escolher um explosivo com características de impedância que se igualem ou aproximem ao máximo da rocha e para  $\eta_2$ , pode-se tentar obter um preenchimento completo do furo na fase de

carregamento. O explosivo é capaz de transferir à rocha apenas uma parte da energia liberada, dada pela equação:

$$\varepsilon^* = \eta_1 \eta_2 \cdot E_d \quad (4)$$

Sendo:

$\varepsilon^*$ = energia transferida à rocha relacionada à massa unitária da carga explosiva (MJ/kg)

$\eta_1$ = rendimento da carga explosiva em função da impedância do explosivo e da rocha

$\eta_2$ = rendimento da carga explosiva em função dos diâmetros

$E_d$ = energia liberada na detonação (MJ/kg)

## 2.4- BALANÇO ENERGÉTICO TOTAL

Segundo Bacci (2000), Iramina (2002) e Eston (1998) a energia transmitida à rocha pode ser distribuída em várias etapas do desmonte da seguinte forma:

### a) Destaque

A fase de início do deslocamento da rocha é precedida pela formação das fraturas radiais e transversais geradas com a detonação.

### b) Quebra

A quebra tem início antes que o seu arrancamento seja completado. A energia necessária é função do grau de fragmentação que se deseja obter.

### c) Deslocamento

A quantidade de descolamento do material em um desmonte (figura 13) é função das propriedades físicas do material, da orientação do furo de mina, da distância de afastamento, do espaçamento entre furos, da sequência e tempo relativo de

iniciação das cargas, da quantidade e distribuição do explosivo e das propriedades do gás gerado pela detonação do explosivo.

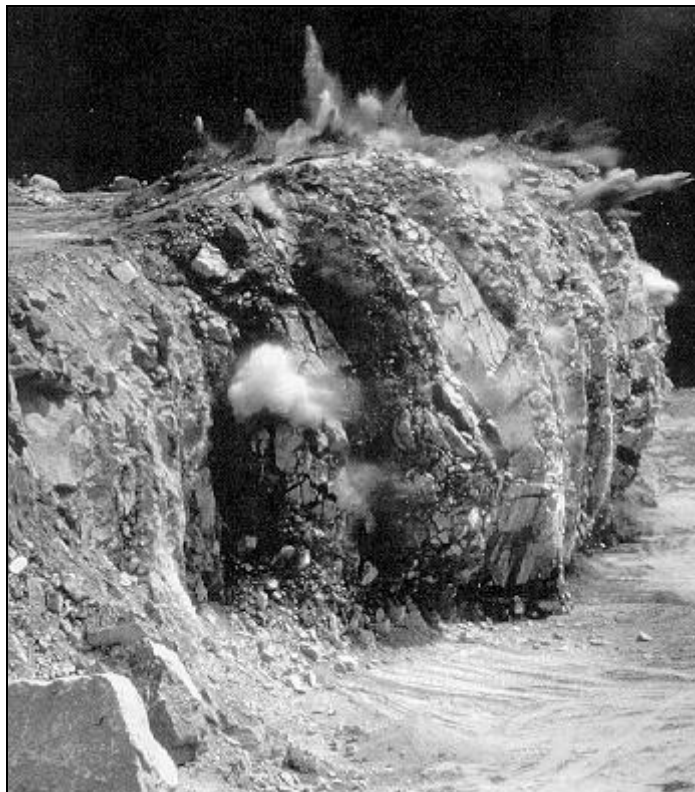


Figura 13- Fragmentação e deslocamento da rocha  
Fonte: JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995

d) Ultrafragmentação da rocha

É um dos efeitos indesejáveis e inevitáveis produzido pela energia residual da detonação. Ocorre no entorno imediato do furo. Nessa zona a rocha é pulverizada. O efeito estende-se até uma distância aproximadamente igual ao diâmetro do furo. O volume de rocha ultrafragmentada representa menos da milésima parte do volume total desmontado (BERTA, 1990).

e) Ultralançamento de fragmentos

Segundo a ABNT (2005), ultralançamento é o “arremesso de fragmentos de rocha de diâmetro superior a 1000 mm além da área de operação decorrentes do desmonte de rocha com uso de explosivos”.

Os ultralanchamento podem provocar danos pessoais e materiais. Sua prevenção dá-se na elaboração de um bom plano de fogo, não o sendo, entretanto, suficiente para evitá-los totalmente. Os lançamentos de rocha são observados com maior frequência nas minerações a céu aberto, e consomem uma fração da energia total gerada na detonação. Uma maior energia pode ser consumida, em algumas ocasiões, devido à presença de fraturas ou cavidades naturais, e/ou devido a erros no dimensionamento e carregamento dos furos. O ultralanchamento não deveria ocorrer, de forma alguma, durante a detonação (TAMROCK, 1984).

Na figura 14 observa-se um exemplo de detonação com ultralanchamento de rochas.



Figura 14- Detonação de uma bancada com ultralanchamento  
Fonte: FAJERSZTAJN, 2010

f) Deformação local da rocha

A energia gasta nessa fase é uma porcentagem muito pequena da energia total. A deformação ocorre na parte posterior do furo, a uma distância que pode ser superior ao afastamento adotado, envolvendo um volume de rocha maior do que o desmontado.

g) Efeito sísmico e perdas na atmosfera.

O efeito sísmico é mais duradouro que os efeitos de destaque, fragmentação e lançamento da rocha e estende-se pelo maciço rochoso, abrangendo um volume de rocha muito maior do que aquele fragmentado no desmonte.

O fenômeno vibratório produzido por uma detonação é do tipo transiente e sua duração varia conforme a carga explosiva utilizada e a distância ao ponto de detonação. O tempo de duração do fenômeno varia, durando alguns milésimos, a poucas dezenas de metros do ponto de detonação, podendo se prolongar por vários segundos a distâncias de centenas de metros ou quilômetros.

A energia dissipada pelo efeito sísmico é uma fração significativa da energia total liberada na detonação. Sua quantificação é muito difícil, porque o fluxo transmitido ao meio não é igual em todas as direções. O tipo de movimento vibratório é muito complexo, consistindo de oscilações longitudinais e transversais, com frequências muito variáveis, e com caráter diverso nas várias direções, além da variação com o aumento da distância da origem.

Segundo Eston (1998), a energia gasta na produção das vibrações elásticas na rocha corresponde a, aproximadamente, 40% da energia total produzida, podendo ser calculada através de fórmulas matemáticas.

Uma fração considerável de energia é dissipada na forma de vibrações não audíveis, porque são transmitidas em frequências fora da faixa de audibilidade humana (16 a 16000 Hz ou 20 a 20000 Hz).

Estas perdas correspondem à parte do trabalho de expansão dos gases que não foi utilizado para quebrar ou deslocar a rocha, incluindo a energia cedida à rocha na forma de calor. São difíceis de medir, já que a maioria das medições considera a parte audível do fenômeno.

#### h) Vibração no maciço

Segundo Tamrock (1984) as vibrações são decorrentes da resposta do maciço à propagação das ondas sísmicas provocadas pelas detonações. São afetadas, em sua intensidade, pela energia liberada na fonte, distância percorrida, características do meio, tipo de onda, frequência, ângulo de incidência com interfaces entre meios distintos e descontinuidades existentes no meio. As vibrações do maciço podem ser quantificadas através das grandezas deslocamento, aceleração e velocidade de partícula, assim denominada para diferenciá-la da velocidade de propagação da onda. As vibrações são a principal causa de conflitos envolvendo empreendimentos, que empregam explosivos, e sua vizinhança.

A distribuição da energia de detonação apresentada anteriormente é representada no gráfico 1 por Bacci (2000).

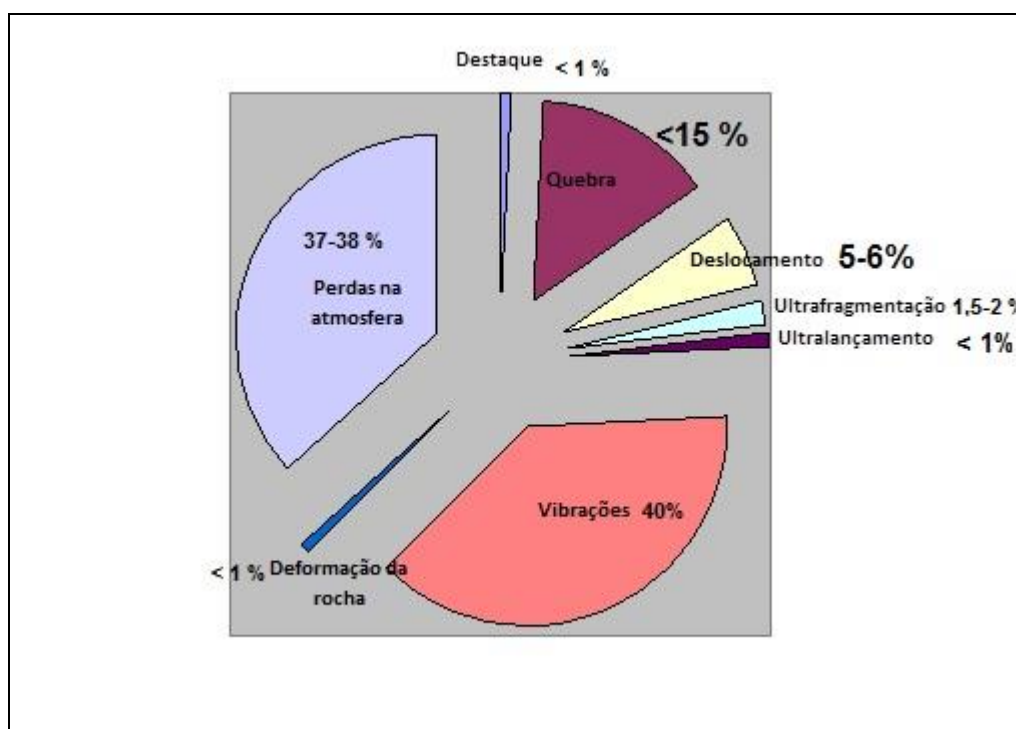


Gráfico 1- Distribuição da energia da detonação  
Fonte: Bacci (2000)



Iramina (2000) representa a distribuição da energia da detonação de outra forma na figura 15.

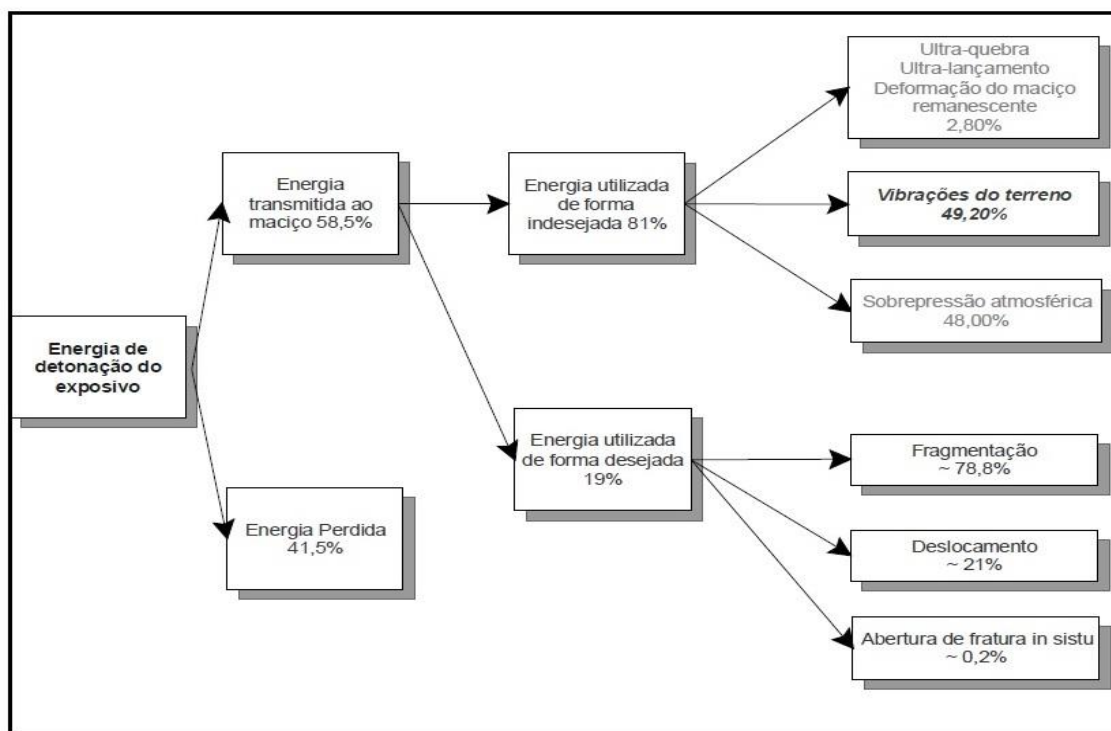


Figura 15- Diagrama de distribuição da energia de detonação  
Fonte: Iramina (2002)

## 2.5- VIBRAÇÕES DO TERRENO

Segundo Tamrock (1984) entende-se como vibração o fenômeno de transmissão de energia pela propagação do movimento ondulatório através de um meio.

Numa detonação o explosivo trabalha com uma determinada eficiência e uma porcentagem é liberada para o ambiente através do maciço rochoso, de águas subterrâneas e do ar. A amplitude destes movimentos diminui na medida que se afasta do ponto da detonação (TAMROCK, 1984).

### 2.5.1- Parâmetros das ondas.

Segundo Llera et al. (1987) a passagem de uma onda por um meio rochoso produz em cada ponto deste, um movimento conhecido como vibração.

Uma simplificação para estudar as vibrações geradas por detonações é considerá-las como ondas senoidais (Figura 16).

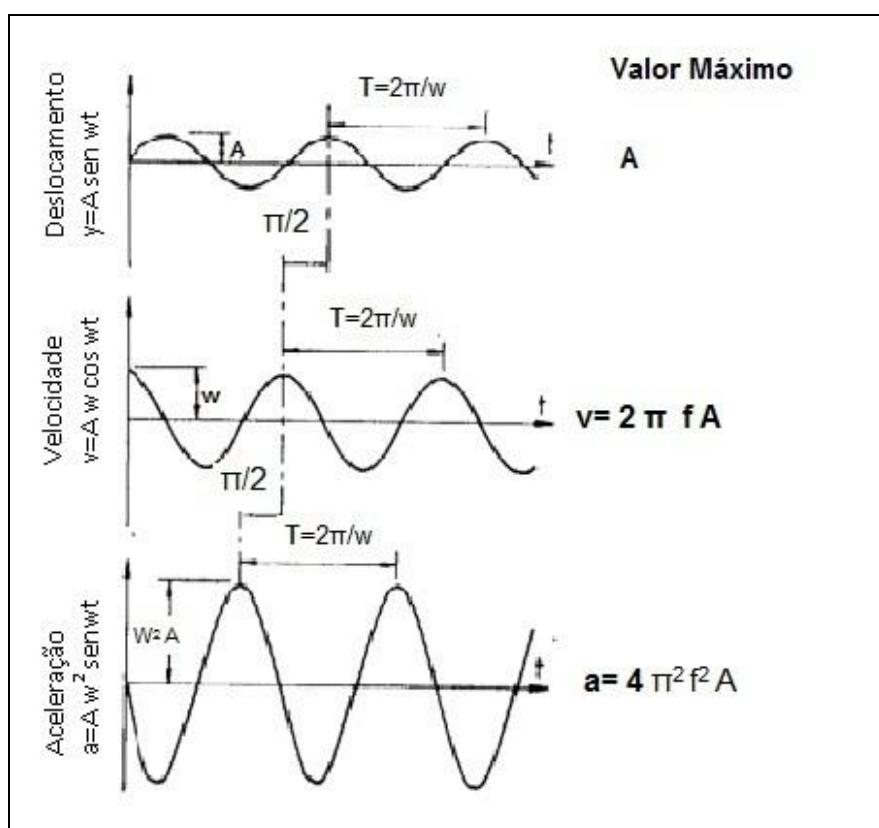


Figura 16- Movimento ondulatório senoidal

Fonte: JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995 (adaptado)

Os elementos básicos de análise de ondas senoidais são:

- Amplitude (A) - deslocamento máximo de um ponto desde sua posição de repouso (m).
- Velocidade da partícula (v) - velocidade com que se movimenta o ponto (m/s)

- Aceleração ( $a$ ) - taxa de variação da velocidade ( $m/s^2$ )
- Frequência ( $f$ ) - número total de oscilações ou ciclos por segundo (Hz). A frequência é o inverso do período " $T$ " (s).

O deslocamento " $y$ " em qualquer instante de tempo é igual a:

$$y = A \times \text{sen}(\omega t) \quad (5)$$

sendo  $\omega$  a velocidade angular, tendo-se:

$$\omega = 2 \times \pi \times f = 2 \times \pi \times \left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

O comprimento de onda " $\lambda$ " para uma velocidade de propagação " $v$ " é:

$$\lambda = v \times T = v \times \left(\frac{1}{f}\right) \quad (7)$$

As relações entre deslocamento, velocidade e aceleração das partículas são:

$$y = A \times \text{sen}(\omega t) \quad (8)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = A \times \omega \times \cos(\omega t) \quad (9)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A \times \omega^2 \times \text{sen}(\omega t) \quad (10)$$

Quando se leva em conta somente os valores máximos absolutos desses parâmetros, as relações anteriores tornam-se:

$$V_{\text{max}} = A \times \omega = A \times 2 \times \pi \times f \quad (11)$$

$$a_{\max} = A \times \omega^2 = A \times 4 \times \pi^2 \times f^2 = V_{\max} \times 2 \times \pi \times f \quad (12)$$

Segundo Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) as vibrações geradas nas detonações são transmitidas através do maciço rochoso como ondas sísmicas cuja frente se desloca radialmente partindo do ponto da detonação. As ondas sísmicas são classificadas em dois grupos: ondas de volume e ondas de superfície.

Ondas de volume são conhecidas como primárias ou de compressão (P). Estas ondas vão se propagar no interior do maciço, produzindo compressões e trações, dando origem movimentos das partículas na direção da propagação das ondas. São as mais rápidas e produzem mudanças de volume, mas não de forma, no material através do qual se propagam (TAMROCK, 1984).

O segundo tipo são as ondas transversais ou de cisalhamento (S), que produzem movimento das partículas, perpendiculares à direção de propagação da onda (Figura 17).

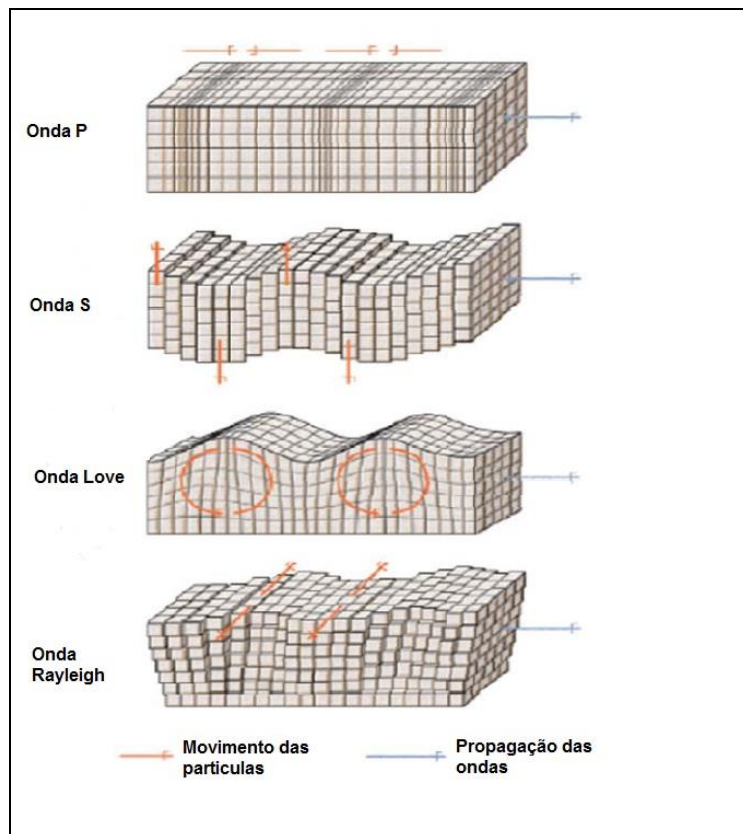


Figura 17- Tipos de ondas  
 Fonte: Castillo e Vizcarra, 2009

O maciço por causa dessas ondas experimenta mudanças na forma, mas não de volume.

Outro tipo de ondas são as ondas superficiais, que são geradas nas fraturas das rochas ou próximas à superfície do terreno: ondas *Rayleigh-R* e ondas *Love-Q*. Outros tipos de ondas superficiais são as ondas Canal e as ondas *Stonelly*, que são irrelevantes pela pouca informação que fornecem para o caso de danos por vibrações do maciço (ORIARD, 1982); (SCOTT, 1996).

A velocidade das ondas transversais encontra-se entre a das ondas longitudinais e as ondas superficiais.

As ondas *Rayleigh* proporcionam às partículas um movimento elíptico retrógrado, com uma direção contrária a da propagação da onda. As ondas de *Love* são mais

rápidas do que as *Rayleigh*, e provocam um movimento das partículas na direção transversal à de propagação das ondas (ORIARD, 1982); (SCOTT, 1996).

As velocidades de ondas “P” e “S” podem ser calculadas a partir das propriedades elásticas do maciço pelas seguintes expressões:

$$V_p = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{\rho_r \times (1 - 2\nu) \times (1 + \nu)}} \quad (13)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2 \times \rho_{rocha} \times (1 + \nu)}} \quad (14)$$

onde:

$\rho_{rocha}$  = Densidade da rocha (kg/m<sup>3</sup>)

$\nu$  = Coeficiente de *Poisson*, (adimensional).

$E$  = Módulo de *Young* (N/m<sup>2</sup>)

$V_p$  e  $V_s$  = Velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais respectivamente (m/s)

Como as ondas viajam com diferentes velocidades e o número de retardos na detonação pode ser grande, as ondas geradas se sobrepõem umas às outras no tempo e no espaço, tornando os movimentos muito complexos. As análises utilizam então sensores para as três direções: radial, vertical e transversal para captar os movimentos parciais e totais.

As ondas *Rayleigh* transportam entre 70 e 80% da energia total. Este tipo de onda domina os movimentos de superfície terrestre a distâncias da detonação de várias centenas de metros. Como muitas estruturas e edifícios estão a distâncias superiores a 500 m da detonação, são as ondas de *Rayleigh* que representam o maior potencial de danos (ORIARD, 1982); (SCOTT, 1996).

## 2.6- PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A VIBRAÇÃO

### 2.6.1- Geologia local e características da rocha.

Segundo Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) a geologia local e as características da rocha têm uma grande influência sobre as vibrações.

Em maciços rochosos homogêneos e isotrópicos, as vibrações se propagam igualmente em todas as direções, mas em estruturas geológicas com fraturamento, a propagação da onda pode variar muito com a direção e, portanto, podem-se ter diferentes níveis de atenuação.

O capeamento de solo afeta a intensidade e frequência das vibrações devido ao módulo de elasticidade ser mais baixo do que o das rochas, e a velocidade de propagação da onda é menor nesses materiais. A frequência diminui também, mas o deslocamento aumenta na medida em que as espessuras dos materiais de capeamento são maiores.

A magnitude da vibração em longas distâncias diminui rapidamente na presença de material de capeamento, mas em pontos perto da detonação as vibrações são mais afetadas pelos fatores da concepção do plano de fogo.

Em um estudo estatístico de mais de 2700 registros mantidos pela empresa *Nobel's Explosive Company Limited* observa-se que 90% das detonações em minas de carvão produzem frequências abaixo de 20 Hz. O número de detonações em outras pedreiras resulta em frequências entre 4 e 21 Hz numa porcentagem de aproximadamente 80%. Quanto menor for a frequência maior o deslocamento do solo e elevados os níveis de tensão, resultando frequentemente

em grandes danos às estruturas (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995).

### 2.6.2- Carga máxima por espera

As magnitudes das vibrações do solo e do ar em um dado ponto variam dependendo da carga explosiva detonada e da distância do ponto ao local da detonação. A maior carga por espera é a que influencia diretamente na intensidade das vibrações, e não a carga total usada na detonação. É importante que os intervalos de retardos sejam suficientemente grandes de modo que não exista interferência entre as ondas geradas por diferentes grupos de furos detonados (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995).

Quando existem vários furos com o mesmo tempo de retardo nominal, a carga máxima por espera geralmente é menor do que a carga total, devido à dispersão nos tempos dos detonadores utilizados. Portanto, para determinar a carga máxima por espera, estima-se uma fração do número total de cargas iniciadas pelos detonadores com o mesmo retardo nominal.

A carga máxima por espera ( $Q$ ) é o fator mais importante que afeta a geração de vibrações e a relação entre a intensidade das vibrações e a carga é do tipo potencial. Para a velocidade da partícula ( $V_p$ ) tem-se:

$$V_p \propto Q^a \quad (15)$$

Segundo Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) as investigações realizadas pelo *United States Bureau of Mine* (USBM) mostraram que o valor de “a” é da ordem de 0,8.



### 2.6.3- Distância da detonação

A distância ponto de detonação- ponto de captação tem também uma grande importância na magnitude das vibrações. À medida que aumenta a distância, a intensidade das vibrações diminui de acordo com a seguinte fórmula:

$$V_p \propto \frac{1}{D^b} \quad (16)$$

Onde o valor “b” segundo o U. S. Bureau of Mine é aproximadamente 1,6 (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995). Se fosse 2 se teria a conhecida lei do inverso do quadrado da distância.

Segundo Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) outro efeito da distância é a atenuação das componentes da onda de alta frequência, uma vez que o solo atua como um filtro. Assim, a grandes distâncias da detonação as vibrações no solo terão mais energia na faixa das baixas frequências (1- 160 Hz) (figura18).

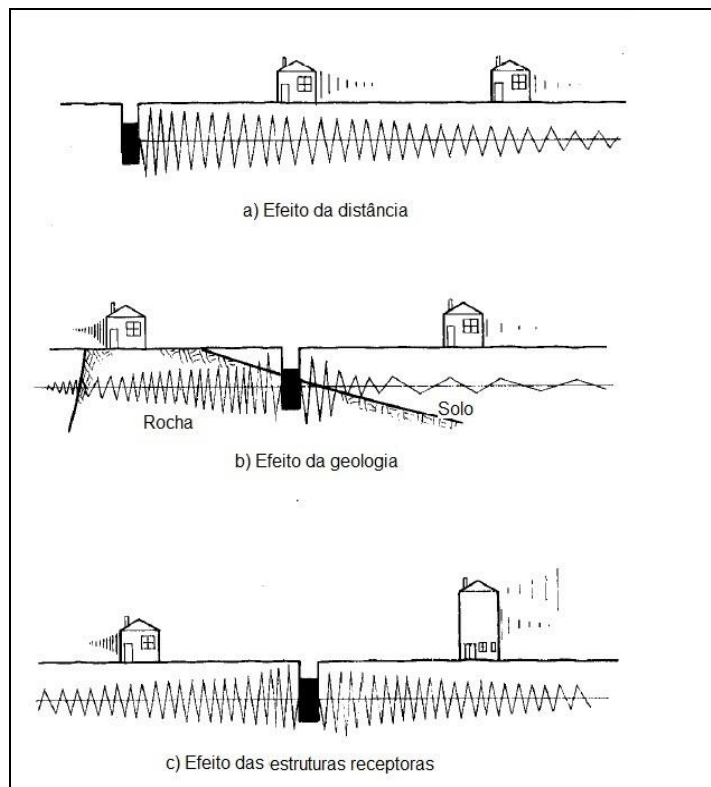


Figura 18- Modificações das vibrações ao se propagarem por terrenos de diferentes estruturas e características

Fonte: JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995

#### 2.6.4- Razão de carregamento

Segundo Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) quando existem problemas de vibração pode-se pensar em reduzir a quantidade de explosivo, mas isto está longe de resolver o problema, uma vez que foram registradas detonações no qual a razão de carregamento foi reduzida em 20% com relação ao ideal, e os níveis de vibração medidos foram 2 e 3 vezes maiores. As causas foram o grande confinamento espacial e à má distribuição do explosivo.

### 2.6.5- Tipos de explosivos

Há uma correspondência entre as velocidades das partículas e as tensões induzidas nas rochas, e a constante de proporcionalidade é a impedância da rocha.

Assim, uma consequência prática é que o explosivo que gera menores pressões nos furos gerará níveis inferiores de vibração. Estes explosivos são de baixa densidade e baixa velocidade de detonação, e um exemplo é o ANFO (Ammonium Nitrate / Fuel Oil). Se compararmos a mesma quantidade de ANFO com um hidrogel, as intensidades das vibrações geradas serão 2 vezes e 2,4 vezes menores, respectivamente (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995).

Os ANFO são explosivos fabricados à base de nitrato de amônio, na forma a granel (“*prills*”) e utilizado após sua mistura com óleo (preferencialmente diesel) na proporção de 3 a 3,5 L de óleo para cada saco de 50 kg de nitrato.

A mistura do ANFO pode ser feita manualmente aonde o explosivo vai ser carregado, com o objetivo de aumentar o volume de gases produzidos na detonação e também para evitar um maior contato direto dos grânulos com a água. Muita umidade nos furos pode provocar degeneração e perda de potencial explosivo. Em estações chuvosas é recomendável revestir preliminarmente os furos e carregar com uma camisa feita de filme de polietileno, e geralmente ele é despejado nos furos sem embalagens (GERALDI, 2011).

