

## Aplicação de métodos estatísticos multivariados na avaliação de vibrações sísmicas

*Statistical methods applied to evaluate blasting seismic vibration*

Denise de La Corte Bacci<sup>1</sup> e Paulo Milton Barbosa Landim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR (bacci@usp.br)

<sup>2</sup>Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Rio Claro, SP, BR (plandim@rc.unesp.br)

Recebido em 29 de maio de 2015; aceito em 03 de fevereiro de 2016

### Resumo

O presente artigo analisa a aplicação de métodos estatísticos multivariados na avaliação das vibrações sísmicas geradas no desmonte de rochas com explosivos em pedreiras. Os métodos utilizados foram a análise das componentes principais e a análise discriminante multigrupos. As variáveis consideradas na análise referem-se ao meio físico e ao plano de fogo. Os dados analisados constituem valores de velocidade de vibração da partícula, em mm/s e de frequência, em Hertz, coletados por meio de monitoramento com o uso de sismógrafos de engenharia, contemplando uma série de detonações em uma pedreira na área urbana de Campinas, São Paulo. Devido às diversas variáveis tornou-se impossível correlacioná-las, especialmente, sem a utilização da análise multivariada. Os resultados obtidos na análise das componentes principais indicam que a distância do ponto de detonação ao ponto de registro é o fator mais importante na atenuação das ondas sísmicas e, portanto, nos níveis de vibração. Os resultados obtidos na análise discriminante apontam que a variável mais importante para discriminar os quatro grupos é a carga por espera, seguida pela frequência, solo e distância. Os fatores físicos do terreno, como o fraturamento do maciço rochoso, a espessura do solo e a profundidade do topo rochoso influenciam no comportamento das ondas sísmicas e nas vibrações, podendo aumentar ou diminuir os níveis de vibração, dependendo da direção de propagação das ondas. As análises proporcionaram uma melhor compreensão das vibrações no terreno no conjunto de dados e do comportamento do processo, correlacionando dados do maciço com parâmetros medidos.

**Palavras-chave:** Métodos estatísticos; Vibrações no terreno, Pedreiras; Desmonte de rochas; Explosivos.

### Abstract

The present paper analyses multivariate statistical methods applied to evaluate blasting seismic vibration in quarries. Principal components analysis and multigroups discriminate analysis were used. Blast pattern and properties of rock body were the variables used in the present study. Data consider the peak particle velocity, in mm/s and frequency, in Hertz, collected by the seismograph monitoring in an urban quarry at Campinas municipality, São Paulo, Brazil. In view of the great number of variables, it was impossible to correlate them without the multivariate analyses. The results obtained with principal component analysis shower distance as the most important factor in the attenuation of ground vibration. Discriminate analysis shower the charge weight per delay as the most important variable to separate the four groups of data, followed by thickness of soil overburden and distance. Properties of the rock body (orientation, frequency and angle of geological discontinuities and soil overburden) have influence in the ground vibration, increasing or reducing its level, depending on the direction of wave propagation. The analyses gave a better comprehension of the ground vibration process correlating physics data with measured parameters.

**Keywords:** Statistical methods; Ground vibration; Quarry; Blasting; Explosives.

## INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos estatísticos multivariados na avaliação das vibrações sísmicas geradas no desmonte de rochas com explosivos em pedreiras pode indicar quais parâmetros do processo têm maior influência na propagação das ondas sísmicas no terreno. O presente artigo teve como objetivo identificar, por meio da análise das componentes principais e da análise discriminante, quais desses parâmetros — variáveis físicas do maciço rochoso e também as relacionadas ao plano de fogo — são mais importantes no desmonte. Sendo esses conhecidos, é possível modificar as condições de detonação, reduzindo, assim, os impactos ambientais das vibrações sísmicas geradas durante as detonações de cargas explosivas.

O monitoramento sismográfico dos desmontes de rocha é utilizado para medir as vibrações no terreno e a sobrepressão atmosférica, produzidos pelo uso de explosivos (Eston, 1998; Bacci, 2000; Iramina, 2002; Bacci et al., 2003; Canedo, 2013). Trata-se de um método de escavação, uma operação unitária de lavra, bastante utilizado em pedreiras de agregados para construção civil, muitas delas localizadas próximas a centros urbanos. Devido a essa proximidade, as vibrações geradas no processo de desmonte podem causar impactos ambientais e desconforto à população local (Bacci et al., 2006; Bacci et al., 2011).

Uma explosão decorre de uma reação físico-química, na qual uma pequena quantidade de material produz, num intervalo de tempo muito curto, um grande volume de gases a alta temperatura e pressão. O processo é acompanhado por efeitos mecânicos, acústicos e visuais (Eston, 1998). Nos explosivos detonantes, a velocidade das primeiras moléculas gaseificadas é tão grande que elas não conseguem transmitir calor por condutividade através (da zona ainda não detonada) do explosivo remanescente, mas que lhe transmitem carga por choque, deformando-o e provocando seu aquecimento e explosão adiabática gerando novos gases. O processo se reproduz em movimentos ondulatórios que atingem a massa inteira do explosivo e se constitui em ondas de choque.

Os principais problemas ambientais decorrentes desse tipo de detonação podem ser assim enumerados (Berta, 1994; Iramina 2002; Bacci, 2000; Bacci et al., 2006):

- emissão de gases tóxicos (monóxido de carbono e gases nitrosos, entre outros) e partículas sólidas na atmosfera, podendo comprometer a qualidade do ar;
- emissão e propagação de ondas sísmicas transientes (de pequena duração, com frequência e amplitude variadas), através dos maciços de solo e rocha, ocasionando vibrações de suas partículas. Existem critérios e recomendações para potenciais danos em construções civis, como trincas e rachaduras, que levam em conta os valores de velocidade de vibração da partícula e frequência e devem ser respeitados para evitar problemas

(Olofsson, 1990; Oriard, 2002; ABNT, 2005; CETESB, 2015). Além de potenciais danos materiais, também pode ocorrer desconforto ao seres humanos que vivem no entorno das pedreiras;

- emissão e propagação de energia pela atmosfera, provocando deslocamento do ar (sobrepressão) ocasionando ruídos e mesmo vibrações em faixas de frequência não audíveis, com a possibilidade de provocar danos materiais e desconforto ao ser humano;
- ultralancamento de fragmentos rochosos de dimensões, em geral, centimétricas a decimétricas (lançamento excepcional além dos limites da área prevista pelas normas legais e de segurança), que podem provocar danos materiais no caso de atingirem construções ou máquinas, e mesmo acidentes com vítimas;
- indução de escorregamento para o interior das cavas e taludes, podendo ocasionar acidentes com trabalhadores e/ou prejudicar o andamento da atividade.

O monitoramento das vibrações torna-se importante à medida que possibilita quantificar os impactos ambientais decorrentes de detonações, confrontando-os aos valores estipulados pelas normas técnicas vigentes e pela legislação ambiental (ABNT/NBR 9653/2005 e CETESB D7.013/2015). Avaliar a correlação das variáveis por meio de métodos estatísticos resulta no melhor conhecimento do processo de detonação e em proposições de medidas mitigadoras. Estas podem ocorrer por meio de ajustes no plano de fogo, ou no desenvolvimento das frentes de lavra, considerando-se os conhecimentos geológicos locais e as tecnologias de exploração. Quanto melhor o conhecimento das diversas variáveis que estão presentes em uma detonação e das suas possíveis correlações, maiores as chances de minimizar os impactos negativos decorrentes do processo. Nesse sentido, a aplicação de métodos estatísticos multivariados, como apresentado neste trabalho, pode mostrar-se eficaz (Landim, 2003, Yamamoto e Landim, 2013) para atender aos objetivos de identificação dos principais parâmetros e a correlação das diferentes variáveis envolvidas nos desmontes com explosivos.

## METODOLOGIA DE COLETA DE DADOS

A área de estudo foi uma pedreira de diabásio, localizada dentro da malha de expansão urbana do município de Campinas, São Paulo (Figura 1), cuja ocupação populacional ocorre nas porções leste e nordeste da cava, sendo o restante do seu entorno ocupado por áreas de pastagem e por rodovias.

A coleta dos dados consistiu na medição dos valores de velocidade de vibração da partícula ( $V_p$ ), em mm/s e frequência ( $f$ ), em Hertz, por meio de monitoramento com o uso de sismógrafos de engenharia, abrangendo uma série

de detonações. Os dados foram coletados nas proximidades da pedreira e nos seus arredores, num raio de 1 km a partir da cava principal, totalizando uma área de amostragem de 4 km<sup>2</sup>. Os pontos amostrados distribuíram-se de modo homogêneo e foram considerados representativos para as análises propostas.

Os dados obtidos para cada evento monitorado (desmontes) contemplaram: localização do ponto de registro, definição do local e do operador do equipamento, características do sismógrafo, definição dos parâmetros de registro, valores de velocidade, aceleração e deslocamento da partícula e frequência da onda sísmica nas três componentes (transversal, vertical e longitudinal), além do vetor resultante da velocidade de vibração da partícula. O sismograma (resultado gráfico) representa o espectro da onda sísmica nas três direções de propagação. O equipamento de medição também fornece um gráfico que correlaciona a velocidade de vibração da partícula (mm/s) com a frequência (Hertz), com a distribuição dos valores medidos. Com isso é possível avaliar, no momento da medição, se o Vp medido nas três direções principais e na resultante está dentro dos limites das normas legais.

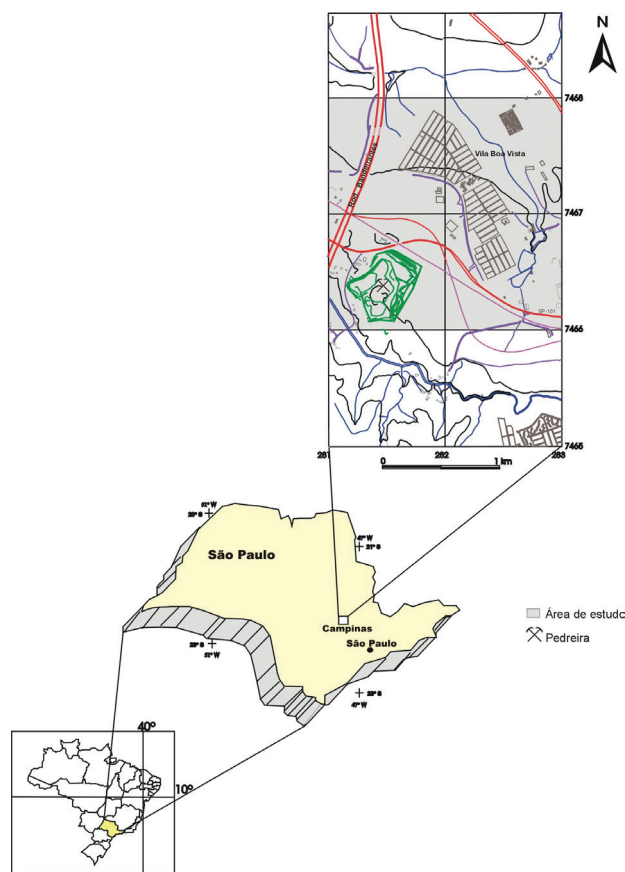


Figura 1. Localização da área de estudo.