O hidrogel ou *slurrie* (polpa) não contém na sua composição materiais explosivos. Tem grande resistência à água, pois os seus componentes são dissolvidos em água (soluções aquosas saturadas em nitrato de amônio com nitrato de cálcio ou nitrato de sódio, combustíveis, etc.), dando segurança aos trabalhadores. Os gases são muito pouco tóxicos sendo ideais para o desmonte em subsolo. Tem

força semelhante à dinamite e podem ser usados no seu lugar como carga de fundo. Na sua composição não levam sensibilizantes explosivos aumentando a sua segurança (MARTINHO, 2012).

### 2.6.6- Tempos de retardo

Os tempos de retardo entre as detonações dos furos podem se referir ao retardo nominal ou ao retardo efetivo (JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L. e CARCEDO, 1995).

O primeiro é a diferença entre os tempos de iniciação nominais, enquanto o retardo efetivo é a diferença entre os tempos de chegada dos impulsos gerados pela detonação de furos consecutivos. No caso simples de uma fila de furos esses parâmetros estão relacionados com a seguinte expressão:

$$t_e = t_n \frac{S_f \times \cos \phi}{V} \quad (17)$$

Onde:

$t_e$  = tempo de retardo efetivo, s.

$t_n$  = tempo de retardo nominal, s.

$S_f$  = espaçamento entre os furos, m

$V$  = velocidade de propagação das ondas sísmicas, m/s

$\phi$  = Ângulo entre a linha da progressão da detonação e da posição do captador

## 2.7- DANOS PROVOCADOS PELAS VIBRAÇÕES AO MEIO AMBIENTE

Para o desenvolvimento de uma mineração a céu aberto são realizadas algumas operações que tem efeitos indesejáveis para o meio ambiente e desconforto para as populações vizinhas (Koppe et al., 2009). Na fase de abertura da cava, por

exemplo, é retirada a vegetação, sendo realizadas escavações e movimentações de terra que modificam a paisagem local. Posteriormente, como desmonte são provocados outros efeitos indesejáveis para o meio ambiente (como incômodo na vizinhança, como sobrepressão atmosférica, vibração do terreno, ultralancamento de fragmentos, fumos, gases, poeira e ruído). As operações de transporte e beneficiamento do minério também geram poeira e ruído (DE ARAUJO NETO, 2006).

Na tabela 3 apresentam-se os principais aspectos e impactos ambientais das atividades de lavra a céu aberto segundo Bacci et al.(2006).

Tabela 3- Aspectos negativos e impactos da mineração a céu aberto

<b>ATIVIDADES</b>	<b>ASPECTOS</b>	<b>IMPACTOS</b>
Decapeamento, envolvendo remoção da cobertura superficial, deterioração da cobertura vegetal e a formação de pilhas de solo	Erosão, movimentação de terra e assoreamento de córregos, alteração da paisagem, flora e fauna locais	Esgotamento de recurso natural Afugento da fauna Modificação e destruição da vegetação nativa
Perfuração das bancadas	Geração de ruído e poeira	Poluição sonora Perturbação das vizinhanças e exposição ocupacional dos trabalhadores
Carregamento dos furos com explosivos	Possibilidade de acidentes	Explosão, riscos de vida
Desmonte das bancadas com detonação dos explosivos	Geração e propagação de ondas sísmicas no terreno e no ar (vibração e sobrepressão atmosférica) Ultralancamento de fragmentos	Riscos de danos a construções civis, desconforto à população vizinha, riscos de incidentes e de vida Riscos de danos a construções civis e riscos a vida humana
	Geração de ruído, fumos e gases	Poluição sonora

**Continua**

		<b>Conclusão</b>
Armazenagem de explosivos e acessórios de detonação	Riscos de explosão	Perdas materiais e de vidas, poluição do ar
Carregamento e transporte do minério até a britagem	Geração de poeira e ruído e emissão de gases	Poluição do ar e sonora; Desconforto aos trabalhadores da mina
	Vazamentos de óleos/combustíveis/graxas	Comprometimento do solo e das águas superficiais
Abertura de novas vias de acesso na Cava	Processos erosivos e assoreamento dos cursos d'água	Comprometimento dos recursos naturais
	Geração de ruído, poeira e emissão de gases produzidos pelas máquinas	Poluição do ar e sonora
	Vazamentos de óleos/combustíveis/graxas das máquinas	Comprometimento do solo e das águas superficiais
Drenagem da cava	Geração de efluentes, aporte de sedimentos para os cursos d'água	Contaminação das águas superficiais Comprometimento dos recursos naturais superficiais
	Consumo de energia	Utilização de recursos naturais
Umidificação das vias de acesso	Consumo de água	Utilização de recursos naturais

Fonte: Bacci et al., 2006 (adaptado)

## 2.8- DANOS PROVOCADOS NAS EDIFICAÇÕES

As normas consideram que um fator decisivo para a ocorrência de danos nas edificações é a relação existente entre a frequência natural da edificação e a frequência da vibração a que ela será submetida. Consideram ainda que danos podem ser causados por alongamento, cisalhamento e torção, sendo que tais

deformações podem ser incrementadas pela superposição de tensões estacionárias preexistentes na edificação. Isto requer a adoção de critérios de danos mais conservadores. Outro fator a ser observado é o estado de conservação da edificação (DALLORA NETO, 2004).

Existem diferentes classificações e recomendações que variam de acordo com os diversos autores. Um exemplo é Siskind et al. (1980), que propõem que o critério de vibrações consideradas seguras em detonações está relacionado com as frequências e deve observar os limites da tabela 4.

Tabela 4- Critérios para a avaliação de danos a edificações

		Frequências			
		Até 4 Hz	4- 15 Hz	15- 40 Hz	>40 Hz
Nível máximo de vibração (mm/s)	Taxa de aumento do nível	0,762 mm	Valor fixo 19,05 mm/s	Taxa de aumento do nível 0,203 mm	Valor fixo 50,8 mm/s

Fonte: Siskind et al., 1980 (adaptado)

Outra recomendação de Siskind et al. (1980) é que para as construções habitacionais com paredes revestidas com gesso, o limite dos níveis de vibração considerados seguros para baixas frequências (de 4 a 15 Hz) deve ser de 12,5 mm/s.

## 2.9- RESPOSTA HUMANA AS VIBRAÇÕES

Nos primeiros anos da década de 1930, alguns testes foram realizados com pessoas voluntárias com o objetivo de determinar a sensibilidade humana às vibrações do solo ocasionadas pelas detonações. Todavia é muito enganoso tentar quantificar a intensidade da vibração do solo com base nas respostas das pessoas. Embora pessoas sejam sensíveis a sons e vibrações, são muito

imprecisas na sua capacidade de quantificar a sua percepção, e há grandes variações entre diferentes indivíduos (RUDENKO, 1998). O mais importante é o fato de que as pessoas no interior de edifícios respondem de forma diferente das pessoas que estão fora, e os que estão dentro de suas casas vão responder de uma forma mais negativa do que aqueles que estão dentro de outros edifícios. Um dos fatores mais importantes é a presença de sons secundários, tais como ruído de janelas ou portas. Depois de perceber certos sons, algumas pessoas testemunhavam que eles sentiram vibrações muito fortes, mesmo quando eram muito pequenas para ser sentidas pelos seres humanos. Os limiares de percepção de vibração (sem um segundo evento) são de aproximadamente 0,51 mm/s para a maioria das pessoas em frequências típicas de detonação. Isto é 1/100 do limite de 50,8 mm/s comumente utilizado para as detonações da construção civil (INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVE ENGINEERS (ISEE), 2003).

## 2.10-SISMÓGRAFOS DE ENGENHARIA E SEUS COMPONENTES

A origem dos sismógrafos pode ser datada há muitos séculos atrás, nos povos de China e do Egito, com as vibrações do solo sendo avaliadas com a queda de objetos. O primeiro equipamento desenvolvido para gravar as vibrações produzidas por terremotos surgiu em 1841, mas só em 1923 o primeiro sismógrafo portátil surgiu como produto de pesquisas motivadas pela artilharia durante a 1ª Guerra Mundial. Hoje em dia os equipamentos para medições das detonações têm o mesmo princípio que os utilizados na medição dos terremotos (ISEE, 2003).



### **2.10.1- Sismógrafos de engenharia para detonações**

Os sismógrafos de engenharia para detonações são utilizados para monitorar, gravar, analisar e mostrar as vibrações do terreno produzidas por detonações. Em outras palavras são utilizados para medir a energia transferida pela onda sísmica de um ponto a outro. Os sismógrafos de hoje são leves, compactos e alimentados por baterias, de forma que podem ser facilmente deslocados de um lugar a outro.

Um sismógrafo padrão utiliza 4 canais para sinais de 4 sensores, três deles que medem o movimento do solo e um quarto para medir sobrepressão do ar. As informações provenientes da detonação são mostradas como medições de picos de velocidades das partículas, deslocamentos destes picos, suas acelerações, e as frequências do movimento (ISEE, 2003).

Os sismógrafos de engenharia são completamente distintos dos sismógrafos geofísicos usados em pesquisa mineral.

### **2.10.2- Sismógrafos de engenharia digitais**

Nos sismógrafos digitais (figura 19) os sinais analógicos obtidos das vibrações são convertidos em informações digitais, processados e finalmente mostrados, impressos ou armazenados. Ainda que acabe a energia da bateria a informação armazenada não é perdida. Os dados estão constantemente sendo lidos e comparados com um nível de gatilho definido pelo operador. Uma vez que o valor do gatilho é alcançado o sismógrafo começa a gravar as informações (ISEE, 2003).



Figura 19- Sismógrafo digital modelo SSU 3000EZ+  
Fonte: GEOSONICS, 2011

### **2.10.3- Geofone ou sensor de vibração**

Segundo ISEE (2003) os geofones têm basicamente três sensores que medem os movimentos em três direções (vertical, radial e transversal). Os picos de velocidades das partículas são medidos em unidades de polegadas/segundo ou mm/segundos.

O sensor de vibração tem internamente um peso que se move devido à vibração e o movimento gerado pelo peso é então medido pelo sismógrafo.

### **2.10.4- Microfones**

Os microfones são utilizados para medir a sobrepressão do ar, que normalmente chega ao aparelho na forma de pulsos com valores acima da pressão atmosférica. As leituras são dadas em psi ou Pa, e depois convertidas a dB.

### 2.10.5- Acelerômetros

Segundo Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995), a diferença de potencial gerada por um cristal piezoelétrico submetido a uma força é a base dos acelerômetros e essa força é proporcional à massa do cristal vezes a aceleração do movimento vibratório. Para Iramina (2002), quando ocorre a diferença de potencial, há um desequilíbrio com relação às partículas carregadas que se manifesta sob a forma de um fluxo de carga elétrica até que o equilíbrio entre as partículas seja restaurado. Este fluxo de carga é diretamente proporcional à força atuante sobre o elemento piezoelétrico.

Na figura 20 observa-se o geofone do sismógrafo dentro do qual se encontra o acelerômetro, fixado no solo.



Figura 20- Geofone do sismógrafo fixado no solo para medição  
Fonte: Arquivo pessoal, 2012.

## 2.11- EQUAÇÃO CARGA- DISTÂNCIA

As vibrações no terreno atenuam-se ao longo do seu percurso por dois mecanismos: o geométrico e o de dissipação (DINIS DA GAMA, 1998). Na prática, as ondas não se atenuam sempre com a distância, pois em meios estratificados, com geometria favorável, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras refletidas, podendo medir-se maiores valores de vibração em pontos mais afastados.

Segundo Dinis da Gama (1998) as propriedades geológicas, geotécnicas e físicas de um maciço estão relacionadas às suas propriedades de atenuação de vibrações, de forma a produzir trens de ondas característicos ao longo da trajetória de propagação.

Os fatores locais de atenuação podem se correlacionar com a fonte de energia, sobre a qual se tem controle através dos elementos do plano do fogo, como são a massa de explosivos a ser detonada e a distância entre ela e o ponto monitorado. O fator mais importante é o uso de retardos e a sequência correta de detonação para assegurar que cada furo, ou a linha de furos, faça o lançamento na direção de pelo menos uma face livre (DINIS DA GAMA, 1998).

Segundo Dinis da Gama (1998) a forma geral da equação que correlaciona as variáveis que mais influenciam na atenuação da onda sísmica é:

$$VPP = a(DE)^b \quad (18)$$

Sendo DE (Distância Escalonada) definida pela Norma Brasileira (NBR) 9653 (ABNT, 2005) como:

$$DE = \frac{D}{Q^{0,5}} \quad (19)$$

D é a distância horizontal entre o ponto de medição e o ponto mais próximo da detonação (em m);

Q é a carga máxima de explosivos a ser detonado por espera (kg).

Quando uma detonação apresenta diversos valores de carga máxima por espera, o valor considerado como Q é o maior dos valores da detonação em questão.

Como a equação de distância escalonada é uma função potencial, não se tem um ajuste linear direto e usa-se uma transformação logarítmica:

$$\log(VPP) = \log(a) + b * \log(DE) \quad (20)$$

A USBM estabelece que a velocidade de partícula máxima  $V_p$  é relacionada com a distância escalonada pela seguinte expressão:

$$VPP = k \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-b} \quad (21)$$

Onde:

VPP = velocidade de partícula de pico (m/s)

D = distância de detonação ao ponto de medição (m)

Q= carga máxima por espera (kg)

k= fator local

b= fator local

Onde k e b são constantes que devem ser determinadas por medições feitas em cada local de desmonte em particular, e obtidas por regressão estatística.

A equação 20 plota uma reta em papel log-log e valor de k é dado pela intercepção do eixo vertical (na distância escalonada igual à unidade), enquanto que a constante b é dada pela inclinação da reta.

## 2.12-NORMAS E CRITÉRIOS DE CONTROLE DA VIBRAÇÃO DE TERRENO

### 2.12.1- Normas internacionais

Em muitos países desenvolvidos existem normas específicas que regulam as vibrações geradas pelas detonações, com limites para as mesmas.

Segundo Bacci et al. (2003a) no caso específico de minerações em áreas urbanas, a velocidade de vibração de partícula, normalmente expressa em mm/s, é o parâmetro que tem dado melhor correlação na avaliação de possíveis danos às estruturas civis, atribuídos às vibrações do terreno.

A maioria das normas existentes apresentam valores que variam de 2 mm/s até 150 mm/s dependendo do tipo de construção. A maioria considera na avaliação de danos estruturais, além da velocidade, a frequência da vibração, e algumas usam parâmetros como o tipo de construção e o material.

As normas internacionais mais importantes são as seguintes:

- Alemanha: *Deutsches Institut für Normung* (DIN) 4150
- França: Recomendações da *Association Française des Tunnelset del' Espace Souterrain* (AFTES)
- Reino Unido: *British Standards* (BS) 7385
- Suécia: SS460 48 66
- Portugal NP-2074
- Vários países: *International Organization for Standardization* (ISO) 2631
- Estados Unidos: USBM RI 8507

A maioria das normas são semelhantes em termos dos critérios que limitam as vibrações, e algumas características comuns são:

- Inclusão de diferentes tipos de estruturas (dependendo do nível de resistência que é assumida a priori) e exclusão de certas estruturas especiais como pontes, túneis, represas, etc.
- Variação dos limites de velocidade da vibração com a frequência, com uma relação diretamente proporcional entre elas.
- Estabelecimento de critérios para o cálculo da frequência predominante pelo método da *Fast Fourier Transform* (FFT). Com base nos registros de vibração o espectro de frequências permite determinar a frequência ou frequências predominantes ou principais da onda.

No entanto, cada norma tem uma característica única, que geralmente representa uma circunstância específica do país de origem. Exemplos são a apreciação de casas de madeira nos USA, frequência do número de detonações na Suécia, fatores de ponderação "sociocultural" na Grã-Bretanha, etc.

Segundo Bacci et al. (2003b) algumas diferenças entre as normas americanas e europeias são:

- Na instalação do geofone a norma americana, dispõe que seja colocado no terreno circundante à estrutura em observação, e não no interior do edifício ou em correspondência de suas partes particularmente sensíveis, como estipulam as normas europeias.
- O USBM classifica os edifícios em duas classes, considerando o tipo de revestimento interno, ou seja, aqueles construídos com paredes rebocadas, e os construídos sem reboco nas paredes, ou com revestimentos em gesso ou madeira. Os limites para as paredes à vista (sem reboco), propostos pelo USBM, coincidem com aqueles do *Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement* (OSMRE), para frequência entre 0 e 11 Hz e entre 40 e 100 Hz. A recomendação do OSRME permite

maiores valores de  $V_p$  no intervalo de frequência compreendido entre 11 e 40 Hz. As normas europeias definem o tipo de edifício em função do seu uso (residencial, industrial, histórico), dando valores de  $V_p$  mais baixos que a norma americana para frequências menores que 40 Hz. No intervalo de 40 a 100 Hz, para edifícios industriais, os valores se aproximam daqueles da norma americana, mantendo-se mais baixos para os outros tipos de edifícios.

- As normas norte-americanas definem os intervalos de frequência em menor e maior que 40 Hz, pois a ressonância natural dos edifícios está abaixo desse valor. As normas européias definem intervalos de frequência menores, devido aos tipos de construções mais antigas e, portanto, mais sensíveis.

### **2.12.2- A Norma Brasileira (NBR) 9653 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)**

A norma Brasileira NBR 9653 teve sua última atualização no ano 2005. Antes desse ano vários artigos foram escritos, comparando a norma com outras internacionais que já incluíam uma relação entre os valores da velocidade das partículas e a frequência da vibração.

A NBR 9653 define no seu item 3 os principais conceitos relacionados ao tema e no item 4 os critérios de avaliação e limites recomendáveis. Apresenta as seguintes condições que devem ser observadas nos desmontes por explosivos:

- Os ultralancamentos não devem ocorrer além da área de operação do empreendimento e devem ser respeitadas as normas internas de segurança referentes à operação de desmonte.



- A pressão acústica medida além da área de operação, não deve ultrapassar o valor de 100 Pa, o que corresponde a um nível de pressão acústica de 134 dBL pico.
- Os riscos de ocorrência de danos induzidos por vibrações do terreno devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude (velocidade de vibração de partícula de pico) e a frequência de vibração de partícula.
- Os limites para velocidade de vibração de partícula de pico acima dos quais podem ocorrer danos induzidos por vibrações do terreno são apresentados numericamente na tabela 5.

Tabela 5- 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 aumentando linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumentando 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: ABNT, 2005

No gráfico 2 observa-se a representação dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.

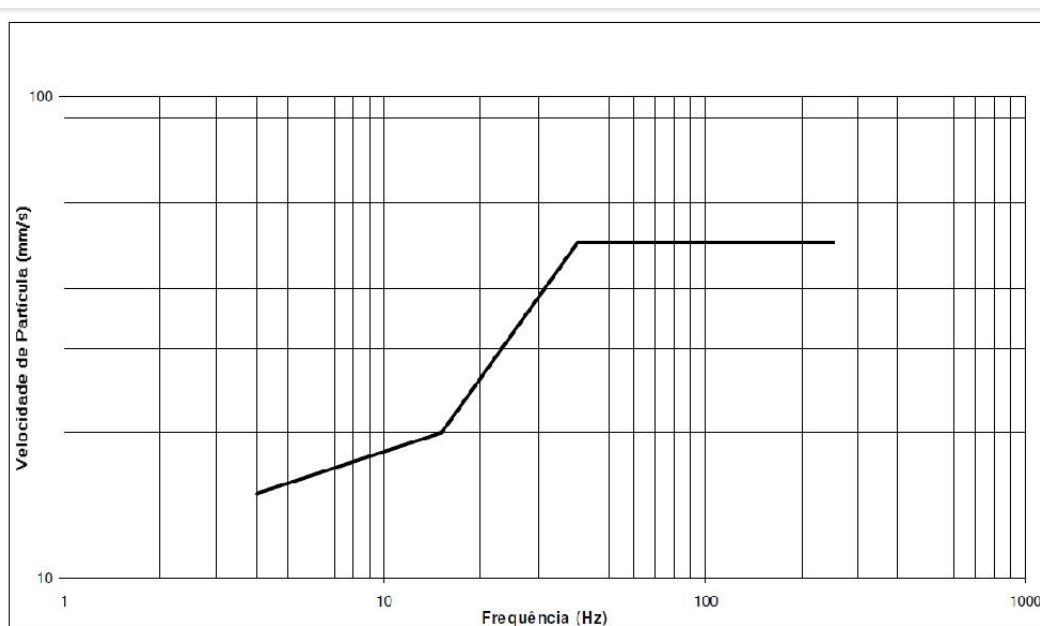


Gráfico 2- Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência  
Fonte: ABNT, 2005

A norma também oferece as orientações para os procedimentos de avaliação dos ultralancamento, da pressão acústica (neste caso estabelece como devem ser instalados os sensores de medição e como devem ser feitos os relatórios).

Também orienta como fazer as medições de vibração de partícula e para isto fornece diretrizes quanto ao posicionamento de sensores e equipamentos:

- No caso de solo, deve-se preferencialmente enterrar o transdutor a uma profundidade nunca inferior a 10 cm e nunca superior a 30 cm. Alternativamente, pode-se utilizar cravos de comprimento máximo de 20 cm, desde que o sistema não fique em balanço.
- Os geofones contendo os transdutores devem ser nivelados e orientados conforme a direção da detonação.

Quanto às características dos equipamentos, a norma preconiza que:

#### I- Sismógrafos devem:

- a) possuir sistema de verificação interna da calibração por pulso eletrônico (autochecagem);
- b) dispor de capacidade de armazenamento de eventos sísmicos (memória);
- c) estar preparado para efetuar medições em temperaturas compreendidas na faixa de  $-12^{\circ}\text{C}$  a  $+55^{\circ}\text{C}$ ;
- d) de modo preferencial, registrar instantaneamente os valores máximos de velocidade de vibração de partícula em três direções mutuamente perpendiculares, sendo os valores expressos em milímetros por segundo (mm/s).
- e) Os aparelhos de registro devem ser calibrados de acordo com as recomendações dos seus fabricantes, no máximo a cada 2 anos, com equipamentos rastreáveis, preferencialmente na RBC (Rede Brasileira de Calibração).

#### II- Transdutores de velocidade devem apresentar:

- a) resposta plana linear na faixa de frequências 4 Hz a 125 Hz;
- b) realizar medição de intensidade de velocidade de vibração de partícula no intervalo de 0,5 mm/s a 100 mm/s na faixa de frequência de 2 Hz a 250 Hz;
- c) resolução de 0,25 mm/s;
- d) precisão de  $\pm 5\%$  ou  $\pm 0,5\text{ mm/s}$ , o que for maior;
- e) A taxa de amostragem mínima deve ser de 1 000 pontos por segundo por canal, para eventos de até 5s de duração.

#### III- Quanto aos Relatórios sismográficos devem conter:

- data e hora da medição;
- identificação do local de monitoramento;
- identificação do local de detonação;
- registros sismográficos das intensidades no tempo (onda sísmica);

- valores de pico da velocidade de vibração de partícula para cada uma das três componentes (L, T e V);
- valores de pico da aceleração de partícula para cada uma das três componentes (L, T e V);
- valores de pico do deslocamento de partícula para cada uma das três componentes (L, T e V);
- valores da frequência associada ao pico da velocidade para cada componente tri-ortogonal;
- máximo valor da velocidade de vibração de partícula resultante de pico;

Adicionalmente os relatórios podem conter as seguintes informações:

- distância entre o local de detonação e o local de monitoramento;
- carga explosiva máxima por espera detonada;
- intervalos da sequência detonante;
- carga explosiva total detonada;
- condições atmosféricas.

A norma também se refere aos critérios de conforto ambiental das populações vizinhas às minerações e para isso recomenda:

1. implantação de um sistema de informação à população quanto às atividades de desmonte na pedreira, envolvendo aspectos tais como: sinalização, horário de detonação, procedimentos de segurança adotados, e outros;
2. estabelecimento de um registro de reclamações em formulário adequado, contendo pelo menos:
  - nome e endereço do reclamante, horário, tipo de incômodo verificado, quais as providências tomadas pela empresa para minimizar os aspectos relativos ao objeto de reclamação e outras providências eventuais;

3. estabelecimento, de comum acordo com a comunidade, de horários determinados de detonação com sinal sonoro audível que não gere desconforto adicional;
4. uso de insumos, na operação de desmonte, de modo a minimizar os impactos ambientais, especialmente os propagados pela atmosfera na forma de ruído e poeiras (ex.; cordel detonante substituído por tubo de choque ou espoleta eletrônica);
5. implantação de um único canal de comunicação com a comunidade, através de agente tecnicamente habilitado e familiarizado com as operações de produção;
6. implantação de uma sistemática de treinamento para os operadores vinculados às tarefas de desmonte, visando habilitá-los na minimização dos impactos ambientais;
7. manutenção do registro de todos os planos de fogo realizados, por um período mínimo de um ano, para eventual verificação do órgão fiscalizador local;
8. estabelecimento de um plano de monitoramento das detonações compatível com as necessidades específicas de cada unidade mineradora em operação.

### **2.12.3- CETESB D7.013**

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) estabeleceu critérios de avaliação de problemas ambientais através da norma interna D7.013, de 1992. Nela são fixadas as condições exigíveis para a atividade de mineração a céu aberto que utiliza explosivos no desmonte do minério. Esta norma avalia o incômodo gerado à população e não aborda os danos em estruturas civis, como a NBR-9653.

A velocidade resultante de vibração de partícula é calculada do mesmo modo que na norma NBR 9653. Quando a medição for realizada com utilização de instrumentos cujos resultados sejam a integração das três componentes, o valor máximo permitido para a velocidade de partícula é de 4,2 mm/s, para que não haja incômodo à população. Em ambos os casos, a medição deve ser feita fora dos limites da propriedade da mineração (Bacci et al., 2003b).

### 3- MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1- METODOLOGIA

Nesta pesquisa foi realizado o monitoramento de quatro detonações sequenciais, e para cada uma delas individualmente foram usados 20 sismógrafos. Assim, para cada detonação sequencial será elaborado um mapa de iso-velocidades. As análises destes dados permitirão:

- 1- Comparar quatro mapas de iso-velocidades para quatro detonações sequenciais na mesma bancada e analisar as variações nas geometrias dos mapas.
- 2- Obter para cada uma das quatro detonações, quatro equações carga-distância para as direções aproximadas norte, sul, leste e oeste e observar como o deslocamento das detonações ao longo da bancada, afeta os coeficientes das curvas carga-distância.  
  
Isto permitirá analisar a relativa precisão destas curvas em função do ponto de detonação na bancada.
- 3- Simular a técnica de Iramina (2002), gerando quatro curvas carga-distância para cada uma das quatro detonações (uma curva para uma direção distinta para cada detonação). Com as quatro curvas carga distância gerar um mapa de iso-velocidade para cada uma das quatro detonações, e comparar o efeito de deslocamento pela bancada em alterações nos mapas.
- 4- Comparar os quatro mapas gerados pelas quatro detonações com mapas gerados pela metodologia de Iramina (2002).
- 5- Finalmente se poderá fazer a construção de mapas com 80 pontos, 20 pontos, 16 pontos e 12 pontos e verificar a variação que o número de

pontos tem na construção de cada mapa. Isto será feito para cada um dos quatro locais de detonação.

### 3.2- CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PEDREIRA MONITORADA

O Grupo EMBU S.A. atua no mercado brasileiro desde 1964, fornecendo agregados para a construção civil e concreto. O grupo é composto por quatro pedreiras, localizadas em Embu das Artes, Mogi das Cruzes e Perus, no estado de São Paulo e em Vila Velha, Espírito Santo.

A pedreira Juruaçu, localizada em Perus (figura 21) tem por atividade a mineração através do beneficiamento de pedras para a construção civil e retirada de areia da própria cava da pedreira.

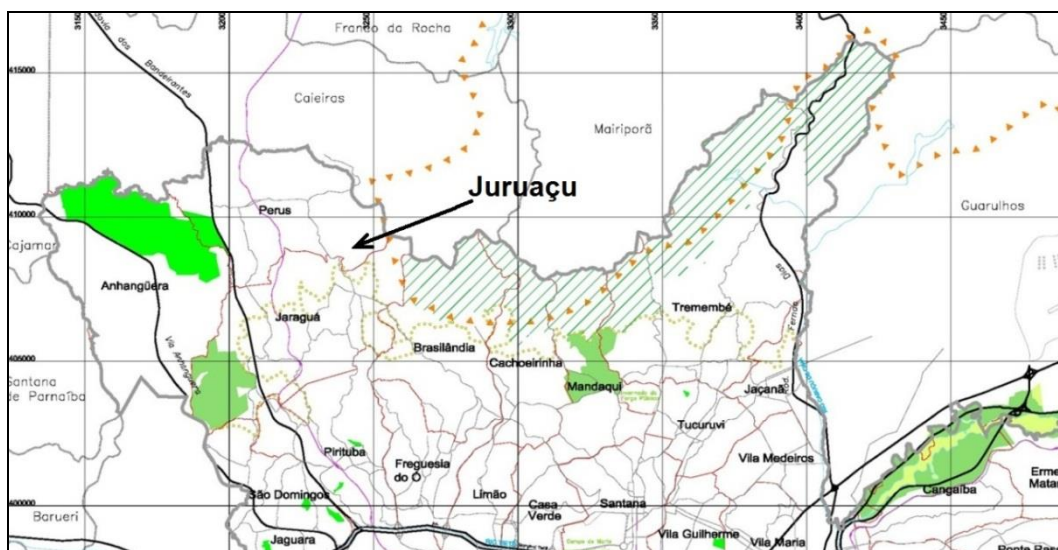


Figura 21- Localização da pedreira Juruaçu  
Fonte: Atlas de São Paulo, 2002

A lavra é feita através do desmonte de rocha granítica com o uso de explosivos próprios, e os fragmentos são transportados por correias e passam por sucessivos estágios de britagem até se obter as granulometrias comerciais.



A empresa não estoca explosivos, e para as detonações é contratada uma empresa especializada que no dia da detonação fornece todo o explosivo necessário e o que sobrar é levado de volta.

A produção média mensal da Juruçu é de 150.000 toneladas (cerca de 100.000 m<sup>3</sup>/mês) e a remoção média mensal de estéril é de cerca de 15.000 m<sup>3</sup> (estéril é medido em metros cúbicos devido à heterogeneidade e muita variação da densidade).

O processo de lavra envolve várias etapas, as quais são acompanhadas de maneira contínua por levantamentos topográficos, avaliações litológicas e planejamentos periódicos para determinação das regiões de avanço (frentes de lavra), além de amostragens de material por meio de sondagens.

A primeira fase do processo de lavra é a remoção do material de capeamento que recobre o maciço rochoso. Para tal, são utilizadas escavadoras, tratores e caminhões. O material de capeamento, depois de removido é descarregado em áreas específicas para disposição de material estéril e inerte.

Depois do decapeamento ocorre a preparação das bancadas, com o cálculo e marcação das malhas de acordo com especificações de afastamentos, espaçamentos, diâmetros de perfuração, inclinação e profundidade dos furos.

São utilizadas perfuratrizes hidráulicas (figura 22) nas operações de perfuração e os explosivos utilizados são emulsões bombeadas.

Depois do desmonte ocorre o carregamento e transporte para a britagem primária, iniciando o processo de beneficiamento. A empresa utiliza escavadoras hidráulicas e carregadoras sobre pneus para carregamento de caminhões fora de estrada (com capacidade de até 40t).



Figura 22- Perfuratrizes hidráulicas na pedreira Juruauçu

Na etapa da britagem (figura 23) o material sofre a primeira fragmentação em britadores de mandíbulas. Após a britagem primária o material é direcionado a pilhas pulmão, que funcionam como estoque regulador de material para cobrir eventuais paradas na produção e também como produto para algumas aplicações que necessitem rochas de grandes granulometrias. Outra parte do material vai para a rebitagem e classificação. Chega a ocorrer até britagem quaternária em certos casos.



Figura 23- Britagem na pedreira Juruauçu

Finalmente é feito o controle de qualidade. Todos os materiais produzidos na pedreira Juruáçu são diariamente ensaiados em laboratórios próprios e em alguns casos laboratórios terceirizados.

### 3.3- CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA

#### 3.3.1- Geologia regional

A região onde se localiza a pedreira Juruáçu pertence aos terrenos cristalinos do Grupo São Roque, na província geomorfológica Planalto Atlântico, subdivisão Zona Serrania de São Roque (IPT, 1981).

Segundo Coutinho (1972) a constituição do Grupo São Roque foi essencialmente de sedimentos clásticos, predominando os de natureza argilosa, metamorfoseados em filitos. Os metassedimentos conglomeráticos, anfibolitos e calcários afloram em áreas restritas e os granitos intrusivos são abundantes.

O planalto Atlântico se caracteriza geomorfologicamente como uma região de terras altas, constituídas predominantemente por rochas cristalinas pré-cambrianas e cambro-ordovicianas, cortadas por intrusivas básicas e alcalinas mesozoico-terciárias, e pelas coberturas das bacias sedimentares de São Paulo e Taubaté. (IPT, 1981).

A serra de São Roque é uma extensa área montanhosa, de constituição litológica diversificada, que vai dos metamorfitos de baixo grau do Grupo São Roque até as rochas gnáissicas e migmatíticas, generalizadamente penetrados por intrusões graníticas.

O relevo na área da pedreira se caracteriza por morros com serras restritas, morros de topos arredondados, vertentes com perfis retilíneos, por vezes abruptas, com presença de serras restritas. A drenagem é de alta densidade com padrão dendrítico a pinulado, vales fechados, e planícies aluvionares interiores restritas.(IPT, 1981).

### **3.3.2- Geologia local**

A empresa optou por manter os dados litológicos ou da geologia local sob um caráter sigiloso. Estas informações poderiam ajudar em algumas análises a mais, mas sua falta não afeta os objetivos desta pesquisa.

## **3.4- MONITORAMENTOS**

### **3.4.1- Sismógrafos utilizados**

Para os monitoramentos foram utilizados 20 sismógrafos de engenharia da marca GEOSONICS, sendo quinze sismógrafos modelo SSU 3000EZ+ (figura 24) com números de série SN 8893, SN 8894, SN 8895, SN 8896, SN 8897, SN 8947, SN 8949, SN 8950, SN 8951, SN 8952, SN 8953, SN 8954, SN 8955, SN 8956 e SN 8957 e cinco deles SSU 3000LC (figura 25) com os números de série SN 3700, SN 3702, SN 3706, SN 3707 e SN 3708.

A principal diferença entre os dois modelos de sismógrafos utilizados é o visor digital que possui o SSU 3000 EZ+ (figura 24). Ele pode ser programado, ativado e desativado através do teclado e visor digital, precisando do computador somente para retirar os relatórios de sismografia.



Figura 24- Sismógrafo modelo SSU 3000EZ+ em campo

O modelo SSU 3000 LC não possui teclado nem visor digital (figura 25) e precisa ser conectado a um computador para ser programado, ativado e desativado.



Figura 25- Sismógrafo modelo SSU 3000LC em campo

Os dois modelos de sismógrafos utilizados são compostos por uma unidade central de processamento, um microfone para captação de sobrepressão

atmosférica, e um geofone para a captação da vibração do solo. Os dados dos eventos captados pelos sismógrafos são transferidos para um computador e analisados pelos softwares *Seismic Analysis* ou *GeoSonicsNet* ambos da Geosonics Inc. Os programas de análise permitem descarregar os relatórios de sismografia, apresentando-se dados como as velocidades das partículas nas componentes x, y e z, o valor resultante da VPP e as frequências para as componentes da velocidade, assim como os gráficos das ondas e dos valores da velocidade x frequência, conforme normas nacionais e internacionais.

As principais especificações dos dois modelos de sismógrafos são resumidas na tabela 6.

Tabela 6- Especificações dos sismógrafos utilizados nos monitoramentos

Modo de disparo	Especificações	
Sísmico	Resolução	0,06 mm/s
	Alcance	Até 130 mm/s
	Faixa de frequência de resposta	2-250 Hz (3dB) / 2- 1000 Hz (Nyquist)
	Taxa de amostragem	Até 2000 segundos/canal
	Tempo de gravação	1-15 segundos
	Precisão	5 % em um ano
	Calibração	Dinâmica interna
	Intervalo (linear)	78-142 dB (faixas opcionais disponíveis de 154 e 174 dB)
Som	Faixa de frequência	2-250 Hz (3 dB), 2- 1000 Hz (Nyquist)
	Precisão	±10 % ou 1 dB em um ano
	Calibração	Eletrônico interno
Modo Histograma	Intervalos de gravação	Selecionável 1, 2, 5, 10, 15, 30 segundos e 1 minuto
	Resolução sísmica	0,06 mm/s
	Alcance	130 mm/s
	Resolução do som	1 dB

Fonte: Geosonics, 2011

Segundo a Geosonics (2011) a calibração deve ser feita a cada 12 meses e o erro não pode ser maior de 5% para os três canais de vibrações, e  $\pm 10\%$  ou 1 dB para o canal de som. A ISEE (2009) recomenda calibrar os sismógrafos a cada ano e o sensor de vibração do solo deve ter uma precisão de  $\pm 5\%$  ou 5 mm/s para os três canais entre 4 e 125 Hz, e os microfones de sobrepressão devem ter uma precisão de  $\pm 1$  dB entre 4 e 125 Hz.

As datas da última calibração de cada um dos sismógrafos que foram utilizados neste monitoramento são apresentadas na tabela 7 e no anexo 1 são apresentados os certificados de calibração.

Tabela 7- Data da calibração dos sismógrafos

SN No. Série	Data da calibração
3700	04/05/11
3702	06/05/11
3706	10/05/11
3707	10/05/11
3708	10/05/11
8893	30/04/11
8894	02/05/11
8895	02/05/11
8896	02/05/11
8897	03/05/11
8947	01/06/12
8949	01/06/12
8950	07/06/12
8951	31/05/12
8952	02/06/12
8953	05/06/11
8954	05/06/12
8955	01/06/12
8956	05/06/12
8957	06/06/12

Os sismógrafos foram configurados para ser ativados com limite inferior de sensibilidade (*“trigger”*): entre 0,18 e 5 mm/s em função da proximidade ao local da detonação e levando em consideração a possibilidade de ele ser ativado por algum outro evento como, por exemplo, a passagem de um caminhão. O tempo de registro foi programado entre 5 e 7 segundos.

A fixação do geofone foi uma das muitas dificuldades, pois o solo da pedreira é muito heterogêneo. Os geofones foram cravados na terra ou fixados com gesso quando a superfície era rochosa.

Também foram utilizados uma câmera fotográfica Sony, para registrar imagens da instalação dos sismógrafos e da pedreira, dois GPS (Global Positioning System) da Marca Garmin, modelos eTrex 100 e eTrex 20 para determinar as coordenadas dos fogos e dos pontos onde foram instalados os sismógrafos, e um mini *notebook Hewlett Packard* (HP) para ativar e desativar os sismógrafos SSU 3000LC.

### 3.5- CARACTERÍSTICAS DAS MEDIÇÕES

Os monitoramentos foram realizados em quatro dias diferentes: 16/10/2012, 07/11/2012, 16/11/2012 e 28/11/2012. Todas as detonações monitoradas foram planejadas na bancada número 4 da pedreira (Figura 26).



Figura 26- Bancada monitorada

As características nos planos de fogo foram similares conforme apresentado na tabela 8.



Tabela 8- Características dos desmontes monitorados

Características	Fogo 1	Fogo 2	Fogo 3	Fogo 4
Data	16.10.2012	7.11.2012	16.11.2012	28.11.2012
Horário	13h00	12h50	13h10	13h15
Diâmetro dos furos (pol)	3,5	3,5	3,5	3,5
Total de furos	168	147	125	157
Nº de linhas	4	5	4	3
Tipo de explosivo	emulsão a base de nitrato de amônio	emulsão a base de nitrato de amônio	emulsão a base de nitrato de amônio	emulsão a base de nitrato de amônio
Iniciação	espoleta não elétrica (tubo de choque)	espoleta não elétrica (tubo de choque)	espoleta não elétrica (tubo de choque)	espoleta não elétrica (tubo de choque)
Tempo de retardo (ms)	25/42/42/75	17/42/42/42/75	17/42/42/75	25/42/75
Carga Total (kg)	12.370	11.094	9.365	12.543
Carga máx. por Espera Q (kg)	90	102	98	98
RC(kg/m <sup>3</sup> )	986	970	1.031	997
Tempo de duração do fogo (ms)	1.100	680	500	1.400
Localização	4B	4C	4C	4CD
Malha (AxE) (m)	2,80 x 2,60	2,80 x 2,50	2,60 x 2,50	2,80 x 2,50
Altura Média da bancada (m)	10,5	12,3	12	11,5
Profundidade média dos furos (m)	11,5	13,3	13,1	12,6

A distribuição das detonações na bancada é apresentada na figura 27.

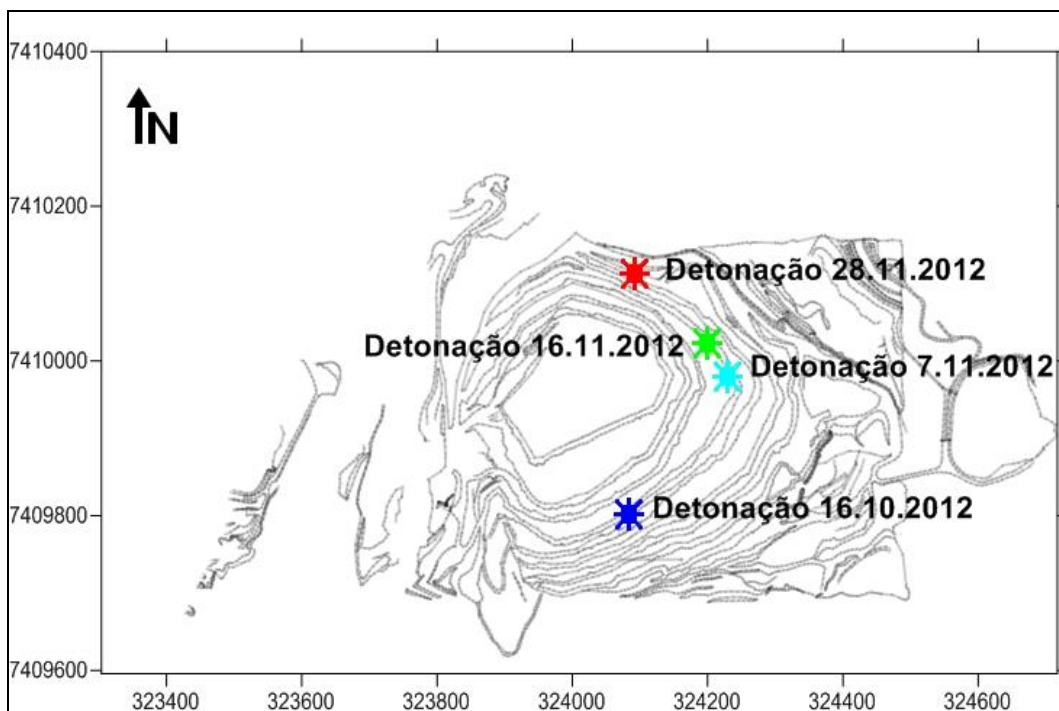


Figura 27- Localização das detonações monitoradas

Pode-se perceber que as detonações são sequenciais e na mesma bancada, mas 3 estão mais próximas e uma mais distante (quase meia cava da primeira).

Para cada uma das quatro detonações foram monitoradas quatro direções, utilizando cinco sismógrafos para cada direção, para um total de vinte sismógrafos por detonação. As distribuições geográficas dos sismógrafos com relação aos pontos das detonações são apresentadas nas figuras 28, 29, 30 e 31. Observa-se que em algumas direções aparecem somente 4 sismógrafos, devido a falhas no acionamento, problemas de bateria, ou vibração abaixo do limite de sensibilidade estabelecido para o acionamento.

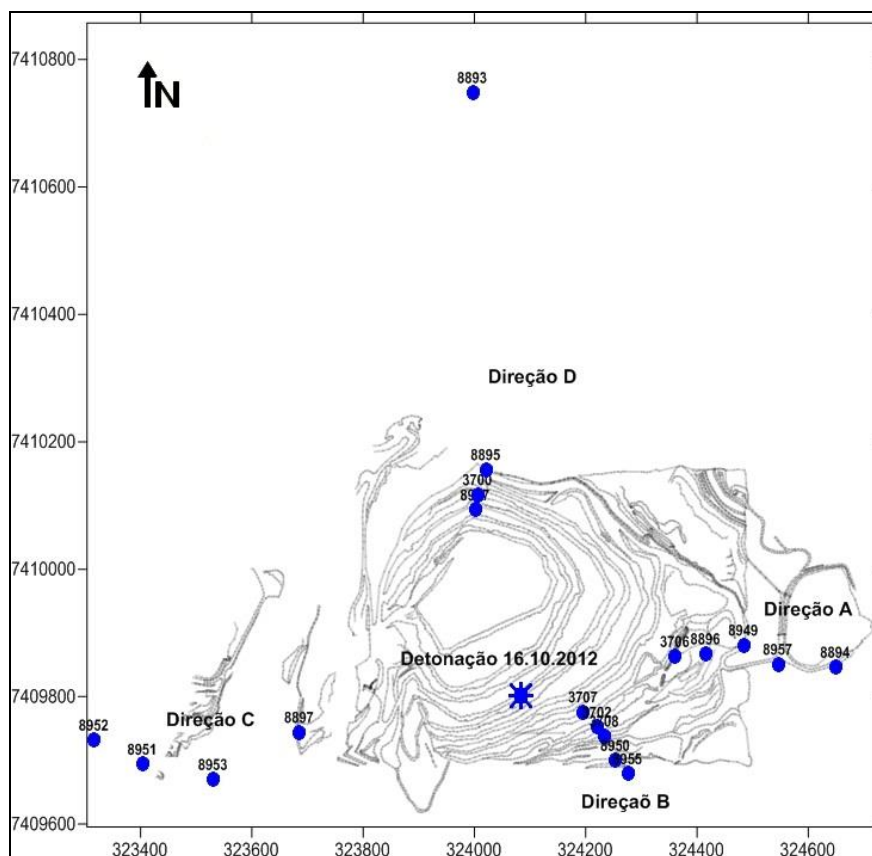


Figura 28-Detonação e distribuição de sismógrafos 16.10.2012

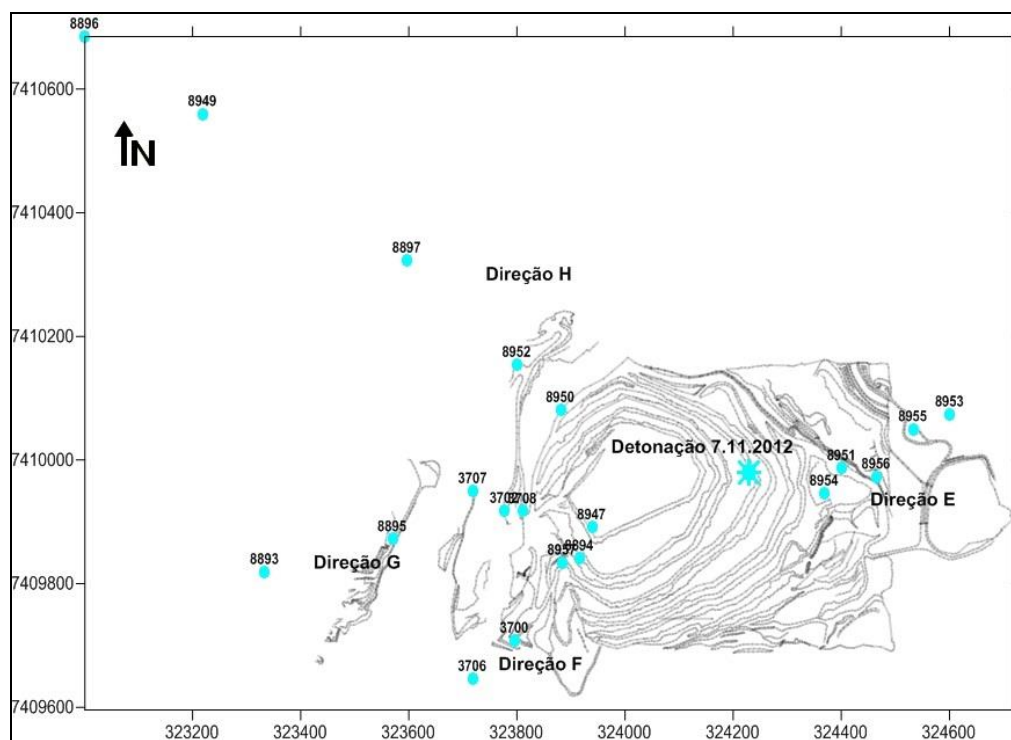


Figura 29-Detonação e distribuição de sismógrafos dia 7.11.2012



## 4- RESULTADOS

Nas tabelas 9 a 12 encontram-se os valores de velocidade resultante pico das partículas (VPP) captadas pelos sismógrafos em cada ponto monitorado e a distância entre o ponto de captação e o local da detonação.

Os resultados sismográficos completos são apresentados no apêndice A. No apêndice B apresenta-se um exemplo de relatório emitido pelo software do sismógrafo.

Tabela 9- Detonação dia 16/10/2012. Carga Máxima por Espera 90 Kg

Direção	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
A	3,87 mm/s	3,37 mm/s	2,73 mm/s	2,4 mm/s	1,27 mm/s
	283,6 m	338,3 m	407,7 m	464,6 m	566,7 m
B	30,48 mm/s	16 mm/s	12,26 mm/s	8,26 mm/s	5,52 mm/s
	115 m	145,8 m	163,1 m	198,3 m	228 m
C	2,92 mm/s	2,86 mm/s	1 mm/s	1,14 mm/s	-
	402,2 m	568,5 m	688,5 m	770,2 m	
D	2,98 mm/s	1,84 mm/s	2,70 mm/s	-	0,95 mm/s
	302,3 m	324,5 m	359,6 m		950 m

Tabela 10- Detonação dia 7/11/2012. Carga Máxima por Espera 102 Kg

Direção	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
E	16,70 mm/s	15,70 mm/s	8,00 mm/s	5,03 mm/s	3,56 mm/s
	144,1 m	172,1 m	236,1 m	312 m	383,7 m
F	2,29 mm/s	1,91 mm/s	1,80 mm/s	1,50 mm/s	1,02 mm/s
	303,3 m	342,5 m	374,6 m	511,3 m	610,5 m
G	2,60 mm/s	3,56 mm/s	2,48 mm/s	1,59 mm/s	0,83 mm/s
	422,7 m	456,2 m	510,9 m	667,8 m	909,4 m
H	1,97 mm/s	1,84 mm/s	1,46 mm/s	1,21 mm/s	0,64 mm/s
	362,4 m	462,9 m	719,1 m	1164,7 m	1416 m

Tabela 11- Detonação dia 16/11/2012. Carga Máxima por Espera 98 Kg

Direção	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
I	20,26 mm/s	14,80 mm/s	10,29 mm/s	9,46 mm/s	7,11 mm/s
	78,8 m	121,2 m	163 m	214,1 m	285,7 m
J	6,03 mm/s	4,90 mm/s	3,56 mm/s	3,94 mm/s	3,24 mm/s
	218,5 m	249,3 m	282,2 m	307,9 m	330,8 m
K	2,73 mm/s	2,16 mm/s	1,21 mm/s	2,03 mm/s	0,25 mm/s
	402,9 m	492,1 m	637 m	802 m	1199,1 m
L	2,90 mm/s	-	1,59 mm/s	0,25 mm/s	0,60 mm/s
	469 m		710,1 m	913 m	1052,9 m

Tabela 12- Detonação dia 28/11/2012. Carga Máxima por Espera 98 Kg

Direção	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
M	52,32 mm/s	7,49 mm/s	4,06 mm/s	2,48 mm/s	2,03 mm/s
	87 m	269,7 m	376,4 m	483,1 m	549,5 m
N	4,20 mm/s	4,06 mm/s	3,90 mm/s	3,30 mm/s	2,10 mm/s
	259,1 m	292,2 m	343,1 m	447,6 m	498,3 m
O	3,37 mm/s	3,56 mm/s	2,20 mm/s	2,60 mm/s	1,02 mm/s
	340,3 m	374,3 m	425,9 m	571,3 m	777,7 m
P	2,22 mm/s	1,91 mm/s	-	0,76 mm/s	0,38 mm/s
	472,3 m	548,5 m		970,6 m	1126,6 m

#### 4.1- MAPAS DE ISO-VELOCIDADES

Com os valores de VPP e a localização dos pontos monitorados foram construídos os mapas de iso-velocidade reais para cada uma das quatro detonações captadas (dias 16/10/2012, 7/11/2012, 16/11/2012 e 28/11/2012). Para a construção dos mapas foi utilizado o programa Surfer da *Golden Software*.

Os mapas de iso-velocidade reais são aqueles que foram desenvolvidos com os valores reais captados pelos sismógrafos no campo. Os quatro mapas de iso-velocidade são apresentados nas figuras da 32 a 35 e cada mapa corresponde a uma detonação diferente.

A principal dificuldade para a construção destes mapas foi a escolha do método de interpolação. A interpolação é o procedimento que permite construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados pontuais conhecidos, ou seja, trata-se de um método que possibilita proceder à reconstituição de uma função apenas conhecendo algumas das suas abscissas e respectivas ordenadas. A interpolação estima um parâmetro para o qual não existe informação disponível, considerando-se que os pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais semelhantes do que pontos mais afastados.

Existem vários métodos para realizar a interpolação, e atualmente, diversos *softwares* contêm vários destes métodos. O *software* Surfer utilizado para a construção dos mapas deste trabalho possui 12 métodos diferentes de interpolação. Foi escolhido o método de interpolação conhecido como Krigagem (*Kriging*) porque este foi o método escolhido pelo Iramina (2002) já que oferece a melhor solução visual.





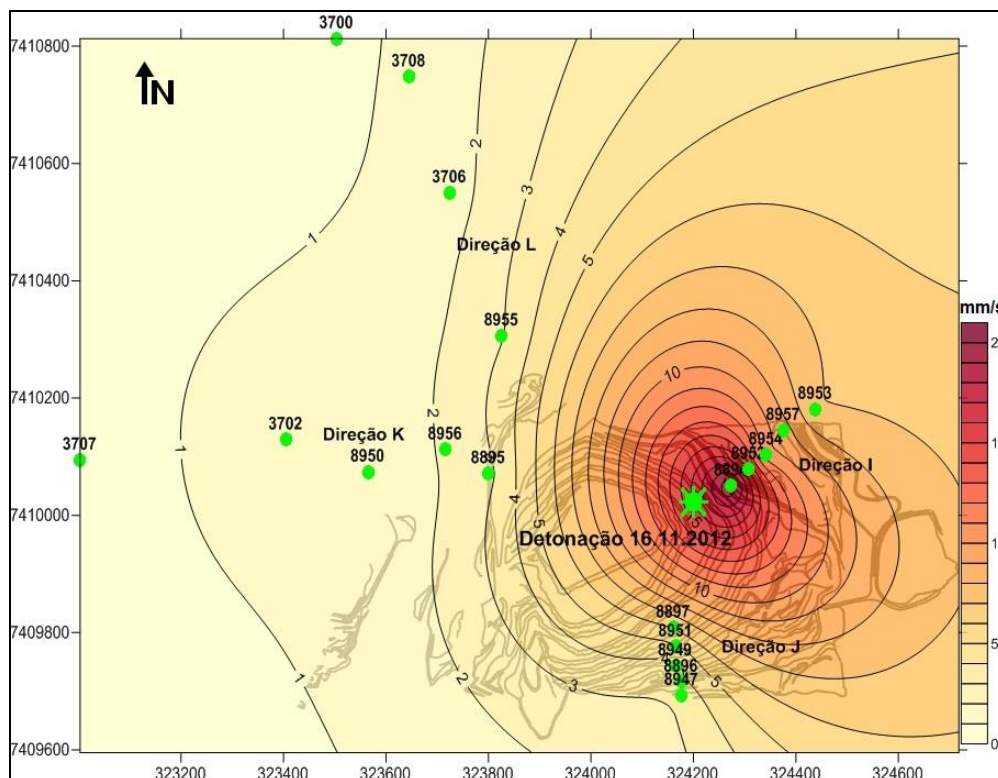


Figura 34- Mapa de Iso-velocidade da detonação 16.11.2012

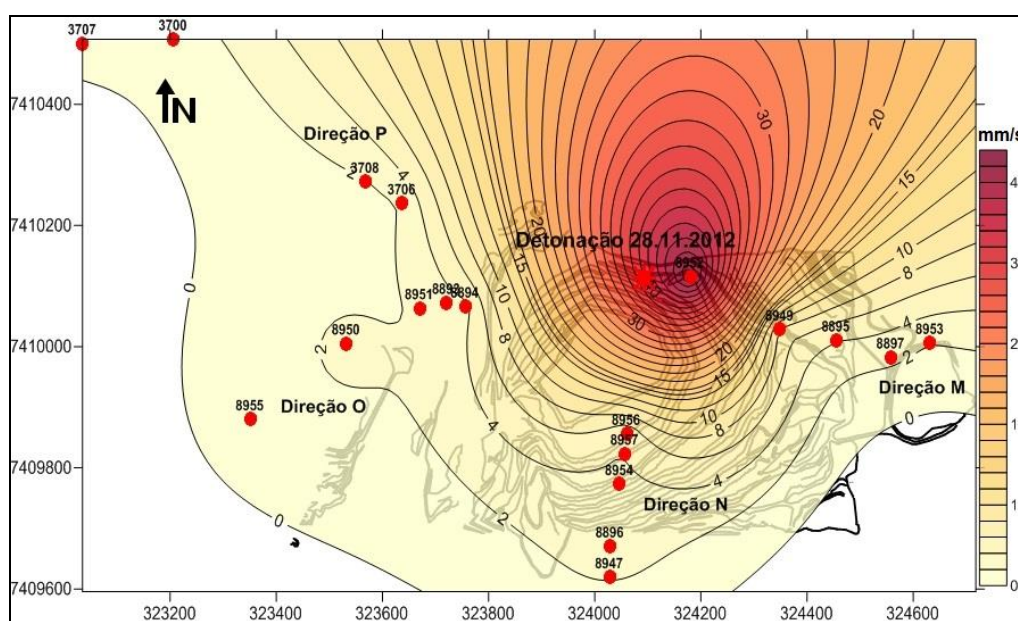


Figura 35- Mapa de Iso-velocidade da detonação 28.11.2012

Quando os locais das detonações são diferentes, os valores de VPP nos pontos de captação que estão mais próximos aos fogos são diferentes, mesmo que os pontos de captação estejam muito próximos. Isto pode ser observado na figura 36

(mapa de iso-velocidades de todos os valores das captações). Na direção sul, por exemplo, foram realizadas captações próximas para duas detonações, localizadas em pontos diferentes, nos dias 16.10.2012 (pontos azuis) e 16.11.2012 (pontos verdes). Os pontos mais próximos aos fogos tem 47 m de distância entre eles e a diferença de VPP é de quase 25 mm/s. Conforme vão se afastando os pontos de captação dos locais da detonação, as diferenças nos valores de VPP vão se reduzindo. Por exemplo, nessas mesmas duas direções os pontos mais afastados que foram monitorados encontram se a uma distância de 100 m entre eles e a diferença nos valores de VPP é de 2 mm/s.