Os valores registrados foram transportados para uma planilha, formando a base de dados do estudo (Tabela 1). Nessa planilha estão os valores de Vp (mm/s) e da frequência (Hertz) das ondas nas três componentes, as coordenadas dos pontos medidos N-S e E-W, em UTM, extraídas das folhas topográficas do Instituto Geológico e Cartográfico (IGC, 1979) na escala 1:10.000, os valores de carga máxima instantânea (kg), a distância entre o ponto de detonação e o ponto de registro (m) e a distância escalonada (SD), calculada segundo a fórmula proposta por Devine (1966).

A base de dados elaborada contém 146 registros medidos (Tabela 1), dos quais 114 foram usados no presente trabalho. Os registros foram obtidos a partir de cinco frentes de lavra, lavradas concomitantemente, segundo o plano de avanço da cava (Figura 2). Para cada frente de lavra foi identificada uma direção principal de propagação de onda, calculadas a partir da distribuição circular normal (Bacci, 2000), resultando na separação dos dados conforme a frente detonada (Figura 3). No conjunto dos dados, um mesmo ponto de captação pode conter mais de um valor medido de velocidade e frequência, em função de ter ocorrido mais de uma detonação no mesmo dia.

## Parâmetros considerados nas Análises Estatísticas Multivariadas

### Fraturamento

A importância do fraturamento provém da interferência direta na propagação e atenuação das vibrações no terreno. A propagação da onda sísmica em um meio natural, isotrópico e homogêneo difere daquela que se processa em um meio real, que apresenta descontinuidades, heterogeneidades e anisotropia, ocorrendo fenômenos de reflexão e refração, sucedendo-se, à medida que aumenta o grau de fraturamento do maciço rochoso.

Dependendo da direção e da densidade das fraturas, a propagação das ondas sísmicas em determinada direção pode aumentar ou diminuir, e seus efeitos vibratórios poderão ser mais ou menos intensos. Para a compreensão da atenuação do fenômeno vibratório, é importante a determinação do tipo e do grau de fraturamento, além de sua orientação espacial, espaçamento, persistência e preenchimentos.

O levantamento das descontinuidades na área de estudo foi realizado com auxílio de uma bússola tipo CLAR para medidas de direção e mergulho, e com trena para obtenção do espaçamento e da densidade das fraturas, seguindo a metodologia de levantamento estrutural proposta pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 1983). As medidas foram realizadas em todas as frentes de lavra da pedreira e separadas em domínios, com o auxílio do programa *Stereonet*.

**Tabela 1.** Dados referentes aos registros sísmográficos na área de estudo.

Registro	Coord X UTM	Coord Y UTM	Frente	Velocidade de partícula (mm/s)				Frequência (Hz)			Distância ao ponto de detonação (m)
				Transversal	Vertical	Longitudinal	Resultante	Transversal	Vertical	Longitudinal	
1	281,64	7466,35	A	9,40	3,81	18,2	18,7	47	57	57	290
2	281,72	7466,29	A	14,7	7,62	7,24	15,5	47	57	43	360
3	281,47	7466,64	A	26,9	19,4	29,8	36,6	43	85	39	130
4	281,50	7465,92	A	2,27	0,952	2,64	2,66	> 100	20	> 100	620
5	281,49	7466,67	A	16,1	10,4	13,2	16,8	43	> 100	64	166
6	281,64	7466,70	A	16,8	17,3	12,3	21,2	57	73	47	270
7	281,72	7466,29	A	6,35	7,11	7,11	9,13	43	64	57	362
8	281,69	7466,35	A	10,9	5,59	12,1	16,0	37	47	47	298
9	282,05	7466,76	A	8,51	2,16	6,22	8,79	128	93	114	637
10	281,53	7466,69	A	7,18	6,43	9,68	10,1	47	64	73	180
11	281,58	7466,71	A	11,8	7,75	6,48	12,3	N/A	57	27	228
12	281,64	7466,77	A	11,7	5,71	13,0	14,2	57	73	57	312
13	281,70	7466,86	A	14,0	8,0	20,3	20,5	73	73	85	410
14	281,74	7466,96	A	13,8	5,71	9,02	14,6	57	85	64	520
15	281,59	7466,67	A	5,71	10,2	8,89	11,0	39	51	43	190
16	281,73	7466,74	A	11,3	9,40	9,78	12,2	73	85	85	338
17	281,87	7466,80	A	6,86	4,83	6,60	7,41	73	85	64	508
18	281,96	7466,78	A	3,43	5,84	6,86	8,46	64	85	> 100	570
19	282,05	7466,87	A	0,762	1,27	1,14	1,49	47	43	43	693
20	282,23	7466,93	A	2,16	1,78	2,03	2,60	64	> 100	73	873
21	282,45	7467,05	A	1,65	1,02	1,27	1,71	> 100	73	> 100	1037
22	281,77	7466,79	A	13,5	5,33	5,33	13,8	> 100	> 100	> 100	427
23	281,77	7466,84	A	7,87	5,97	4,83	7,89	73	51	73	470
24	281,79	7466,87	A	9,91	6,98	15,4	16,3	57	64	73	524
25	281,84	7466,88	A	7,62	3,56	8,0	9,02	> 100	85	> 100	575
26	281,79	7466,79	A	9,27	5,84	6,68	10,1	85	37	> 100	435
27	281,83	7466,83	A	6,10	4,70	8,0	9,62	85	47	> 100	484
28	281,88	7466,84	A	6,73	7,75	4,70	10,4	73	> 100	57	528
29	282,01	7466,87	A	7,75	3,43	6,60	10,4	85	73	> 100	648
30	282,20	7467,06	A	4,95	2,92	2,79	5,63	64	64	85	918
31	282,29	7467,27	A	2,79	1,27	2,03	2,98	64	73	85	1026
32	282,30	7467,32	A	0,762	0,635	1,14	1,20	64	51	73	1070
33	282,24	7467,08	A	1,14	1,40	1,65	1,70	47	34	30	972
34	281,41	7466,78	A	9,65	2,54	5,21	10,3	37	43	23	310
35	281,39	7466,83	A	7,37	6,10	6,60	9,01	57	73	64	410
36	281,37	7466,86	A	12,4	8,13	7,87	13,3	51	85	47	445
37	281,58	7466,81	A	9,14	6,86	9,27	13,2	37	85	47	290
38	281,60	7466,92	A	5,71	6,10	9,02	9,06	> 100	> 100	85	380
39	281,61	7466,96	A	10,3	11,2	18,7	19,5	57	64	57	428
40	282,03	7466,49	B	5,46	5,46	5,21	6,59	57	85	57	568
41	281,85	7466,64	B	7,24	5,71	5,08	7,50	47	64	43	416
42	281,88	7466,71	B	7,24	14,7	5,46	14,8	51	85	37	480
43	281,92	7466,74	B	7,59	4,52	7,95	9,35	64	> 100	73	532
44	282,27	7466,69	B	3,00	1,49	3,21	3,73	73	32	> 100	834
45	282,05	7466,76	B	7,75	4,44	6,60	9,00	60	68	114	664
46	281,77	7466,45	B	16,6	8,13	23,7	24,8	64	43	51	300
47	281,84	7466,30	B	11,3	14,9	14,5	16,9	47	51	85	395
48	281,69	7466,35	B	9,02	10,5	14,6	15,1	37	37	39	364

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Registro	Coord X UTM	Coord Y UTM	Frente	Velocidade de partícula (mm/s)				Frequência (Hz)			Distância ao ponto de detonação (m)
				Transversal	Vertical	Longitudinal	Resultante	Transversal	Vertical	Longitudinal	
49	281,81	7466,41	B	13,6	7,24	7,75	14,9	57	51	57	444
50	281,86	7466,39	B	8,00	6,98	7,87	9,79	64	85	47	485
51	281,90	7466,47	B	7,11	5,71	3,81	8,41	51	43	43	574
52	281,77	7466,45	B	9,02	6,60	7,62	9,78	57	43	47	300
53	281,97	7466,42	B	5,84	5,21	8,51	10,1	39	39	39	500
54	282,06	7466,44	B	3,05	2,92	2,54	4,25	85	57	57	584
55	282,08	7466,36	B	3,68	2,41	2,54	3,74	57	73	> 100	616
56	281,88	7466,43	B	5,84	6,10	6,48	8,99	85	43	57	384
57	281,96	7466,45	B	8,64	5,33	6,60	8,83	85	64	73	480
58	282,14	7466,40	B	2,03	1,65	1,27	2,16	28	47	> 100	668
59	282,20	7466,38	B	2,03	1,90	1,90	2,13	85	64	64	718
60	282,05	7466,84	B	4,32	2,54	4,95	5,12	> 100	37	> 100	672
61	281,69	7466,35	C	20,8	9,52	22,0	23,8	47	47	64	276
62	281,72	7466,29	C	14,5	18,2	12,1	22,5	39	57	47	326
63	281,47	7466,64	C	7,75	2,54	5,33	8,03	47	73	57	250
64	281,50	7465,92	C	9,11	1,95	6,45	10,0	73	24	85	504
65	281,71	7466,15	C	9,52	6,86	8,00	9,70	51	85	43	370
66	281,85	7466,81	C	5,33	2,41	3,68	5,80	> 100	64	> 100	590
67	282,05	7466,87	C	3,05	1,27	2,16	3,12	51	73	57	765
68	281,66	7466,18	C	9,02	4,06	5,71	9,44	51	47	57	326
69	281,75	7466,13	C	5,97	4,19	6,48	7,26	64	57	64	418
70	281,80	7466,11	C	3,56	3,17	4,70	4,79	47	47	37	464
71	281,89	7466,08	C	4,44	2,16	N/A	N/A	37	43	N/A	560
72	281,90	7466,21	C	5,59	4,06	5,21	6,19	47	64	43	512
73	281,72	7466,88	C	6,35	2,03	5,59	6,60	> 100	37	85	592
74	282,07	7466,52	C	2,29	1,52	1,14	2,32	20	64	51	680
75	281,78	7465,84	C	3,30	1,78	3,68	4,10	57	47	43	642
76	281,81	7465,80	C	3,05	1,27	2,29	3,18	64	64	64	692
77	281,93	7465,71	C	2,16	1,40	2,29	2,46	47	51	47	730
78	281,40	7466,75	C	2,16	1,14	1,78	2,42	39	39	43	412
79	281,87	7465,58	C	8,25	4,06	6,60	9,71	73	64	73	740
80	281,80	7465,66	C	3,94	2,54	4,44	4,75	57	85	57	700
81	281,70	7465,80	C	9,40	3,05	6,22	9,78	64	> 100	57	660
82	281,70	7465,85	C	4,06	2,41	3,94	5,47	57	> 100	64	608
83	281,68	7465,90	C	3,94	2,54	3,17	5,01	51	39	47	560
84	281,63	7465,94	C	1,90	2,29	2,03	3,12	64	37	37	504
85	281,59	7465,95	C	3,56	1,90	3,94	4,55	47	57	57	460
86	281,59	7466,20	C	18,3	9,91	10,9	18,4	> 100	43	> 100	235
87	281,60	7466,21	C	15,0	12,8	22,4	25,3	64	57	51	244
88	281,64	7466,18	C	3,81	2,67	3,68	4,07	57	39	39	295
89	281,69	7466,11	C	11,0	4,95	9,02	11,9	85	51	57	270
90	281,49	7466,67	D	7,87	3,17	5,21	8,31	39	64	51	470
91	281,64	7466,70	D	5,59	2,92	5,33	7,38	43	47	39	505
92	281,72	7466,29	D	19,8	20,1	26,8	33,0	43	47	47	195
93	281,69	7466,35	D	22,0	13,6	31,9	38,8	37	51	43	202
94	282,05	7466,76	D	5,21	1,52	4,19	5,25	114	29	45	374
95	281,66	7466,18	D	19,0	18,0	15,9	22,6	N/A	N/A	N/A	116
96	281,75	7466,13	D	11,4	10,5	17,4	17,9	47	39	43	168

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Registro	Coord X UTM	Coord Y UTM	Frente	Velocidade de partícula (mm/s)				Frequência (Hz)			Distância ao ponto de detonação (m)
				Transversal	Vertical	Longitudinal	Resultante	Transversal	Vertical	Longitudinal	
97	281,89	7466,08	D	4,70	4,70	7,37	7,94	57	39	64	365
98	282,08	7466,75	D	3,56	1,14	1,78	3,64	> 100	51	64	788
99	281,40	7466,75	D	2,79	1,52	1,40	3,07	24	30	13	444
100	282,06	7466,44	D	2,41	2,41	2,29	3,68	> 100	24	34	612
101	282,08	7466,36	D	2,16	3,30	2,29	3,50	37	57	57	624
102	281,78	7466,30	D	9,02	9,27	10,7	12,0	64	16	37	230
103	281,90	7466,21	D	5,59	4,06	5,84	6,30	37	30	28	340
104	281,93	7467,05	D	8,25	3,81	5,97	9,11	73	73	85	938
105	281,93	7467,09	D	3,05	1,52	3,05	3,77	> 100	37	> 100	988
106	281,94	7467,26	D	3,56	1,78	3,68	4,11	64	> 100	> 100	1034
107	281,76	7466,58	E	13,8	8,89	12,7	16,0	64	28	64	140
108	281,82	7466,60	E	8,76	12,1	7,75	12,5	57	51	85	208
109	281,84	7466,66	E	11,4	8,51	8,00	12,8	85	37	73	262
110	281,88	7466,71	E	5,59	5,59	4,57	6,12	57	37	85	322
111	281,95	7466,76	E	5,59	4,44	3,30	5,61	> 100	34	34	482
112	282,08	7466,75	E	3,81	3,43	7,87	7,90	> 100	26	73	510
113	281,69	7466,57	E	20,4	33,9	24,4	36,3	> 100	64	57	74
114	281,70	7466,63	E	12,6	16,4	13,3	18,4	73	51	57	130
115	281,67	7466,69	E	14,0	18,2	11,4	21,3	85	64	85	180
116	281,72	7466,79	E	17,7	14,9	13,0	21,2	85	32	85	296
117	281,74	7466,83	E	17,8	11,8	19,6	21,5	51	64	> 100	345
118	281,74	7466,87	E	22,4	10,2	14,1	22,9	> 100	5,4	> 100	390
119	282,08	7466,75	E	7,62	4,44	5,84	7,81	> 100	37	23	506
120	282,08	7466,75	E	5,59	3,17	4,70	5,99	43	39	30	502
121	282,20	7467,06	E	4,57	1,90	4,32	4,85	51	43	> 100	800
122	281,75	7467,09	E	6,48	4,06	4,19	6,85	73	51	73	588
123	281,78	7467,13	E	8,38	4,44	4,70	9,08	51	43	64	638
124	281,79	7467,18	E	7,49	3,94	6,86	8,64	73	85	57	686
125	281,80	7467,23	E	6,86	1,65	4,06	7,87	57	30	64	636
126	281,78	7467,28	E	3,05	1,40	2,67	3,48	47	39	57	784
127	281,74	7467,29	E	2,16	1,27	2,16	2,46	57	37	30	852
128	281,70	7467,38	E	3,30	1,27	2,54	3,66	64	39	64	914
129	282,02	7467,06	E	2,79	2,29	3,30	3,80	64	34	64	792
130	282,29	7467,29	E	2,54	1,52	2,41	2,69	85	47	22	920
131	281,84	7466,98	E	7,62	6,22	8,76	10,7	28	39	39	565
132	281,84	7467,09	E	7,11	5,97	6,35	8,53	73	34	51	702
133	281,85	7467,22	E	6,10	4,32	5,97	6,96	51	32	51	802
134	281,72	7466,88	E	20,4	11,2	19,3	21,0	64	> 100	85	438
135	282,07	7466,52	E	2,54	2,92	2,54	3,34	15	39	37	438
136	281,93	7467,05	E	15,5	8,64	18,3	21,5	64	85	64	650
137	281,93	7467,09	E	7,87	5,08	9,14	10,4	85	> 100	> 100	700
138	281,94	7467,15	E	9,40	6,48	10,9	11,2	85	85	85	750
139	282,06	7466,6	E	6,48	6,48	8,38	8,52	47	64	64	415
140	282,32	7466,58	E	3,81	2,03	4,06	5,13	57	57	64	678
141	282,58	7466,59	E	1,52	0,762	1,14	1,69	> 100	37	> 100	1088
142	282,68	7466,66	E	2,16	1,14	1,40	2,25	47	85	73	1012
143	281,59	7466,20	E	3,17	2,67	3,30	4,25	> 100	57	> 100	288
144	281,60	7466,21	E	2,67	4,32	5,21	5,91	39	43	47	280
145	281,64	7466,18	E	1,27	1,27	1,14	1,53	73	24	43	312
146	281,69	7466,11	E	3,43	1,27	2,54	3,75	64	> 100	30	370

O objetivo principal, no levantamento das descontinuidades, foi o de correlacionar suas direções preferenciais de ocorrência, nas diversas frentes de lavra com valores medidos de  $V_p$ . E com isso estabelecer uma relação entre propagação e atenuação de vibrações e o padrão de fraturamento local, indicados nas Tabelas 2 e 3, como  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ .

As direções de propagação das vibrações para cada frente de lavra foram determinadas a partir da estatística de dados circulares, usando o programa *Oriana*. Os dados circulares referem-se às observações distribuídas em um círculo de raio unitário. Uma observação simples  $\theta^\circ$  ( $0^\circ < \theta^\circ < 360^\circ$ ), medida em graus, é, então, um vetor unitário, e os dados podem ser descritos como circulares.  $\theta^\circ$  representa o ângulo entre o vetor e o eixo x positivo, na direção anti-horária. As coordenadas cartesianas do vetor são  $(\cos \theta^\circ, \sin \theta^\circ)$ , e as coordenadas polares são  $(1, \theta^\circ)$ . Os dados circulares podem ser plotados de duas maneiras, por pontos na circunferência de raio unitário, ou pelos raios dos pontos amostrados,

traçados a partir da origem da circunferência. A Figura 3 mostra as principais direções encontradas para as frentes de lavra. A distribuição circular normal foi utilizada a fim de verificar se os alinhamentos dos pontos registrados em relação à frente de lavra apresentavam uma direção preferencial ou se sua distribuição era uniforme em torno do círculo unitário, o que representaria a não existência de um vetor médio. Os grupos de medidas de cada frente de detonação apresentam uma distribuição circular unimodal, aderindo à distribuição de Von Mises.

Quatro direções preferenciais de propagação sísmica foram identificadas, sendo  $N24^\circ$ ,  $N84^\circ$ ,  $N111^\circ$  e  $N20^\circ$ , respectivamente para as frentes A, B, CD e E. O comprimento do vetor médio próximo a 1 significa que a variância circular é pequena e os pontos de registro estão concentrados, confirmando a hipótese de que existe uma direção preferencial de propagação para cada frente, na qual são esperados os maiores valores de vibração (Figura 3).