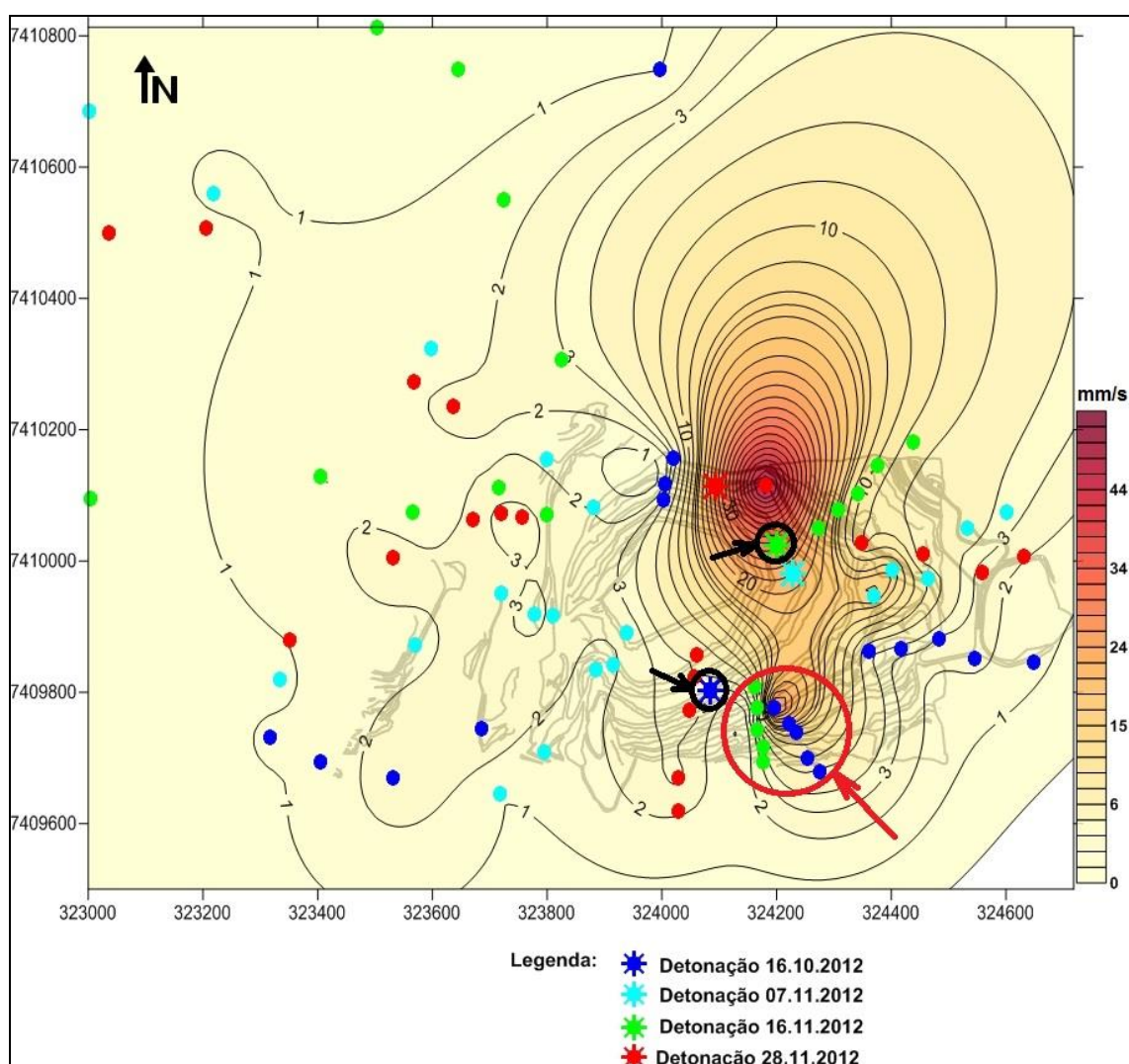


Figura 36- Mapa de Iso-velocidade com todos os pontos reais monitorados

#### 4.2- EQUAÇÕES CARGA-DISTÂNCIA

Com os valores VPP registrados pelos sismógrafos, as distâncias entre os pontos monitorados, os locais das detonações e as cargas máximas por espera, foram estimados os valores dos coeficientes  $k$  e  $b$  das equações carga distância para cada direção (tabelas 13 a 16). Os cálculos e os gráficos das curvas apresentam-se no Apêndice C.

Tabela 13- Equações carga distância (16.10.2012)

Direção	Equação	Coeficiente de correlação
A	$y = 650,01 x^{-1,488}$	0,90
B	$y = 12681 x^{-2,445}$	0,99
C	$y = 1958,6 x^{-1,702}$	0,72
D	$y = 53,304 x^{-0,874}$	0,85

Tabela 14- Equações carga distância (7.11.2012)

Direção	Equação	Coeficiente de correlação
E	$y = 1651,7 x^{-1,697}$	0,98
F	$y = 71,455 x^{-1,018}$	0,93
G	$y = 1683,7 x^{-1,676}$	0,90
H	$y = 25,172 x^{-0,691}$	0,82

Tabela 15- Equações carga distância (16.11.2012)

Direção	Equação	Coeficiente de correlação
I	$y = 90,484 x^{-0,757}$	0,98
J	$y = 492,76 x^{-1,436}$	0,87

**Continua**

		<b>Conclusão</b>
K	$y = 3768,6 x^{-1,906}$	0,73
L	$y = 2685 x^{-1,75}$	0,90

Tabela 16- Equações carga distância (28.11.2012)

Direção	Equação	Coeficiente de correlação
M	$y = 1805,6 x^{-1,688}$	0,99
N	$y = 83,056 x^{-0,893}$	0,76
O	$y = 386,94 x^{-1,324}$	0,80
P	$y = 3395,1 x^{-1,882}$	0,95

A comparação das equações carga - distância foi realizada dividindo a área monitorada em quadrantes (Norte, Leste, Sul e Oeste) conforme Apêndice D.

No quadrante norte (Gráfico 3), observa-se que as equações carga distância das direções D e I tem quase a mesma inclinação, o que significa que nessas duas direções a atenuação das vibrações é similar.

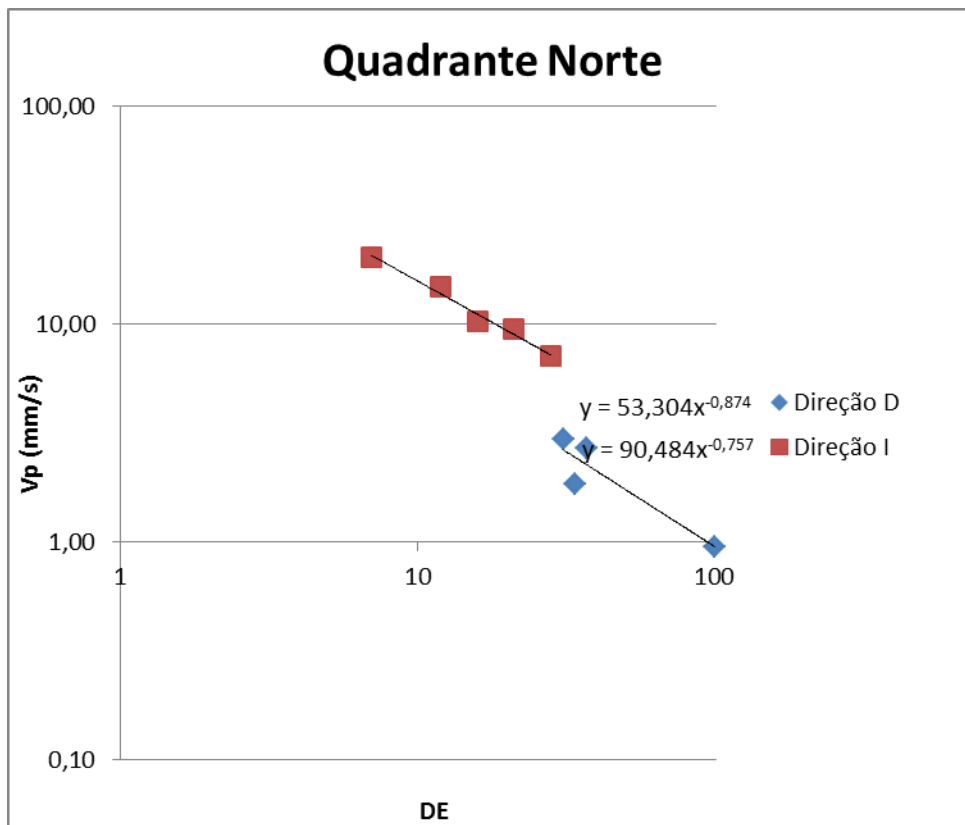


Gráfico 3- Equações carga-distância do sentido Norte

No quadrante Leste a atenuação nas quatro direções monitoradas é muito similar, isto pode ser observado através do gráfico das equações carga distância (Gráfico 4). Na direção B a atenuação é visivelmente maior que nas outras três direções e na direção A a atenuação é ligeiramente menor. Mas de forma geral pode se afirmar que todas as direções monitoradas neste quadrante têm um comportamento similar quanto à atenuação das vibrações.

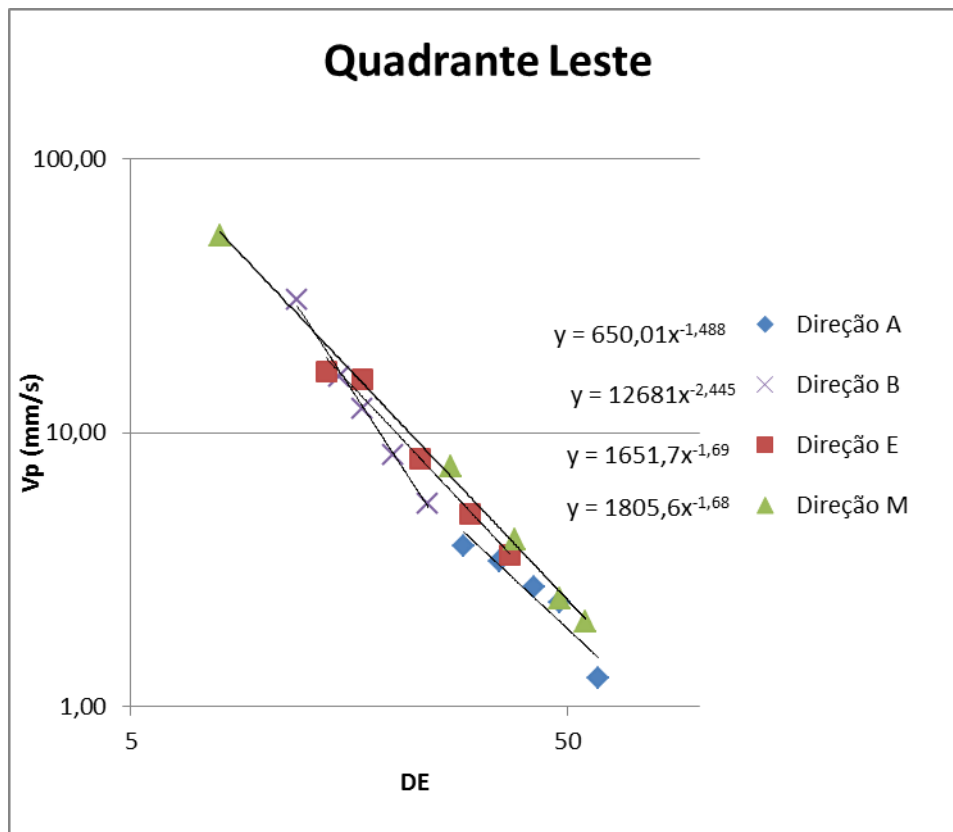


Gráfico 4- Equações carga-distância do sentido Leste

No quadrante Sul existe maior variação na inclinação das equações carga distância das direções monitoradas (Gráfico 5). O que significa que a atenuação das vibrações do solo tem um comportamento variável. Observa-se que a atenuação mais rápida ocorre na direção C e a mais lenta na direção N. As equações das direções F e J são similares, pelo que pode se afirmar que a atenuação das vibrações nessas duas direções são parecidas.

No quadrante Oeste (Gráfico 6) foi realizada a maior quantidade de monitoramentos. A maior atenuação ocorre na direção K e a menor atenuação ocorre na direção H. As outras direções têm um comportamento similar, isso pode ser notado nos fatores b e k de todas as equações, exceto a que corresponde à direção H.

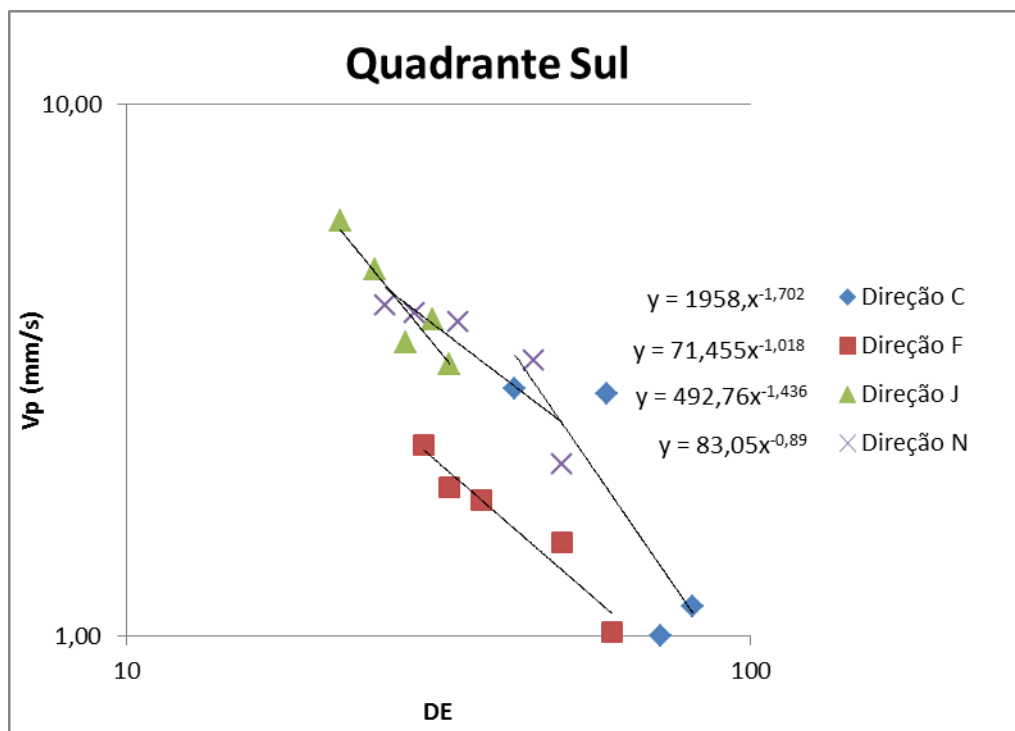


Gráfico 5- Equações carga-distância do sentido Sul

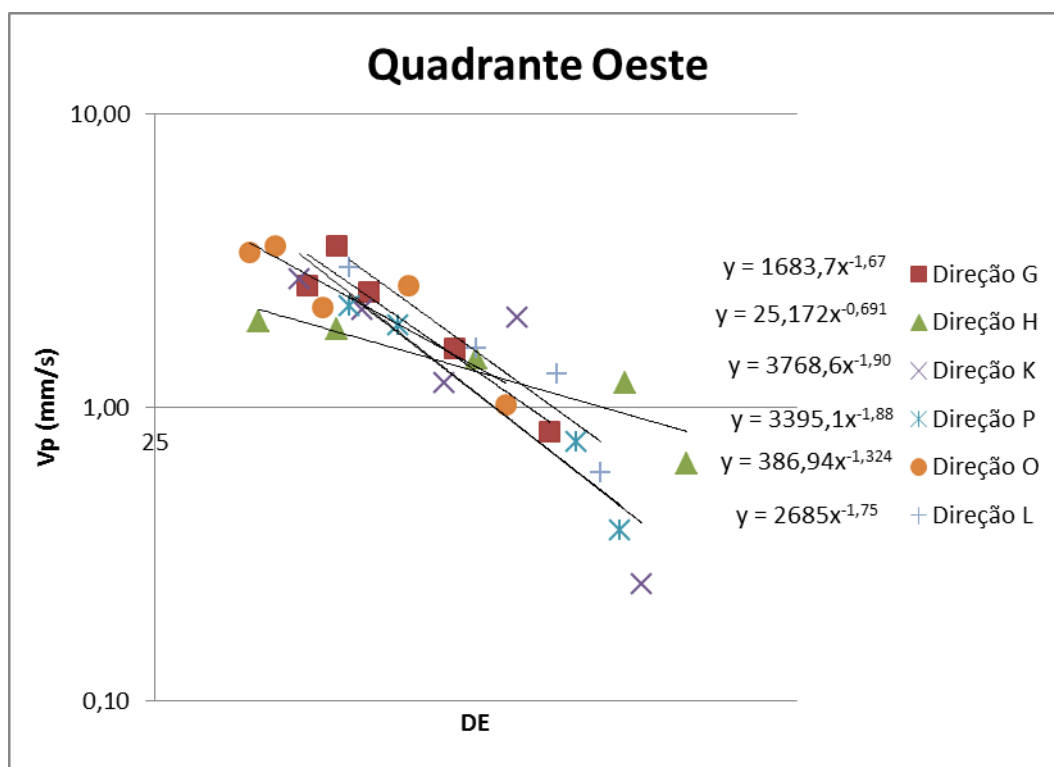


Gráfico 6- Equações carga-distância do sentido Oeste

#### 4.3- MAPAS DE ISO-VELOCIDADE PELO MÉTODO DE IRAMINA (2002)

Iramina (2002) monitorou inicialmente quatro detonações e fez a plotagem dos pontos monitorados observando que existiam erros de alinhamento que ocorreram principalmente devido à dificuldade de acesso e à escolha do local mais adequado para a fixação do sensor. Neste estudo também ocorreu este problema.

Depois de obter a equação carga distância para cada direção, Iramina(2002) fez a normalização dos valores obtidos do monitoramento projetando os pontos reais na reta média da correlação.

Posteriormente realizou a interpolação de pontos intermediários das retas normalizando a distância entre os novos pontos espaçados em 50 metros entre eles. Finalmente gerou as isolinhas a partir da mesma origem para as 4 direções.

Foram construídos quatro mapas simulando a metodologia de Iramina (2002). Para a construção do primeiro mapa (figura 37), foram selecionadas as equações carga distância das direções D, E, J e O. Cada uma das direções pertence a uma detonação diferente. Para a construção do segundo mapa simulando a metodologia do Iramina (2002) foram selecionadas as equações carga distância das direções A, F, K e P(figura 36).O terceiro mapa (figura 37) foi construído selecionando as equações carga distância das direções B, G, L e M e o quarto mapa foi desenhado com as equações carga distância das direções B, G, L e M das diferentes detonações (figura 38).

Foram traçadas linhas médias em cada uma das direções monitoradas a partir de uma origem comum e gerados pontos sobre essas linhas com uma distância entre eles de 50 m. Nesses pontos foram recalculados os valores de VPP através das equações carga – distância de cada uma das direções.



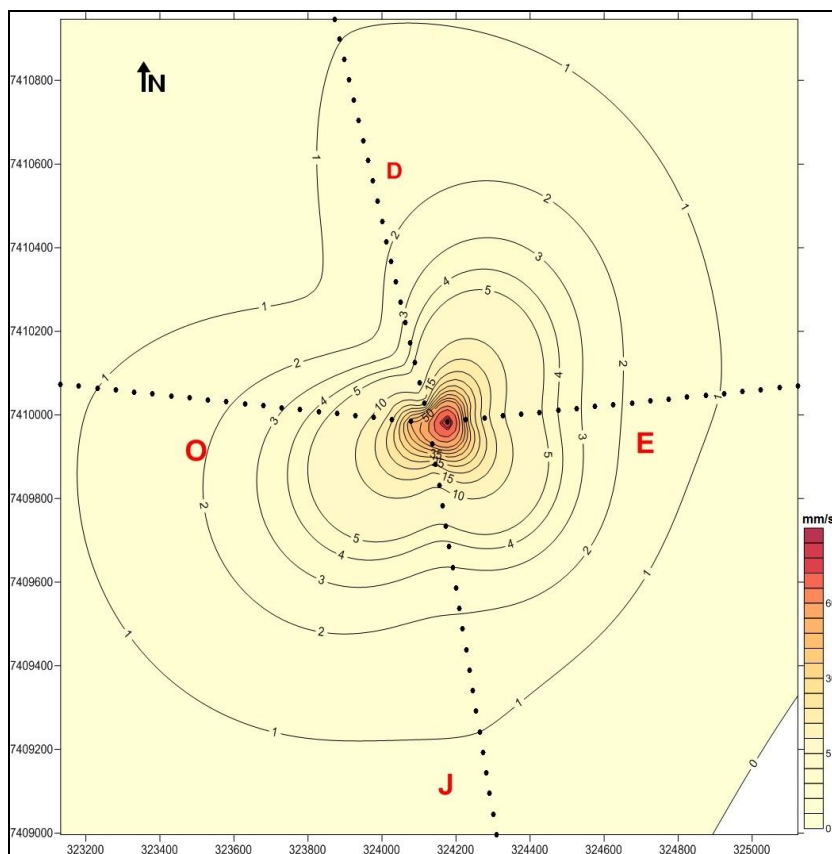


Figura 37- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações D, E, J, O das diferentes detonações.

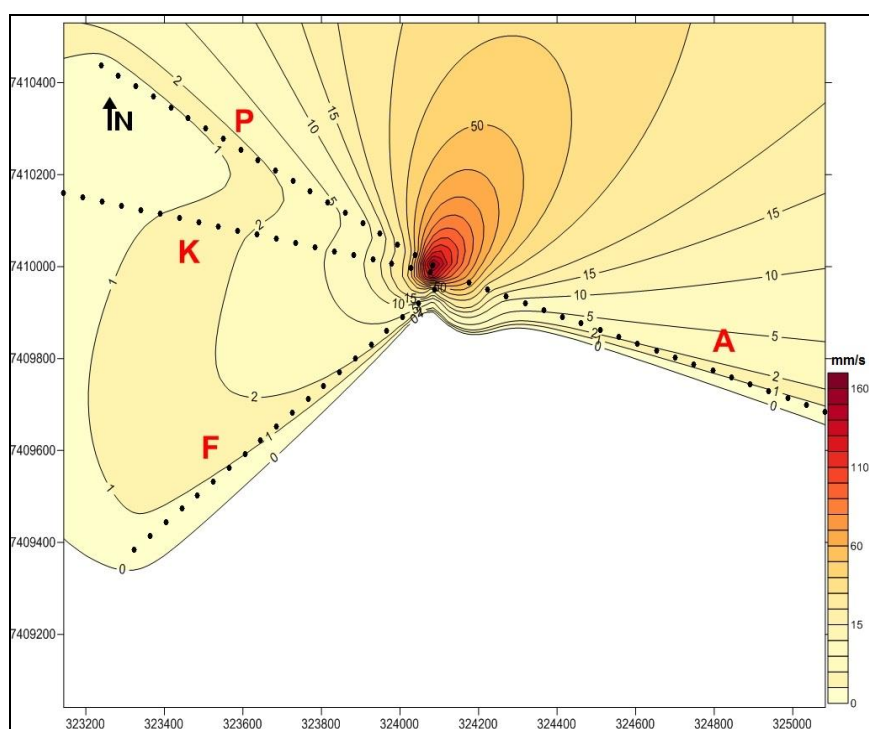


Figura 38- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações A, F, K e P das diferentes detonações.

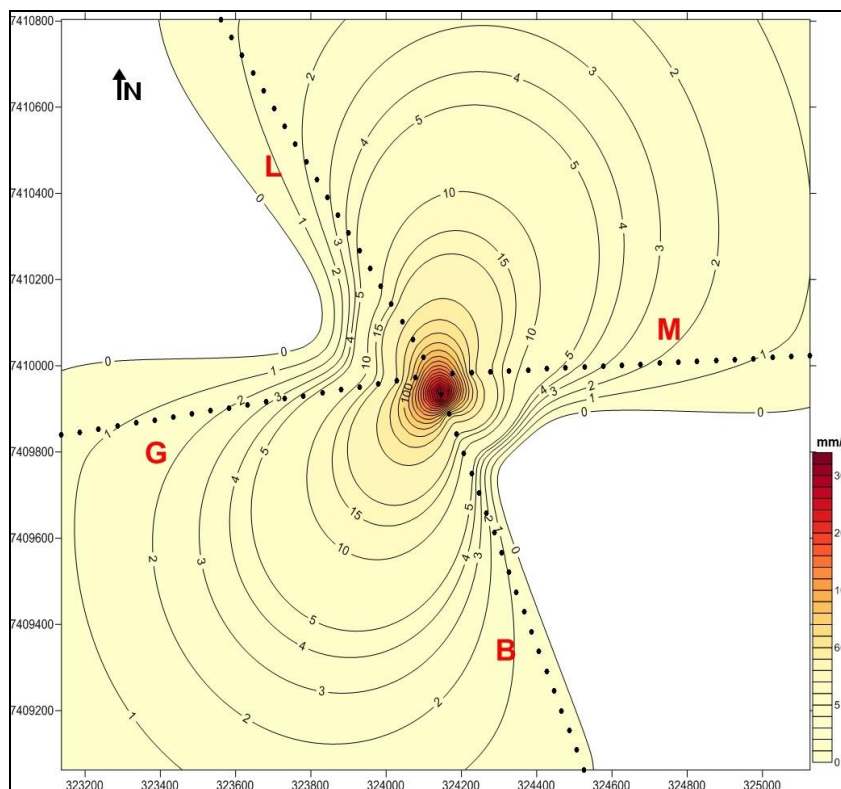


Figura 39- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações B, G, L e M das diferentes detonações.

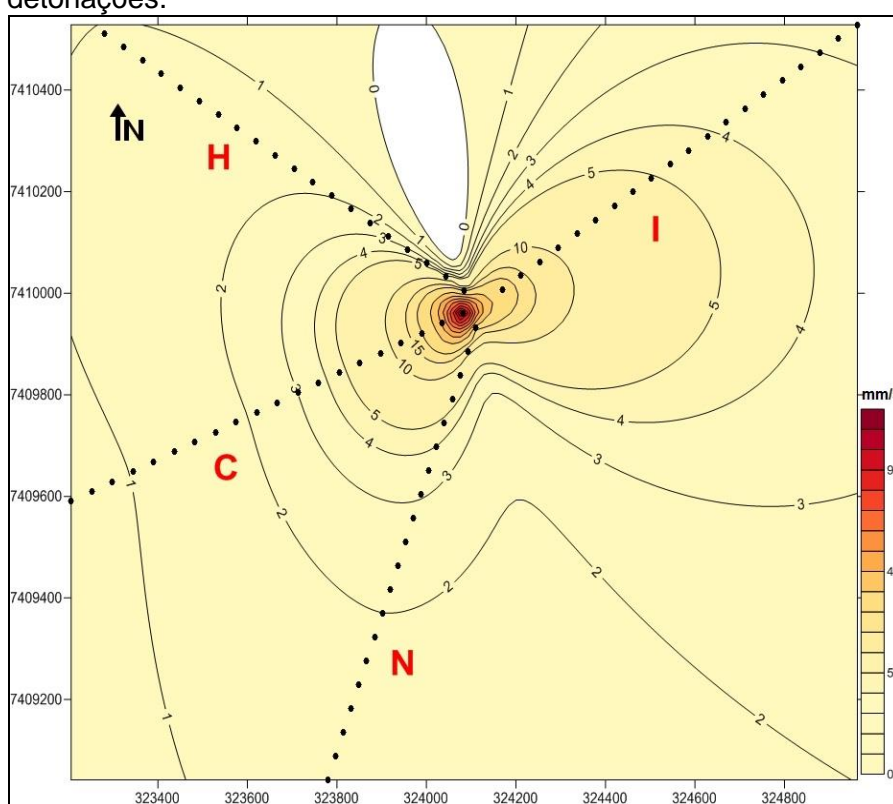


Figura 40- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações C, H, I e N das diferentes detonações.