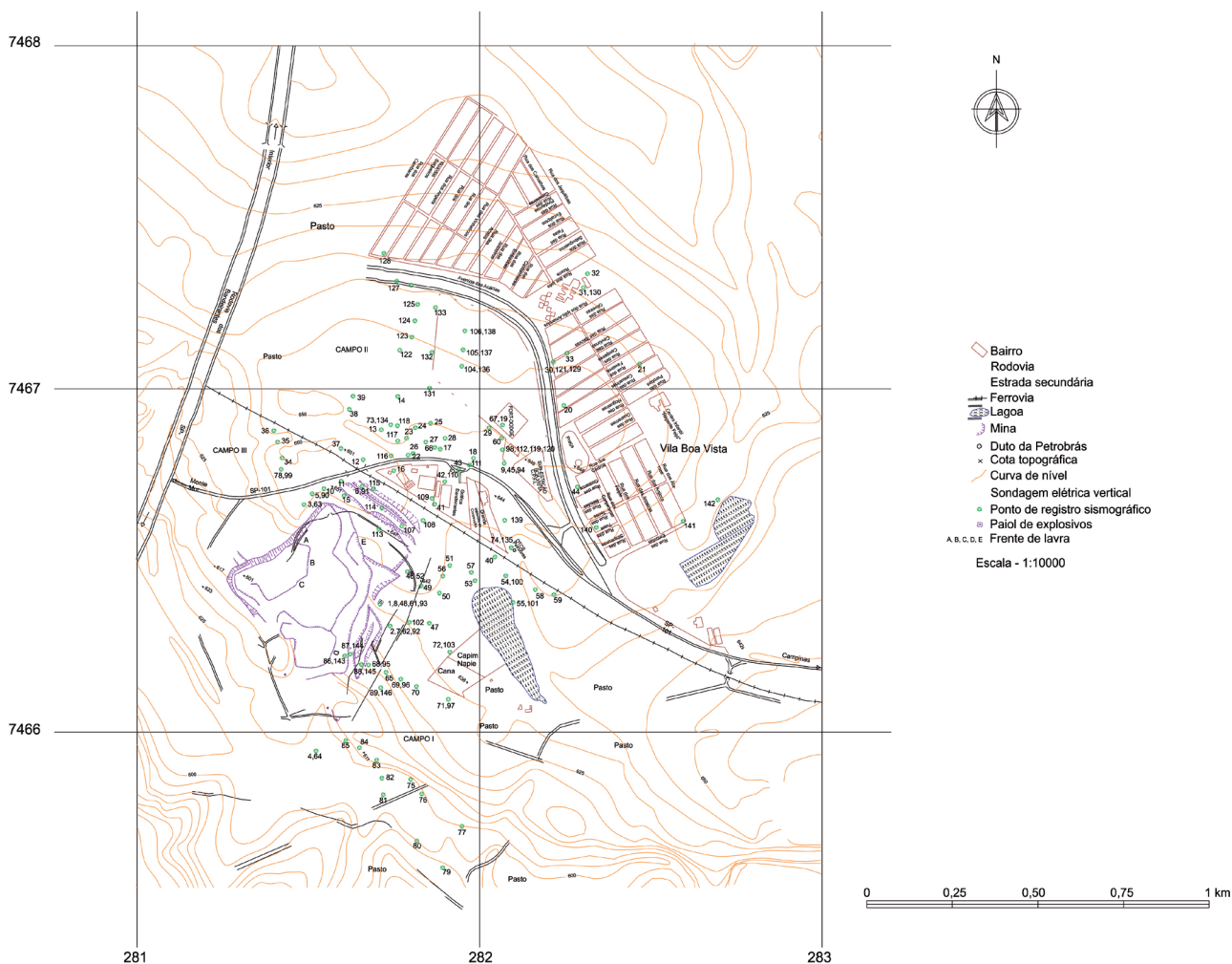
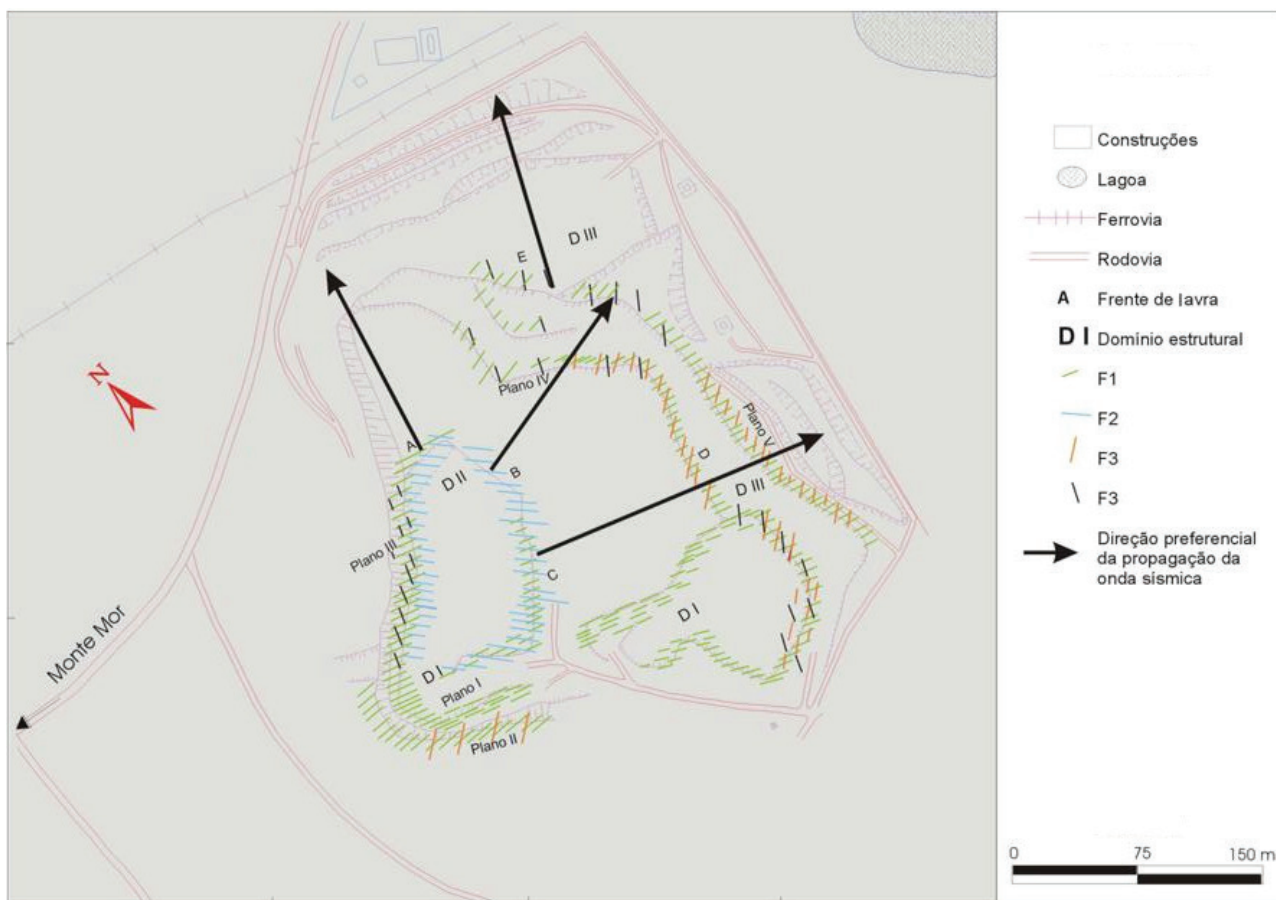


Figura 2. Mapa de pontos do monitoramento sísmográfico.

### Topo rochoso e espessura da cobertura de solo

A profundidade do topo rochoso está diretamente relacionada à velocidade de vibração de partícula no terreno. Quanto mais próximo da superfície estiver o topo rochoso e, consequentemente, menor for a cobertura de solo residual, maior será a velocidade esperada de vibração de partícula, pois quanto

mais rígido e mais denso for o meio de propagação, maiores serão os valores de propagação da onda e maior a vibração do terreno (Mancini, 1994). A profundidade do topo rochoso e a espessura da cobertura de solo residual foram determinadas através do método geoeletrico de sondagem vertical (SEV). Foram realizados 14 pontos de sondagem na área de estudo para a determinação dos parâmetros desejados (Bacci, 2000).



**Figura 3.** Direções preferenciais das famílias de fraturas no maciço rochoso.

**Tabela 2.** Classificação das fraturas no maciço rochoso.

Características	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
Orientação principal	E-W	NW-SE	N-S
Espaçamento	18 cm	30 cm	–
Persistência	Persistente	Persistente	Subpersistente
Rugosidade	Irregular a liso	Liso	Liso
Resistência das paredes	Fresca	Fresca	Fresca
Abertura	Abertas	Abertas	Abertas
Preenchimento	Veios de 2 a 3 cm de espessura de carbonatos, com presença de zeólitas, apofilitas e sulfetos		Não preenchida
Percolação	V	III	III
Tamanho dos blocos	Fragmentado	Irregular	Irregular



Foram identificadas quatro camadas de solo com resistividades diferentes, sobrepostas ao corpo de diabásio, além de uma zona saturada em água. Também foi possível identificar, em alguns perfis, o contato inferior entre o corpo de diabásio e os sedimentos sotopostos do Subgrupo Itararé (C-P).

### Parâmetros do plano de fogo

O plano de fogo tem como objetivo dar eficiência ao desmonte, minimizando a geração de impactos negativos, e deve considerar uma série de variáveis, dentre as quais o tipo de explosivo, a carga por espera, as características geológicas do maciço rochoso, o espaçamento e afastamento entre os furos e o tempo de retardos entre furos e linha de furos.

Os parâmetros relacionados ao plano de fogo analisados no presente estudo foram: carga máxima por espera (Q), distância escalonada (SD) e distância da frente de lavra ao ponto de monitoramento sismográfico (d). Para a quantificação das vibrações no terreno, foi utilizada a Q, que é a maior quantidade de explosivo detonado por retardo no furo. Em alguns desmontes foi observado o fenômeno da superposição de detonação de cargas, que ocorreu, especificamente, quando o desmonte começava no meio da bancada, geralmente com mais de uma linha de furos. Esse fenômeno foi verificado nos desmontes com retardos de tempos idênticos (25 ms) nos dois e nos três primeiros furos, medidos no plano de fogo. Em consequência, as cargas eram detonadas simultaneamente ou com intervalos inferiores a 8 ms, provocando detonações de até 288 kg de carga ao mesmo tempo, contribuindo, assim, na produção de altos índices de vibração. Nesses eventos, observados nas frentes A, B, C e D, os valores de Vp registrados atingiram mais de 30 mm/s, a distâncias entre 100 e 300 m da frente de detonação.

Segundo Klen (2010), a importância na utilização dos retardos está na inserção de uma defasagem de tempo entre a iniciação de cargas explosivas, originando uma sequência

na detonação dos furos, dividindo o desmonte em vários outros menores, fazendo com que as cargas detonadas por intervalo de tempo sejam diminuídas. Entretanto, esses dispositivos apresentam uma dispersão em seus tempos, fazendo com que dois furos planejados para serem detonados simultaneamente sejam detonados juntos ou com um intervalo de tempo insuficiente entre eles. Esse fato provoca um aumento dos níveis de vibração pelo terreno devido à superposição de ondas sísmicas.

Autores como Jimeno et al. (2003) citam um intervalo mínimo de 8 a 9 ms para se evitar o efeito construtivo das ondas. Wiss e Linehan (1978) sugerem um tempo nominal entre períodos de retardos sucessivos de 17 ms para eliminar a superposição de ondas. Persson et al. (1994) sugerem um tempo de retardo entre 6 e 15 ms por metro de afastamento para reduzir os níveis de vibração.

Winzer et al. (1985) esclarecem que muitos esquemas de previsão e normas de agências reguladoras recomendam 8 ou 9 ms como tempo de retardo mínimo que pode ser usado entre cargas, quando utilizados para separação com propósitos de controle de vibração. Segundo os autores, no entanto, retardos curtos podem oferecer separação adequada para detonações pequenas e próximas, o que não ocorre em grandes detonações e longas distâncias, nas quais retardos com tempos maiores são necessários para obter uma separação real, pois a vibração de cada carga individual se mantém por um longo período de tempo.

Vuillaume et al. (1996) estudaram os métodos utilizados na redução dos níveis de vibração. Os autores definiram duas regras essenciais para evitar a superposição de ondas: os circuitos devem ser iniciados antes da detonação do primeiro furo, em um raio de ação predeterminado, e a diferença em tempo, entre dois retardos sucessivos, deve ser maior do que 8 ms, pois a probabilidade de superposição de cargas com diferença menor ou igual a 8 ms pode chegar a 20% em uma detonação com um grande número de furos.

A precisão dos tempos dos elementos de retardo também é importante na avaliação da probabilidade de superposição de cargas explosivas. Silva (1988) mediu os desvios ocorridos nos tempos dos retardos de superfície de 25 e 42 ms, os quais podem apresentar desvios de até 30%. Os desvios de retardos de coluna de 250 ms podem chegar a 17%. Numa sequência de 20 furos com retardo de 25 e 42 ms e de 250 ms, o autor mostrou que a probabilidade de iniciação simultânea de dois furos é de quase 50%, em função dos desvios medidos.

A carga total de explosivos utilizada variou com o comprimento da frente de lavra e o número de furos. As frentes B e D apresentaram maiores comprimentos, e utilizaram de 1.257 e 5.229 kg de carga total. Nas demais frentes, foram utilizados de 800 a 4.300 kg de explosivos para detonar, em média, um volume de 5.500 m<sup>3</sup> de rocha. O padrão usado para o desmonte foi o de duas linhas de

**Tabela 3.** Relação entre as direções de propagação das vibrações e o fraturamento do maciço rochoso (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>).

Direção média de propagação	Relações espaciais com o fraturamento	Vp (mm/s)	
		mín	máx
N24° – Frente A	Perpendicular à F <sub>1</sub> (E-W)	1,20	36,6
	Oblíqua à F <sub>2</sub> (NW-SE)		
	Paralela à F <sub>3</sub> (N-S)		
N84° – Frente B	Paralela à F <sub>1</sub> (E-W)	2,1	24,8
	Oblíqua à F <sub>2</sub> (NW-SE)		
	Perpendicular à F <sub>3</sub> (N-S)		
N111° – Frentes C e D	Oblíqua à F <sub>1</sub> (E-W)	3,1	25,3
	Paralela à F <sub>2</sub> (NW-SE)		
	Perpendicular à F <sub>3</sub> (N-S)		
N20° – Frente E	Oblíqua à F <sub>1</sub> (E-W)	1,7	36,3
	Perpendicular à F <sub>2</sub> (NW-SE)		
	Paralela à F <sub>3</sub> (N-S)		

furos, com diâmetro de 3 polegadas, altura máxima da bancada de 15 metros, retardos de 25 e 42 ms. Os acessórios de iniciação utilizados nas detonações na área de estudo são os mesmos dos avaliados por Silva (1988) e Rezende (2002), o que pode indicar que a superposição das ondas identificada em alguns desmontes esteja relacionada também aos desvios dos acessórios.

Klen (2010) afirma em sua pesquisa sobre dispersão dos retardos que todos os sistemas de iniciação utilizados atualmente apresentam uma dispersão em seus tempos de iniciação.

A SD é a relação entre a distância real da fonte ao ponto de registro e a Q. Foram elaborados gráficos de correlação linear entre as duas variáveis: Vp e SD, de forma a obter as equações de atenuação. Para uma determinada distância escalonada existe sempre uma Vp ao redor da média. A equação de atenuação, geralmente, é definida em função da linha de intervalo de confiança de 95%, pois é a mais adequada no caso de segurança contra eventuais danos estruturais. As equações de atenuação foram assim definidas para cada uma das frentes de lavra:

$$\text{Frente A: } V_p = 1511,3 (SD)^{-1,183}$$

$$\text{Frente B: } V_p = 8953,0 (SD)^{-1,641}$$

$$\text{Frente CD: } V_p = 904,5 (SD)^{-1,073}$$

$$\text{Frente E: } V_p = 607,9 (SD)^{-0,847}$$

Sendo:

Vp = velocidade de vibração da partícula (mm/s)

SD = distância escalonada (m/ $\sqrt{\text{kg}}$ )

As regressões efetuadas apresentaram os coeficientes de correlação, respectivamente, de 0,60; 0,70; 0,67 e 0,47, para as frentes A, B, C e DE. O desvio padrão corresponde a 0,2 para todas as equações.

As equações de atenuação oferecem possibilidade de avaliação dos dados segundo o critério de Devine (1966), que fixa a relação de Vp à Q e a D. Desta forma é possível estimar a Vp para dados definidos do plano de fogo, a partir das equações de atenuação. Segundo os critérios de danos estruturais adotados pelas normas internacionais, as equações de atenuação são utilizadas para prever os possíveis danos à construção civil, causados pela detonação de explosivos em desmontes de rochas. As equações de atenuação também são úteis no estudo do incômodo à população.

#### *Configuração da cava*

Pela configuração da cava da pedreira, observa-se que a orientação das frentes de lavra A e E, (leste-oeste e noroeste, respectivamente) favorece a propagação da energia sísmica em relação ao bairro mais próximo. Em consequência disto

há maiores níveis de vibração, quando ocorrem os desmontes, o que não foi observado em relação às outras frentes no período monitorado.

A partir de uma distribuição circular normal para cada frente de lavra, foi encontrada para cada grupo de medidas registradas uma direção preferencial de propagação da onda sísmica. Quatro direções preferenciais foram identificadas, sendo N24°, N84°, N11° e N20°, respectivamente para as frentes, A, B, CD e E. Essas direções são confirmadas pela pequena variância circular, que reflete que os pontos de registro estão concentrados, confirmando que existe uma direção preferencial de propagação para cada frente, na qual são esperados os maiores valores de vibração (Figura 3).

A área de influência da frente A ocupa a região nordeste da pedreira, abrangendo a área das construções residenciais mais próximas. As frentes B, C e D estão voltadas para áreas de pastagem. O posicionamento das bancadas, a maior distância do centro habitado, a rápida atenuação das vibrações no terreno e a não existência de construções civis na direção preferencial de propagação dessas frentes favorecem a sua lavra, respeitando os limites seguros para estruturas e em relação ao desconforto da população.

A direção preferencial de propagação das vibrações para frente E é a região norte e nordeste, área onde se encontram diversas fábricas, a rodovia SP-101, trecho da ferrovia e região habitada, ou seja, uma área de influência com densa ocupação urbana, comparada às outras frentes.

Os registros foram feitos quase que totalmente em área fora da propriedade da pedreira, inclusive dentro de algumas residências.

#### **Comportamento das Vibrações e Frequências de Vibração de Partícula na área de estudo**

Na zona onde se encontram as construções mais próximas e algumas fábricas localizadas entre 400 e 500 m da pedreira, os valores medidos atingem 7 mm/s. Na Vila Boa Vista, a mais de 800 m, o valor de Vp na componente transversal chega a 3 mm/s e 3,73 mm/s na resultante.

Em ambos os valores de Vp calculados mostram uma tendência dos valores em diminuir de oeste para leste, em todas as componentes e no vetor resultante, mostrando que o comportamento das três componentes de velocidade é muito semelhante para essa frente.

Para as frequências, as componentes verticais e longitudinais tendem a diminuir de sudeste para noroeste, enquanto que os valores da componente transversal aumentam de sudoeste para nordeste.

A componente transversal apresenta valores entre 25 e 10 mm/s para distâncias até 450 m, com detonação de 83 a 87 kg de Q.

Com o aumento da distância, os valores decrescem na direção nordeste, permanecendo entre 10 e 5 mm/s, até 800 m

de distância da frente, com exceção do ponto 136, a 650 m, que registrou 15,5 mm/s. A partir dessa faixa, os valores medidos estão abaixo de 5 mm/s, incluindo os pontos medidos nas residências, com valores menores do que 3 mm/s.

Para a componente vertical, os valores de  $V_p$  estão entre 35 e 10 mm/s até a faixa de 400 m de distância da frente, para  $Q$  de 87 kg.

Para distâncias entre 400 e 750 m, os valores de  $V_p$  caem para a faixa entre 10 e 5 mm/s, diminuindo ainda mais na direção nordeste, com o aumento da distância da fonte de energia.

Os registros nas residências da Vila Bela Vista fornecem valores abaixo de 2 mm/s, à distância mínima de 800 m, e carga por espera de 87 kg, no ponto 121.

A componente longitudinal também apresenta valores entre 25 e 10 mm/s para distâncias de até 450 m e cargas máximas por espera de 62 a 87 kg, com exceção dos pontos 136 e 138, que apresentam valores nessa faixa de velocidade, porém a distâncias de 650 a 750 m; na direção nordeste, os valores de  $V_p$  estão na faixa de 10 a 5 mm/s para distâncias entre 500 e 800 m, sendo que, superada a distância de 800 m, os valores registrados encontram-se abaixo de 5 mm/s.

O vetor resultante de  $V_p$  apresenta valores abaixo de 5 mm/s a leste, a partir de 600 m, e a nordeste, a partir de 800 m.

A frequência, na componente vertical, apresenta valores predominantes entre 40 e 80 Hz, na área de influência da frente E. Alguns registros forneceram valores entre 30 e 40 Hz, a distâncias entre 200 e 500 m, na região das fábricas.

As componentes transversais e longitudinais apresentam valores entre 50 e 80 Hz, com comportamento semelhante à vertical. O valor mínimo registrado foi de 22 Hz, no ponto 130, para a componente longitudinal, e 15 Hz, no ponto 135, para a componente transversal.

Apesar da área de maior propagação das vibrações dessa frente estar mais próxima da zona urbana, observa-se que os valores de  $V_p$  mais altos, acima de 20 mm/s concentram-se, aproximadamente, na direção nordeste, a distâncias inferiores a 400 m. Porém, a atenuação das ondas é rápida, principalmente na componente vertical, caindo para um terço os valores registrados acima de 800 m, início das residências da vila.

Para essa área de influência, os valores predominantes de frequência estão acima de 40 Hz, com baixa probabilidade de danos às estruturas civis. No entanto, a região das fábricas, localizada a menos de 300 m da frente, é a que está mais sujeita ao incômodo gerado pelas detonações na frente E. As altas frequências oferecem baixa probabilidade de risco de danos estruturais associados a velocidades não muito altas.

Devido à sua proximidade das construções civis, essa frente vem sendo cada vez menos utilizada, devendo ser, futuramente, abandonada.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### Métodos estatísticos

Os métodos estatísticos aplicados foram: a análise das componentes principais e a análise discriminante, sendo os cálculos realizados com o auxílio do *software* XLSTAT, versão 2012.

Para cada ponto de registro existem diversos parâmetros que devem ser considerados, desde as características geológicas até a carga por espera e os dados do plano de fogo, tornando-se impossível correlacioná-los, espacialmente, sem a utilização da análise multivariada.

#### *Análise das componentes principais*

É o mais antigo método de ordenação, o mais conhecido e com mais exemplos de aplicação em Geociências. Trata-se de uma técnica para encontrar componentes lineares de variáveis correlacionadas por meio do cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis. Tradicionalmente, o coeficiente de correlação é mais usado, em vez de covariância, para a matriz inicial de similaridades. Isso porque o coeficiente de correlação elimina o efeito de escala: uma variável que oscile entre 0 e 1 não pesa mais do que uma variável variando entre 0 e 1.000.

A análise das componentes principais é, portanto, uma técnica de transformação de variáveis. O método apresenta melhores resultados se, originalmente, já existe alguma correlação entre variáveis ou grupo de variáveis e se o número de variáveis é significativo.

A análise das componentes principais foi aplicada com o intuito de se compreender a relação, no espaço multidimensional, entre as variáveis relacionadas às vibrações no terreno, já que numa primeira análise do fenômeno, utilizando o método da regressão múltipla, não ficou clara a influência de algumas variáveis na propagação daquelas vibrações.

Para essa análise, as seguintes variáveis foram usadas:

- velocidade de vibração da partícula ( $V_p$ );
- distância real entre o ponto de registro e a frente de detonação ( $d$ );
- carga máxima por espera ( $Q$ );
- espessura da camada de solo;
- senos do ângulo entre a direção de fraturamento das famílias 1 e 2 (sen.  $\alpha_1$  e sen.  $\alpha_2$ ) e a direção preferencial de propagação da onda sísmica;
- frequência de oscilação da onda sísmica ( $f$ ).

A análise das componentes principais foi aplicada para cada uma das diferentes frentes de lavra. Nas Tabelas 4 e 5 estão representados os dados utilizados no cálculo das

componentes principais, os quais foram padronizados, em função das diferentes unidades de medidas que apresentavam. As análises estão representadas nas Figuras de 4 a 7.