Observando os níveis de vibração nos mapas percebe-se que em função da grande área estudada, o *software* Surfer extrapola diversos valores para pontos onde não há dados e os mapas não parecem ser reais (Figura 38).

Para diminuir esta extrapolação, Iramina (2002) optou por monitorar mais quatro direções intermediárias às quatro primeiras.

A seguir foram construídos mapas de iso-velocidade (figuras 41 e 42) com 8 direções, selecionando duas direções por quadrante do mapa, com o objetivo de melhorar a extrapolação de pontos realizada pelo *software*. Mesmo intercalando direções existem algumas áreas que por impedimentos da geologia, ou outros fatores da dinâmica de trabalho na pedreira, não puderam ser monitorados.

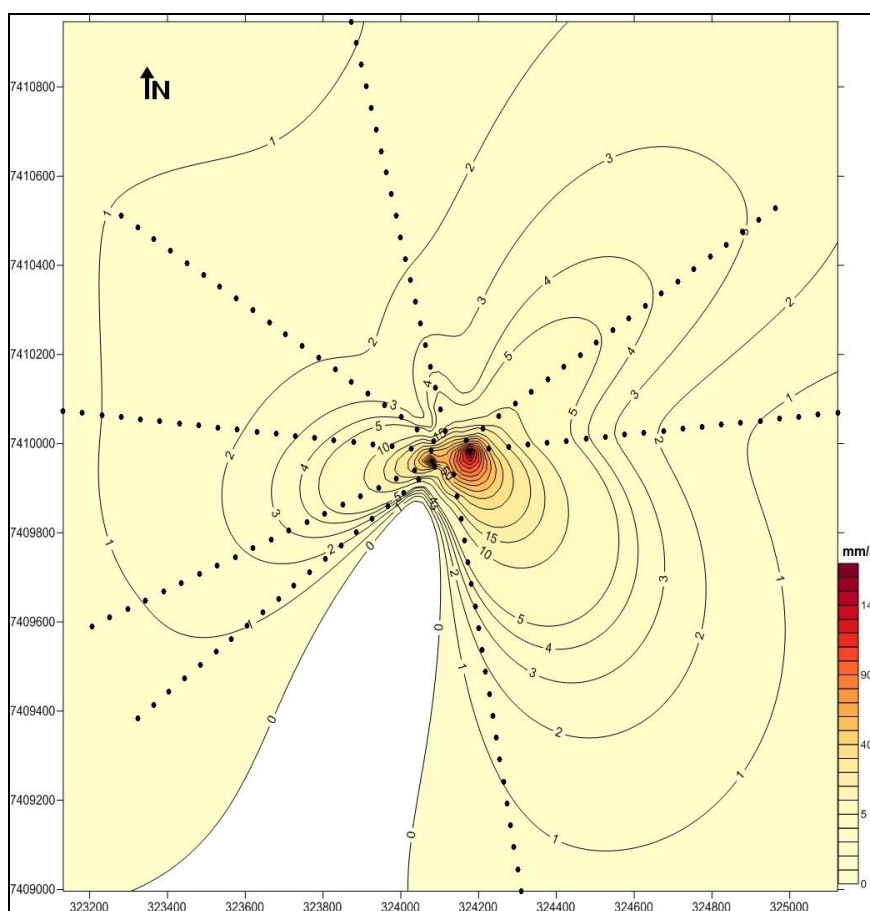


Figura 41- Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações C, D, E, F, H, I, J e O das diferentes detonações.

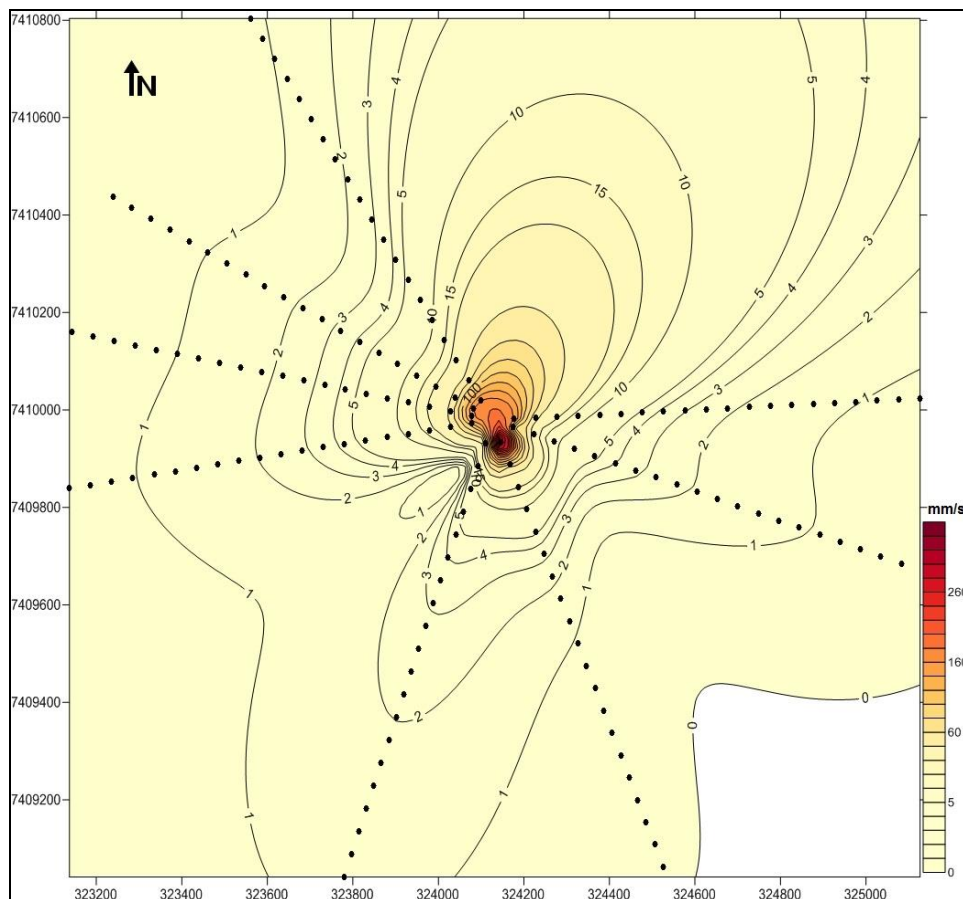


Figura 42- - Mapa de Iso-velocidade da combinação das equações A, B, G, K, L, M, N e P das diferentes detonações.

#### 4.4- SIMULAÇÃO COM DIREÇÕES PERFEITAMENTE ORTOGONAIS

Para simular o mapa com direções perfeitamente ortogonais o mapa da área monitorada foi dividido em oitantes. Em cada um deles existia pelo menos uma direção monitorada (Apêndice E). Posteriormente foi determinada uma linha média para cada oitante com pontos espaçados a cada 50 m e foram usadas as equações carga-distância, determinando novos valores de VPP para a construção dos mapas. Foram construídos dois mapas, um com as equações de maior atenuação e outro com as que menos atenuavam as vibrações em cada oitante. Três oitantes só tinham uma equação carga distância nesse caso nos dois mapas foi utilizada a mesma equação. Esses oitantes eram nas direções Norte, Nordeste e Sudeste.

Nas figuras 43 e 44 observa se que o *software* consegue construir melhores mapas de iso-velocidade quando se tem como dado uma maior quantidade de pontos e eles estão distribuídos em todas as direções.

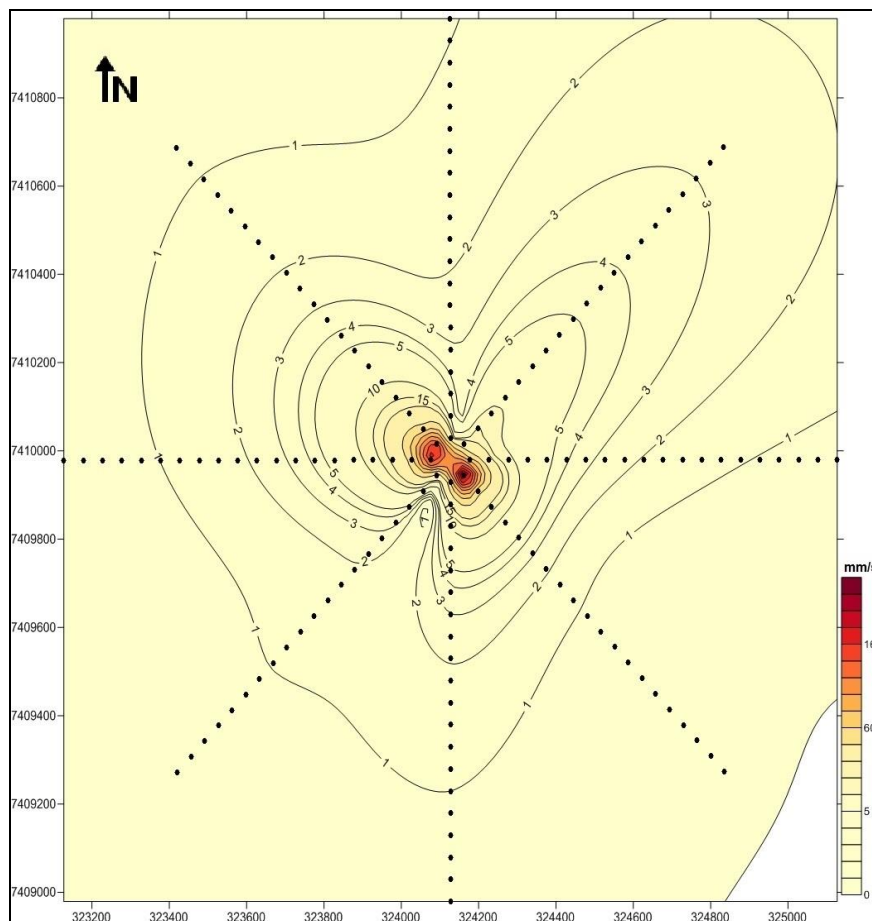


Figura 43- Mapa de iso-velocidade simulado com direções perfeitamente ortogonais e equações carga distância com maior atenuação das vibrações.

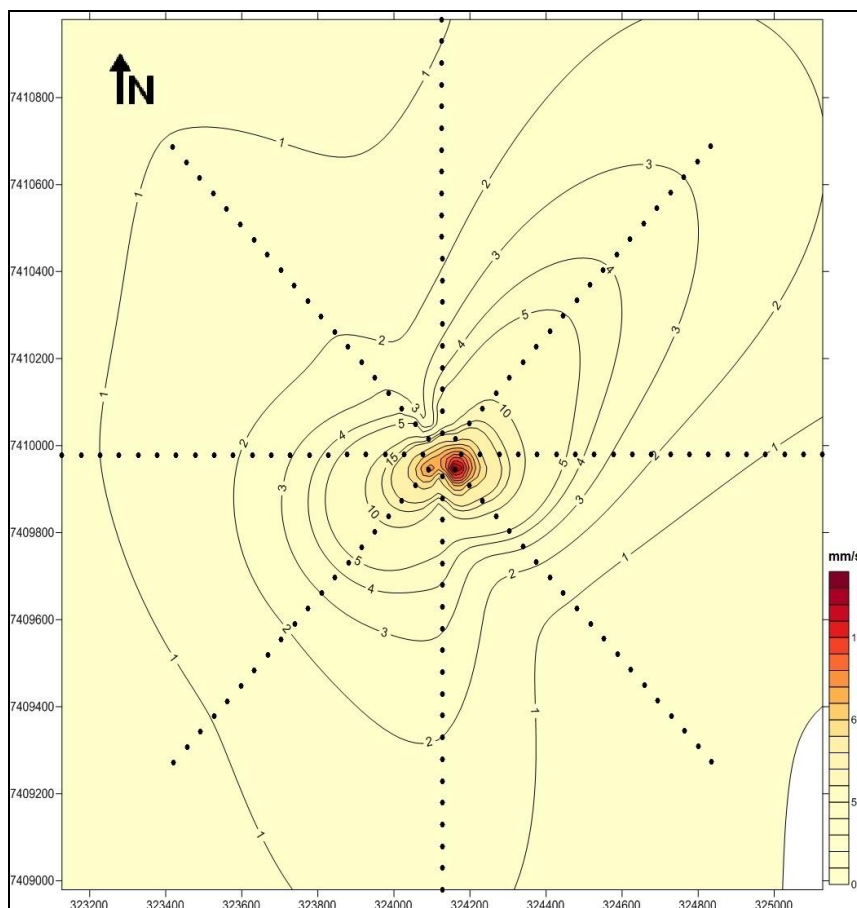


Figura 44- Mapa de iso-velocidade simulado com direções perfeitamente ortogonais e equações carga distância com menor atenuação das vibrações.

#### 4.5- COMPARAÇÃO DOS MAPAS DO MONITORAMENTO COM OS MAPAS SIMULANDO A METODOLOGIA DO IRAMINA (2002).

Para facilitar a comparação visual dos mapas reais com os simulados pela metodologia de Iramina foram utilizadas somente 3 curvas de iso-velocidades com os valores de 5mm/s, 10mm/s e 15mm/s.

Se comparar os primeiros 4 mapas de iso-velocidade correspondentes aos valores reais das captações no campo (figuras da 45 a 48) observa-se que a localização diferente das detonações desloca o centro de maiores valores de VPP (>15mm/s) na geografia do mapa. Mesmo assim, a área com esses valores tem

um diâmetro muito pequeno que não ultrapassa a área da cava. O segundo intervalo de valores de VPP analisado (entre 10mm/s e 15mm/s) ultrapassa pouco a área da cava continuando dentro da área de operação da pedreira. A área com valores entre 5mm/s e 10mm/s também é pequena e ainda fica dentro da área de operações da pedreira. Já os valores entre 0 e 5mm/s correspondem a uma área maior que pode ultrapassar os limites da pedreira.

A análise dos mapas é dificultada não só pelas localizações dos fogos, mas também pela distribuição dos sismógrafos, que faz com que os mapas não tenham a confiabilidade necessária naquelas áreas onde não foram realizadas captações. Isto pode ser observado principalmente na figura 48, na área norte da cava, onde pelas características da geografia do local, não foi possível instalar sismógrafos para medir as vibrações do solo.

Nas figuras 49 e 50 observa-se que os mapas de iso-velocidade simulados pela metodologia de Iramina (2002) com oito direções monitoradas e 3 linhas de iso-velocidade apresentam melhor a atenuação das vibrações ao redor da detonação que os mapas de iso-velocidade desenvolvidos com o monitoramento de 4 direções numa mesma detonação e com 20 sismógrafos. Mesmo assim, no primeiro, na direção sudoeste e no segundo, na direção nordeste, o *software* gera iso-linhas não condizentes com a atenuação real do maciço em todas as direções.





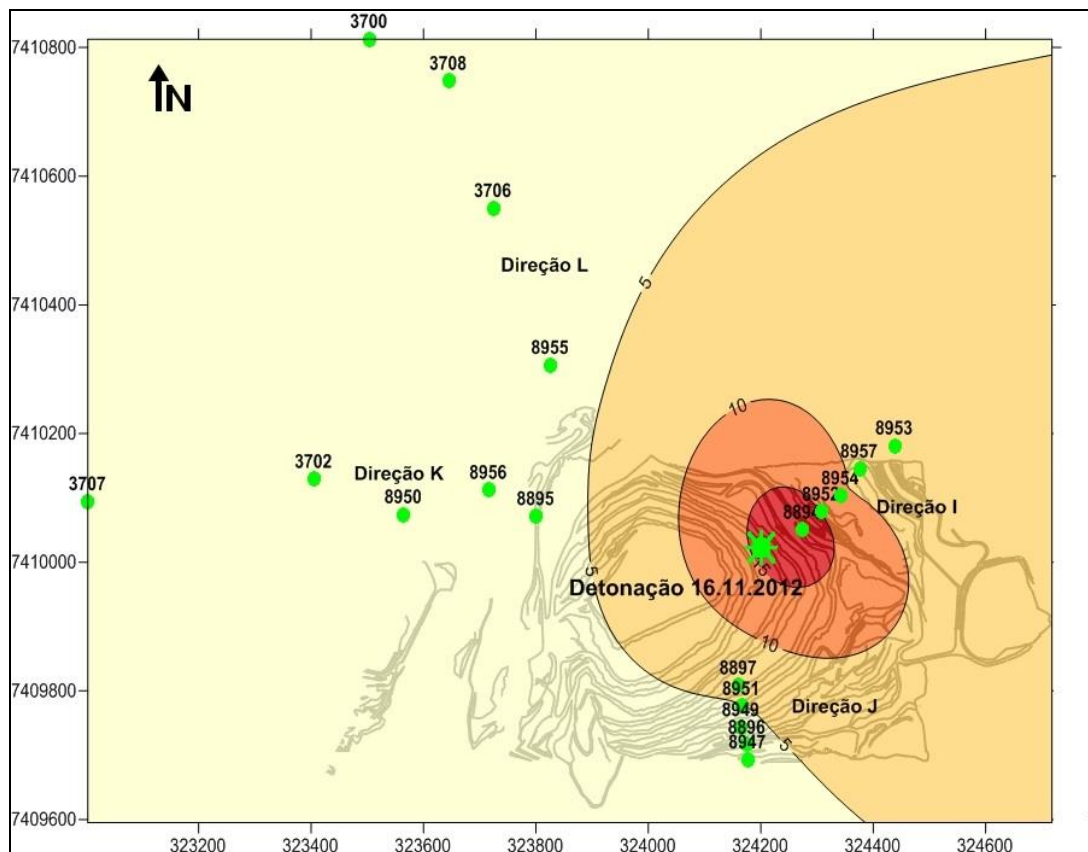


Figura 47- Mapa real de iso-velocidade com três iso-linhas (16.11.2012)

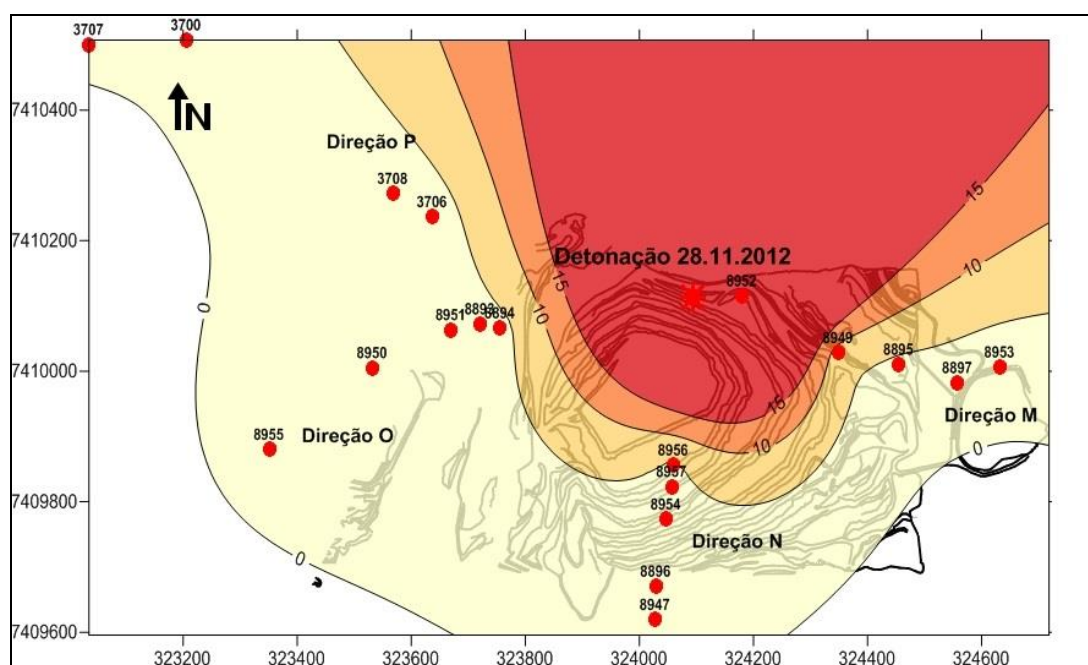


Figura 48- Mapa real de iso-velocidade com três iso-linhas (28.11.2012)

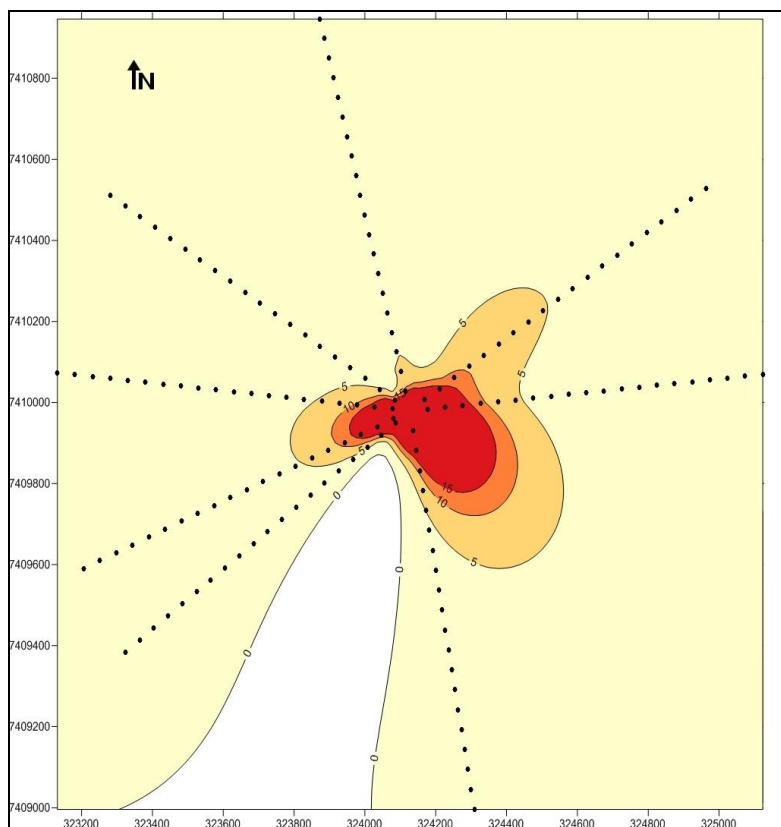


Figura 49- Mapa de iso-velocidade simulado com metodologia de Iramina (2002) com três iso-linhas

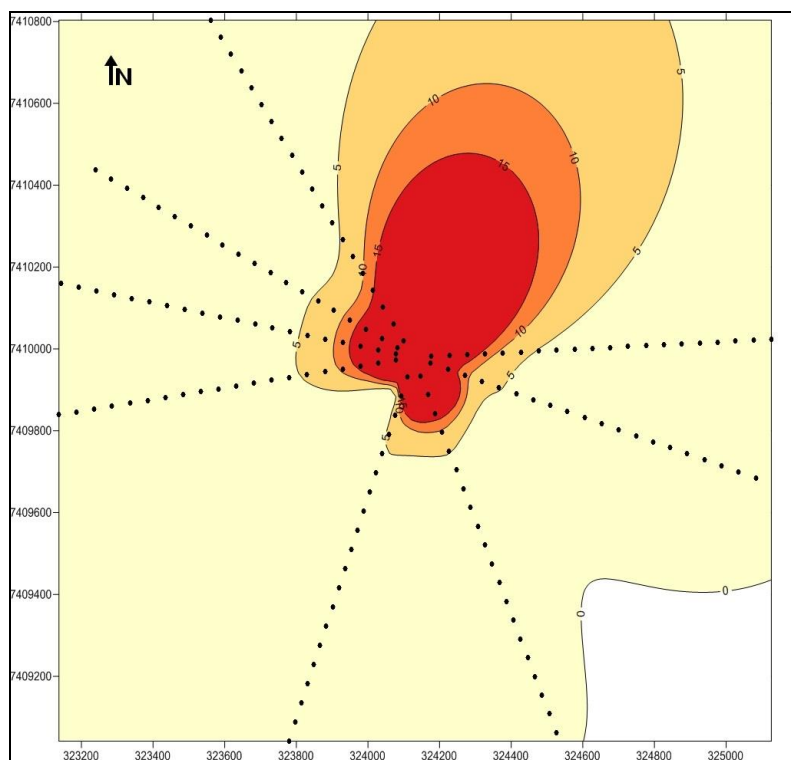


Figura 50- Mapa de iso-velocidade simulado com metodologia de Iramina (2002) com três iso-linhas

#### 4.6- MAPAS COM VARIAÇÃO NA QUANTIDADE DE PONTOS

Na sequência de figuras da 51 à 54 apresentam-se comparações de mapas de iso-velocidade para cada uma das detonações monitoradas (dias 16.10.2012, 7.11.2012, 16.11.2012 e 28.11.2012). Ilustram-se as mudanças dos mapas de iso-velocidade em função da quantidade de pontos conhecidos para o desenvolvimento do mapa de iso-velocidade. A análise foi realizada para 80 pontos, 20, pontos, 16 pontos e 12 pontos.

Quanto menor a quantidade de pontos conhecidos, maior a quantidade de detalhes do comportamento das vibrações do solo que se perdem no desenho do mapa de iso-velocidade. Oitenta pontos de medição seriam uma quantidade elevada o que em muitos casos poderia inviabilizar economicamente a solução, mas pela metodologia de Iramina (2002), podem se estimar muitos pontos a partir das equações carga-distância de cada direção.

Observa-se que o comportamento dos mapas de 20 sismógrafos (Figuras da 51 à 54) foi muito aproximado com os pontos de captação normalizados aos mapas realizados com as 4 detonações monitoradas nesta pesquisa (Figuras da 32 à 35). E com 20 e até com 16 sismógrafos ainda é possível identificar alguns detalhes do comportamento das vibrações na área estudada, com 12 sismógrafos isto já não ocorre.