Na Frente A (Figura 4), para a primeira componente principal foram atribuídos 39,82% da variação dos dados, sendo as variáveis mais expressivas a Vp, com carga da componente igual a -0,804, a espessura do solo, com -0,821; e a d, com carga de 0,841, confirmando a relação inversa entre Vp e distância. Quanto menor a espessura da camada de solo, maior a Vp, portanto, a relação está correta, uma vez que na Frente A o topo rochoso encontra-se mais raso, a cerca de 10 metros de profundidade. Os valores das Vp na área são maiores, pois a proximidade do topo rochoso da superfície facilita a propagação das ondas sísmicas. Observa-se, através da variação espacial dos escores da primeira componente, que nos arredores da cava os valores são negativos e aumentam na direção nordeste, com o aumento da d. Na Figura 4 é clara a relação entre Vp e d, ou seja, quanto maior a distância do ponto de detonação, menor a Vp registrada.

A segunda componente principal, responsável por 26,95% da variação dos dados, está representada pelo fraturamento do maciço rochoso, que, até então, não tinha sido bem avaliado pelas análises estatísticas anteriores. O maciço estudado apresenta-se bastante fraturado, com três famílias de fraturas, porém com apenas duas famílias bastante representativas,  $F_1$  e  $F_2$ . Essas variáveis, representadas pelo seno  $\alpha_1$  (-0,889) e seno  $\alpha_2$  (0,925), também apresentam sentidos opostos, já que os ângulos entre as famílias de fraturas consideradas e as direções de propagação variam de paralelas a perpendiculares. Os escores dessa componente apresentam polarização contrária, indicando que as duas direções têm comportamento inverso. Isso indica que as direções principais de fraturamento são ortogonais entre si e predominam em duas porções diversas da cava. Na porção leste-sudeste, as direções de propagação são paralelas à primeira família de fraturas ( $F_1$ ) e oblíquas à segunda família ( $F_2$ ), e as direções, a nordeste, são perpendiculares a  $F_1$  e  $F_2$ .

Na Frente B (Figura 5), para a primeira componente principal, foram atribuídos 41,71% da variação dos dados, sendo as variáveis mais expressivas Vp, com carga da componente igual a -0,857 e a d, com carga de 0,862; mostrando um comportamento semelhante ao da Frente A.

A segunda componente principal, responsável por 26,41% da variação dos dados, está representada pelo fraturamento, também com comportamento semelhante à Frente A, ou seja, direções perpendiculares entre si.

Nas Frentes C e D (Figura 6), à primeira componente principal foram atribuídos 42,08% da variação dos dados, sendo as variáveis mais expressivas a Vp, com carga da componente igual a 0,824; a espessura do solo, com 0,890 e a d, com carga de -0,852, confirmando a relação inversa entre

Vp e d, e sua variação de atenuação conforme a espessura da camada de solo, já observada nas frentes A e B.

A segunda componente principal, responsável por 27,81% da variação dos dados, está representada pelo fraturamento, mostrando o mesmo comportamento das frentes A e B.

Na Frente E (Figura 7), à primeira componente principal foram atribuídos 37,49% da variação dos dados. As variáveis Vp (-0,814), espessura do solo (-0,827) e d (0,894) são as mais expressivas na análise, repetindo o padrão das demais frentes.

À segunda componente principal foram atribuídos 20,62% da variação dos dados. As variáveis mais expressivas aqui foram Q (-0,799) e f (0,846).

De forma geral, a primeira componente principal está sempre associada à Vp e à d, explicando em torno de 40% da variação total. A segunda componente envolve o fraturamento em 4 frentes (A, B, C e D), explicando cerca de 25%. Apenas na frente E os valores da segunda componente mudam, sendo a Q e a f as variáveis mais expressivas. Isso pode estar associado à baixa influência do fraturamento, onde as fraturas são mais espaçadas e pode haver uma menor influência na atenuação da frequência da onda.

A terceira componente principal relaciona-se à frequência de oscilação, espessura da camada de solo e profundidade do topo rochoso, e ainda à Q, explicando de 11 a 18% a variância dos dados. Observa-se que há uma distinção entre as variáveis relacionadas com a geração de energia (cargas por espera) e a produção do efeito vibratório sobre o maciço. Essa é a relação principal, com valores sempre opostos. As demais variáveis retratam os parâmetros do maciço (fraturas), solo e a distância do ponto de medição, que se relacionam à atenuação das ondas sísmicas, conforme esses parâmetros variam.

Conclui-se que, fundamentalmente, a distância do ponto de detonação ao ponto de registro (d) é o fator mais importante na atenuação das ondas sísmicas e, portanto,

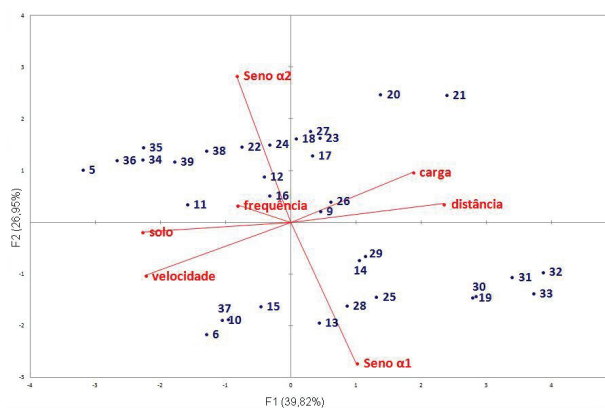


Figura 4. Análise das componentes principais para a frente A.

**Tabela 4.** Dados usados para as análises estatísticas multivariadas.

Registro (n° do ponto)	Frente	Seno $\alpha_1$	Seno $\alpha_2$	Velocidade de partícula resultante (mm/s)	Carga máxima por espera (kg)	Distância (m)	Espessura da camada de solo (m)	Frequência componente vertical (Hz)
3	A	0,5113	-0,9165	36,6	80	130	40	85
5	A	-0,9234	0,5290	16,8	154	166	37	100
6	A	0,6367	-0,9661	21,2	154	270	23	73
9	A	0,2963	0,3132	8,79	154	637	14	93
10	A	0,9683	-0,6435	10,1	150	180	33	64
11	A	-0,6767	0,1235	12,3	150	228	28	57
12	A	-0,1147	0,6702	14,2	176	312	20	73
13	A	0,9510	-0,9537	20,5	176	410	14	73
14	A	0,2538	-0,7682	14,6	176	520	9	85
15	A	0,9200	-0,5215	11,0	160	190	29	51
16	A	-0,5587	-0,0265	12,2	160	338	10,8	85
17	A	-0,2623	0,7738	7,41	160	508	12	85
18	A	-0,9165	0,5139	8,46	160	570	15	85
19	A	0,9017	-0,9851	1,49	160	693	11	43
20	A	-0,8317	0,9995	2,60	160	873	9	100
21	A	-0,8317	0,9995	1,71	160	1037	5	73
22	A	-0,5215	0,9200	13,8	160	427	12	100
23	A	-0,9661	0,6367	7,89	160	470	11	51
24	A	-0,7391	0,9928	16,3	160	524	10,5	64
25	A	0,9928	-0,7391	9,02	160	575	10,5	85
26	A	-0,5587	-0,0265	10,1	160	435	12	37
27	A	-0,9997	0,8268	9,62	160	484	11	47
28	A	0,9866	-0,8979	10,4	160	528	12	100
29	A	0,1235	-0,6767	10,4	160	648	11,5	73
30	A	0,9866	-0,8979	5,63	160	918	9	64
31	A	0,9928	-0,7391	2,98	160	1026	5	73
32	A	0,6367	-0,9661	1,20	160	1070	5	51
33	A	0,9866	-0,8979	1,70	160	972	8	34
34	A	-0,7391	0,9928	10,3	148	310	45	43
35	A	-0,7391	0,9928	9,01	148	410	45	73
36	A	-0,9661	0,6367	13,3	148	445	45	85
37	A	0,9683	-0,6435	13,2	148	290	25	85
38	A	-0,9234	0,5290	9,06	148	380	20	100
39	A	-0,8218	0,9999	19,5	148	428	20	64
40	B	-0,9613	0,9995	6,59	160	568	27	85
46	B	-0,5440	0,7738	24,8	180	300	27	43
47	B	-1,000	0,9510	16,9	180	395	24	51
48	B	0,9129	-0,9938	15,1	80	364	22	37

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Registro (n° do ponto)	Frente	Senos $\alpha_1$	Senos $\alpha_2$	Velocidade de partícula resultante (mm/s)	Carga máxima por espera (kg)	Distância (m)	Espessura da camada de solo (m)	Frequência componente vertical (Hz)
49	B	0,1411	0,1673	14,9	80	444	27	51
50	B	0,9092	-0,7391	9,79	80	485	28	85
51	B	0,9906	-0,9851	8,41	80	574	31	43
52	B	-0,5440	0,7738	9,78	92	294	27	43
53	B	0,4121	-0,1147	10,1	92	500	28	39
54	B	-1,000	0,9510	4,25	80	584	24	57
55	B	-0,7568	0,9200	3,74	80	616	21	73
56	B	0,4121	-0,1147	8,99	74	384	29	43
57	B	-0,5365	0,2538	8,83	74	480	27	64
58	B	0,4121	-0,1147	2,16	74	668	15	47
59	B	0,9893	-0,8979	2,13	74	718	10	64
61	CD	0,9893	-0,8979	23,8	164	276	22	47
62	CD	0,9092	-0,7391	22,5	164	326	20	57
64	CD	-0,0008	0,3132	10,0	164	504	10	24
65	CD	0,1673	0,4361	9,7	88,7	370	6,5	85
68	CD	-0,1323	-0,1760	9,44	156	326	15	47
69	CD	0,8366	-0,6298	7,26	156	418	18	57
70	CD	0,9129	-0,9938	4,79	156	464	21	47
71	CD	-0,9613	0,9995	4,40	156	560	20	43
75	CD	-0,1586	-0,4441	4,10	75	642	6,5	47
76	CD	0,7451	-0,9938	3,18	75	692	8	64
77	CD	-0,6435	0,9683	2,46	75	730	9	51
79	CD	0,8509	-0,3877	9,71	84	740	9	64
80	CD	0,1235	-0,6767	4,75	84	700	8	85
81	CD	-0,7682	0,2538	9,78	84	660	6	100
82	CD	0,8509	-0,3877	5,47	84	608	6	100
83	CD	0,9017	-0,9851	5,01	84	560	6	39
84	CD	-0,9537	0,9510	3,12	84	504	8	37
85	CD	0,9866	-0,8979	4,55	84	460	8	57
86	CD	-0,9880	0,8939	18,4	87	235	15	43
87	CD	0,9563	-0,8218	25,3	87	244	15	57
88	CD	0,9563	-0,8218	4,07	87	295	15	39
89	CD	-0,6636	0,8600	11,9	87	270	15	51
92	CD	0,9637	-0,6298	33,0	288	195	20	47
93	CD	-0,7391	0,9928	38,8	288	202	27	51
95	CD	0,6569	-0,8555	22,6	68	116	20	40
96	CD	0,6569	-0,8555	17,9	68	168	18	39
97	CD	-0,2794	-0,026	7,94	68	365	20	39

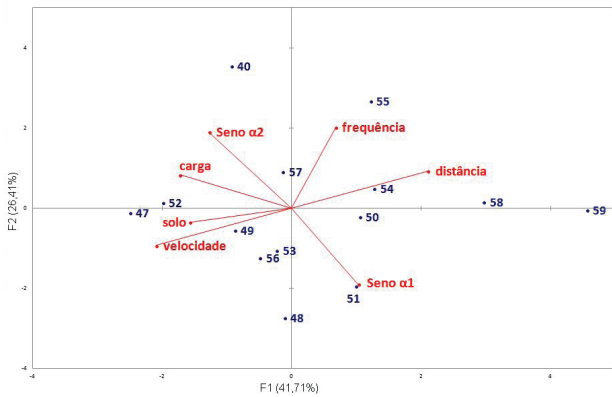
Continua...