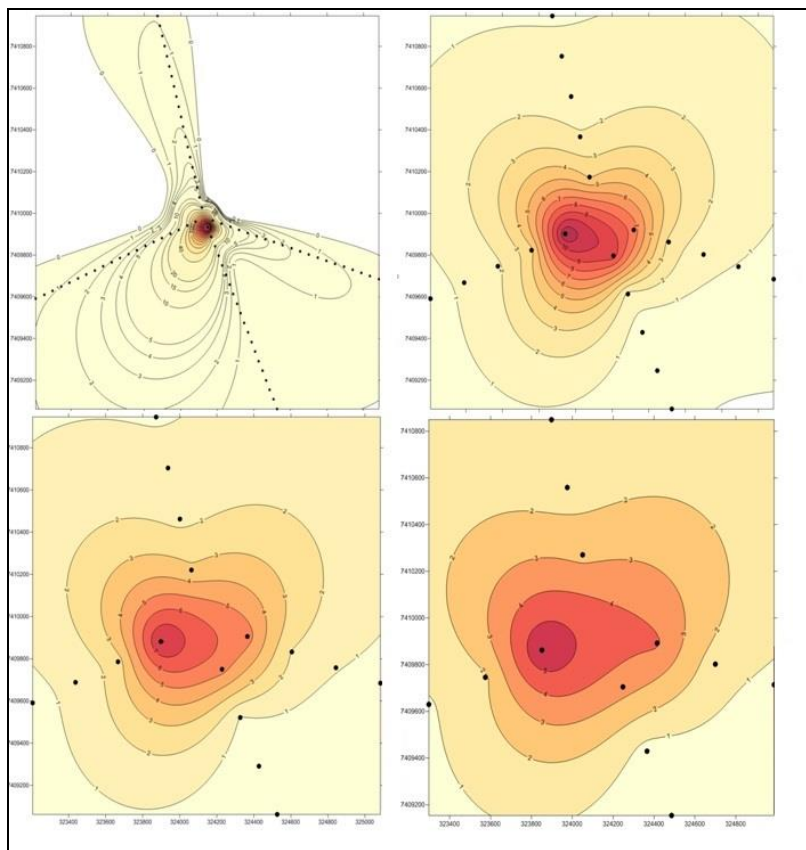


Figura 51- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (16.10.2012)

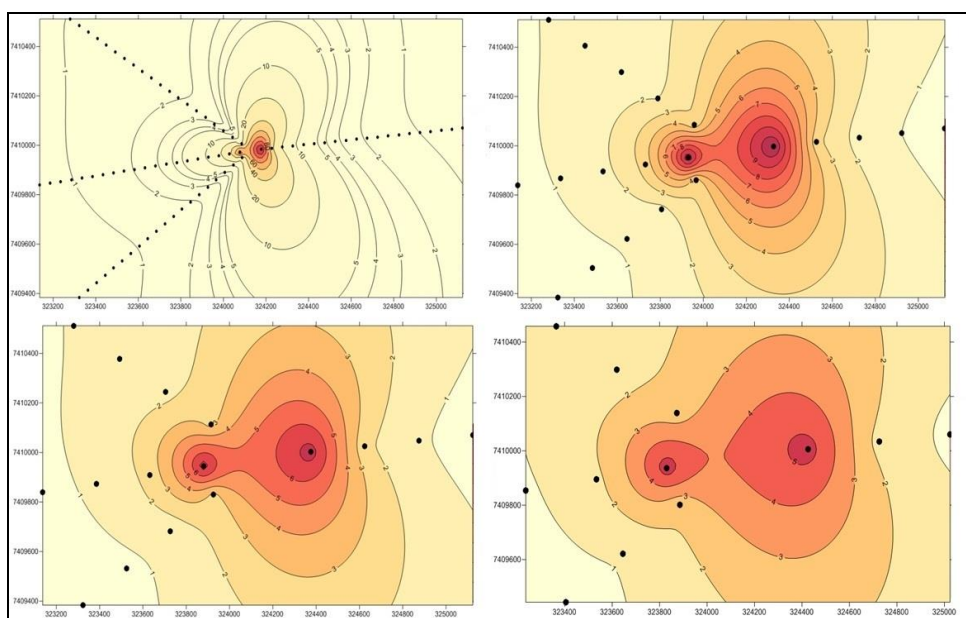


Figura 52- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (7.11.2012)

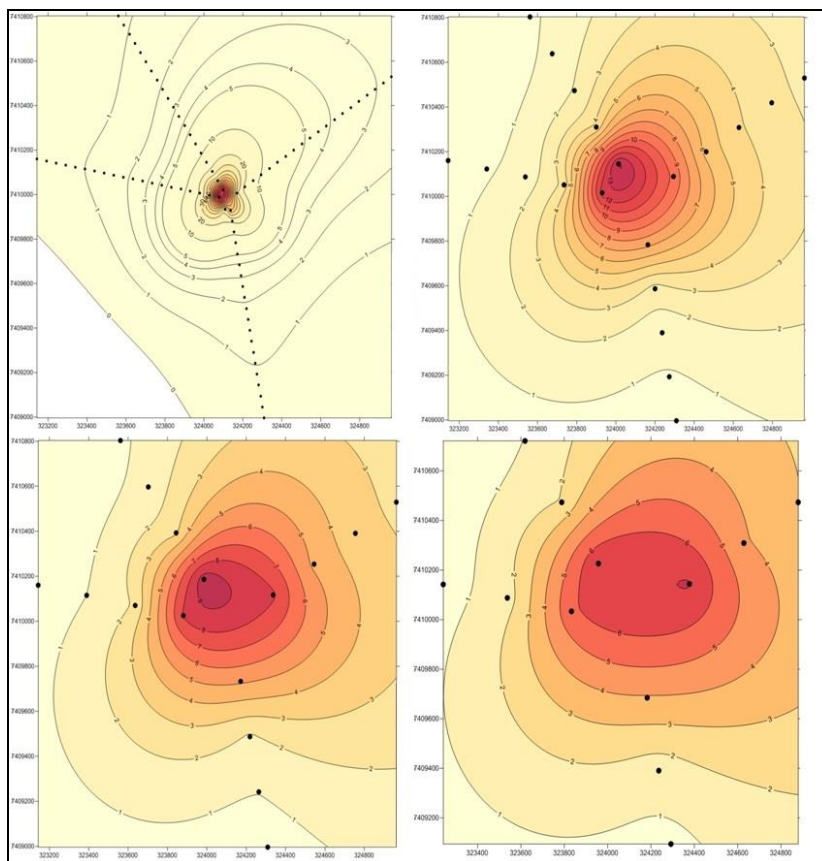


Figura 53- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (16.11.2012)

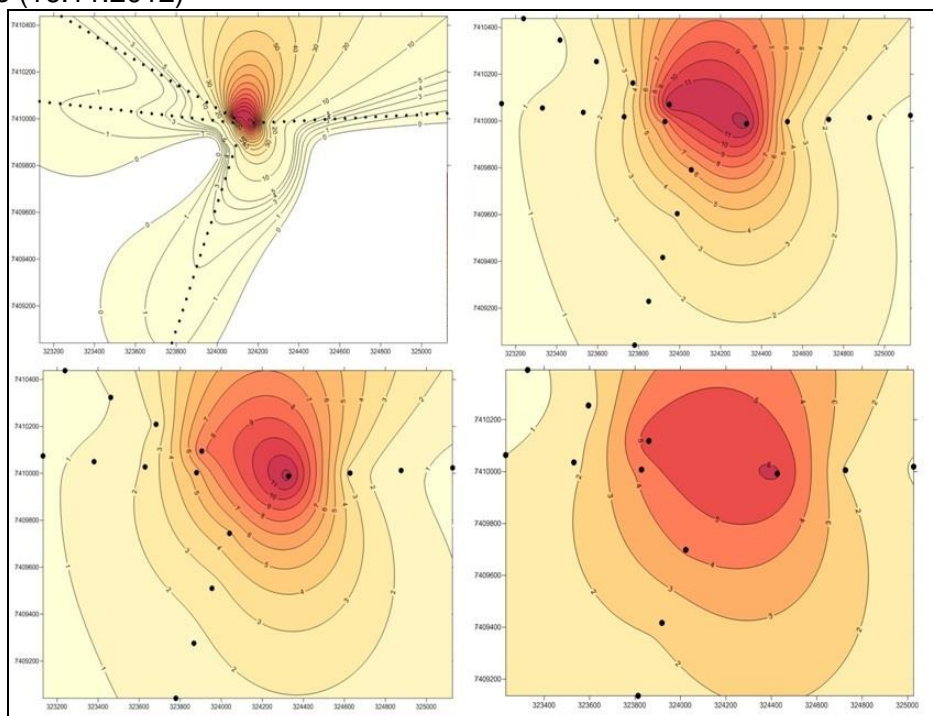


Figura 54- Comparação de mapas desenvolvidos com 80, 20, 16 e 12 pontos de captação (28.11.2012)

## 5- DISCUSSÕES

Os dados medidos, mapas construídos e equações obtidas foram analisados com base nos objetivos definidos no item 1.1.

### 5.1- COMPARAÇÃO DE 4 MAPAS DE ISO-VELOCIDADES, CADA UM DE 20 PONTOS, PARA 4 DETONAÇÕES NA MESMA BANCADA.

Na figura 27 temos os pontos das 4 detonações e nas figuras 28,29,30 e 31 a localização dos pontos de captação.

Uma primeira observação é que foi muito difícil a colocação dos geofones nas posições ideais, ou seja, cinco por linha em 4 direções ortogonais.

Algumas vezes, para uma dada direção a distribuição em linha era praticamente conseguida, como na figura 28. Mas então a ortogonalidade entre linhas não era atingida. Isto também é perceptível na figura 30.

Outras vezes tanto a linearidade como a ortogonalidade eram bastante prejudicadas, como nas figuras 29 e 31.

As maiores dificuldades práticas para a locação ideal decorriam de acessos e topografia.

Outra característica importante é que 3 detonações foram razoavelmente próximas geograficamente (7, 16 e 28 de novembro de 2012), enquanto a detonação de 16 de outubro de 2012 ficou em local mais distante, quase em posição diametralmente oposta com relação à detonação de 28 de novembro de 2012.

Assim seria de se esperar que as detonações de novembro fornecessem mapas de iso-velocidades mais “similares” no campo distante, face a topografia e direcionamento das fragmentações. Mas isto não ficou claramente perceptível.

Todavia para distâncias maiores, relativas a velocidades de 5 mm/s ou menos, grandes diferenças aparecem entre os mapas.

Mesmo para as detonações de novembro, mais próximas geograficamente, os mapas fornecem informações diferentes.

Como uma das utilidades de um mapa de iso-velocidades é estimar incômodos, e a CETESB fixa o valor de 4,2 mm/s, para estas iso-linhas, os mapas dão informações distintas.

A conclusão é que as atenuações dependem muito das variações de topografia, da litologia, do posicionamento na bancada e do ponto da detonação.

Os mapas da Geosonics utilizavam no início cerca de 100 geofones e atualmente cerca de 150 geofones. Talvez com esta quantidade de pontos as interpolações sejam mais precisas e os mapas mais similares. Com apenas 20 geofones surgem divergências muito grandes.

## 5.2- OBTENÇÃO DE EQUAÇÕES CARGA – DISTÂNCIA, PARA 4 DIREÇÕES EM CADA UMA DAS 4 DETONAÇÕES.

Os resultados das captações estão apresentados nas tabelas 9, 10, 11 e 12.

De modo geral quanto menor a distância, maior a taxa de atenuação. Algumas inversões aparecem e são analisadas a seguir.

Por exemplo, para a direção C, o ultimo sismógrafo foi instalado na divisa com a pedreira vizinha, em zona de mata espessa. Foi retirado solo e folhas, mas o solo úmido exigiu várias tentativas de fixação do geofone. Os problemas de fixação e de camada de solo podem explicar a inversão localizada desta velocidade de partícula ou possíveis pontos *hot spots*.

Para a direção D, o geofone foi instalado na borda da estrada que dá acesso às bancadas da cava. O solo estava úmido por causa dos caminhões pipa que atuam para diminuir a poeira.

Para as direções J e K não houve problema para a instalação dos geofones. Mas era solo recente de recapeamento e se estava perto de reservatório de água da pedreira.

Observou-se que os valores que não seguiam exatamente a atenuação com a distância eram sempre pontos isolados, e com magnitude próxima aos valores vizinhos. Assim, acredita-se nos valores captados e a possível discrepância pode estar associada à fixação do geofone, à proximidade de borda de estrada, à não perfeita linearidade dos pontos, a possíveis pontos *hot spots*, ao fraturamento, à características litológicas, etc.

A faixa de valores captados ficou entre 52 mm/s e 0,12 mm/s. Este máximo é pouco acima do valor máximo da NBR 9653, e portanto o domínio medido é



adequado para comparação com a norma. Além disso, era um ponto bem próximo da detonação.

Com os valores de velocidade de partícula se obteve 16 curvas carga – distância, apresentadas nas tabelas 13, 14, 15 e 16. Os coeficientes de correlação variaram de 0,72 a 0,99. Coeficientes acima de 0,80 podem ser considerados razoáveis, e acima de 0,90 bons. Dos 16 valores, 13 estão acima de 0,8 e 9 valores acima de 0,9. A visualização destes coeficientes pode ser feita com as plotagens do Apêndice C.

Os melhores ajustes foram para as direções A, E, I, M, todos acima de 0,95. Os resultados de curvas carga – distância para as direções C e K levaram a coeficientes de correlação baixos, de 0,72 e 0,76 respectivamente.

Da figura 28, percebe-se que a dispersão dos geofones fugia da linearidade, para a direção C, e da figura 30, o mesmo se percebe para a direção K. As não linearidades decorrem das dificuldades de na prática se colocar os geofones sempre em linha.

De modo geral as curvas carga – distância tiveram boas correlações, podendo-se inferir que:

- a) 5 pontos parecem ser sido suficientes para se ter uma confiável curva carga-distância.
- b) Jimeno, C. L.; Jimeno, E. L. e Carcedo (1995) afirmam que 8 pontos seria um número apropriado, e acreditamos que se as curvas de baixa correlação tivessem sido obtidas com 8 pontos, e boa linearidade, a correlação melhoraria.
- c) 5 pontos parecem ser suficiente desde que se tenha condições favoráveis, e portanto 8 pontos parece dar uma margem de segurança razoável para que discrepâncias não abaxiem a correlação.

- d) Poucos pontos (8 ou 10), parecem ser suficientes para dar uma correlação boa para os fins a que se destinam as curvas carga–distância.
- e) Em contraste, mapas de iso-velocidade não parecem confiáveis com 15, 20 ou 25 pontos. Esta análise será aprofundada mais adiante.
- f) Nos gráficos 3, 4, 5 e 6 podem-se comparar inclinações de retas e atenuações. Todas as retas indicam atenuações similares para todas as direções. Isto indica que o conceito de curva carga–distância realmente engloba de modo macroscópico todas as influências nas velocidades de partícula.

### 5.3- SIMULAÇÃO DA TÉCNICA DE IRAMINA.

Analisando as figuras 37, 38, 39 e 40 se percebe que:

- a) A interpolação com direções praticamente ortogonais fornece curvas com certa “plausibilidade” com relação ao fenômeno real (Figura 37).
- b) Para curvas não ortogonais, a interpolação matemática gera curvas que aparentam não estar conectadas com um amortecimento real para todas as direções. As figuras 38 e 39 exemplificam claramente esta impropriedade da técnica matemática pura.
- c) A interpolação é muito dependente da disposição espacial dos pontos, podendo se aproximar ou afastar da “realidade”.
- d) A “instabilidade” da interpolação indica que um mapa de iso-velocidade requer pontos distribuídos numa malha regular ao redor da detonação. A qualidade do mapa requer mais de 4 direções, pelo menos 8 direções (8 octantes).

A análise das figuras 41 e 42 indica que:

- a) Mapas feitos com pontos distribuídos em octantes permitem uma melhor interpolação, mas a figura 41 ainda mostra uma região onde não existe uma sequência de iso-linhas.
- b) A figura 42 apresenta uma melhor distribuição de iso-linhas apesar de haver um quadrante sem nenhum ponto.
- c) Conclui-se que a qualidade dos mapas requer no mínimo 8 pontos em cada direção. Ou seja, mapas de iso-velocidades devem ser elaborados com pelo menos 64 pontos de captação.
- d) A utilidade do mapa de iso-velocidade depende da sua confiabilidade, e esta depende muito da interpolação matemática. A qualidade da interpolação depende fortemente do número de pontos de captação e da distribuição espacial destes pontos.
- e) A empresa Geosonics iniciou a construção de mapas com 100 pontos e atualmente utiliza 150 pontos. Neste estudo pode-se comprovar que são realmente necessários cerca de uma centena de pontos para se ter um mapa de qualidade. Todavia a utilização de uma centena de geofones impõe custos altos para aplicação e manutenção de equipamentos; além de uma numerosa equipe de campo com uma logística complexa para monitoramento.

As figuras 43 e 44 indicam que:

- a) Mapas construídos com pontos linearmente distribuídos em octantes apresentam interpolações adequadas.
- b) Os mapas não perdem qualidade quando se usa as direções de captação para as quais se tinha curvas carga- distância com maiores ou menores atenuações.
- c) As figuras 43 e 44 utilizaram 8 direções com cerca de 20 pontos num total de 160 pontos, ou seja, mais uma vez temos indicação de que mapas de iso-velocidades devem ser construídos com pelo menos uma centena de pontos.

#### 5.4- COMPARAÇÃO DE MAPAS GERADOS COM 20 PONTOS E MAPAS PELA METODOLOGIA DE IRAMINA (2002).

Com as figuras 45 a 48 podemos perceber que o deslocamento das detonações pela bancada altera completamente a geometria das iso-linhas. Ou seja, mais uma vez se confirma que mapas de iso-velocidades tem sua qualidade muito dependente de uma distribuição “ homogênea ” de pontos ao redor da detonação.

As figuras 49 e 50 novamente demonstram a forte dependência da interpolação com relação à distribuição geográfica dos geofones.

Esta dependência também indica que mapas de iso-velocidade não devem usar detonações diversas, mas sim serem construídos para uma única detonação.

#### 5.5- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COM RELAÇÃO AO NÚMERO DE PONTOS DE CAPTAÇÃO.

As figuras 51 a 54 ilustram mapas construídos com diferentes números de pontos. Para o mapa da figura 51, com 80 pontos, estes 80 valores foram obtidos a partir das curvas carga- distância para as 4 detonações.

Num primeiro momento poder-se-ia pensar que quanto mais pontos, melhor a qualidade da interpolação. A análise visual da figura 51 mostra que é muito mais importante uma distribuição geográfica regular dos geofones, do que o número de geofones.

Os mapas com 20, 16 ou 12 pontos tem similaridade entre si, mas o mapa de 80 pontos distorce completamente as iso-linhas. A interpolação interpreta que tantos pontos numa dada direção forçam as iso-linhas nestas direções.

As observações feitas para a figura 51 valem para a figura 54. Para as figuras 52 e 53 as discrepâncias são menores, mas ainda perceptíveis.

## 6- CONCLUSÕES

As principais conclusões desta pesquisa foram:

- a) Curvas de carga-distância devem ser obtidas com 8 ou mais geofones. Se estiverem alinhadas a correlação deve ser mais alta, e acima de 0,9 a reta obtida pode ser considerada bem ajustada para análise de atenuação das vibrações pelo maciço. Oito geofones já dão um resultado aceitável, não sendo necessário usar 20, 30 ou 40 geofones.
- b) Mapas de iso-velocidade devem ser construídos para uma única detonação, usando dezenas de geofones. O número mínimo desejável é de cerca de 64 geofones (8 octantes, com 8 pontos por octante).
- c) A técnica de Iramina (2002) deve funcionar para qualquer tipo de topografia sempre que se realize uma distribuição regular dos sismógrafos.
- d) A distribuição geográfica dos geofones é função dos objetivos da captação. Se o objetivo é a construção de uma curva carga-distância para uma direção específica, deve-se usar de 8 a 15 geofones no melhor alinhamento possível. Se o objetivo é a construção de um mapa de iso-velocidade, deve-se usar pelo menos 64 geofones, espalhados numa malha regular. Não se objetiva então nenhuma linearidade de pontos, apenas uma ampla cobertura espacial.
- e) Deve-se atentar para os resultados da interpolação matemática. Muitos pontos em poucas zonas tendem a mascarar a realidade por efeitos puramente da técnica matemática. É preferível se ter menos pontos mais espalhados espacialmente do que muitos pontos concentrados em algumas zonas.

- f) Mapas de iso-velocidade com cerca de 20 pontos podem dar uma visão macro das iso-linhas reais, desde que haja uma boa distribuição espacial. Se possível, os mapas devem ser construídos com mais de 64 pontos, para que a interpolação forneça mapas mais ajustados à realidade do maciço.
  
- g) Para se analisar melhor a sensibilidade do mapa face ao número de pontos seria adequada uma captação com 100 ou 150 pontos. Atualmente o LACASEMIN não tem este número de geofones, estimando-se em cerca de 1 milhão de reais o custo de se obter um acervo deste tamanho.

## REFERÊNCIAS

ADETOYINBO, A.A.; POPOOLA, O.I.; HAMMED, O.S.; BELLO, A.K. An Assessment of Quarry-Blasting Vibration Impacts in Ibadan and Abeokuta, Nigeria. **European Journal of Scientific Research**, v. 44, n.2, p. 228-252, 2010.

AFENI, T.B.; OSASAN, S.K. Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine — A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. **Mining Science and Technology**, v.19, n.4, p. 420–424, 2009.

ALCUDIA A.D.; STEWART, R. R.; ELIUK, N. ESPERSEN R. Vibration and air pressure monitoring of seismic sources. CREWES, University of Calgary, Alberta, 2007 (Research Report — Volume 19).

ALVARES-VIGIL, A.E.; GONZALEZ-NICIEZA, C.; LOPEZ-GAYARRE, F.; ALVAREZ-FERNANDEZ, M. I. Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 55, p. 108–116, October 2012.

ARMSTRONG, L. W. **Evaluation of parameters effecting blast induced vibrations**. 2001. 246 p. Tese (Doutorado). University of Wollongong, Australia, 2001.

ARORA, S.; DEY, K. Estimation of near-field peak particle velocity: A mathematical model. **Journal of Geology and Mining Research**, v. 2, n. 4, p. 68-73, September 2010.

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.

BACCI, D. C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais**. 2000. 2 v. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo, 2000.



BACCI, D. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M. Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p. 47-54, jan./mar. 2006.

BACCI, D. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M.; IRAMINA, W. S. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas - Parte I. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v.56, n.1, Jan./Mar. 2003a.

BACCI, D. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M.; IRAMINA, W. S. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas - Parte II. **Rem: Rev. Esc. Minas** Ouro Preto, v.56, n.2, Apr./June. 2003b.

BERTA, G. **L' esplosivo strumento di lavoro**. Milano, ITALESPLOSIVI, 1ª ed. 1985.

BERTA, G. **Explosives: an engineering tool**. Milano, ITALESPLOSIVI, 1990.

CANDIA, R. C. O controle estrutural do maciço no desmonte por explosivos. In: Semana Ibero-Americana de Engenharia de Minas, 1., 2004, São Paulo. Resumos. São Paulo: EPUSP, 2004. p. 153-157

CASTILLO, S. M. O.; VIZCARRA, J. R. D. **Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina modelo. 2009. 97 p.** Trabalho de curso (Ingeniería de Minas). Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias y Ingeniería. Lima, 2009.

COUTINHO, J.M.V. **Petrologia do pré-cambriano de São Paulo e arredores**. Boletim IG-USP, São Paulo, v. 3, p. 5-99, 1972.

DALLORA NETO, C. **Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em mineração de calcário e argilito posicionada junto à área urbana de Limeira (SP) e sua aplicação para minimização de impactos ambientais**. 2004, 82 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo, 2004.

DALLORA NETO, C.; FERREIRA, G. C. Controle de vibrações geradas por desmonte de rochas com explosivos. Estudo de caso: Calcário Cruzeiro, Limeira (SP). **Geociências**, v. 25, n. 4, p. 455-466, 2006.

DALLORA NETO, C.; FERREIRA, G. C.; DOURADO, J. C. Utilização de sismógrafos de engenharia como ferramenta no controle de qualidade de acessórios de detonação não elétricos. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v.61, n.2, p. 185-192, abr./jun. 2008.

DE ARAUJO NETO, T.L. **Problemas gerados pela extração de rochas e propostas para mitigação do impacto sonoro**. 2006. 200 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

DE BLAS, J. A. P. **Problemática de las vibraciones en las voladuras. Medición, control e regulación legal**. Universidad Politécnica de Madrid, 2003.

DINIS DA GAMA, C. Ruídos e vibrações ligados à utilização dos explosivos e equipamentos. Comunicações do 1º Seminário de auditorias ambientais internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico Mineiro. Disponível em:  
[http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes\\_online/diversos/auditorias\\_amb/exto#capitulo4](http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/auditorias_amb/exto#capitulo4). Acesso em: 20 de fev.2012.

EGAN, J., KERMODE, J., SKYRMAN, M., TURNER L. L. Ground Vibration monitoring for construction blasting in urban areas. State of California, Abril, 2001 Final Report. Department of transportation.

ELEVLÍ B., ARPAZ E. Evaluation of parameters affected on the blast induced ground vibration (BIGV) by using relation diagram method (RDM). **Acta Montanistica Slovaca**, v.15, n. 4, p.261-268, 2010.

ELSEMAN, A. R. I. **Measurement and analysis of the effect of ground vibrations induced by blasting at the limestone quarries of the Egyptian Cement Company**. In: ICEHM2000, 2000, Cairo, Egito. The Proceeding of the International Conference of the Environmental Hazards Mitigation. Cairo University, Egito, 1990. p. 54-71.

ESTON, S. M. **Uma análise dos níveis de vibração associados a detonações**. Tese (Livre Docencia). 1998. 125 p. Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo para obtenção do título livre docente. São Paulo, 1998.

França, G. S. et al. Estudo das vibrações geradas por detonações feitas na obra civil da Eclusa 2 de Tucuruí (PA). **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.29, n.1, Jan./Mar. 2011.

GEOSONIC. Safeguard Seismic Unit 3000 EZ plus. Portable Seismograph. 2011. Disponível em:  
[http://www.geosonicvibrattech.com/images/stories/pdf/3000EZPlus\\_Manual.pdf](http://www.geosonicvibrattech.com/images/stories/pdf/3000EZPlus_Manual.pdf)  
f. Acesso em: 15 dezembro de 2011.

Geraldi, J. L. P. **O ABC das escavações de Rocha**. Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2011.

GHASEMI, E., ATAEI, M., HASHEMOLHOSSEINI, H. Development of a fuzzy model for predicting ground vibration caused by rock blasting in surfasse mining. **Journal of Vibration and Control**. February, 2012.

HAIBO L., YANXIN L., YAQUN L., WEIGUO Q., SHIHAI CH., QIUHUA Z. , YONGFENG Y. Optimization for the Prediction of Waveform and the Estimation of Peak Particle Velocity of Explosive Vibration. **Disaster Advances**, v. 5, n.4, October, 2012.

HAMIDI, B.; VRAKSIN, S.; NIKRAZ, H. A Case of Vibro Compaction Vibration Monitoring in a Reclaimed Site. In: International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE), 2011, Perth, Australia. **Proceedings.....** Perth, Australia, 2011, p. 861-866.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. (IPT). **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo. 2v. Publicação IPT nº 1.183, 1981.

INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVE ENGINEERS/ISEE. **Blasters' Handbook**. Cleveland, 2003.

INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVE ENGINEERS/ISEE. **ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs**. Cleveland, 2009.

IRAMINA, W. S. **Contribuições sobre a vibração do terreno e a sobrepressão atmosférica na elaboração do EIA de uma mina de nefelina-sienito.** 2007. 276 p. Tese (Livre docente). São Paulo, 2007.

IRAMINA, W. S. **O Mapa de Iso-velocidades como ferramenta de controle ambiental.** Tese (Doutorado). 2002. 223 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

JIMENO, C. L., JIMENO, E. L., CARCEDO, F. J. A. **Drilling and Blasting of Rocks.** London: Talor& Francis, 1995.

KAMALI, M., ATAEI, M. Prediction of blast induced ground vibrations in KarounIII power plant and dam: a neural network. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v.110, August, 2010.

KHALED, M.; RAHMAN, K. A.; BAGY, E. Safe blasting near the historical caves, Tourah, Cairo Egypt. EFEE world conference on explosives and blasting, 4., 2007a.. **Proceedings of the 4th EFEE world conference on explosives and blasting**, Vienna, Austria, v.1, p. 365.

KHALED, M.; RAHMAN, K. A.; MAKAREM, A. A. Experimental techniques to reduce blast vibration level, Tourah, Cairo, Egypt. Annual Conference of Explosives and Blasting Technique, 33., 2007b, **Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual Conference of Explosives and Blasting Technique**, Nashville, TN, USA, v. 1, p. 221.

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

KONYA, C. J. **Blast desingn.** Ohio. Intervontinental Development, 1995.

KOPPE, J. C.; SALVADORETTI, P.; MUNERETTI, E.; COSTA, J. F. C. L. Monitoramento geofísico de desmonte de rocha com utilização de explosivos em condições de risco elevado em zona urbana. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.54, n.4, Oct./Dec. 2001.

KUJUR, B. K. **Blast Vibration Studies in Surface Mines.** Trabalho de curso (Bachelor of technology in mining engineering). 2010. 60 p. National Institute of Technology. Rourkela, 2010.

LLERA, J. M. P.; JIMENO, C. L.; URBINA, F. P. O.; JIMENO, E. L. **Manual de Perforación y voladura de rocas**. Madrid. Instituto Geológico y Minero de España, 1987.

LOURO, A. F. F. C. **Novas formulações para leis de propagação de vibrações, em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos**. Dissertação (Mestrado). 2009. 102 p. Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

MA, G.W., HAO, H., WANG, F. Simulations of explosion-induced damage to underground rock chambers. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v.3, n.1, p.19–29, 2011.

MARTINHO, J. F. C. **O uso de explosivos na escavação de túneis: Implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folhas de cálculo**. Dissertação (Mestrado). 2012. 179 p. Universidade do Porto. Porto, fevereiro, 2012.

MOHAMED, M. T. **Vibration Control**, Book edited by: Dr. Mickaël Lallart, pp. 380, chapter 16 September 2010, Sciyo, Croatia

MURTHY V.M.S.R., DEY, K. Development of predictive models for controlling blast-induced overbreakintunnels. **Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology**, v.10, n.1, p 31-47, 2004.

MURTHY V.M.S.R., DEY K., MUNSHI B., KUMAR S. Predicting blast induced rock damage (bird) in burn cuts using acceleration measurements. **Second National Seminar on Rock Excavation Technique**. Bhubaneshwar, April, 2003.

OLOFSSON, S. O. **Applied explosives technology for construction and mining**. 2nd ed. Applex: Arla, 2002.

ORIARD, L. L. **Blasting effects and their control**. Underground Methods Handbook , W.A. Hustrulid Editor, 1982.

PAL, B. K., BRAHMA K. C. An Application of Regression Model for Evaluation of Blast Vibration in an Opencast Coal Mine – a Case Analysis. **Canadian Journal on Computing in Mathematics, Natural Sciences, Engineering & Medicine**, v. 1, n. 3, April ,2010.

RAI, R.; SINGH, T. N. A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v.11, p. 178-184, June, 2004.

RAO, Y.S. Prediction of ground vibrations in opencast mine using nonlinear regression analysis. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v.4, n.9, September, 2012.

REIL, J.P. Why people complain about Blasting. **Rock Products**. Chicago Maclean Hunter Publishing, July, 1998.

RIBEIRO, J. T. M.; FERREIRA, G. C. Mineração subterrânea de carvão X comunidade no seu entorno: um exemplo de Santa Catarina (2007). **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v.60, n.3, p. 459-464, jul./ set. 2007.

ROY, M. P.; SINGH, P. K.; SINGH, G.; MONJEZI, M. Influence of initiation mode of explosives in open cast blasting on ground vibration. **Mining Technology**, v. 116, n. 1, 2007.

RUDENKO, D. **Understanding blast vibrations**. Business Library, August, 1998. Disponível em:  
<[http://findarticles.com/p/articles/mi\\_m3095/is\\_n2\\_v91/ai\\_n27541607/](http://findarticles.com/p/articles/mi_m3095/is_n2_v91/ai_n27541607/)>.  
Acesso em: 20 de fev.2012.

SADEGHEE, A.; KHOSHROU, H. A comparison of empirical methods and evolutionary programming to predict blast-induced ground vibration. **Harmonising Rock Engineering and the Environment**. September 14, 2011 by CRC Press - 2,048 Pages. Singapore

SCHRAGE, M.W. **Mapa de Ruído como ferramenta de diagnóstico do conforto acústico da comunidade**. Dissertação (Mestrado). 2005. 101 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

SCOTT, A. **Open pit blast design**. JKMRRC. T.J. Napier Munn Editor. The University of Queensland. Australia, 1996.

SISKIND, D.E.; STAGG, M.S.; KOPP, J.W.; DOWDING, C.H. Structure response and damage produced by ground vibrations from surface mine

blasting. Report of Investigations 8507. United States Bureau of Mines. 1980. 74 p. Washington, U.S.

TAMROCK. Handbook on surface drilling and blasting, Painofaktorit, 1984.

TARIQ S. M. A comparative study of calculated and measured particle velocities. **Pakistan Engineering Congress, 69th Annual Session Proceedings**. Pakistan, 2003.

VALENCIA, D. R., SÁNCHEZ, C. O., ORDOÑEZ, J. A. R. Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, v.7, n. 2, 2007.

WANG, H.; XUE, X.; LI, S.; LI, C. Modification of Surface Velocity Calculation Fórmula in Tunnel Blasting. **Advanced Materials Research**, v. 199-200, p. 882-885, 2011.

WU, X., YOU, X. Study on the influence of blast vibration with the underground Mine drifts' stability by comprehensive coefficient method. **International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering**, RSETE 2011 - Proceedings, p 795-797, Nanjing, China.2011.

ZHU, Z.; MOHANTY, B.;XIE, H. Numerical Investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 44, p. 412–424, 2007.

## APÊNDICE A- RESULTADOS DAS SISMOGRAFIAS DAS QUATRO DETONAÇÕES MONITORADAS.

Nas tabelas A1 a A4 encontram-se os valores de velocidade da vibração das partículas medidos pelos sismógrafos e a frequência relacionada a cada componente vetorial da velocidade.

Tabela A1- Resultados da sismografia do dia 16.10.2012

SN	L (mm/s)	Fre (Hz)	T (mm/s)	Fre (Hz)	V (mm/s)	Fre (Hz)	Vp (mm/s)	SP dBL
3707	26,99	33,3	24	25	19,18	26,3	30,48	129
3702	13,34	31,3	10,16	22,7	11,75	26,3	16,00	127
3708	6,99	23,8	6,29	20,8	10,1	27,8	12,26	127
8950	7,18	23,8	5,14	22,7	7,87	20,8	8,26	120
8955	5,46	25	3,68	26,3	4,64	22,7	5,52	120
3706	3,05	16,7	2,54	20,8	2,92	17,9	3,87	120
8896	3,18	23,8	2,35	11,4	2,98	22,7	3,37	118
8949	2,6	15,2	2,35	22,7	1,65	23,8	2,73	115
8957	2,35	29,4	1,65	25	1,97	41,7	2,40	113
8894	0,89	22,7	1,21	20,8	0,76	12,5	1,27	111
8947	2,35	29,4	1,65	25	1,97	41,7	2,98	130
3700	1,78	26,3	0,95	26,3	1,27	38,5	1,84	130
8895	1,65	20	2,35	21,7	2,67	26,3	2,70	122
8893	0,89	22,7	0,38	25	0,64	17,2	0,95	110
8897	2,16	17,2	2,54	15,6	1,46	22,7	2,92	114
8953	1,65	18,5	2,35	21,7	1,71	15,6	2,86	111
8951	0,83	10,2	0,83	9,6	0,83	9,6	1,00	108
8952	0,76	13,2	0,89	11,1	0,95	10,4	1,14	110



Tabela A2- Resultados da sismografia do dia 7.11.2012

SN	L (mm/s)	Fre (Hz)	T (mm/s)	Fre (Hz)	V (mm/s)	Fre (Hz)	Vp (mm/s)	SP dBL
8954	9,33	33,3	14,61	19,2	15,68	27,8	16,70	127
8951	14,03	12,8	8,19	12,2	10,03	33,3	15,70	125
8956	5,78	35,7	5,72	33,3	6,99	16,7	8,00	122
8955	3,43	11,1	3,68	17,2	3,5	12,2	5,03	118
8953	0,44	166,7	3,24	14,7	3,11	14,3	3,56	121
8947	1,4	10,5	1,32	21,9	2,2	14,8	2,29	126
8894	1,69	16,6	1,5	13	1,3	19,9	1,91	127
8957	1,75	14,9	1,48	7,5	1,5	15,7	1,80	118
3700	1,40	13,7	1,37	6,4	1,32	15,3	1,50	118
3706	0,85	23,2	0,8	21	0,7	19,4	1,02	118
3708	1,97	16,7	2,54	17,2	1,21	16,7	2,60	124
3702	2,48	17,2	2,67	17,2	2,73	16,7	3,56	119
3707	2,16	15,6	1,97	15,6	1,4	12,5	2,48	117
8895	0,13	500	1,4	26,3	0,83	14,3	1,59	113
8893	0,76	13,2	0,44	11,4	0,51	17,2	0,83	118
8950	1,91	14,7	1,59	18,5	1,21	15,6	1,97	125
8952	1,78	14,7	1,46	7	1,46	15,2	1,84	117
8897	1,02	16,7	1,21	15,2	0,95	13,5	1,46	111
8949	0,7	13,2	1,14	11,6	0,7	25	1,21	109
8896	0,38	7,9	0,25	2,6	0,57	8,5	0,64	101

Tabela A3- Resultados da sismografia do dia 16.11.2012

SN	L (mm/s)	Fre (Hz)	T (mm/s)	Fre (Hz)	V (mm/s)	Fre (Hz)	Vp (mm/s)	SP dBL
8894	14,61	13,2	18,16	13,2	10,67	13,9	20,26	138
8952	12,13	16,7	8,64	19,2	12,89	20,8	14,80	136
8954	7,11	13,5	7,43	14,7	9,33	12,5	10,29	136
8957	8,57	14,7	6,86	21,7	6,03	16,1	9,46	130
8953	1,97	2	6,99	25	3,56	15,6	7,11	135
8955	2,67	17,2	2,54	15,2	2,36	16,1	2,90	114
3706	1,4	10,9	1,33	15,6	1,46	10,9	1,59	113
3708	1,12	15,2	1,09	15,5	1,25	16,3	1,30	110
3700	0,30	13,8	0,25	19,5	0,56	13,7	0,60	108
8895	2,41	16,7	2,16	19,2	1,71	14,7	2,73	118
8956	1,84	13,2	1,27	25	1,65	15,2	2,16	114
8950	1,14	13,5	0,57	55,6	0,7	9,3	1,21	119
3702	1,21	10,2	1,46	16,7	1,46	9,8	2,03	114
3707	0,12	15,3	0,17	13,2	0,21	10,8	0,25	108
8897	4,57	12,5	5,21	15,6	5,59	22,7	6,03	139
8951	1,91	26,3	1,21	31,3	1,33	18,5	4,90	138
8949	1,91	16,1	2,03	18,5	3,24	20	3,56	135
8896	3,24	14,7	2,48	19,2	2,41	17,2	3,94	137
8947	3,18	17,2	2,67	16,7	1,91	14,3	3,24	134

Tabela A4- Resultados da sismografia do dia 28.11.2012

SN	L (mm/s)	Fre (Hz)	T (mm/s)	Fre (Hz)	V (mm/s)	Fre (Hz)	Vp (mm/s)	SP dBL
8952	24,19	20,8	31,31	33,3	49,28	45,5	52,32	130
8949	6,73	17,2	6,79	22,7	4,06	31,3	7,49	120
8895	2,86	17,9	2,29	26,3	4	29,4	4,06	118
8897	2,35	15,6	1,84	20,8	1,4	20	2,48	113
8953	0,95	12,8	1,65	17,9	1,71	21,7	2,03	111
3706	1,46	10,2	1,33	21,7	2,1	14,3	2,22	111
3708	1,71	16,7	1,65	12,8	1,33	20	1,91	113
3700	0,7	8,5	0,38	12,5	0,44	23,8	0,76	87
3707	0,32	7,8	0,25	12,5	0,19	9,1	0,38	101
8894	2,29	20	2,73	16,7	2,41	20	3,37	120
8893	2,92	10,4	2,73	19,2	2,6	17,2	3,56	119
8951	2,10	15,2	1,71	27,8	1,91	15,2	2,20	114
8950	1,84	21,7	1,84	62,5	2,29	33,3	2,60	108
8955	0,83	25	0,83	20	0,57	19,2	1,02	113
8956	3,54	22,7	3,48	41,7	2,48	22,7	4,20	125
8957	2,79	31,3	2,67	23,8	2,54	18,5	4,06	125
8954	3,2	15	3,7	11,4	2,9	14,3	3,90	125
8896	2,79	15,6	1,59	15,6	2,54	16,1	3,30	118
8947	1,27	13,5	0,89	16,1	1,59	16,1	1,59	118

# APÊNDICE B- RELATÓRIO DE SISMOGRAFIA OBTIDO DO SISMOGRAFO SN-3707.

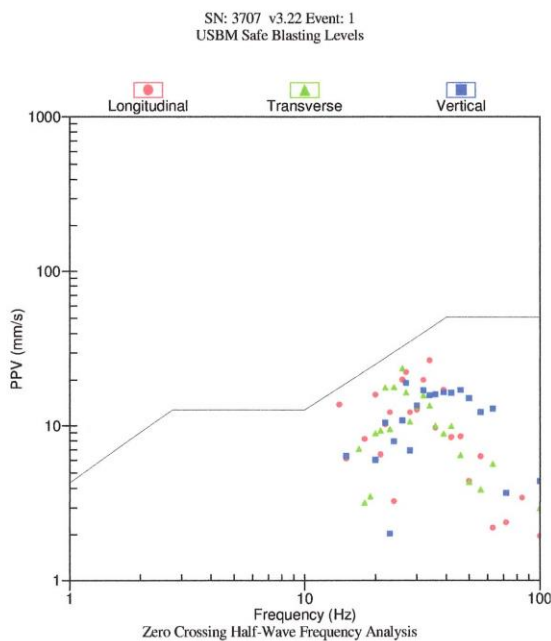
**SN:** 3707 **Firmware:** v3.22  
**Date:** 16.10.2012 **Time:** 13:03:25  
**Event:** 1 **Record Time:** 5,0 s  
**Client:** EMBU JURUACU  
**Operation:** Desmonte de Rochas  
**Location:**  
**Distance:** 0,  
**Operator:** LACASEMIN EPUSP  
**Comment:**  
**Trigger Level:** 0,51 mm/s

**Velocity Waveform Graph Scale:**  
**Time** = 0,100 s  
**Seismic** = +/- 1,28 mm/s  
**Sound** = +/- 0,0091 psi

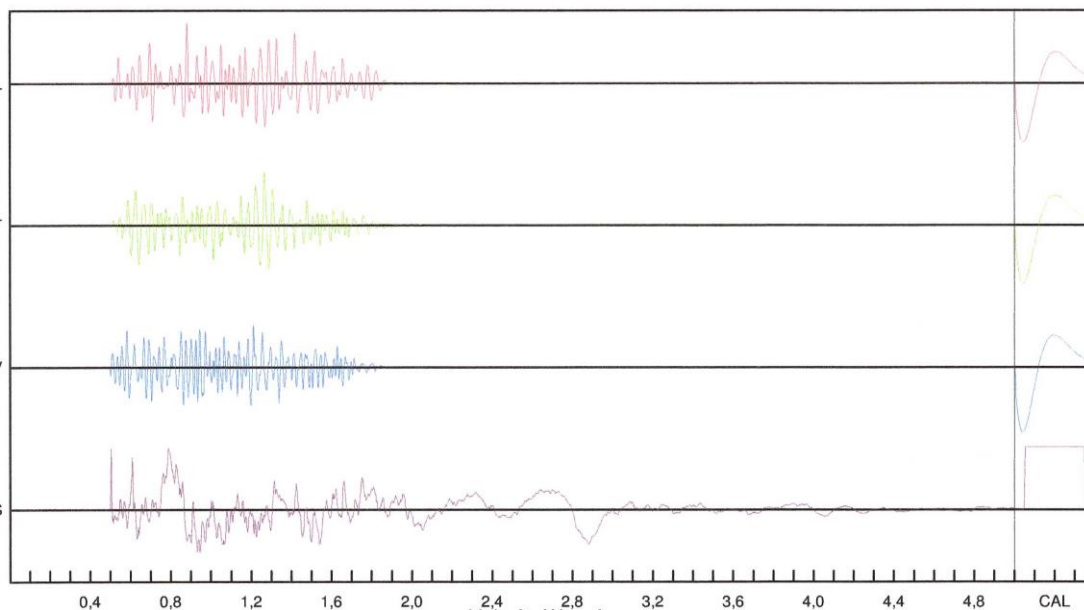
Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	26,99	24	19,18
PD (.01mm)	14,4	14,1	9,12
PPA (g)	0,508	0,449	0,566
FREQ (Hz)	33,3	25,0	26,3
Resultant PPV:	30,48 (mm/s)		
Peak Air Pressure:	129 db		
	0,0 psi		

**Additional Info:**

**Shaketable Calibrated:** 10.05.2011  
**By:** GeoSonics Inc.  
 359 Northgate Drive  
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.  
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999



SN: 3707 v3.22 Event: 1



## APÊNDICE C- CÁLCULOS E GRÁFICOS DAS CURVAS CARGA - DISTÂNCIA DAS QUATRO DETONAÇÕES MONITORADAS.

### *Detonação dia 16.10.2012*

Na tabela B1 encontram-se os dados necessários para estimar as variáveis das equações carga distância. Também apresentam-se as equações e os gráficos com os valores da correlação.

Tabela C1-Dados para estimar as variáveis das equações carga-distância do dia 16.10.2012

SN	Distância (m)	Carga máxima por espera (Q) (kg)	Vp (mm/s)	Q <sup>0,5</sup>	DE (D/Q <sup>0,5</sup> )
3706	283,6	90	3,87	9,486833	29
8896	338,3	90	3,37	9,486833	35
8949	407,7	90	2,73	9,486833	42
8957	464,6	90	2,40	9,486833	48
8894	566,7	90	1,27	9,486833	59
3707	115,0	90	30,48	9,486833	12
3702	145,8	90	16,00	9,486833	15
3708	163,1	90	12,26	9,486833	17
8950	198,3	90	8,26	9,486833	20
8955	228,0	90	5,52	9,486833	24
8897	402,2	90	2,92	9,486833	42
8953	568,5	90	2,86	9,486833	59
8951	688,5	90	1,00	9,486833	72
8952	770,2	90	1,14	9,486833	81
8947	302,3	90	2,98	9,486833	31
3700	324,5	90	1,84	9,486833	34
8895	359,6	90	2,70	9,486833	37
8893	950,0	90	0,95	9,486833	100

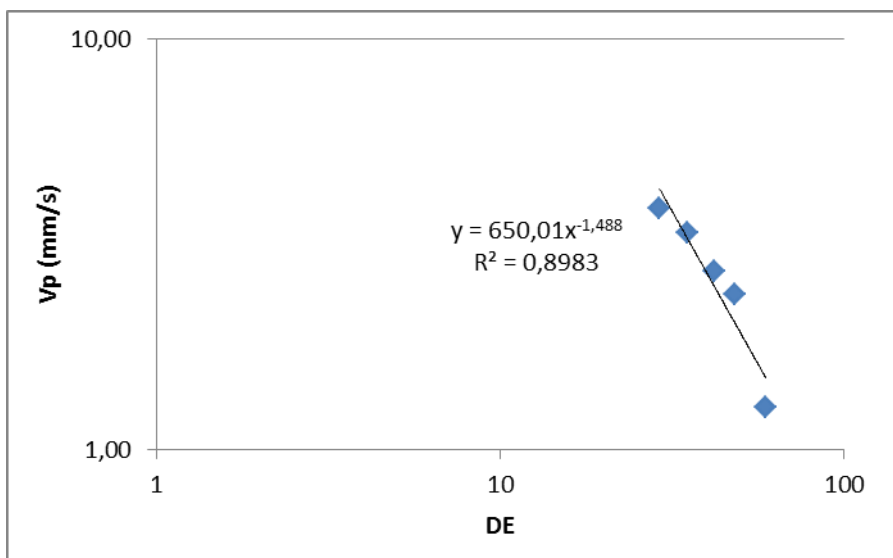


Gráfico C1- Equação Carga-Distância direção A

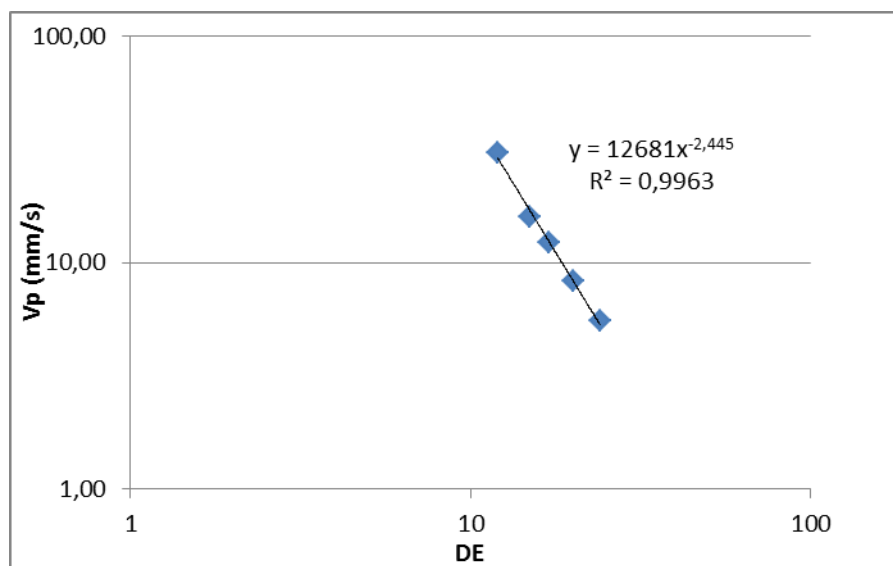


Gráfico C2- Equação Carga-Distância direção B

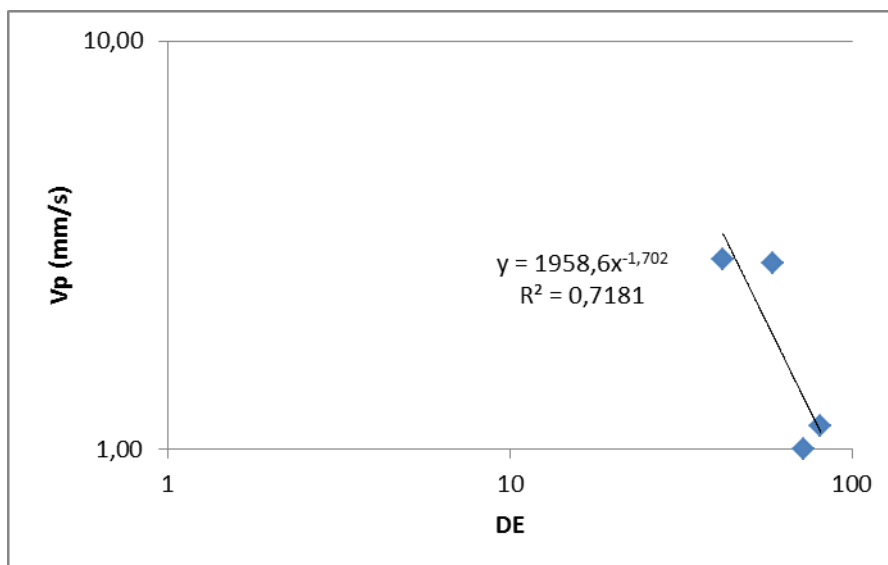


Gráfico C3- Equação Carga-Distância direção C

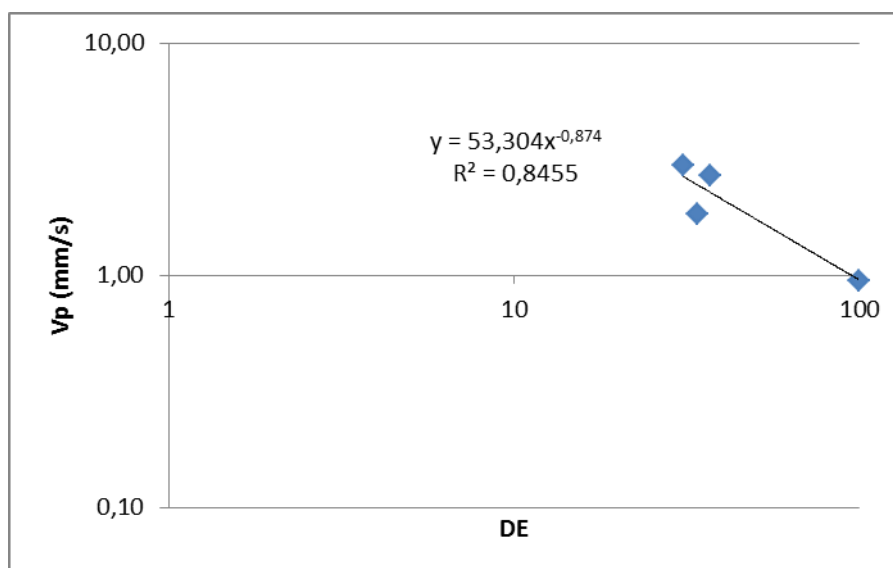


Gráfico C4- Equação Carga-Distância direção D

**Detonação dia 07.11.2012**

Na tabela B2 encontram-se os dados necessários para estimar as variáveis das equações carga distância. Também apresentam-se as equações e os gráficos com os valores da correlação.

Tabela C2- Dados para estimar as variáveis das equações carga-distância do dia 7.11.2012

SN	Distância (m)	Carga máxima por espera (Q) (kg)	Vp (mm/s)	Q <sup>0,5</sup>	DE (D/Q <sup>0,5</sup> )
8954	144,1	102	16,70	10,0995	14
8951	172,1	102	15,70	10,0995	17
8956	236,1	102	8,00	10,0995	23
8955	312,0	102	5,03	10,0995	30
8953	383,7	102	3,56	10,0995	37
8947	303,3	102	2,29	10,0995	30
8894	342,5	102	1,91	10,0995	33
8957	374,6	102	1,80	10,0995	37
3700	511,3	102	1,50	10,0995	50
3706	610,5	102	1,02	10,0995	60
3708	422,7	102	2,60	10,0995	41
3702	456,2	102	3,56	10,0995	45
3707	510,9	102	2,48	10,0995	50
8895	667,8	102	1,59	10,0995	66
8893	909,4	102	0,83	10,0995	90
8950	362,4	102	1,97	10,0995	35
8952	462,9	102	1,84	10,0995	45
8897	719,1	102	1,46	10,0995	71
8949	1164,7	102	1,21	10,0995	115
8896	1416,0	102	0,64	10,0995	140

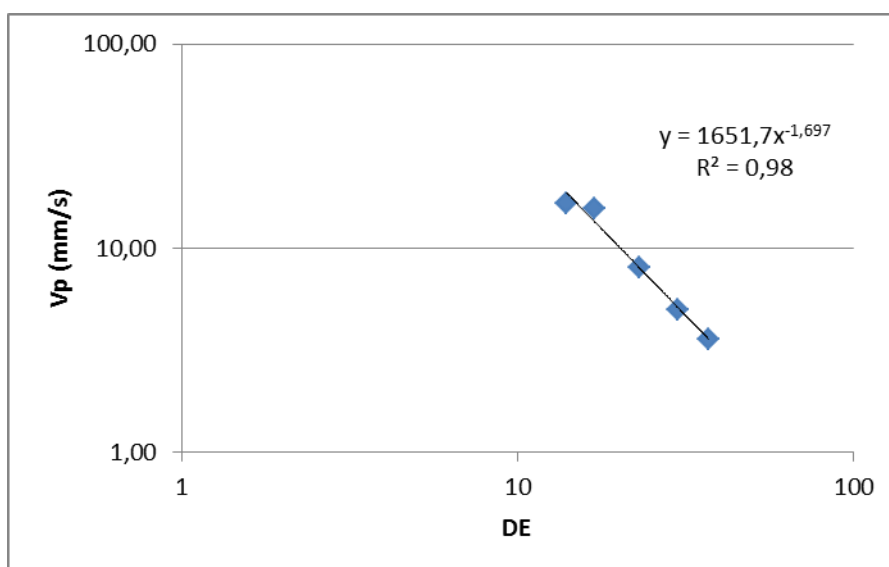


Gráfico C5- Equação Carga-Distância direção E



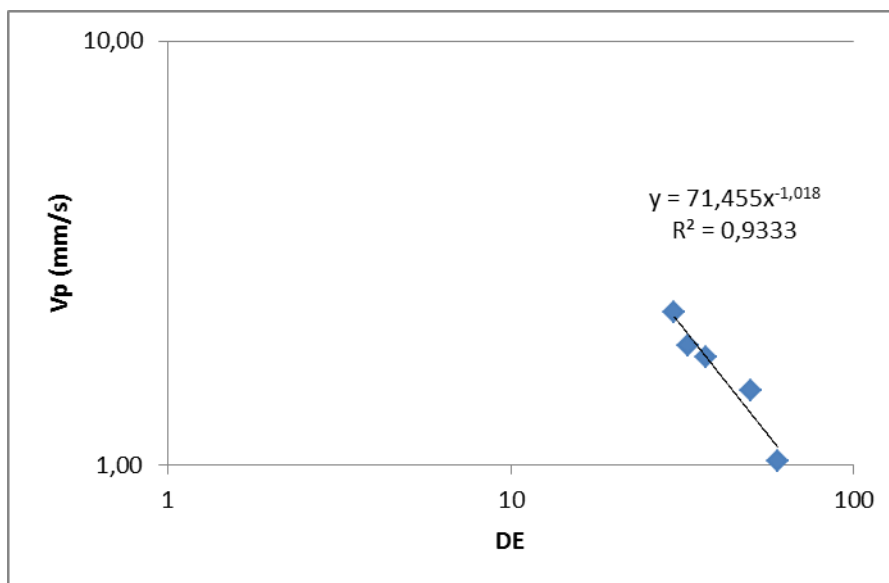


Gráfico C6- Equação Carga-Distância direção F

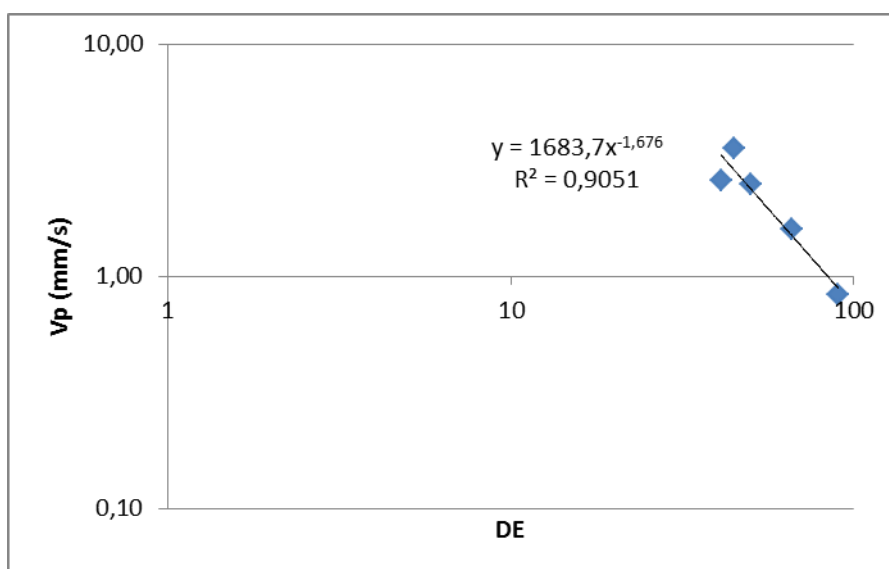


Gráfico C7- Equação Carga-Distância direção G

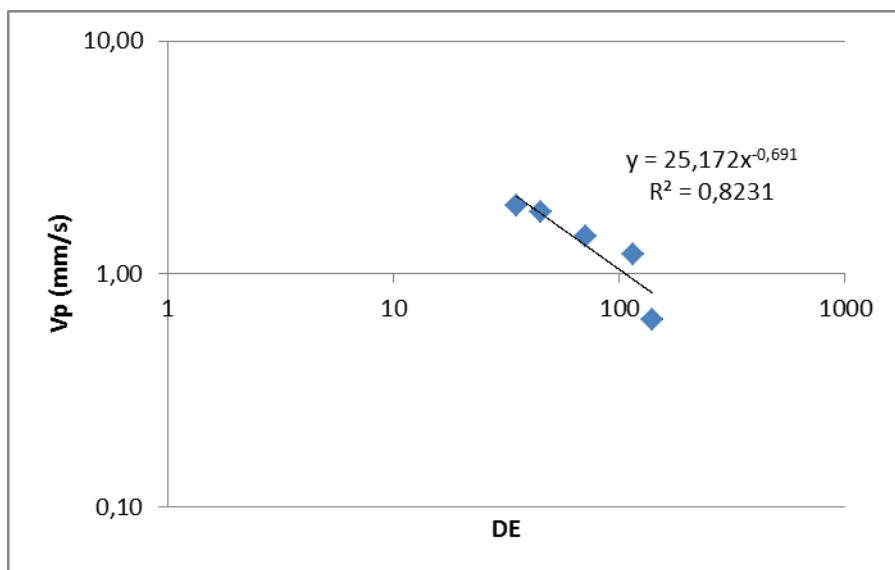


Gráfico C8- Equação Carga-Distância direção H

**Detonação dia 16.11.2012**

Na tabela B3 encontram-se os dados necessários para estimar as variáveis das equações carga distância. Também apresentam-se as equações e os gráficos com os valores da correlação.

Tabela C3- Dados para estimar as variáveis das equações carga-distância do dia 16.11.2012

SN	Distância (m)	Carga máxima por espera (Q) (kg)	Vp (mm/s)	Q <sup>0,5</sup>	DE (D/Q <sup>0,5</sup> )
8894	78,8	98	20,26	9,899495	7
8952	121,2	98	14,80	9,899495	12
8954	163,0	98	10,29	9,899495	16
8957	214,1	98	9,46	9,899495	21
8953	285,7	98	7,11	9,899495	28
8897	218,5	98	6,03	9,899495	22
8951	249,3	98	4,90	9,899495	25
8949	282,2	98	3,56	9,899495	28
8896	307,9	98	3,94	9,899495	31
8947	330,8	98	3,24	9,899495	33
8895	402,9	98	2,73	9,899495	40
8956	492,1	98	2,16	9,899495	49
8950	637,0	98	1,21	9,899495	64
3702	802,0	98	2,03	9,899495	81
3707	1199,1	98	0,25	9,899495	121
8955	469,0	98	2,99	9,899495	47
3706	710,1	98	1,59	9,899495	71
3708	913,0	98	1,30	9,899495	92
3700	1052,9	98	0,60	9,899495	106

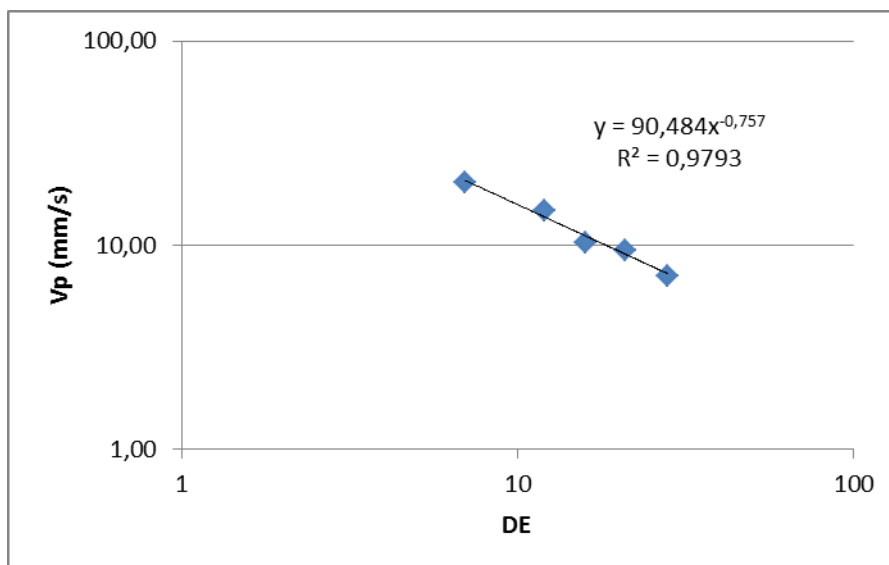


Gráfico C9- Equação Carga-Distância direção I

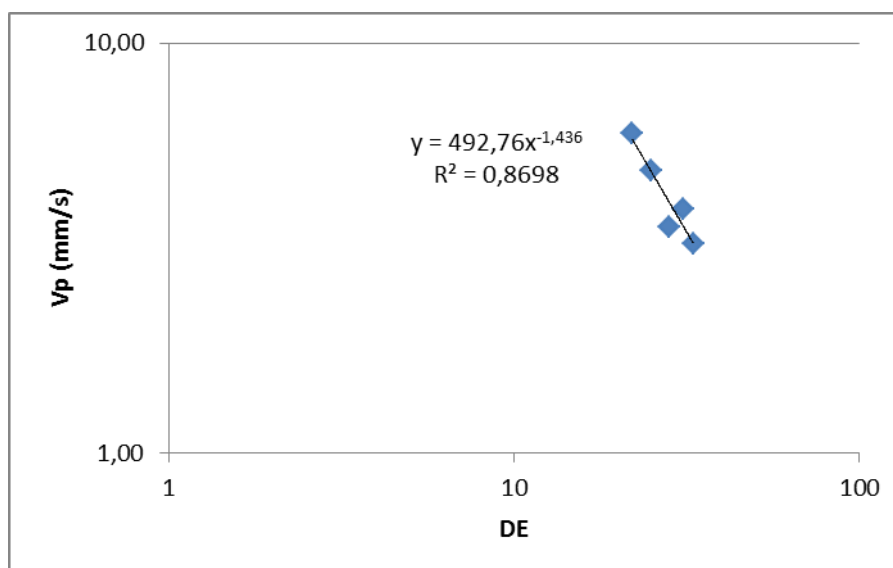


Gráfico C10- Equação Carga-Distância direção J

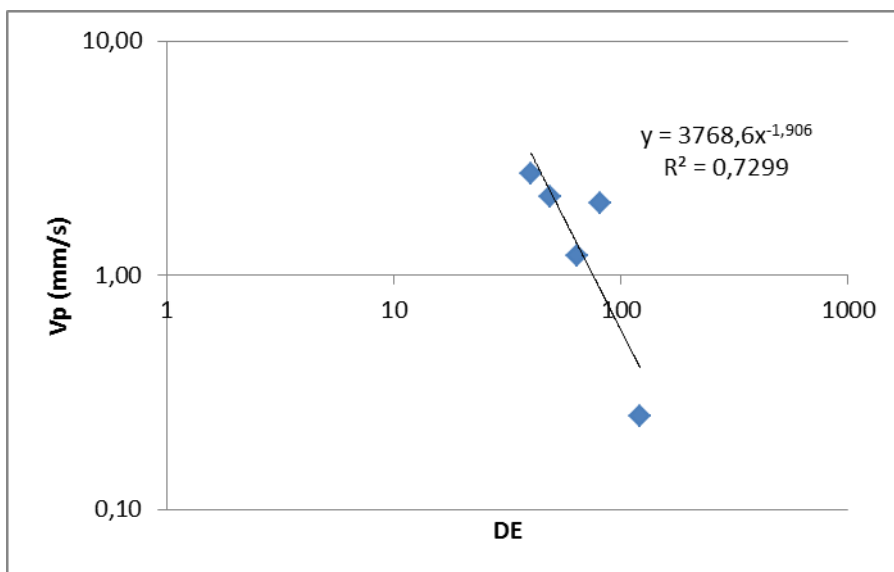


Gráfico C11- Equação Carga-Distância direção K

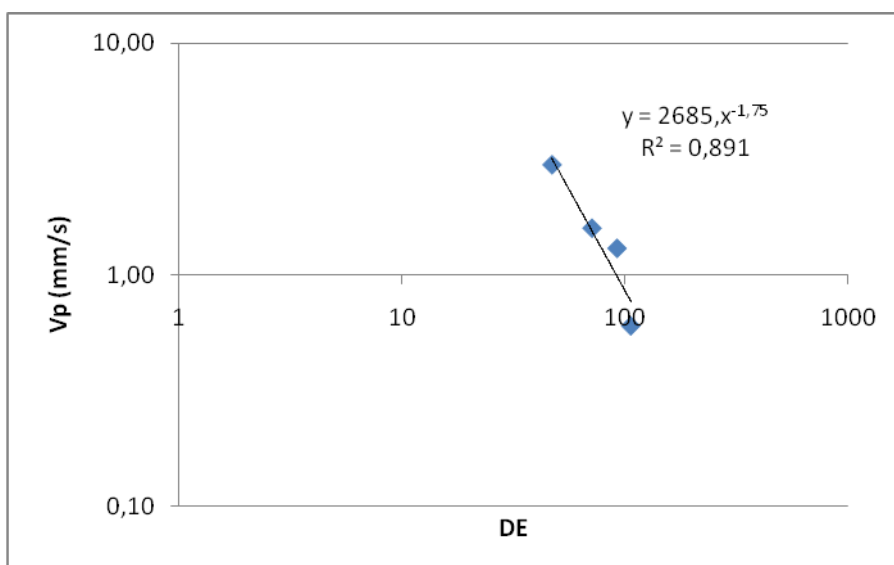


Gráfico C12- Equação Carga-Distância direção L

### ***Detonação dia 28.11.2012***

Na tabela B4 encontram-se os dados necessários para estimar as variáveis das equações carga distância. Também apresentam-se as equações e os gráficos com os valores da correlação.

Tabela C4- Dados para estimar as variáveis das equações carga-distância do dia 28.11.2012

SN	Distância (m)	Carga máxima por espera (Q) (kg)	Vp (mm/s)	Q <sup>0,5</sup>	DE (D/Q <sup>0,5</sup> )
8952	87,0	98	52,32	9,899495	8
8949	269,7	98	7,49	9,899495	27
8895	376,4	98	4,06	9,899495	38
8897	483,1	98	2,48	9,899495	48
8953	549,5	98	2,03	9,899495	55
8956	259,1	98	4,20	9,899495	26
8957	292,2	98	4,06	9,899495	29
8954	343,1	98	3,90	9,899495	34
8896	447,6	98	3,30	9,899495	45
8947	498,3	98	2,10	9,899495	50
8894	340,3	98	3,37	9,899495	34
8893	374,3	98	3,56	9,899495	37
8951	425,9	98	2,20	9,899495	43
8950	571,3	98	2,60	9,899495	57
8955	777,7	98	1,02	9,899495	78
3708	548,5	98	1,91	9,899495	55
3700	970,6	98	0,76	9,899495	98
3707	1126,6	98	0,38	9,899495	113

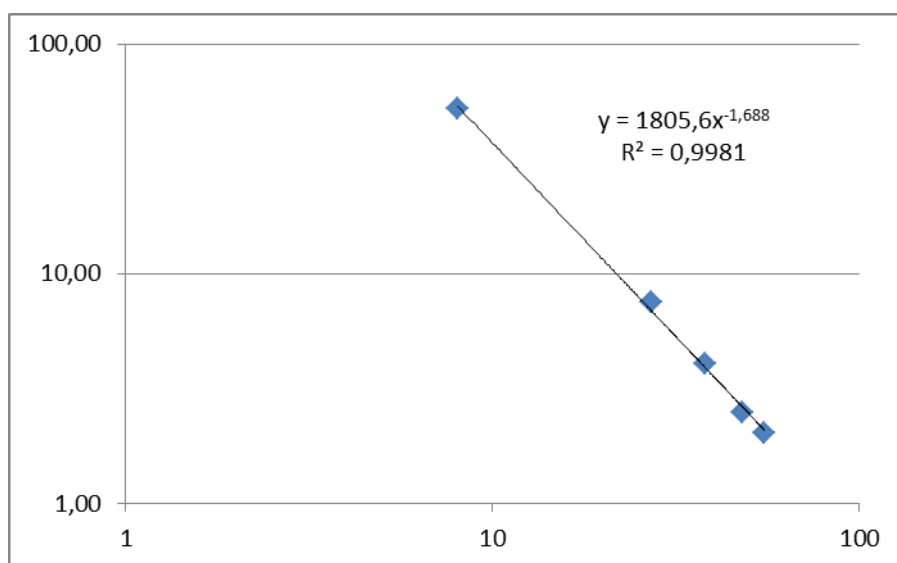


Gráfico C13- Equação Carga-Distância direção M

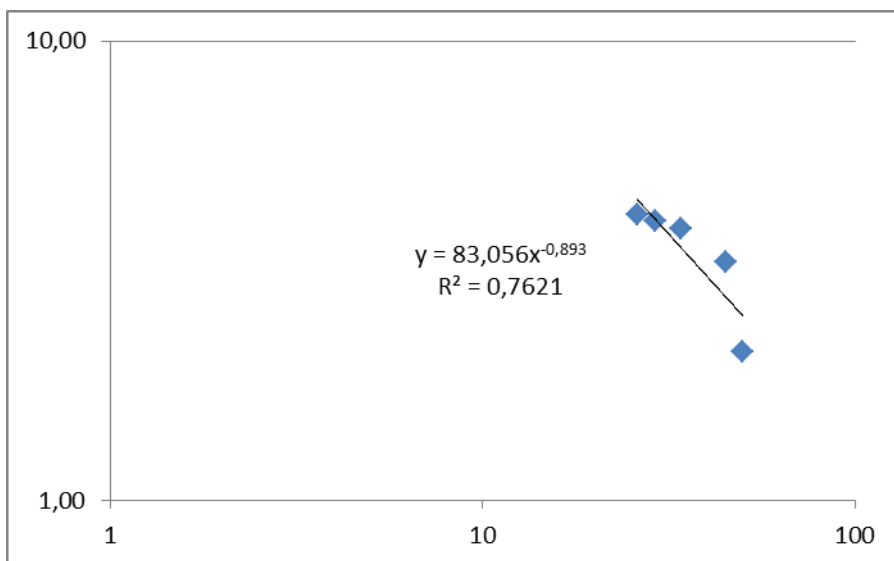


Gráfico C14- Equação Carga-Distância direção N

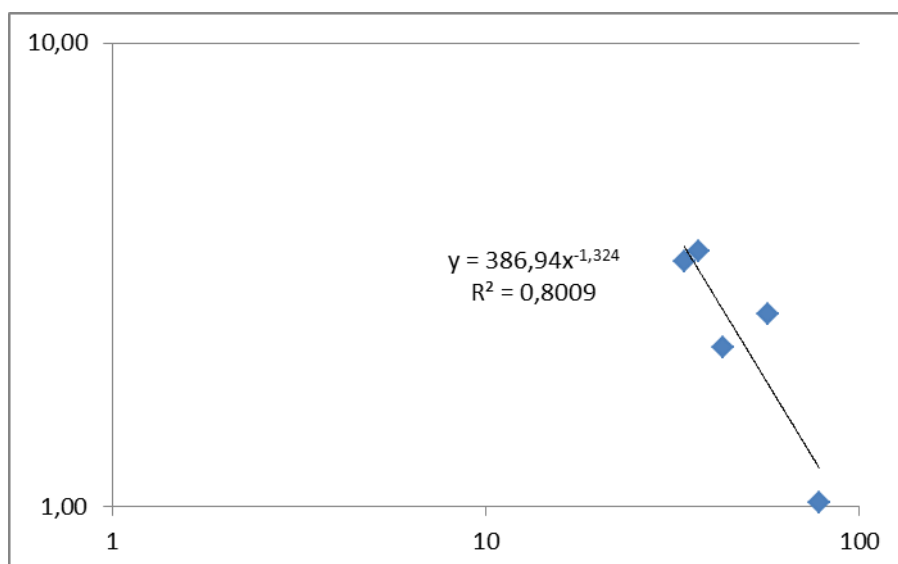


Gráfico C15- Equação Carga-Distância direção O

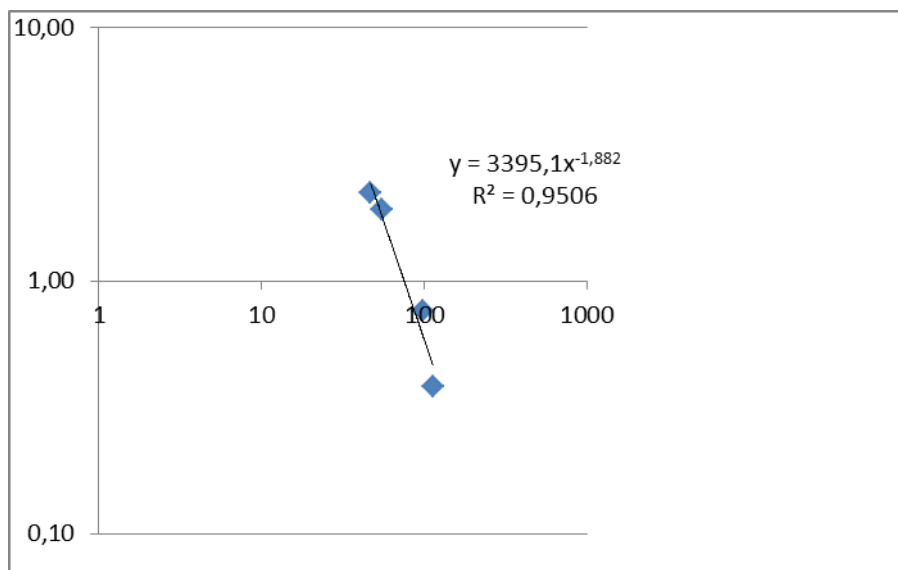
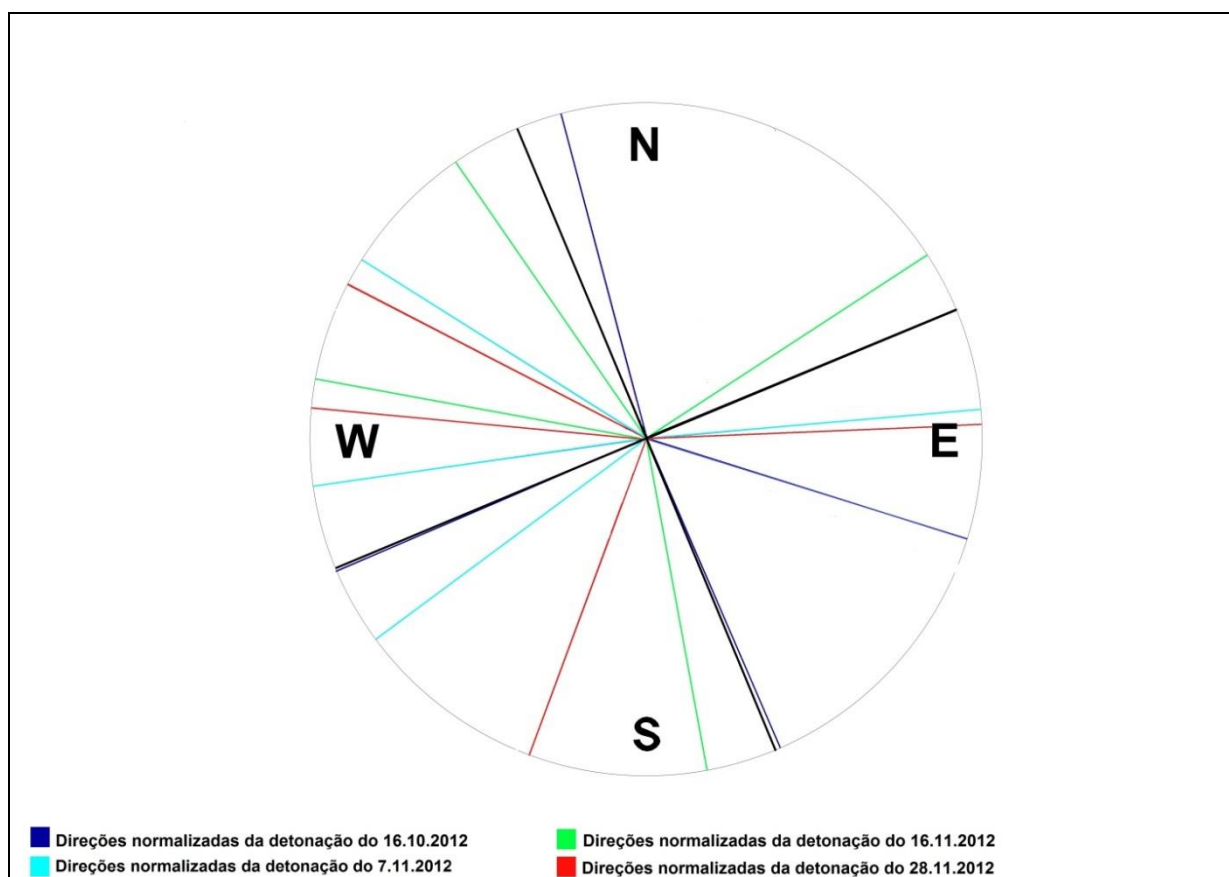


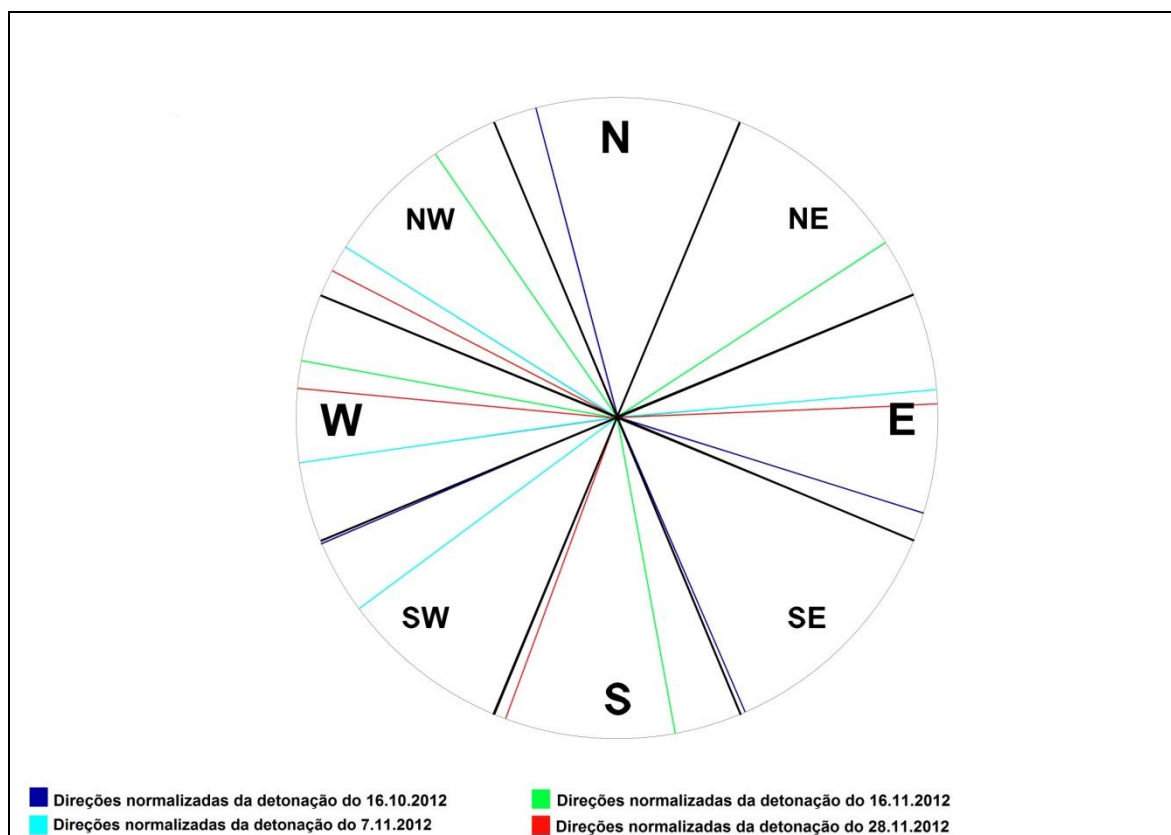
Gráfico C16- Equação Carga-Distância direção P



## APÊNDICE D- DIVISÃO DA ÁREA MONITORADA EM QUADRANTES.



## APÊNDICE E- DIVISÃO DA ÁREA MONITORADA EM OITANTES.



# ANEXO 1- CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS UTILIZADOS NO MONITORAMENTO

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000SR/LC</u>		
SERIAL NUMBER: <u>3700</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/04/11</u>	OWNER: <u>Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>66.9°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>66%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u><i>Mark W. Gelber</i></u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u><i>[Signature]</i></u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000LC/SR</u>		
SERIAL NUMBER: <u>3702</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/06/11</u>	OWNER: <u>Universidade of Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>67.9°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>59%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u><i>Mark W. Gelber</i></u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u><i>[Signature]</i></u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000LC/SR</u>		
SERIAL NUMBER: <u>3706</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/10/11</u>	OWNER: <u>Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>70.1°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>59%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u><i>M. W. Wellen</i></u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u><i>[Signature]</i></u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000LC/SR</u>		
SERIAL NUMBER: <u>3707</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/10/11</u>	OWNER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>69.2°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>60%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u><i>M. W. Wellen</i></u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u><i>[Signature]</i></u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

ITEM: Portable Seismograph MODEL: SSU 3000LC/SR  
 SERIAL NUMBER: 3708 MANUFACTURER: GeoSonics Inc.  
 CALIBRATION DATE: 05/10/11 OWNER: Universidade de Sao Paulo  
 AMBIANT CONDITIONS: TEMP: 69.9°F RELATIVE HUMIDITY: 55%  
 ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications

**STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY**

*This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).*

**STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION**

ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.

Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at:  
 GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086

Calibrated By: Munk Walden  
 for GeoSonics, Inc.

Certified By: [Signature]

**GeoSonics Inc.**

**CERTIFICATE OF CALIBRATION**

ITEM: Portable Seismograph MODEL: SSU 3000EZ+  
 SERIAL NUMBER: 8893 MANUFACTURER: GeoSonics Inc.  
 CALIBRATION DATE: 04/30/11 OWNER: Universidade de Sao Paulo  
 AMBIANT CONDITIONS: TEMP: 66.7°F RELATIVE HUMIDITY: 59%  
 ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications

**STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY**

*This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).*

**STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION**

ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.

Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at:  
 GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086

Calibrated By: Munk Walden  
 for GeoSonics, Inc.

Certified By: [Signature]

**GeoSonics Inc.**

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8894</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/02/11</u>	OWNER: <u>Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>67.9°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>65%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>Mark Waldman</u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u>[Signature]</u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8895</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/02/11</u>	OWNER: <u>Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>67.7°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>65%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>Mark Waldman</u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u>[Signature]</u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8896</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/03/11</u>	OWNER: <u>Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>67.0°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>65%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>Much Waldman</u>	Certified By: <u>[Signature]</u>		
for GeoSonics, Inc.			
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8897</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/03/11</u>	OWNER: <u>Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>67.9°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>66%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>Much Waldman</u>	Certified By: <u>[Signature]</u>		
for GeoSonics, Inc.			
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8947</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/01/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>72.4°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>65%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u><i>Mick W. Collins</i></u>	Certified By: <u><i>[Signature]</i></u>		
for GeoSonics, Inc.			
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8949</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/07/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>71.9°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>62%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u><i>[Signature]</i></u>	Certified By: <u><i>[Signature]</i></u>		
for GeoSonics, Inc.			
<b>GeoSonics Inc.</b>			



CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8950</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/07/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>71.4°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>62%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>Mark Walden</u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u>[Signature]</u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			


CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8951</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>05/31/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>73.0°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>60%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>[Signature]</u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u>[Signature]</u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: Portable Seismograph	MODEL: SSU 3000EZ+		
SERIAL NUMBER: 8952	MANUFACTURER: GeoSonics Inc.		
CALIBRATION DATE: 06/02/12	OWNER: FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: 72.6°F	RELATIVE HUMIDITY: 74%		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <i>Mark Waldman</i> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <i>[Signature]</i>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: Portable Seismograph	MODEL: SSU 3000EZ+		
SERIAL NUMBER: 8953	MANUFACTURER: GeoSonics Inc.		
CALIBRATION DATE: 06/05/11	OWNER: FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: 71.4°F	RELATIVE HUMIDITY: 60%		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY			
This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).			
STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <i>Mark Waldman</i> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <i>[Signature]</i>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8954</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/05/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>71.8°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>64%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>Mark W. Seltzer</u>	Certified By: <u>[Signature]</u>		
for GeoSonics, Inc.			
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8955</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/01/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>73.0°F</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>76%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086			
Calibrated By: <u>[Signature]</u>	Certified By: <u>[Signature]</u>		
for GeoSonics, Inc.			
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8956</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/05/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>71.0°</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>65%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
<i>Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086</i>			
Calibrated By: <u></u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u></u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			

CERTIFICATE OF CALIBRATION			
ITEM: <u>Portable Seismograph</u>	MODEL: <u>SSU 3000EZ+</u>		
SERIAL NUMBER: <u>8957</u>	MANUFACTURER: <u>GeoSonics Inc.</u>		
CALIBRATION DATE: <u>06/06/12</u>	OWNER: <u>FUSP-Fundacao de Apoio a Universidade de Sao Paulo</u>		
AMBIANT CONDITIONS: TEMP: <u>70.9°</u>	RELATIVE HUMIDITY: <u>59%</u>		
ITEM RETURNED: Within Manufacturer's Specifications			
<b>STATEMENT OF N.I.S.T. TRACEABILITY</b>			
<i>This is to certify that the above identified item has been calibrated by GeoSonics Inc., according to the manufacturer's specifications by comparison to standards with accuracies that are traceable to the National Institute of Standards and Technology (formerly the National Bureau of Standards).</i>			
<b>STANDARDS USED IN THIS CALIBRATION</b>			
ITEM:	MODEL:	SERIAL NUMBER:	MANUFACTURER:
Shaketable System	ST-1T	9006	Larcor
Sound Level Calibrator	1562-A	25560	General Radio Co.
<i>Calibration Certificates for Standards used during instrument calibration, on file at: GeoSonics Inc., 359 Northgate Drive, Warrendale, PA 15086</i>			
Calibrated By: <u></u> for GeoSonics, Inc.	Certified By: <u></u>		
<b>GeoSonics Inc.</b>			