Tabela 4. Continuação.

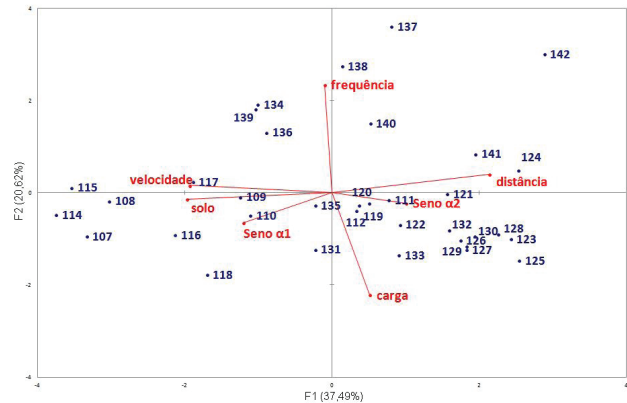
Registro (nº do ponto)	Frente	Seno $\alpha_1$	Seno $\alpha_2$	Velocidade de partícula resultante (mm/s)	Carga máxima por espera (kg)	Distância (m)	Espessura da camada de solo (m)	Frequência componente vertical (Hz)
102	CD	-0,9917	0,7331	12,0	89	230	20,5	16
103	CD	0,6502	-0,3877	6,30	89	340	23	30
107	E	0,6702	-0,1147	16,0	83	140	26	28
108	E	0,8509	-0,3877	12,5	83	208	26	51
109	E	-0,9997	0,8268	12,8	83	262	21	37
110	E	0,4361	0,1673	6,12	83	322	18	37
111	E	-0,5587	-0,0265	5,61	83	482	9	34
112	E	-0,7682	0,2538	7,90	83	510	14	26
113	E	0,2538	-0,7682	36,3	87	74	28	64
114	E	0,9683	-0,6435	18,4	87	130	26	51
115	E	0,7331	-0,9917	21,3	87	180	23,5	64
116	E	0,8939	-0,9880	21,2	87	296	12	32
117	E	0,8600	-0,4040	21,5	87	345	11	64
118	E	0,8600	-0,4040	22,9	87	390	10	5,4
119	E	-0,7682	0,2538	7,81	87	506	14	37
120	E	-0,7682	0,2538	5,99	87	502	14	39
121	E	-0,3048	-0,3048	4,85	87	800	9	43
122	E	-0,1760	-0,4281	6,85	99	588	9	51
123	E	-0,8218	1,0000	9,08	99	638	9	43
124	E	-0,8218	1,0000	8,64	99	686	9	85
125	E	-0,8218	1,0000	7,87	99	636	9	30
126	E	-0,1760	-0,4281	3,48	99	784	9	39
127	E	0,3132	0,2963	2,46	99	852	9	37
128	E	-0,4441	-0,1586	3,66	99	914	9	39
129	E	-0,3048	-0,3048	3,80	99	792	9	34
130	E	0,8268	-0,9997	2,69	99	920	5	47
131	E	0,9683	-0,6435	10,7	96	565	10	39
132	E	-0,9234	0,5290	8,53	96	702	9	34
133	E	0,8600	-0,4040	6,96	96	802	9	32
134	E	-0,1760	-0,4281	21,0	86	438	10	100
135	E	-0,7509	0,5139	3,34	86	438	22	39
136	E	0,5139	-0,9165	21,5	86	650	10	85
137	E	-0,9938	0,7451	10,4	65	700	10	100
138	E	0,3132	0,2963	11,2	65	750	10	85
139	E	-0,6636	0,8600	8,52	68	415	22	64
140	E	0,2709	0,0353	5,13	68	678	10	57
141	E	0,9563	-0,8218	1,69	68	1088	5	37
142	E	-0,9880	0,8939	2,25	68	1012	5	85

**Tabela 5.** Dados gerados na análise das componentes principais para as diferentes frentes de lavra.

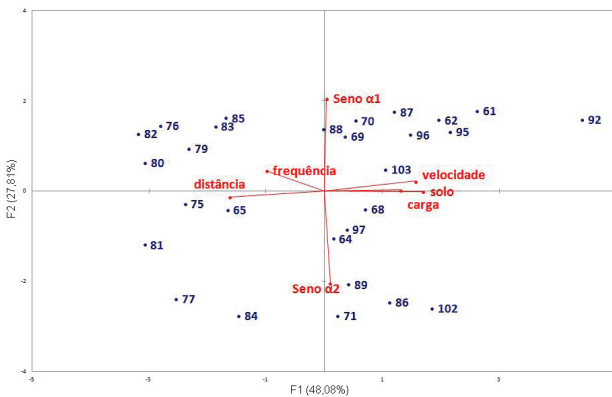
	Cargas fatoriais							
	Frente A		Frente B		Frente CD		Frente E	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Seno $\alpha_1$	0,360	-0,889	0,421	-0,693	0,019	0,975	-0,504	-0,234
Seno $\alpha_2$	-0,301	0,925	-0,522	0,695	0,055	-0,966	0,420	-0,081
Velocidade	-0,804	-0,336	-0,857	-0,339	0,824	0,106	-0,814	0,058
Carga	0,671	0,316	-0,709	0,305	0,688	0,015	0,215	-0,799
Distância	0,841	0,117	0,862	0,339	-0,852	-0,063	0,894	0,144
Solo	-0,821	-0,061	-0,643	-0,129	0,890	-0,004	-0,827	-0,051
Frequência	-0,298	0,109	0,278	0,738	-0,521	0,217	-0,043	0,846



**Figura 5.** Análise das componentes principais para a frente B.



**Figura 7.** Análise das componentes principais para a frente E.



**Figura 6.** Análise das componentes principais para as frentes C e D.

nos níveis de vibração. No entanto, deve-se estar atento aos fatores físicos do terreno, como o fraturamento do maciço rochoso, a espessura do solo e a profundidade do topo rochoso, que influenciam no comportamento das ondas sísmicas e nas vibrações, podendo aumentar ou diminuir os níveis de vibração, dependendo da direção de propagação das ondas.

*Análise discriminante*

A análise estatística multivariada utilizando funções discriminantes pode ser aplicada quando se trata de discriminar entre mais de dois grupos, e nessa situação são utilizados procedimentos combinados da análise de variância e da análise fatorial.

A variável dependente é representada pelos grupos previamente identificados, ou seja, as diversas frentes de lavra e as variáveis independentes as variáveis consideradas.

O principal objetivo da análise discriminante no presente trabalho foi entender as diferenças entre grupos (ou comportamento das variáveis independentes nas diferentes frentes de lavra) e prever a probabilidade de influência de cada uma das variáveis nessas frentes, o que fornece maior possibilidade de controle dos impactos gerados.

Considerando apenas a comparação entre dois grupos, o valor central de cada grupo é determinado por

$$D_A = \lambda_1 \bar{x}_{a1} + \lambda_2 \bar{x}_{a2} + \dots + \lambda_p \bar{x}_{ap}$$

e do grupo B por

$$D_B = \lambda_1 \bar{x}_{b1} + \lambda_2 \bar{x}_{b2} + \dots + \lambda_p \bar{x}_{bp}$$



O índice discriminante,  $D_0$ , ou seja, o ponto na linha descrita pela função discriminante situado exatamente na metade da distância entre os centros dos grupos A e B, é encontrado segundo:

$$D_0 = \lambda_1 \left( \frac{\bar{X}_{a1} + \bar{X}_{b1}}{2} \right) + \lambda_2 \left( \frac{\bar{X}_{a2} + \bar{X}_{b2}}{2} \right) + \dots + \lambda_p \left( \frac{\bar{X}_{ap} + \bar{X}_{bp}}{2} \right)$$

Para testar a significância da função encontrada, ou seja, verificar se os dois grupos considerados pertencem a uma única população ou a duas distintas populações, calcula-se a distância entre as duas médias multivariadas, DA e DB. Essa medida de distância é conhecida como “distância generalizada de Mehalanobis”, ou  $D^2$ , e mede a separação entre as duas médias multivariadas expressas em unidades de variâncias combinadas.

$D^2$  é usada na seguinte expressão para ser testada pela distribuição F:

$$F = \left( \frac{n_a + n_b - p - 1}{(n_a + n_b - 2)p} \right) * \left( \frac{n_a n_b}{n_a + n_b} \right) * D^2$$

com “p” graus de liberdade para o numerador e “ $n_a + n_b - p - 1$ ” para o denominador. A hipótese nula a ser testada estabelece que as duas médias multivariadas sejam iguais, ou que a distância entre ambos os grupos é igual a zero, significando que se trata de um único grupo.

$$H_0 : [Rp] = 0, \quad \text{ou} \quad \alpha_a = \alpha_b$$

$$H_1 : [Rp] > 0$$

A contribuição relativa, em porcentagem, de cada variável para o distanciamento entre os dois grupos é fornecida pela expressão:

$$C_i = \frac{\lambda_i R_i}{D^2} * 100$$

onde o índice i refere-se a i-ésima variável e  $C_i$  mede apenas a contribuição direta da variável, sem levar em consideração o seu inter-relacionamento com as demais existentes.

Os resultados da análise discriminante estão apresentados nas Tabelas 6 e 7. Os dados calculados nas Tabelas 6 e 7 mostram que os quatro grupos são discriminados. Os resultados obtidos apontam que a variável mais importante para discriminar os quatro grupos é a carga, seguida pela f, solo e d (Figuras 8 e 9).

Os valores da Tabela 7 indicam maior ou menor proximidade entre os grupos, quanto maior o valor de  $D^2$ , mais separados eles estão. Os dados das diversas variáveis para a frente A apontam maior distância deste grupo de dados para a frente E, ou seja, são os grupos mais separados. A separação entre os grupos de dados da frente A em relação à frente B está em segundo lugar em distância, seguida em terceiro das frentes B e CD, em quarto das frentes A e CD, em quinto das frentes E e B e em sexto das frentes CD e E.

Os valores médios de carga por espera e frequência para a frente A são, respectivamente, 156 kg e 72 Hz; e a espessura do solo é de cerca de 10 m. Na Frente B, os valores de carga por espera e frequência são de 92,5 kg e 51 Hz. Para as frentes CD, os valores obtidos são de 114 kg e 51 Hz e, para frente E, são de 87,2 kg e 50 Hz. Aqui é clara a influência da carga por espera na separação dos grupos, pois, para Frente A, a carga é praticamente o dobro das demais frentes e a frequência está acima das demais, justificando a separação desses dados em relação a essas duas variáveis. No caso da espessura do solo, na frente A, ela é mais rasa, enquanto que nas frentes B, CD e E, a espessura aumenta consideravelmente (atingindo até 43 m).

As médias de profundidade do topo variam de 10 a 27 m. O topo rochoso encontra-se mais raso próximo à Vila Boa Vista, na porção nordeste, e na região sudeste da pedreira

**Tabela 6.** Representação das variáveis mais importantes para a discriminação.

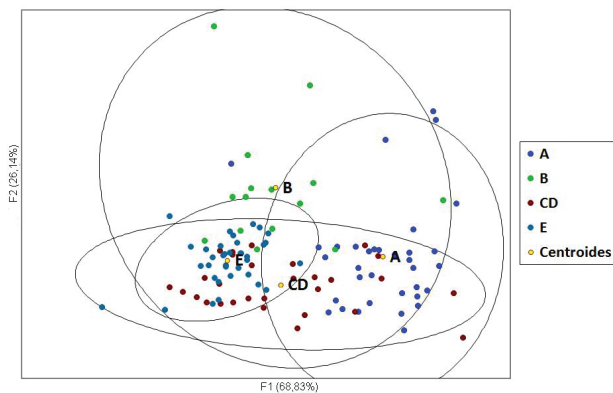
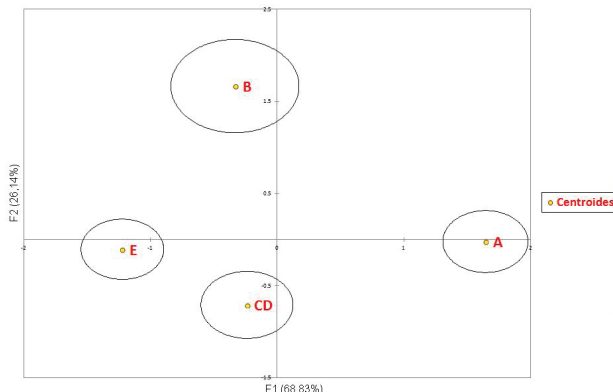
Resumo da seleção das variáveis:						
Nº de variáveis	Variáveis	Variável IN/OUT	Status	R <sup>2</sup> parcial	F	Pr > F
1	Carga	Carga	IN	0,407	25,133	< 0,0001
2	Carga/frequência	Frequência	IN	0,173	7,596	0,000
3	Carga/solo/frequência	Solo	IN	0,162	6,942	0,000
4	Carga/distância/solo/frequência	Distância	IN	0,188	8,251	< 0,0001
5	Velocidade/carga/distância/solo/frequência	Velocidade	IN	0,136	5,571	0,001
6	Seno $\alpha$ 1/velocidade/carga/distância/solo/frequência	Seno $\alpha$ 1	IN	0,116	4,593	0,005

**Tabela 7.** Cálculos das distâncias de Mahalanobis.

	Distâncias de Mahalanobis			
	A	B	CD	E
A	0	6,971	4,362	8,246
B	6,971	0	5,664	4,294
CD	4,362	5,664	0	1,870
E	8,246	4,294	1,870	0

	Valores p para as distâncias de Fisher			
	A	B	CD	E
A	1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
B	< 0,0001	1	< 0,0001	< 0,0001
CD	< 0,0001	< 0,0001	1	0,000
E	< 0,0001	< 0,0001	0,000	1

**Figura 8.** Análise discriminante multigrupos para todas as frentes de lavra.**Figura 9.** Análise discriminante multigrupos mostrando os centroides para todas as frentes de lavra.

(direção de propagação das frentes A, E e CD) e mais profundo a leste da área, direção de propagação da frente B.

Os valores das  $V_p$  na área são maiores quanto mais raso o topo da rocha e quanto menor a cobertura de solo residual. Na porção nordeste da pedra a rocha está mais próxima da superfície e facilita a propagação das vibrações. Também nessa área, verifica-se uma melhor propagação das

vibrações devido ao fraturamento do maciço, o que favorece valores mais altos

O plano de fogo pode ser considerado um fator importante, já que determina a quantidade de carga por espera que será utilizada. A combinação das variáveis carga por espera e espessura do solo faz com que o comportamento das vibrações seja diferente para cada frente de lavra, em particular para a frequência das ondas, que é maior onde a espessura de solo é menor e o topo rochosos está mais raso.

A análise discriminante mostrou com clareza a separação dos dados para cada frente de lavra, indicando que os quatro grupos de dados devem ser tratados de forma separada. Isso mostra que cada frente de lavra apresenta um comportamento diferenciado das ondas e das vibrações, em função das diferentes variáveis. Todo o conjunto de dados deve ser levado em conta, mas é possível discriminar áreas ao redor da cava com maior ou menor impacto. Essa identificação auxilia no planejamento e avanço da lavra, em consideração à ocupação do entorno, minimizando os impactos do desmonte com uso de explosivos.

## CONCLUSÕES

As análises estatísticas multivariadas, aplicadas ao conjunto de dados obtidos a partir do monitoramento sismográfico das vibrações, geradas pelo desmonte de rocha em pedra em área urbana, mostraram-se eficientes e complementares para a compreensão das variáveis.

O efeito dos parâmetros do maciço rochoso nas vibrações, neste estudo representado pelas famílias de fraturas e suas respectivas direções, ficou mais claro após as análises, explicando um aspecto que não é mensurável pelos equipamentos, qual seja a correlação com a atenuação das ondas sísmicas. A equação de atenuação pode ser obtida por cálculos matemáticos a partir dos dados medidos pelo sismógrafo, mas a explicação para uma maior ou menor atenuação das ondas em determinadas direções só é possível quando se conhecem os parâmetros do maciço. Existem outros aspectos mensuráveis como impedância (rocha e explosivo, velocidade da onda P, resistência a compressão, etc.) que de alguma forma também interferem na atenuação e aumentam a complexidade dos modelos de simulação. No entanto, esses parâmetros não foram considerados no presente trabalho.

Neste estudo, a análise das componentes principais ofereceu ótimos resultados para a compreensão das variáveis consideradas, que influenciam a atenuação da onda para as diferentes frentes de lavra. Os altos índices de correlação entre as variáveis mostraram isso e a análise discriminante mostrou com clareza a separação dos dados para cada frente de lavra.

Conclui-se, com a aplicação dos métodos estatísticos multivariados, que é possível um melhor entendimento dos

impactos gerados pelo uso de explosivos e que a combinação dos métodos fornece, com clareza, a compreensão do comportamento das variáveis espaciais.

A análise estatística multivariada associada ao uso de uma ferramenta gráfica como, por exemplo, o mapa de isovalores, mapas com curvas de tendência, oferece uma melhor compreensão das variáveis, principalmente quando é desejado identificar anomalias (*hot spots*) como valores de vibração normalmente muito altos em relação à tendência.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). (1983). *Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos*. Tradução nº 12. São Paulo: International Society for Rock Mechanics.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2005). NBR 9653/2005. *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*. Norma de Procedimento.
- Bacci, D.C. (2000) *Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.
- Bacci, D. C., Landim, P. M. B., Eston, S. M., Iramina, W. S. (2003). Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas. Parte I. *Revista Escola de Minas*, 1(56), 51-57.
- Bacci, D. C., Landim, P. M. B., Eston, S.M. (2006). Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana. *Revista da Escola de Minas*, 59(1), 47-54.
- Bacci, D. C., Diniz, T. M. R. G., Aquino, T. D. V. S. (2011). Diagnóstico socioambiental da atividade de mineração no nordeste da Região Metropolitana de São Paulo: relacionamento com a comunidade e o poder público. *Geociências (São Paulo)*, 30(2), 207-217.
- Berta, G. (1994). *L'esplosivo instrumento de lavoro*. Milão: Italesplosivi.
- Canedo, G. R. (2013). *Monitoramento sismográfico associado a detonações em pedreiras no município de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica – USP.
- Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB). (2015). Norma D7.013 *Avaliação e monitoramento das operações de desmonte de rocha com uso de explosivo na mineração*. Norma de Procedimento.
- Devine, J. F. (1966). *Avoiding damage to residences from blasting vibration*. Washington: Hygway Research Bord.
- Eston, S. M. (1998). *Controle ambiental e segurança na mineração*. Tese (Livre Docência). São Paulo: Escola Politécnica – USP.
- Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC). (1979). *Mapa topográfico do município de Campinas*. Folhas SF-23-Y-A-V (Campinas III) e SF-23-Y-A-V (Jardim Santa Isabel). Escala 1:10.000. São Paulo: Coordenadoria de Ação Regional, Divisão de Geografia do Plano Geográfico do Estado de São Paulo.
- Iramina, W. S. (2002). *O mapa de isovelocidades como ferramenta de controle ambiental*. Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica – USP.
- Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos* (2a ed. revisada e ampl.). São Paulo: UNESP.
- Jimeno, L. C., Jimeno, L. E., Bermúdez, G.P. (2003). *Manual de perforación e voladura de rocas* (1a ed.). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Klen, A. M. (2010) *Aplicação da técnica de simulação para análise da superposição de ondas sísmicas geradas em desmonte de rochas pela dispersão dos tempos de retardo utilizando o método de Monte Carlo*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas – UFOP.
- Mancini, R. (1994). Definizione e descrizione delle vibrazioni prodotte dall'uso dell'esplosivo. *Rivista dell'Associazione Italiana dell'Associazione Subalpina*, 1, 9-17.
- Oriard, L. L (2002). *Explosives engineering, construction vibrations and geotechnology*. Cleveland: International Society of Explosives Engineers.
- Olofsson, S. O. (1990). *Applied explosives technology for construction and mining* (2a ed.). Sweden: APPLEEX.
- Persson, P., Holmberg, R., Lee, J. (1994). *Rock blasting and explosives engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Rezende, A. (2002). *Dispersões nos tempos dos acessórios transmissores de energia: detonadores convencionais e eletrônicos*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas – UFOP.

Silva, V. C. (1998) *Variáveis que interferem nos problemas ambientais gerados durante o desmonte de rochas*. Tese (Doutorado). São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo – USP.

Vuillaume, P. M., Bernar, T., Kiszlo, M (1996). Blasting vibrations control: the shortcomings of traditional methods. *Proceedings of 22<sup>nd</sup> ISEE Annual Conference*. Orlando: International Society of Explosives Engineers. CD-ROM.

Winzer, S. R., Furth, W., Ritter, A. (1985). *Initiation firing times and their relationship to blasting performance*. Bureau of Mines Report of Investigations, RI8888.

Wiss, J. F., Linehan, P. W. (1978) *Control of vibration and air noise from surface coal mines – III*. Report no. OFR 103 (3)-79. Bureau of Mines, US.

Yamamoto, J. K, Landim, P. M. B (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos.