



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Qualidade da Fragmentação no Desmonte de Rocha:  
Análise Preliminar**

**José Luís dos Santos Teixeira**





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Qualidade da fragmentação no desmonte de rocha:**

**Análise Preliminar**

**José Luís dos Santos Teixeira**

*Nº 1000031*

*Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizado sob a orientação do Eng.º António Rodrigues Vieira, equiparado a Assistente do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e do Doutor João Paulo Meixedo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*



## **Júri**

### **Presidente**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

*Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Engenheiro António Carlos Reis Galiza Carneiro

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre Maria Eugénia Oliveira Lopes

*Equiparada a Assistente, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Engenheiro António Rodrigues Vieira

*Equiparado a Assistente, Instituto Superior de Engenharia do Porto*



*Dedico este projecto à minha mãe, pois é para mim um símbolo do meu esforço e empenho, e está sempre presente nos momentos mais importantes da vida.*

*Dedico também este projecto à minha esposa, pelo apoio que ela me deu durante a realização deste projecto, pela paciência e motivação que me proporcionou.*

*Não posso deixar de mencionar que dedico também a uma amiga que esteve ao meu lado sempre com uma palavra de apoio e carinho, obrigado Sara.*



## **Agradecimentos**

O presente trabalho resulta da conjugação de diversos apoios e incentivos oferecidos ao autor, que desta forma, pretende expressar a sua gratidão e reconhecimento de todos os que contribuíram para a elaboração deste projecto.

Ao Eng.º António Vieira (ISEP), que me orientou e ajudou ao longo deste longo percurso com conselhos e informações indispensáveis para o desenvolver deste trabalho.

Ao Professor Doutor João Paulo Meixedo (ISEP), pela sua orientação e apoio, levando a “bom porto” este projecto. Pelas sábios conselhos que foi transmitindo ao longo do tempo de Mestrado, e pelo apoio, esforço e dedicação que demonstrou sempre que necessitei de uma opinião ou conselhos.

Ao Professor Doutor Hélder I. Chaminé (ISEP) pelo esforço desempenhado nesta recta final na avaliação e caracterização dos dados examinados neste trabalho.

À Eng.ª Ana Pires pela consideração e motivação que me transmitiu ao longo de todo este trajecto universitário que culmina neste mestrado.

Ao Eng.º Rui Silva pela ajuda e troca de impressões sobre cartografia aplicada.

Finalmente à minha mãe, esposa, família e à Sara, que conjuntamente me encaminharam sempre numa direcção de satisfação profissional e pessoal.



## ***Palavras-chave***

*Desmonte com explosivos, fragmentação, análise granulométrica*

## **Resumo**

Neste trabalho faz-se uma análise comparativa entre dois métodos de classificação da fragmentação, tendo a parte prática sido baseada num caso concreto de uma obra rodoviária, que foi realizada em Recarei, Paredes, e que foi acompanhada pelo signatário do presente trabalho, por nela estar profissionalmente envolvido.

O acompanhamento dos desmontes dependeu da disponibilidade possuída, bem como das condições atmosféricas. Este estudo abordou, numa primeira fase, a caracterização geológica e o levantamento das orientações das descontinuidades dos locais em estudo, numa fase posterior, avaliar e aplicar todos os dados recolhidos nos métodos em estudo.

O objectivo principal é demonstrar a relação que existe entre os dois métodos de avaliação da fragmentação, para assim validar a sua utilização conjunta, no caso de ela ser possível. Portanto, o acompanhamento dos desmontes com explosivos é fundamental para a recolha de informação necessária e caracterização do plano de fogo para melhor perceber e mostrar o conteúdo dos resultados finais.

Este trabalho requer as seguintes etapas, estudo da frente de desmonte antes do rebentamento com explosivos (levantamento de descontinuidades), execução do plano de fogo, acompanhamento do desmonte com explosivos (assegurar o cumprimento na integra do plano de fogo), recolha de dados gráficos da pilha de desmonte (imagens fotográficas da pilha de desmonte) e análise dos dados recolhidos.

Este estudo pode mostrar-se relevante caso exista uma relação entre os métodos, pois é da maior importância conseguir prever com eficácia a fragmentação no desmonte de rocha com explosivos.



**Keywords**

Blasting operations, fragmentation, grading analysis

**Abstract**

This work tries to demonstrate the compatibility between two different types of classifying the rock fragmentation, located in the region of Recarei (municipality of Paredes). The monitoring of the blastings depends on availability, the quality of the face line, the weather conditions and the equipment used on site. In a first approach, this essay will describe the geological classification and the orientations of the breaking lines in the sites where the study was made, later we will evaluate and use all the data collected in the methods that we are studying.

The purpose of this preparation is to demonstrate the existing relation between both evaluating methods for fragmentation in order to use them at the same time, if possible. Therefore, it is crucial to monitor the blasting operations in order to recover some necessary information and to establish the blast pattern. This will also allow a better understanding and explanation of the final results.

This essay requires the following steps: analysis of the face line before the blasting with explosives (recover of discontinuities), making the blast pattern, monitoring the blasting operations (ensure that the blast pattern is fully complied), recover some data from the loose material (photos of the loose material) and analysis of the collected data.

This study can be relevant if there is a relation between both methods, because it's very important to be able to predict with accuracy the fragmentation of the rock using explosives.



## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO GERAL, ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJECTIVOS.....	3
2	FRAGMENTAÇÃO .....	7
2.1	Desmante em bancada .....	8
2.1.1	Geologia.....	8
2.1.2	Perfuração .....	11
2.1.3	Carregamento.....	12
2.1.4	Parâmetros geométricos .....	13
2.2	Explosivos .....	17
2.3	Acessórios de tiro .....	20
2.3.1	Temporização .....	22
3	METODOLOGIAS E TÉCNICAS UTILIZADAS.....	27
3.1	Introdução.....	27
3.2	O modelo <i>Kuz-Ram</i> .....	27
3.2.1	Avaliação pré-desmante.....	27
3.2.2	Avaliação pós-desmante .....	28
3.3	<i>SPLIT-Desktop</i> .....	29
3.3.1	Informação geral.....	30
3.3.2	Características e compatibilidades do <i>SPLIT-Desktop</i> .....	30
3.3.3	Obtenção das imagens .....	31
3.3.4	Delineação .....	32
3.3.5	Controlo da delimitação .....	33
3.3.6	Análise da dimensão.....	33
3.3.7	Resultados .....	34
3.3.8	Validade e precisão.....	34
3.4	<i>Kuz-Ram</i> .....	35
3.4.1	Equação de Kuznetsov.....	36
3.4.2	Equação de Rosin-Rammler.....	36
3.4.3	Índice de uniformidade de Cunningham .....	37
3.4.4	Equação de Tidman .....	37
3.4.5	Factor da rocha.....	38
3.4.6	Factores de cálculo .....	39

3.4.7	Apresentação completa do modelo .....	43
3.5	Modelos alternativos de classificação da fragmentação .....	44
4	VIBRAÇÕES RESULTANTES DO REBENTAMENTO COM EXPLOSIVOS.....	53
4.1	Sismógrafo.....	58
4.2	Teoria vibratória.....	59
5	CASO DE ESTUDO.....	63
5.1	História e acessibilidade da zona em estudo .....	63
5.2	Enquadramento Regional.....	64
5.3	Enquadramento geográfico da zona em estudo .....	64
5.4	Geologia regional .....	65
5.5	Geologia localizada à zona em estudo .....	66
5.5.1	Geomorfologia.....	66
5.5.2	Litoestratigrafia .....	67
5.5.3	Zonografia.....	68
5.6	Apreciação dos métodos.....	69
5.6.1	Fragmentação.....	70
6	ANÁLISE AO COMPORTAMENTO DAS VIBRAÇÕES .....	99
6.1	Avaliação dos resultados.....	103
7	CONCLUSÕES .....	107
8	REFERÊNCIAS .....	113
	ANEXOS.....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Direcção do diaclasamento (Gustafsson, 1973) .....	11
Figura 2 – Geometria do desmonte em bancada (Latham, et al, 2006) .....	13
Figura 3 – Com furos inclinados os rapés desaparecem após uma ou duas fiadas (Langefors e Kihlström, 1967) .....	14
Figura 4 – Redução da quebra com furos inclinados (Langefors e Kihlström, 1967) .....	15
Figura 5 – Solução da emulsão e pormenor micro esferas na emulsão (Olofsson, 2002) .....	19
Figura 6 – Velocidade de iniciação do ANFO (Olofsson, 2002) .....	20
Figura 7 – Ligação e união NONEL do desmonte (Olofsson, 2002) .....	21
Figura 8 – Iniciação do tubo NONEL pelo DynoStart (Olofsson, 2002) .....	22
Figura 9 – Intervalos de tempo muito curtos e intervalos de tempo perfeitos (Olofsson, 2002).....	24
Figura 10 – Ligação e temporização .....	24
Figura 11 – Curva granulométrica pelo <i>SPLIT-Desktop (Versão Demo)</i> . .....	29
Figura 12 – Imagem depois de escalada pelo <i>SPLIT-Desktop</i> .....	31
Figura 13 – Imagem da pilha de desmonte delimitada .....	32
Figura 14 – Estimativa da curva de fino ( <i>SPLIT-Net Manual de instruções formato PDF, 2003-2004</i> ). 34	
Figura 15 – Imagem da pilha de desmonte delimitada ( <i>SPLIT-Net Manual de instruções online em www.spliteng.com</i> ) .....	35
Figura 16 – Técnica de amostragem linear. (a) Descontinuidade interceptada; (b) descontinuidade persistente; (c) espaçamento; (d) espaçamento principal; (e) família principal; (f) família secundária (Latham, 2006) .....	40
Figura 17 – Curva granulométrica pelo <i>Kuz-Ram</i> .....	43
Figura 18 – Ligação entre o tamanho dos blocos do desmonte e a carga específica (Langefors e Kihlström, 1967) .....	44
Figura 19 – Curvas de distribuição dos blocos por classe de acordo com a percentagem de volume total desmontado (Kendall, 1983).....	45
Figura 20 – Monograma de determinação da percentagem da dimensão dos blocos (Kendall, 1983) 46	
Figura 21 – Perfuração específica para as diferentes alturas de bancada e diâmetro do furo (Kendall, 1983).....	47
Figura 22 – Quantidade de explosivo necessário de acordo com a altura da bancada, diâmetro do furo e carga específica (Kendall, 1983) .....	48
Figura 23 – Relacionamento entre a altura da bancada, distancia à frente e o diâmetro do furo (Kendall, 1983) .....	48

Figura 24 – Atenuação das vibrações com a distância (Bernardo, P. et al, 2005).....	54
Figura 25 – Efeito da litologia do terreno de fundação nas velocidades vibratórias (Bernardo, P. et al, 2005).....	55
Figura 26 - Enquadramento Territorial das Freguesias abrangidas pelo Trecho 2 .....	64
Figura 27 – Localização da área do projecto .....	65
Figura 28 – Extracto da carta geológica, à escala 1/50000, 9-D (Penafiel) .....	66
Figura 29 – Ligação e temporização .....	71
Figura 30 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do rebentamento de rocha número 31.....	73
Figura 31 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do rebentamento de rocha número 31 .....	74
Figura 32 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 31.....	74
Figura 33 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do rebentamento número 33.....	77
Figura 34 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do rebentamento número 33 .....	77
Figura 35 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 33.....	78
Figura 36 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do rebentamento de rocha número 34.....	80
Figura 37 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do rebentamento de rocha número 34 .....	81
Figura 38 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 34.....	81
Figura 39 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do rebentamento de rocha número 35.....	83
Figura 40 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do rebentamento de rocha número 35 .....	83
Figura 41 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 35.....	84
Figura 42 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do desmorte de rocha número 37.....	85
Figura 43 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do desmorte de rocha número 37 .....	86
Figura 44 – Gráfico resumo do desmorte de rocha número 37 .....	86
Figura 45 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do desmorte de rocha número 40.....	88
Figura 46 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do desmorte de rocha número 40 .....	89
Figura 47 – Gráfico resumo do desmorte de rocha número 40 .....	89
Figura 48 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do rebentamento de rocha número 43.....	91
Figura 49 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do rebentamento de rocha número 43 .....	92
Figura 50 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 43.....	92
Figura 51 – Gráfico do <i>Kuz-Ram</i> do desmorte de rocha número 50.....	94
Figura 52 – Gráfico do <i>SPLIT-Desktop</i> do desmorte de rocha número 50 .....	94
Figura 53 – Gráfico resumo do desmorte de rocha número 50.....	95

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Força a compressão e a tracção de várias rochas (Olofsson, 2002).....	9
Quadro 2 – Comparação dos valores teóricos com os aplicados (em que a altura da bancada é de 14 m, a distância a frente de 3,5 m e o diâmetro de 89 mm).....	12
Quadro 3 – Adaptado do consumo de explosivo em gramas por tonelada de explosivo (valores anuais) (Langefors e Kihlström, 1967).....	23
Quadro 4 – Classificação geomecânica para obtenção do factor da rocha (Cunningham, 1983). ..... (Morais e Gripp, 2004) .....	38 38
Quadro 5 – Adaptado do quadro representativo dos valores do peso específico para alguns elementos (Galery, Fragmentação de minérios).....	39
Quadro 6 – Adaptado do quadro representativo dos valores do peso específico para alguns elementos (Palmström, 2001).....	39
Quadro 7 – Exemplo do levantamento das descontinuidades do maciço em estudo.....	41
Quadro 8 – Quadro dos parâmetros médios usados no <i>Kuz-Ram</i> .....	42
Quadro 9 – Quadro resumo da norma NP-2074 .....	56
Quadro 10 – Quadro resumo das descontinuidades. ....	68
Quadro 11 – Parâmetros das variáveis do <i>Kuz-Ram</i> .....	69
Quadro 12 – Quadro resumo das características do desmonte de rocha .....	70
Quadro 13 – Quadro resumo das características do desmonte de rocha .....	71
Quadro 14 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	73
Quadro 15 – Percentagem de passados do rebentamento 31 .....	76
Quadro 16 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	76
Quadro 17 – Percentagem de passados do rebentamento 33 .....	79
Quadro 18 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	79
Quadro 19 – Percentagem de passados do rebentamento 34 .....	82
Quadro 20 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	82
Quadro 21 – Percentagem de passados do rebentamento 33 .....	84
Quadro 22 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	85
Quadro 23 – Percentagem de passados do rebentamento 37 .....	87
Quadro 24 – Parte do quadro resumo das características do desmonte de rocha .....	88
Quadro 25 – Percentagem de passados do rebentamento 40 .....	90
Quadro 26 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	91
Quadro 27 – Percentagem de passados do rebentamento 43 .....	93

Quadro 28 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha .....	93
Quadro 29 – Percentagem de passados do rebentamento 50 .....	96
Quadro 30 – Quadro resumo das características do desmonte de rocha .....	100
Quadro 31 – Parte do quadro resumo da norma NP-2074 .....	101
Quadro 32 – Adaptado do quadro resumo das características do sismógrafo vibracord VX (Proyectos Mineros ICAM, S.L., 2008) .....	102

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

Formula 1 – Equação de Kuznetsov .....	36
Formula 2 – Equação de Rosin-Rammler .....	36
Formula 3 – Índice de uniformidade de Cunningham.....	37
Formula 4 – Equação de Tidman .....	37
Formula 5 – Equação do tamanho médio dos fragmentos.....	38
Formula 6 – Equação de Langefors .....	53
Formula 7 – Equação de vibração da NP-2074.....	101



## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO *SPLIT-DESKTOP*

Anexo 2 – VALORES DE CÁLCULO *KUZ-RAM* E CURVA GRANULOMÉTRICA

Anexo 3 – REGISTOS DE VIBRAÇÃO



**1**

**INTRODUÇÃO GERAL, ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJECTIVOS**



## 1 INTRODUÇÃO GERAL, ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJECTIVOS

Este trabalho insere-se na Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio, do 2º ano, do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Politécnico do Porto.

Na avaliação que aqui se apresenta tenta-se demonstrar a qualidade da fragmentação obtida por desmorte de rocha em obra, com o auxílio de métodos empíricos (pré-desmorte) e métodos ópticos (pós-desmorte). Este estudo realizou-se na A41 – PICOTO (IC2) /NÓ DA ERMIDA/IC25) TRECHO 2 – NÓ A32/A42 / AGUIAR DE SOUSA projecto executado pela AEDL – Auto-Estradas do Douro Litoral, S.A..

O objectivo foi caracterizar a fragmentação e validar os métodos de avaliação, comparando a informação obtida em campo com o objectivo de conseguir resultados fiáveis que nos indicassem a qualidade da mesma. Para isso, o acompanhamento de diversos desmontes de rocha foi indispensável para se conseguir recolher o máximo de informação para executar estes métodos; como os parâmetros de desmorte (geometria de furação e comprimento do furo, entre outros) e de imagens (fotografias) para tratamento óptico.

Este estudo foi realizado em quatro fases, tendo a primeira consistido na pesquisa bibliográfica da área em estudo recolhendo informação da geologia local e alguma informação sobre descontinuidades da região onde se inseriu a obra. Pretendia-se que este estudo pudesse ajudar a desenvolver alterações nos diagramas de fogo de modo a adaptar-se as exigências da obra no seu dia-a-dia. A segunda fase centrou-se essencialmente no acompanhamento do trabalho de campo para a recolha de dados específicos relativos aos desmontes de rocha, como furação, planos de fogo, entre outros. Em terceiro lugar realizou-se uma manipulação da informação obtida que se dividiu em duas partes: por um lado criar, através dos trabalhos desenvolvidos por Kuznetsov (1973), Cunningham (1983), Lilly (1986), Sarma (1994) e Djordjevic (1999), uma simulação da fragmentação pré-desmorte e, por outro lado, e baseado numa análise óptica da pilha de desmorte com o auxílio de um modelo criado pela empresa Split Engineering, LLC, avaliar a fragmentação pós-desmorte. Os métodos ópticos têm limitações, não avaliam a granulometria fina mas executam uma previsão dos finos, e a análise requer que sejam obtidas várias fotografias ao logo do processo de carga e transporte para minimizar o erro induzido pelos blocos superficiais. Por último, fez-se uma análise dos dois métodos, relacionando os seus resultados de forma a verificar se os dois podem ser usados em simultâneo conseguindo assim informação mais fiável e correcta.

No decorrer deste trabalho e durante a recolha de informação prática outro tema despertou interesse, assim foi elaborado uma análise de vibrações com o objectivo caracterizar a onda vibratória que é produzida pelo rebentamento de explosivos aplicando a fórmula de Langefors determinando com isso o factor de transmissibilidade do maciço rochoso.

O trabalho de campo acima descrito foi realizado em dois períodos, em Dezembro de 2009 e Setembro/Abril de 2010.



2

## FRAGMENTAÇÃO



## 2 FRAGMENTAÇÃO

A fragmentação pode ser caracterizada pelo tamanho dos blocos depois do desmonte de rocha (Gustafsson, 1973) ou pode ainda dizer-se que é a relação económica de uma determinada granulometria de um definido volume de rocha (Franklin, 1996).

A granulometria da rocha desmontada deve ser adaptada às operações a jusante e com uma qualidade da fragmentação adequada ao fim a que se destina. Neste caso existe um limite máximo do tamanho dos blocos produzidos no desmonte, que caso não seja cumprido são necessários trabalhos posteriores (fragmentação secundária) que vai resultar em custos financeiros elevados. Ela influencia todos os trabalhos, desde o planeamento do diagrama de fogo até a carga e transporte, sendo o elemento mais importante a controlar para obter o resultado final esperado.

A fragmentação depende de vários factores como: estado de fracturação natural do maciço, características físico-mecânicas do maciço rochoso, condições atmosféricas, tipo de equipamento utilizado, carga específica, perfuração específica, tipo de diagrama de fogo, sequência de iniciação, inclinação da furação, qualidade da furação e a dimensão do desmonte, a única maneira de obter o resultado esperado é otimizar os desmonte de rocha caso a caso. Mesmo trabalhando no mesmo local, como neste caso, em que os desmontes de rocha são sequenciais obtivemos qualidades de fragmentação diferentes de rebentamento para rebentamento, revelando-se assim de grande importância esta avaliação pelo técnico responsável de modo a obter uma fragmentação ideal.

A avaliação da fragmentação não é uma tarefa fácil na medida em que não existe uma regra consensual de aplicação generalizada. Normalmente é aceite a regra empírica de que a medição deve ser realizada a partir da medição dos blocos de média e grande dimensão.

Tudo começa com uma visita ao campo, apoiado com documentação geológica para daí retirar-se uma primeira ideia de como se pode realizar o trabalho de desmonte.

Já no escritório é importante a elaboração cuidada do plano de fogo com os elementos já recolhidos em campo. Na execução dos trabalhos no campo é necessário controlar e assegurar que todos os parâmetros calculados são aplicados com o maior rigor, para que não existam discrepâncias nos valores finais previstos.

Se por algum factor o resultado não é o esperado, pode resultar em trabalho extra como a fragmentação secundária (detonação de pequenas cargas explosivas controladas, reduzindo o tamanho dos blocos para que estes sejam transportáveis) e rapés (detonação de cargas reduzidas no fundo da bancada de elevações anómalas resultantes do desmonte que acontecem devido a má perfuração), que além de diminuir o rendimento de toda a maquinaria adjacente resulta num custo financeiro elevado.

## **2.1 Desmorte em bancada**

A definição de fragmentação pode ser subjectiva, dependendo do uso a que se destina, considerando-se ainda que a fragmentação desejada depende da utilização prevista, sendo comum pensar-se que equipamentos de grandes dimensões são utilizados para transportar blocos de grandes dimensões. No entanto, não é com esse objectivo que se adquire grandes equipamentos, mas sim para transportar grandes volumes de material, tendo em atenção que a fragmentação ideal é aquela que não necessita de tratamentos pós-desmorte.

A rocha transportada para o britador primário deve ter dimensão tal que permita rentabilizar ao máximo este sector. Assim, para se conseguir o maior aproveitamento do britador primário os blocos não devem exceder 75% da sua menor abertura (Olofsson, 2002).

É possível influenciar a fragmentação, mas não é possível calcular com certeza absoluta o resultado que se vai obter. No desmorte em bancada a fragmentação pode ser afectada pelos seguintes aspectos:

### **2.1.1 Geologia**

Embora a geologia exerça elevada influência na fragmentação, o controlo dos seus parâmetros é extremamente difícil.

Podemos controlar um conjunto de factores que depende do maciço rochoso, mas só pontualmente, interpolando para o resto do maciço. Assim, conseguimos ter uma visão da possível constituição que apresenta.

O maciço é constituído por um conjunto de descontinuidades, definindo assim a sua compartimentação. Essas descontinuidades podem ser favoráveis ou desfavoráveis para o desmorte, em função da direcção que apresentam. A perfuração num maciço muito fracturado pode ser uma tarefa difícil; além de diminuir a velocidade de avanço pode também provocar desvios significativos e encravamentos.

Quando as descontinuidades são interceptadas pelo equipamento de perfuração, provoca mudança de direcção do material de perfuração, dando origem a um desvio. Como normalmente é interceptado um conjunto elevado de descontinuidades, origina um efeito de desvio acumulado, reunindo assim um desvio conjunto do conjunto de descontinuidades interceptadas. Isto dá origem a que o diagrama de fogo não corresponda ao calculado, porque a geometria do desmorte não é regular, isto é, a distância à frente ou o espaçamento entre furos no fundo do furo é diferente da do topo da bancada.

Se essas descontinuidades forem de tal maneira irregulares pode provocar encravamento no material de perfuração, na medida em que como são zonas frágeis do maciço necessitaria de uma menor força de avanço e rotação para ultrapassar essa irregularidade com eficácia, mas como é impossível de prever em todos os momentos a qualidade do maciço.

Todos estes possíveis acontecimentos levam a que a velocidade de avanço média seja reduzida, diminuindo assim o rendimento do equipamento.

Como vemos, a qualidade da fragmentação depende não só da quantidade de explosivo consumida mas também das descontinuidades, mais propriamente do bloco tridimensional que essas descontinuidades formam. Em maciços com descontinuidades muito juntas, o tamanho médio do bloco é menor, portanto será necessário utilizar maior energia explosiva para obter a fragmentação pretendida. Em maciços com descontinuidades mais abertas, os fragmentos de rochas são libertados do maciço rochoso em vez de serem fragmentados, sendo evidente que a onda de choque é responsável por tal libertação e a pressão de gases pode ser pobremente utilizada para alargar as fracturas causadas pela onda de choque. (Chakraborty, A. K., 2004)

Em seguida descrevem-se alguns dos parâmetros considerados mais relevantes para a descrição do maciço rochoso.

- Força à compressão e força de tracção

A força de tracção é 8 a 10 vezes inferior à força de compressão, pelo que para que a rocha parta é necessário que a força de tensão seja ultrapassada. No quadro 1 estão listadas as forças de tensão e compressão para diferentes tipos de maciços.

Quadro 1 – Força a compressão e a tracção de várias rochas (Olofsson, 2002)

Tipo	Força à compressão (kg/cm <sup>2</sup> )	Força à tensão (kg/cm <sup>2</sup> )
Granito	2.000-3.600	100-300
Mármore	1.500-1.900	150-200
Calcário	1.300-2.000	170-300

- Densidade

Rochas com elevada densidade necessitam de explosivo com maior potência explosiva e de uma maior quantidade de explosivo, para vencer a sua resistência.

- Velocidade de propagação

A velocidade de propagação varia com o tipo de maciço. Para uma escolha eficaz do tipo de explosivo para um determinado maciço rochoso deve-se ter em conta o seguinte critério: *“A impedância do explosivo a utilizar deverá ser a mais próxima da impedância acústica do maciço rochoso (produto da velocidade de propagação sísmica no maciço pela densidade da rocha que o constitui”*. (Gomes et al, 2004/2005)

- Dureza

Um maciço mais “mole” absorve mais a força do explosivo e se o carregamento for excessivo dificilmente vamos ter projecções; por outro lado se o carregamento for diminuto consegue-se a fragmentação pretendida. Em maciços duros um carregamento irregular resulta em blocos de grandes dimensões porque a rocha encontra-se encaixada, sendo difícil a sua extracção. Mas se, o carregamento for excessivo, existe uma grande probabilidade de ocorrência de projecções e de onda aérea.

- Estrutura

A estrutura deve ser documentada antes de se realizar o plano de fogo. A direcção, inclinação, espaçamento das discontinuidades, etc. devem ser registados antes de se realizar a furação e mesmo o diagrama de fogo para se fazer os ajustes necessários para se conseguir um bom resultado na fragmentação. (Olofsson, 2002)

A direcção do diaclasamento pode ajudar ou prejudicar a fragmentação. No caso de descontinuidades horizontais é vantajoso que os furos interceptem perpendicularmente a face da descontinuidade para que o explosivo possa actuar nas melhores condições, como se pode ver na figura 1.

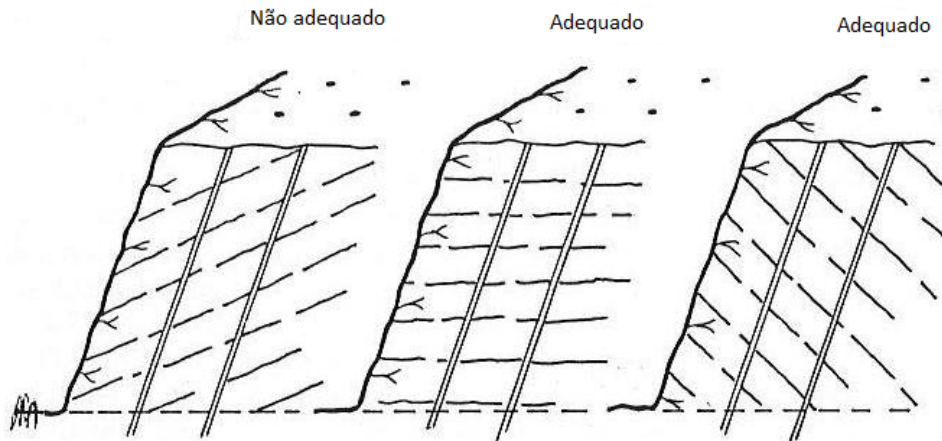


Figura 1 – Direcção do diaclasamento (Gustafsson, 1973)

### 2.1.2 Perfuração

A perfuração é um dos parâmetros mais importante no desmonte em bancada, sendo ele responsável pela adequação dos elementos já calculados no plano de fogo à realidade em campo.

O bom manuseamento do equipamento não só aumenta o rendimento de furação como aumenta a esperança de vida do equipamento de perfuração e do material de desgaste. É necessário cumprir com o que está estipulado no plano de fogo, como sejam as inclinações, comprimentos de furos e diâmetro de furação, para se conseguir a melhor fragmentação possível.

Existe uma tendência para aumentar o diâmetro de furação, conseguindo-se assim aumentar a produção mas mantendo a carga específica. Este método tem consequências directas na qualidade da fragmentação, porque se consegue uma diminuição do número de furos que resulta numa menor intercepção da furação nos blocos que constituem a compartimentação do maciço rochoso, aumentando o número destes blocos que em vez de serem fragmentados pelos explosivos são empurrados por eles.

Como já foi referido, a perfuração tem extrema importância na qualidade da fragmentação. Langefors e Kihlström defendem que a distância à frente deve ser  $V \approx 40d$  (diâmetro), também deve conter-se entre 20 e 50% da altura da bancada e por isso o diâmetro possui uma relação com a altura da bancada entre 0,5 e 1,25%, como podemos verificar no quadro 2.

Quadro 2 – Comparação dos valores teóricos com os aplicados (em que a altura da bancada é de 14 m, a distância a frente de 3,5 m e o diâmetro de 89 mm)

<b>Segundo Langefors e Kihlström</b>	$V \approx 40d$	$V \approx (50\% \text{ e } 20\%) k$	$d \approx (0,5 \text{ e } 1,25\%) k$
<b>Caso em estudo</b>	$V \approx 3,56 \text{ m}$	$V \approx 25\%k$	$d \approx 0,64\%k$

### 2.1.3 Carregamento

O carregamento utilizado no caso em estudo é aplicado em vários tipos de trabalhos como os usados na construção ou para desmontes de produção, com uma inclinação dos furos próxima da vertical. Na carga de fundo é usado um explosivo de elevada potência e na carga de coluna é utilizado ANFO (*Ammonium nitrate fuel oil*) a granel. Nem sempre é possível o uso de material granulado, devido a quantidade de água no furo, por isso existe variação do consumo dos explosivos de desmonte para desmonte.

Em primeiro lugar deve verificar-se o estado de limpeza do furo e a sua profundidade, em seguida distribui-se o material a utilizar por furo, depois prepara-se o cartucho escorvado, formado pelo detonador e o cartucho de explosivo, que é o primeiro a entrar até ao fundo do furo. Após esta operação insere-se no furo a restante carga de fundo constituída por emulsão encartuchada e consequentemente carrega-se com o ANFO a granel até ao tamponamento desejado. Este trabalho é repetido para todos os furos, com a excepção de furos com água, estes devem ser carregados com cartuchos até o furo não conter água ou até se obter o tamponamento desejado.

### 2.1.4 Parâmetros geométricos

O propósito do desmonte em bancada é facilitar a fracturação e deslocar a massa de rocha para ser carregada.

Existem vários parâmetros que influenciam a fragmentação no desmonte em bancada, sendo os mais importantes as propriedades do maciço e a geometria do diagrama de fogo. Descrevo as terminologias do diagrama de fogo que se apresentam na figura seguinte.

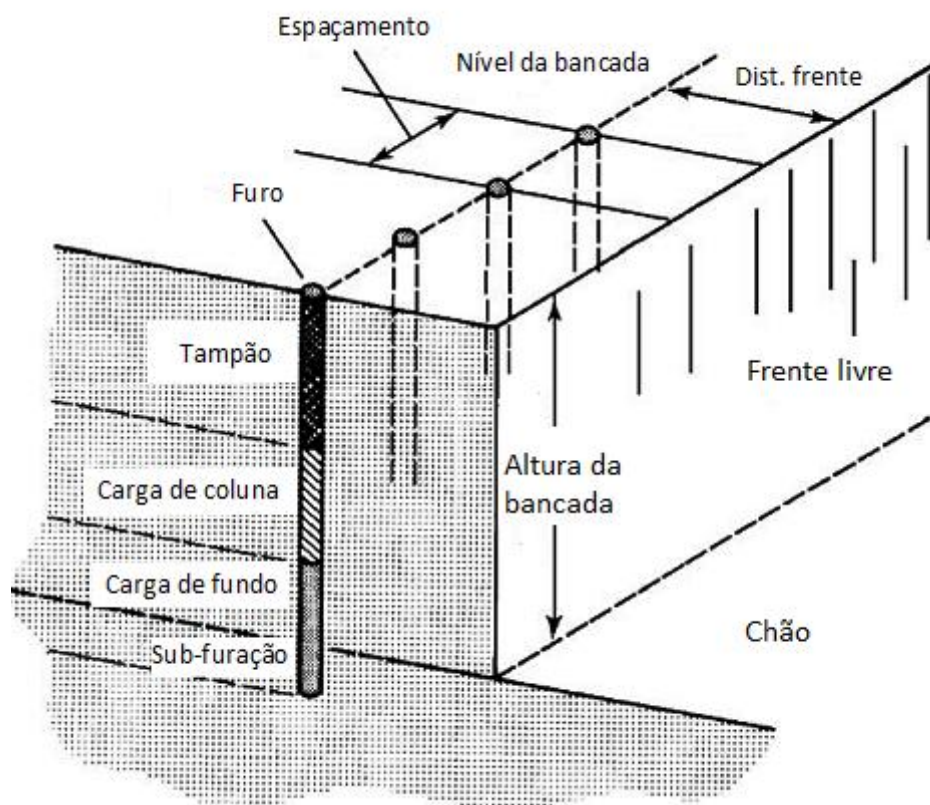


Figura 2 – Geometria do desmonte em bancada (Latham, et al, 2006)

- Diâmetro do furo

A escolha do diâmetro do furo depende muito do volume pretendido a desmontar num determinado período de tempo. Para um dado equipamento de perfuração, quanto maior for o diâmetro do furo praticado, maior será a produção em m<sup>3</sup> de rocha desmontada. A escolha do diâmetro do furo é condicionada por vários factores, tais como:

Fragmentação pretendida – quanto maior o diâmetro do furo maior será o calibre do material desmontado.

Controlo de vibrações – utilizando as boas técnicas de iniciação, as vibrações provocadas no maciço rochoso, serão tanto maiores quanto maior for o diâmetro do furo/diâmetro do explosivo.

Controlo das projecções – quanto maior é o diâmetro maior será a concentração de carga no furo, como tal, aumentará o perigo de projecções no caso de desvio de furação ou mau tamponamento.

Altura da bancada – o aumento da altura da bancada obriga, para se reduzirem os desvios de furação, (excepto quando a perfuração é feita com martelo de fundo de furo) o uso de material de perfuração (aço) de maior diâmetro, o que implica um maior diâmetro de furo. (Gomes et al, 2004/2005)

- Inclinação dos furos

A execução de furos verticais é mais fácil de realizar do que furos inclinados, mas o risco de se obter irregularidades na base da bancada e de resultar num corte incompleto é elevado. Se já existe uma base irregular devido a desmontes anteriores, com furos verticais eles vão continuar ao longo de todas as fiadas porque o corte na base é feito por ângulos rectos. A figura 3, mostra um desmonte com irregularidade na segunda fiada e que continua para as seguintes

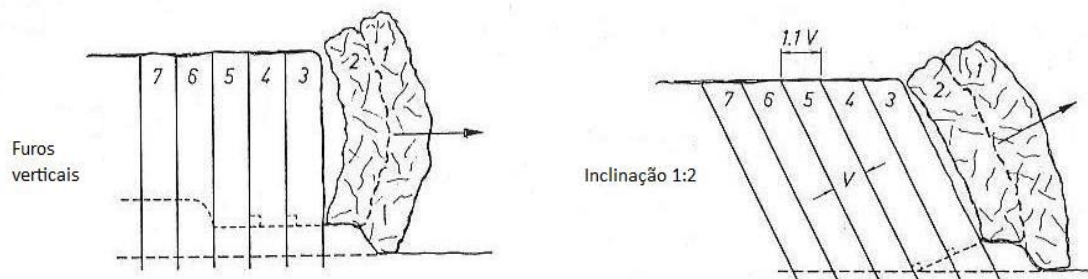


Figura 3 – Com furos inclinados os rapés desaparecem após uma ou duas fiadas (Langefors e Kihlström, 1967)

Como os furos inclinados provocam um maior aproveitamento da energia do explosivo, uma menor fricção na base da bancada, uma maior quantidade de rocha pode ser extraída com o mesmo número de furos mais compridos. Consegue-se assim um aumento na ordem dos 10 a 15%, o que é o mesmo que dizer que a distância à frente poderá ser aumentada cerca de 5 a 7,5% para uma inclinação de 2:1 ou 3:1.

A qualidade do paramento após desmonte é também uma mais-valia pois diminui a sobre quebra, aumentando assim a qualidade da próxima furação. A diminuição deste efeito é considerável, como se vê na figura 4.

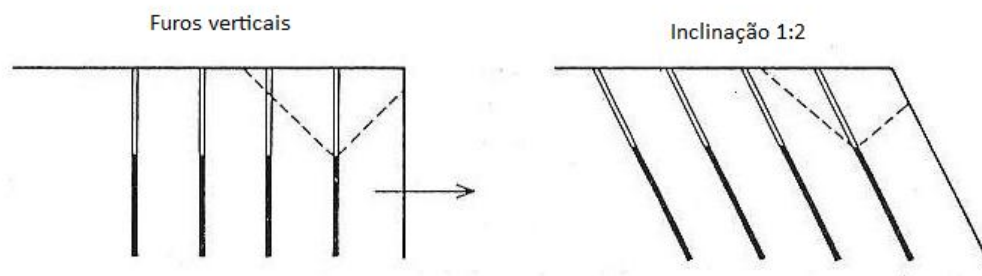


Figura 4 – Redução da quebra com furos inclinados (Langefors e Kihlström, 1967)

Na maior parte dos casos, para se conseguir uma melhor fragmentação deve distribuir-se a carga específica o mais possível por metro cúbico, tendo, no entanto, o cuidado para não se provocar sub-carga para não produzir projecções nem originar consumo excessivo de explosivo.

- Altura da bancada

A altura de bancada poderá em certos casos ser limitada por especificações de projecto, devendo no entanto atender às seguintes condições:

Alturas maiores – quanto maiores os diâmetros de furação, maiores as concentrações de carga, por isso, é mais difícil controlar as projecções, maiores os danos e mais irregulares serão os taludes finais de escavação. Maiores desvios de furação dão origem a maiores irregularidades nos paramentos finais, com maiores hipóteses de mau funcionamento do desmonte. A percentagem de calibres de maior dimensão aumenta, usando a mesma carga específica.

A altura máxima da bancada é condicionada pela eficácia do equipamento, da capacidade do manobrador e do material de perfuração.

Em certas ocasiões de saturação da capacidade do equipamento de perfuração, por diminuição de rendimentos do mesmo, a redução da altura da bancada permite um aumento da produção traduzindo-se em metro cúbico de material desmontado (Gomes et al, 2004/2005).

- Subfuração

Entende-se como subfuração a parte do furo que se prolonga além da base da bancada. Assim o centro de massa da carga de fundo encontra-se ao nível da base, reduzindo vibrações devido ao seu menor confinamento e obtendo um corte mais regular pela base. (Gomes et al, 2004/2005)

- Distância à frente e Espaçamento

A relação da divisão entre o espaçamento e a distância à frente pode variar entre valores superiores e inferiores a 1,25, sem afectar os valores de carga e perfuração específica. A relação superior a 1,25, conduz a uma fragmentação mais fina, mas se a relação for inferior a 1,25 é recomendada quando se pretendem calibres maiores (Gomes et al, 2004/2005).

A relação da geometria utilizada no caso em estudo é superior a 1,25 o que originou blocos de menores dimensões, mas as geometrias utilizadas no mesmo desmonte podem variar pois é normal, principalmente no inícios de frentes novas, que as cotas sejam menores ou mesmo com o inicio a zero e como tal é necessário reduzir as geometrias de furação para que o resultado não fuja ao estimado.

- Carga de fundo

A carga de fundo apresenta uma maior força explosiva para compensar o aumento de confinamento que existe na base da bancada, sendo responsável pelo arranque pela base do desmonte em bancada.

- Carga de coluna

A carga de coluna ocupa a maior parte do furo e tem como função deslocar a parte superior da bancada que já se encontra em movimento descendente, ajudada pelo peso da gravidade. Permite também o choque entre partículas, melhorando assim a fragmentação final.

- Tamponamento

O tamponamento é a parte superior do furo que não é carregada, esta parte é preenchida por um material preferencialmente granular para aumentar o confinamento do furo conseguindo com isso um maior rendimento do explosivo. Como é do conhecimento geral, esta zona vai ter uma fragmentação deficiente, mas reduz o risco de projecções e confina o explosivo dentro do furo. (Demenegas, 2008)

- Carga específica

Define-se carga específica, como sendo a quantidade de explosivo, expressa em quilogramas, necessária para desmontar um metro cúbico de rocha (Gomes et al, 2004/2005).

Para se obter uma boa fragmentação e partido do princípio que se mantém a geometria de furação aumentado a carga específica consegue-se um nível da fragmentação mais elevado. Isto pode ser realizado aumentando o comprimento da carga de coluna e diminuindo o tamponamento, já que a carga de fundo contém a carga óptima conseguindo-se assim uma fragmentação muito satisfatória nesta zona. Ao realizar isto obtemos uma melhor fragmentação embora o risco de projecções seja mais elevado.

## **2.2 Explosivos**

Segundo Gomes: “Explosivo é um composto químico, constituído fundamentalmente por substâncias combustíveis (ricas em carbono) e substâncias comburentes (ricas em oxigénio), que quando estimuladas por uma fonte de energia térmica ou mecânica (impacto, fricção ou choque) se decompõe bruscamente, libertando um elevado volume de gases e alta temperatura e pressão”, isto é, trata-se e “Uma substância ou mistura de substâncias que, devidamente estimuladas numa pequena parte da massa, se converte, num intervalo muito pequeno de tempo, em outras substâncias mais estáveis, essencialmente gasosas, que ocupam um volume muito maior que o explosivo no seu estado original”. Podemos dizer que quando activados por uma fonte de energia térmica ou mecânica podem reagir rapidamente libertando um grande volume de gases, a alta pressão e temperatura. A energia libertada por este processo é capaz de provocar a rotura de qualquer maciço rochoso. (Gomes et al, 2004/2005)

Se a reacção de decomposição se move através do explosivo a uma velocidade superior à do som, diz-se que há detonação e quando a velocidade da reacção é mais baixa que a velocidade do som há

deflagração. Podemos neste caso afirmar que, o explosivo quando reage lentamente deflagra e quando reage rapidamente detona. Quando um explosivo detona, liberta-se uma grande quantidade de energia a grandes temperaturas e pressões.

A temperatura varia entre 3.000 °C e 4.000 °C com a pressão acima das 100.000 atmosferas. (Gomes et al, 2004/2005)

Todos os materiais utilizados, por mais seguros que sejam, não dispensam no seu manuseamento dos equipamentos de protecção adequados para o efeito. Devem ser evitadas grandes pressões, impactos, fricção e fontes de calor, pois a sua detonação acidental pode ocorrer nestas situações.

Um dos tipos de explosivo utilizado é da gama das emulsões, capaz de libertar uma elevada quantidade de energia durante a sua detonação, usado tanto na carga de fundo como na carga de coluna. Este produto, além de inodoro, possui baixo grau de toxicidade e é sensível só ao detonador ou a outro explosivo, apresentando assim um elevado grau de segurança no seu manuseamento.

O explosivo mais usado na carga de coluna é o ANFO, possui como principal característica a libertação de uma elevada quantidade de gases, que entra nas descontinuidades do maciço provoca a sua fragmentação. O carregamento é realizado a granel, melhorando a contacto entre o ANFO e as paredes do furo, conseguindo-se que a energia libertada passe na totalidade ao maciço rochoso. A grande quantidade de gases tóxicos que este explosivo produz não permite uma imediata deslocação ao local do desmonte para se verificar o seu estado, pois é necessário esperar cerca de quatro a cinco minutos antes que se dissipe por completo na atmosfera ou que seja deslocado pelo vento para outra posição. A sua utilização é também limitada se existirem furos com água pois ele dissolve-se na água, razão pela qual que não é sempre usado.

- Emulsão

A emulsão é composta por uma solução de nitrato de amónio misturado com outros oxidantes, dispersos numa fase aquosa, que é composta por uma mistura de minerais, óleos e cera. Na figura 5 (esquerda) podemos ver um esquema demonstrativo desta mistura.

A mistura de óleo e cera permite uma elevada superfície de contacto com o oxidante, a solução de nitrato de amónio. O que distingue a emulsão de outros explosivos líquidos é a sua capacidade de detonar sem a adição de um sensibilizante, que é por si só um explosivo.

Para provocar a sua iniciação é necessário criar pequenas cavidades na emulsão em forma de microbalões com um diâmetro com cerca de um décimo de milímetro (figura 5 direita). Assim os microbalões através da onda de choque provocada por um iniciador entram em rotura, criando múltiplos locais onde a temperatura é suficientemente elevada para iniciar a combustão do explosivo.

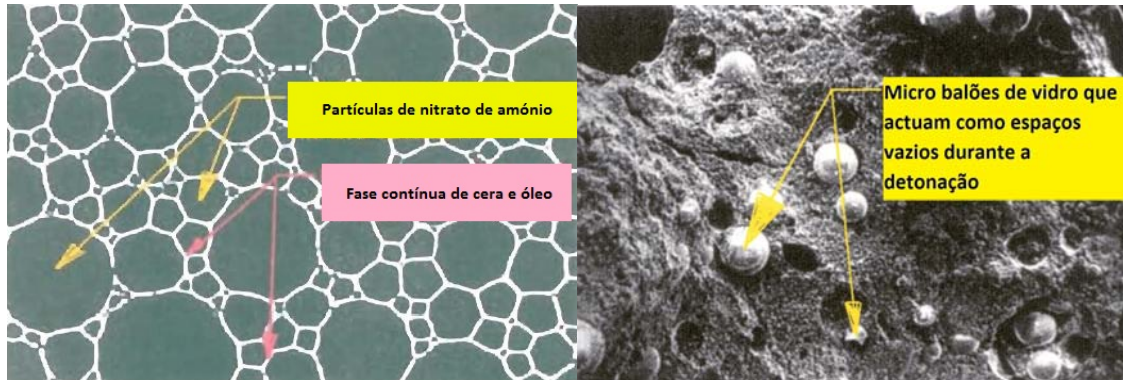


Figura 5 – Solução da emulsão e pormenor micro esferas na emulsão (Olofsson, 2002)

A densidade do explosivo e a sua capacidade de ignição pode ser ajustada com a quantidade de microbalões na emulsão. A velocidade de detonação é elevada para as emulsões mas pode diminuir com diâmetros mais reduzidos.

Graças ao facto da solução aquosa de nitrato de amónio na emulsão estar completamente envolvida pelo óleo e cera, ele é impermeável, adquirindo assim uma elevada resistência à água. Do ponto de vista do manuseamento é muito segura, sendo necessário uma elevada força de impacto para que a sua iniciação accidental. (Olofsson, 2002)

- ANFO

É sem dúvida o explosivo civil mais usado em todo o mundo. É considerado um agente explosivo e, por isso, necessita de ser iniciado por um explosivo capaz de promover a sua iniciação. Este deverá ter um diâmetro o mais aproximado possível do diâmetro do furo e o comprimento suficiente para produzir uma iniciação estável. Considerando que uma iniciação com um velocidade inferior a 2000 m/s não é estável.

Testes demonstram que uma iniciação do ANFO com elevada velocidade de iniciação aumenta a velocidade inicial do ANFO, conseguindo assim um aumento de rendimento (figura 6).

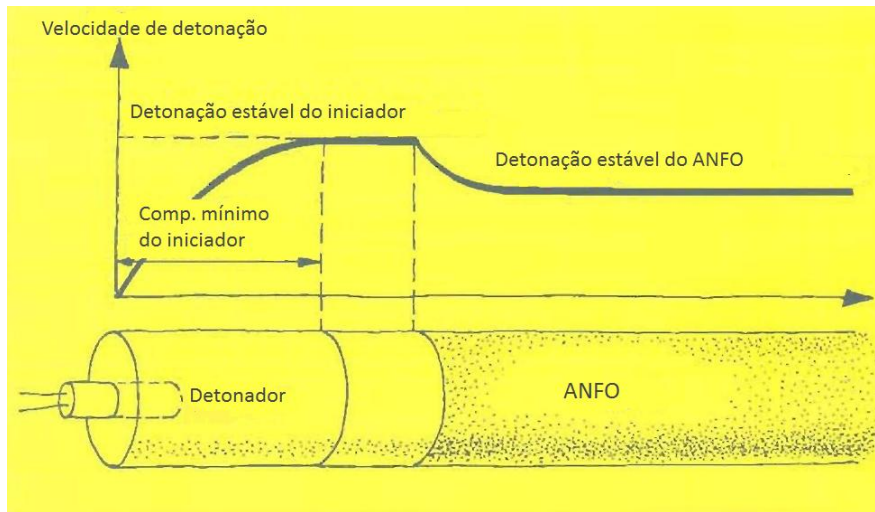


Figura 6 – Velocidade de iniciação do ANFO (Olofsson, 2002)

A velocidade de detonação muda com os diâmetros de furação, e atinge o seu pico de 4400 m/s com diâmetros de furo de 250 mm, mas com diâmetros de furação inferiores a 25 mm a detonação não é estável. Assim, concluímos que o ANFO apresenta maiores vantagens, quando usado em diâmetros de furação de maior diâmetro, em maciços sem humidade.

O ANFO apresenta uma impermeabilidade extremamente baixa, por isso, caso o seu carregamento seja realizado em furos com água, é necessário encamisar o furo, protegendo-o assim da água. (Olofsson, 2002)

### 2.3 Acessórios de tiro

Todos os acessórios de tiro utilizados no caso em estudo são do tipo não eléctricos, mais propriamente do sistema NONEL (*Nonelectric Blast Initiation System*).

Este sistema é vantajoso quando aplicado em diagramas de fogo em que o comprimento largamente excede a largura, como no desmonte em valas, pois o desmonte fica extremamente limitado com detonadores de eléctricos devido ao seu limitado número de tempos.

Este sistema permite um número ilimitado de tempos, consistindo num detonador no fundo do furo com uma temporização de 475 milissegundos (outras temporizações estão disponíveis) e um ligador na superfície de cada furo com temporizações de 17, 25, 42 e 67 milissegundos (outras temporizações estão disponíveis).

A temporização por furo é a soma do detonador no fundo do furo com o ligador na superfície do mesmo. Assim, como a diferença de tempo entre o detonador e o ligador é significativa, o perigo de corte de ligações à superfície é extremamente diminuto.

Na figura seguinte podemos visualizar não só o tipo de ligação utilizada mas também o método de ignição usada. (Olofsson, 2002)



Figura 7 – Ligação e união NONEL do desmonte (Olofsson, 2002)

O tipo de ligação utilizada no caso em estudo denomina-se “em linha”, pois apresenta ligações ao longo da largura com um atraso para as linhas seguintes no primeiro furo de cada linha. A linha do desmonte usada é também do tipo NONEL (existem outros tipo de linha, nomeadamente a eléctrica), que usa o mesmo tipo de material que os detonadores e ligadores. Assim, para efectuar a sua ligação para a passagem da onda de choque é necessário um tubo de plástico como se vê no pormenor da figura 7. Este tubo tem um diâmetro exterior superior e o interior é ligeiramente inferior, para que os tubos dos ligadores entrem neste com uma certa pressão.

Após completo este processo só precisamos de uma fonte de energia para dar início ao desmonte de rocha; para isso é utilizado o DynoStart. Este sistema é ligado ao desmonte pelo tubo NONEL, que é iniciado através de uma faísca produzida pelo DynoStart directamente no tubo NONEL. A figura 8 demonstra este processo.



Figura 8 – Iniciação do tubo NONEL pelo DynoStart (Olofsson, 2002)

### 2.3.1 Temporização

A temporização influencia a quantidade de blocos que se obtêm na pilha de desmonte, comprovadas em experiências de trabalhos de renome.

Langefors e Kihlström descrevem uma dessas experiências realizadas por Malmgren e Berglundque. Eles fizeram a contagem dos blocos que apareciam na pilha, com dimensão superior a 40cm, com desmontes de uma só fiada. Chegando à seguinte conclusão: com 10 milissegundos obtêm-se fragmentos de dimensões médias, com 20 milissegundo consegue-se fragmentos grandes e pequenos e com 30 milissegundos fragmentos na sua maior parte grandes. Conseguindo melhores resultados com a temporização de 10 milissegundos. Outra experiência realizada por Mecir e Valek demonstra que no intervalo de 15 a 300 milissegundos a fragmentação é melhor com tempos menores.

Com distâncias à frente pequenas e tempos iguais ou superiores a 20 milissegundos não se obtêm um intervalo de tempo elevado mas sim um intervalo suficiente para a deslocação da rocha. A experiência obtida em pedreiras de calcário com distâncias a frente ente 5 a 8 m diz-nos que a melhor fragmentação é conseguida com tempos entre 20 a 40 milissegundos, obtendo-se uma fragmentação constante ao longo da pilha. Se a geometria de furação for cuidada consegue-se dentro de certos limites controlar o tamanho dos blocos de modo a não ultrapassar a capacidade do equipamento de carregamento. Janelid traduziu para um quadro (quadro 3) a relação do consumo de explosivo dos desmontes com tempos instantâneos e temporizados.

Quadro 3 – Adaptado do consumo de explosivo em gramas por tonelada de explosivo (valores anuais) (Langefors e Kihlström, 1967)

Método de desmonte	Ano	Nº de desmontes	Consumo de explosivo		
			Desmonte primário	Desmonte secundário	Total
Instantâneo	1947/48	23	95,5	29	124,5
Retardada	1948/49	48	100,1	12,4	112,5

Estes dados são referentes também a uma pedreira de maciço calcário, com bancadas de altura entre 15 a 20m, com 5m de distância a frente, espaçamento de 6m e tempos entre 20 a 25 milissegundos. A eficiência do explosivo subiu na ordem dos 10% quando se temporiza os furos em comparação com os instantâneos com o inconveniente do aumento em 10% no número de blocos que necessitaram de desmonte secundário, mas o consumo de explosivo baixou cerca de 43%, sendo aceitável o aumento de blocos para desmonte secundário.

Neste caso em concreto a temporização utilizada é: 25 milissegundos para a primeira fiada e 42 milissegundos para as seguintes, como demonstram as figuras que se seguem.

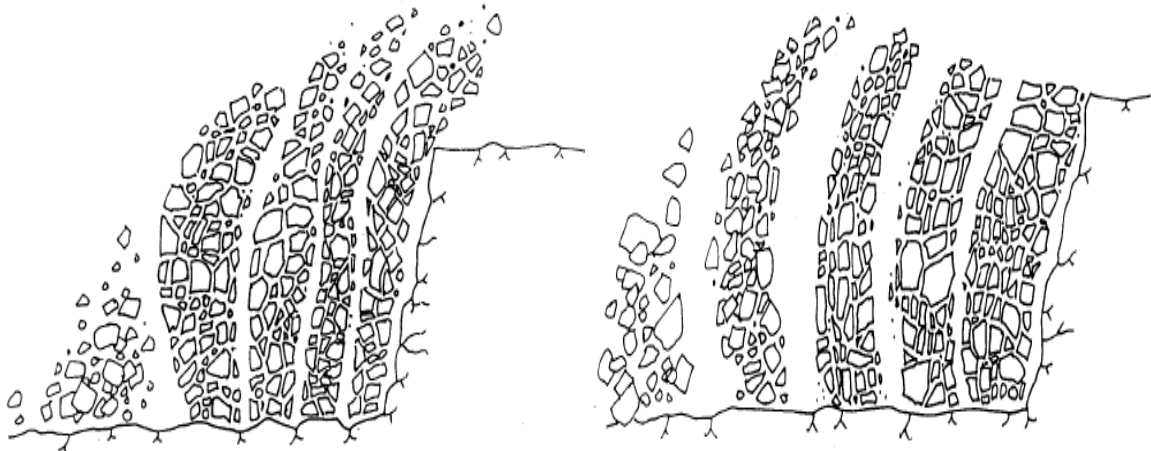


Figura 9 – Intervalos de tempo muito curtos e intervalos de tempo perfeitos (Olofsson, 2002)

A figura 10 mostra o tipo de ligação usada, sendo denominada por “ligação por linhas”, consistindo em ligar de maneira corrida todos os furos da mesma linha ao longo do seu espaçamento, com uma temporização de 25 milissegundos entre cada furo. Para fazer a ligação de cada linha, ao longo da distância a frente, utilizou-se, no caso em estudo, 42 milissegundos.

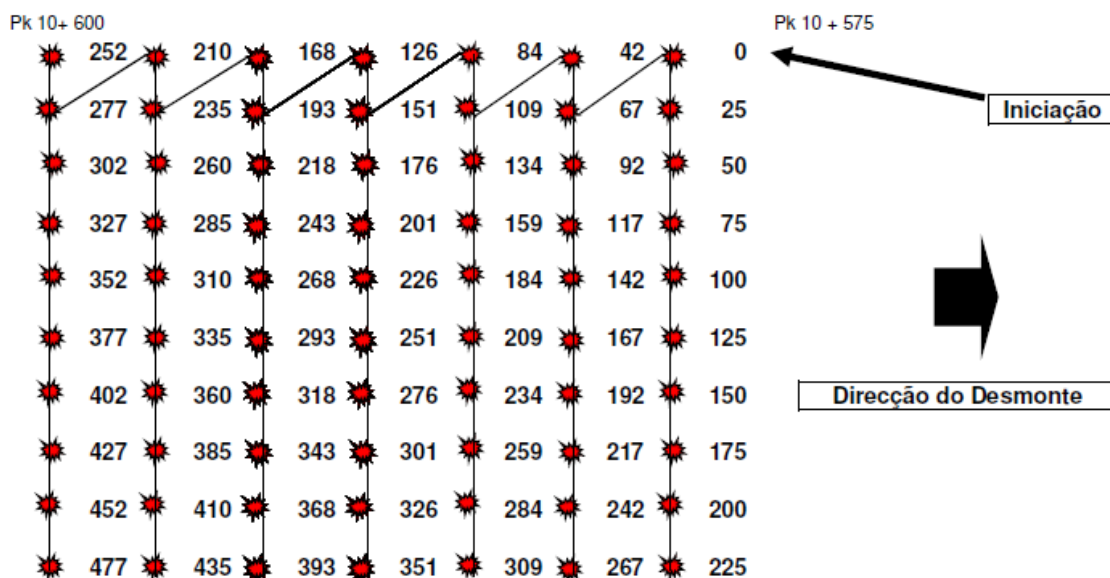


Figura 10 – Ligação e temporização

Os detonadores são, com já referido, de 475 milissegundos, que somando as temporizações superficiais dá tempo suficiente para iniciar todos os ligadores ou para oferecer uma avanço considerável para evitar cortes acidentais.

**3**

**METODOLOGIAS E TÉCNICAS UTILIZADAS**



### 3 METODOLOGIAS E TÉCNICAS UTILIZADAS

#### 3.1 Introdução

De acordo com o que ficou já devidamente salientado, a distribuição granulométrica é uma componente essencial para se verificar o nível de fragmentação. Antigamente, a única forma de controlar essa granulometria era parar a produção e recolher manualmente as amostras, passá-las por um conjunto de telas classificando os fragmentos e, posteriormente, construir a curva granulométrica da amostra. Este método é lento, pesado, penoso e impraticável para fragmentos com dimensões com tamanho elevado, mesmo classificando através de uma serie de peneiro que oferece uma maior precisão, o tamanho da amostra é relativamente pequena tornando os resultado menos representativos (Palangio & Palangio, 2005).

Em 1987 foi desenvolvido o primeiro sistema de análise óptica, que ofereceu as vantagens de velocidade e facilidade de uso. (Palangio & Palangio, 2005)

#### 3.2 O modelo *Kuz-Ram*

O modelo *Kuz-Ram* é muito simplista, pois tenta calcular um conjunto de parâmetros através de um conjunto de factores empíricos. Este modelo não tem em conta a fragmentação proveniente de desmontes anteriores, que provocam o impacto no corte do desmorte que cria fissuras na nova frente criada. Portanto, parte do pressuposto que a maioria da rocha entre furos partirá pelas discontinuidades o que pode resultar num erro na estimativa da curva granulométrica.

##### 3.2.1 Avaliação pré-desmorte

A avaliação pré-desmorte é definida através de qualquer factor variável da rocha ou maciço rochoso que seja passível de ser medido, que foi determinado ou possa ter um efeito potencial na fragmentação por desmorte. Esses factores dividem-se em: *propriedades do maciço* e *desmontes consecutivos*.

O estudo da fragmentação deve ser realizado com um elevado conjunto de amostragens de modo a ganhar influência em vários factores.

- Propriedades do maciço

A rocha tem propriedades físicas e mecânicas que podem ser enumeradas e avaliadas numericamente. Muitos destes atributos afectam o desmonte e conseqüente o seu resultado. A composição do maciço e a existência de falhas, fendas e zonas de fraqueza possui grande influência na qualidade da fragmentação.

- Desmontes consecutivos

Na escavação de rocha por meios de explosivos, os rebentamentos são raramente realizados sem que o maciço não tenha sofrido acção do rebentamento anterior.

### **3.2.2 Avaliação pós-desmonte**

A avaliação pós-desmonte é definida através de qualquer factor variável da rocha ou maciço rochoso que seja passível de ser medido e que seja um resultado directo do desmonte. Os factores da avaliação são decompostos nos seguintes: *pilha de escombros do desmonte* e *frente de desmonte*.

- Pilha de escombros do desmonte

Este factor afecta a escavação e o processamento do material do desmonte onde se incluem a selecção do material, carregamento, transporte e descarga, sem esquecer os processos de britagem.

- Frente de desmonte

Referimo-nos aos parâmetros que necessitam de ser tidos em conta após a escavação e que afectam o novo ciclo de desmonte. O desmonte não só parte em torno do furo mas também cria novas fracturas na nova frente e dilata as fracturas naturais descomprimindo o maciço. Mesmo que o maciço rochoso seja pouco fracturado pode ocorrer que na nova zona de desmonte ou em parte dela o maciço se encontre com um nível de facturação elevado.

### 3.3 *SPLIT-Desktop*

*SPLIT-Desktop* é um assistente para a medição da fragmentação por computador. Imagens digitais retiradas no campo são analisadas para a determinação da curva granulométrica da rocha em qualquer estágio do trabalho.

Este programa executa todos os passos de avaliação das imagens automaticamente, mas um deles exige uma concentração elevada, pois necessita de uma grande intervenção humana. A delimitação que é realizada pelo programa necessita de ajuste humano, pelo menos no tipo de imagens que foram utilizadas no caso em estudo, porque não se consegue delimitar com eficácia todos os blocos na imagem.

Para se obter um elevado nível de precisão utilizamos três ou quatro imagens para caracterizar cada desmonte de rocha. Esta escolha é realizada tendo em conta a qualidade da imagem que o programa exige.

No final obtém-se uma curva granulométrica global que reúne a análise realizada no conjunto de imagens de um mesmo desmonte de rocha, como vemos na figura 11. As restantes encontram-se no anexo 1.

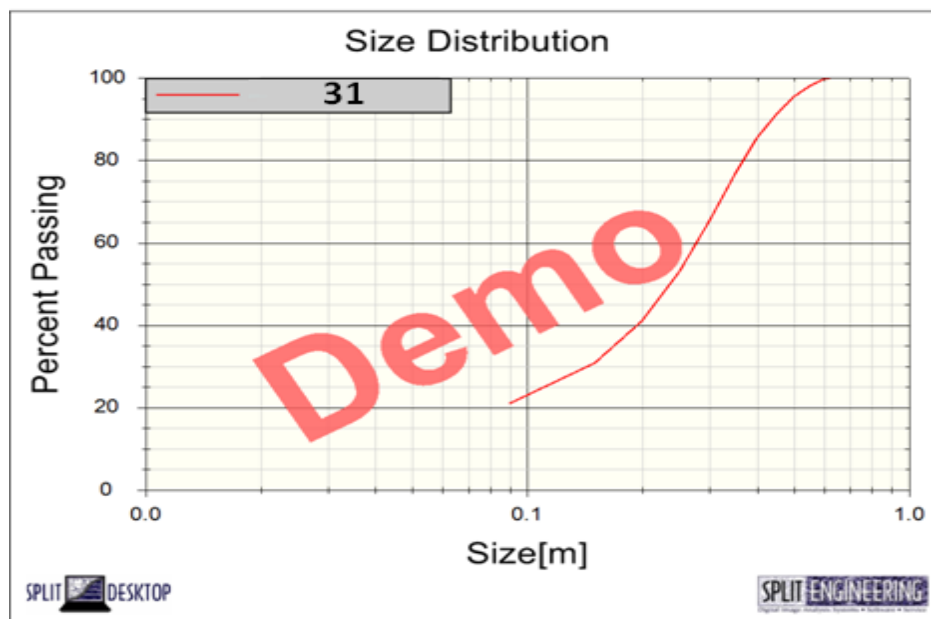


Figura 11 – Curva granulométrica pelo *SPLIT-Desktop* (Versão Demo).

### 3.3.1 Informação geral

O método aceita imagens de vídeo e imagens digitais. No presente estudo foram utilizadas apenas imagens digitais. O processo de transferência das fotografias para o computador é fácil pois a maior parte dos computadores detecta automaticamente as câmaras digitais evitando assim a aquisição de um programa próprio para esse fim. Recomenda-se o uso de uma câmara digital para retirar as fotografias para que a resolução seja o mais compatível com a resolução do *SPLIT-Desktop*.

Após tirar fotografias à de pilha de desmonte e passá-las para o computador. Ao Introduzir as imagens no *SPLIT-Desktop* este auxilia a caracterizá-las, depois detecta os fragmentos automaticamente e determina a distribuição granulométrica.

Ele permite que o resultado final seja expresso em vários formatos (linear – linear, logaritmo – linear e Rosin – Rammler).

### 3.3.2 Características e compatibilidades do *SPLIT-Desktop*

Os formatos compatíveis são: TIF, JPG e Windows BMP

- ✓ Captura de vídeo analógico com o Scion framegrabber;
- ✓ Captura de vídeo digital com o IEEE 1394 ;
- ✓ Processamento de imagens normalizados;
- ✓ Editores de imagens;
- ✓ Delineador automático das partículas de rocha;
- ✓ Identificação automático de finos ;
- ✓ Serie granulométrica ajustável;
- ✓ Curva granulométrica ajustável;
- ✓ Relatório em HTML e em texto ;
- ✓ Utiliza um algoritmo avançado para combinar as imagens em diferentes escalas ;
- ✓ Calculo automático dos parâmetros para as distribuições de Rosin – Rammler ou de Schumann.

### 3.3.3 Obtenção das imagens

Quando se pretende obter imagens da pilha de desmonte, o ângulo da pilha com o eixo da câmara deve ser considerado.

A forma usada neste trabalho, e a mais tradicional, consiste em colocar dois objectos (no presente estudo foram utilizadas duas bolas de futebol) com dimensões conhecidas na imagem, uma perto da base da pilha e outra perto do topo da pilha, como vemos na figura 12 (direita), mas também é possível usar só um objecto para escalar a imagem. É possível escalar a imagem sem qualquer objecto mas é necessário inserir manualmente a distância da câmara até a base da pilha e até ao topo da pilha, e a máquina necessita de ser calibrada para o efeito.

O *SPLIT-Desktop* foi desenhado para trabalhar com este método de medição e caracterizar qualquer imagem que utilize este método. Quando uma imagem com um ou dois objectos é inserida no programa, uma ferramenta de escala interactiva do programa é usada para as escalar como se vê na figura 12 (esquerda), passando a imagem a tons de cinzentos.



Figura 12 – Imagem depois de escalada pelo *SPLIT-Desktop*

### 3.3.4 Delineação

Uma vez escalada a imagem, o passo seguinte do *SPLIT-Desktop* consiste em delinear cada fragmento da rocha em cada imagem. Nesta versão um conjunto de ajustes foram inseridos para aumentar a precisão e ajustar o erro humano deste passo.

Em primeiro lugar, um novo algoritmo foi adicionado para corrigir as sombras. Em segundo aplica-se um algoritmo automático de *thresholding* (limite das partículas de rocha), pois anteriormente o *thresholding* era inserido pelo utilizador, que necessitava de uma certa experiência para o realizar. Assim consegue-se reduzir o tempo de treino e produção quando se utiliza o *SPLIT-Desktop*.

Depois de se realizar o *thresholding*, o *SPLIT-Desktop* detecta automaticamente os fragmentos usando um conjunto de algoritmos que se baseiam em quatro passos:

- ✓ Filtro do gradiente
- ✓ Análise das sombras
- ✓ Algoritmo da divisão
- ✓ Algoritmo de watershed

O resultado da delimitação automática é uma imagem binária que contem partículas brancas num fundo negro. A figura 13 é a imagem que resulta da delimitação da imagem da pilha de desmonte, num dos desmontes estudados.

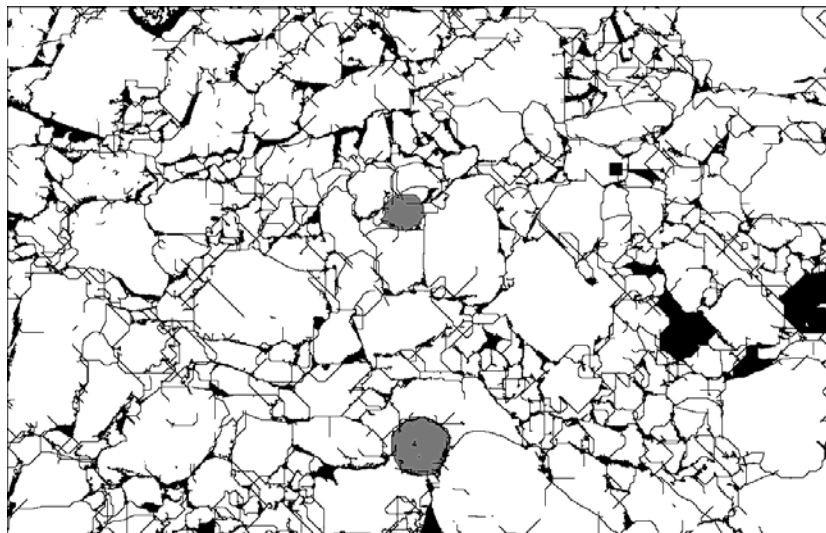


Figura 13 – Imagem da pilha de desmonte delimitada

As zonas negras contêm finos que são pequenos demais para serem individualmente delimitados mas que possuem uma elevada importância para se estimar a quantidade de finos.

### 3.3.5 Controlo da delimitação

Na maior parte das imagens da pilha de desmonte existe um instante em que o algoritmo do *SPLIT-Desktop* não delimita os fragmentos com precisão. Seja devido a falta de luz, elevada quantidade de finos na imagem ou por a resolução da imagem ser baixa, o *SPLIT-Desktop* necessita de uma delimitação manual para ultrapassar este problema usando as ferramentas que o programa tem à disposição para estes casos.

Existem três casos em que é necessário editar a imagem. Primeiro, se existe grande quantidade de finos na imagem, o *SPLIT-Desktop* confunde os finos e traduz estes como um bloco de grandes dimensões. Em segundo, se a imagem possui elevado “ruído” (devido ao ângulo da imagem, da textura da rocha, etc.) o *SPLIT-Desktop* pode dividir este fragmento em fragmentos mais pequenos. Em terceiro, algumas partículas que são delimitadas não são finos nem fragmentos, como as bolas para servir de escala como vemos na figura 12 (direita).

O *SPLIT-Desktop* possui um conjunto de ferramentas para estas situações. O programa faz a avaliação das imagens, escala-as e delimita-as, mas cabe ao utilizador dar o ajuste final à imagem para que esta seja um retrato rigoroso da realidade.

### 3.3.6 Análise da dimensão

Com os fragmentos já delimitados, estamos prontos para seguir para o próximo passo que consiste em usar as características dos fragmentos para calcular a distribuição granulométrica. Estas características incluem a área e dimensões de cada fragmento e a área das regiões de vazios.

O segundo passo é determinar uma distribuição realista do material fino. Aqui temos duas opções, a distribuição de Schumann e a distribuição de Rosin-Rammler. Cada uma delas tem dois parâmetros desconhecidos, sendo estes parâmetros determinados através de dois pontos conhecidos da distribuição granulométrica.

A parte da curva que aparece a cinzento é referente à estimativa de finos como se pode verificar na figura 14.

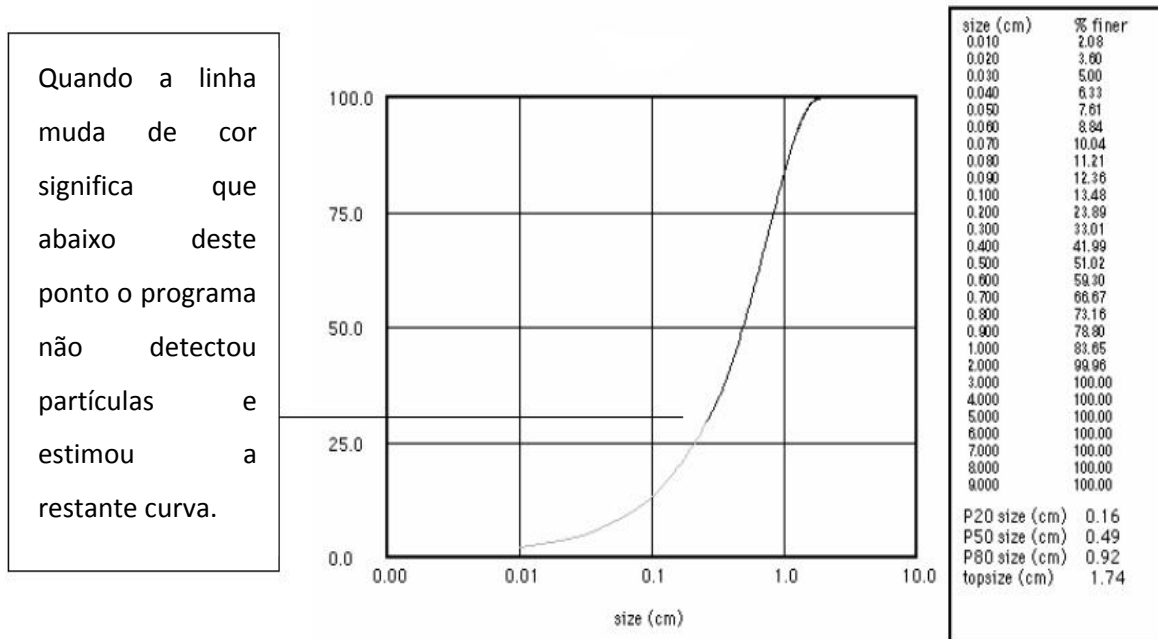


Figura 14 – Estimativa da curva de fino (*SPLIT-Net* Manual de instruções formato PDF, 2003-2004)

### 3.3.7 Resultados

Uma vez a curva granulométrica calculada, *SPLIT-Desktop* consegue mostrar esta informação de quatro maneiras diferentes: demonstração Linear – linear, demonstração logarítmica – linear, demonstração logarítmica – logarítmica e demonstração Rosin – Rammler. A figura 14 é um exemplo de uma demonstração logarítmica – linear.

A maneira como o resultado aparece no ecrã pode ser alterada para uma melhor adaptação a cada caso. A distribuição granulométrica e a percentagem de passados são convertidos em ficheiros e armazenados no computador em formato de texto para poderem depois ser usados para avaliação ou por outros programas.

### 3.3.8 Validade e precisão

Em 1995, o Noranda Technology Center, realizou um conjunto de testes de validação. Três sistemas foram usados: *Fragscan*, *Wipfrag* e *SPLIT-Desktop*, para a medição da curva granulométrica de uma pilha de desmonte de Holloway Joint Venture, e os resultados foram comparados com a curva granulométrica real. Uma pilha de rochas foi dividida em quatro partes. Uma das partes foi utilizada

para determinar a curva granulométrica real e as outras três para cada um dos programas referidos. A comparação real entre eles, entre outros detalhes pode ser consultada na análise efectuada por Lui e Tran (1996).

Recentemente as mesmas imagens foram usadas na nova versão do *SPLIT-Desktop*, tendo as maiores alterações sido detectadas nos finos. Estes resultados apresentam-se na figura 15. A demonstração de cima é linear – linear e a de baixo é logarítmica – linear, a distribuição de Schumann foi utilizada para os finos. Estas demonstrações juntas mostram que o *SPLIT-Desktop* consegue uma precisão elevada tanto nos finos como nos fragmentos quando comparado com a curva granulométrica real.

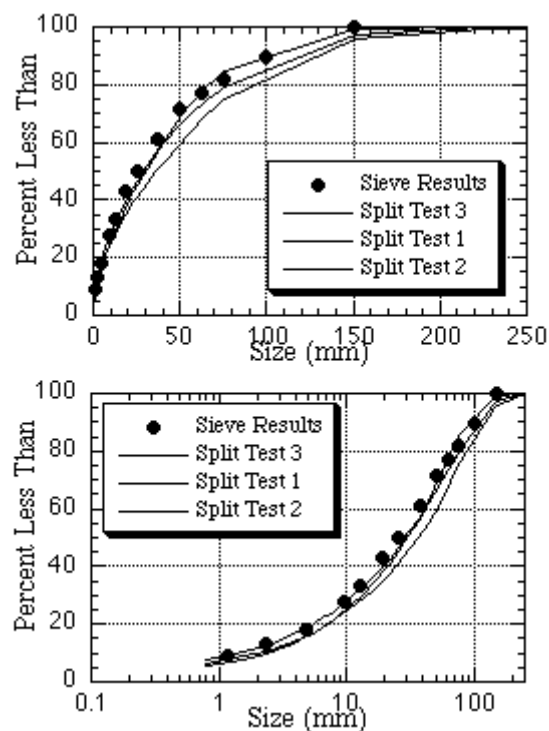


Figura 15 – Imagem da pilha de desmonte delimitada (*SPLIT-Net* Manual de instruções online em [www.spliteng.com](http://www.spliteng.com))

### 3.4 Kuz-Ram

As características das rochas, as propriedades dos explosivos e as mudáveis geométricas do plano de fogo são articuladas usando um conjunto de cinco equações que compõem o modelo de fragmentação *Kuz-Ram*.

### 3.4.1 Equação de Kuznetsov

A relação entre o tamanho médio do fragmento e a energia de detonação aplicada por unidade de volume de rocha, isto é, a razão de carga, foi desenvolvida por Kuznetsov em 1973, como uma função do tipo de rocha. Esta equação foi alterada por Cunningham (Formula 1) em 1983 e apresenta-se da seguinte forma:

$$X_{50} = A \times (K)^{-0,80} \times Q_e^{0,167} \times \left[ \frac{115}{Er} \right]^{0,633}$$

(1)

Onde:

$X_{50}$  – é o tamanho médio de partícula (cm).

$A$  – é o factor da rocha.

$K$  – é a carga específica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$Q_e$  – é a massa do explosivo utilizado (kg).

$E_r$  – representa a energia relativa em massa do explosivo comparada ao ANFO (ANFO=100).

### 3.4.2 Equação de Rosin-Rammler

A distribuição da dimensão dos fragmentos é apresentada pela equação de Rosin-Rammler (Formula 2):

$$P = 100 \times \left[ 1 - e^{-0,693 \times \left( \frac{x}{x_{50}} \right)^n} \right]$$

(2)

Onde:

$X$  – é o tamanho da malha da peneira.

$X_{50}$  – é o tamanho médio de partícula

$n$  – é o índice de uniformidade.

$P$  – é a percentagem de material passante no peneiro de tamanho  $X$ .

### 3.4.3 Índice de uniformidade de Cunningham

O índice foi desenvolvido por uma componente prática de campo por Cunningham (Formula 3) em 1987 e que correlaciona todos os parâmetros geométricos do plano de fogo, como se demonstra:

$$n = \left[ 2,2 - 14 \times \left( \frac{B}{D} \right) \right] \times \left[ \frac{(1 + S/B)}{2} \right]^{0,5} \times \left\{ \left( 1 - \frac{W}{B} \right) \times \left[ abs \times \frac{(BCL - CCL)}{L} + 0,1 \right]^{0,1} \times \left( \frac{L}{H} \right) \right\}$$

(3)

Onde:

$B$  – é o afastamento (m).

$CL$  – é o comprimento da carga de fundo (m).

$S$  – é o espaçamento (m).

$CL$  – é o comprimento da carga de coluna (m).

$D$  – é o diâmetro do furo (mm).

$bs$  – é o valor absoluto referente a  $(BCL - CCL)/L$ .

$W$  – é o desvio da perfuração (m).

$H$  – é a altura da bancada (m).

$L$  – é o comprimento total de carga (m).

### 3.4.4 Equação de Tidman

A equação desenvolvida por Tidman (Formula 4) permite determinar a energia do explosivo e é dada por (Formula 4):

$$Er = \left( \frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 \times RWS$$

(4)

Onde:

$Er$  – é a energia relativa por massa efectiva do explosivo.

$VOD_e$  – é a velocidade de detonação efectiva do explosivo (medida em campo).

$VOD_n$  – é a velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s).

$RWS$  – representa a energia relativa por massa comparada ao ANFO.

### 3.4.5 Factor da rocha

Este factor (A) desenvolvido por Lilly em 1986 e actualizado por Cunningham em 1987, é função duma classificação geomecânica.

Quadro 4 – Classificação geomecânica para obtenção do factor da rocha (Cunningham, 1983). (Morais e Gripp, 2004)

Simb.	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Maciço rochoso	Fiável	10
		Fracturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço fracturado	JPS+JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10 m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Blocos acima da dimensão desejada da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direcção de mergulho com relação à frente livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direcção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha intacta, g/cm <sup>3</sup> )	RDI = 25d-50	
HF	se E < 50 GPa	HF = E/3	
	se E > 50 GPa	HF = UCS/5	
E	Módulo de Young (GPa)		
UCS	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)		

Na obtenção desse factor são usados os parâmetros da classificação do quadro 4, a qual engloba o tipo de rocha, a direcção e o mergulho das descontinuidades em relação à frente livre do desmonte. Após ser obtido pela fórmula que apresenta em seguida (Formula 5), esse factor é utilizado para ajustar o tamanho médio dos fragmentos.

$$A = 0,06 \times (RMD + JF + RDI + HF)$$

(5)

### 3.4.6 Factores de cálculo

Para efeito de cálculo deste programa é necessária a introdução de um conjunto de elementos empíricos. Passamos a explicar como recolhemos e inserimos a informação relativa ao caso em estudo, que o programa necessita para elaborar o resultado final:

- Propriedades da rocha

A densidade específica do quartzito é próxima de  $2,68 \text{ t/m}^3$  como se pode ver no quadro seguinte.

Quadro 5 – Adaptado do quadro representativo dos valores do peso específico para alguns elementos (Galery, Fragmentação de minérios)

Material	Peso específico (t/m <sup>3</sup> )
Quartzito	2,68
Quartzito	2,65

Este factor é o mais importante deste programa, pois identifica o tipo de maciço no qual se insere o presente trabalho, influenciando fortemente o resultado final.

O módulo de elasticidade e a força à compressão uniaxial podem ser obtidos laboratorialmente através do quadro que se segue.

Quadro 6 – Adaptado do quadro representativo dos valores do peso específico para alguns elementos (Palmström, 2001)

Valores médios dos testes de amostras de rocha	Testes globais		
	Força a compressão uniaxial (sc)	Módulo de elasticidade (E)	E/sc
Quartzito	209	58	276
Granito	154	48	313
Micaxisto	104	39	374

Estes factores apresentam uma elevada importância no desenvolvimento do cálculo, provocando alterações significativas no resultado final.

- Descontinuidades

Realiza-se um estudo das descontinuidades através da técnica de amostragem linear que consiste em colocar uma fita graduada em faces expostas do maciço e registrar algumas características (geométricas e mecânicas) de todas as descontinuidades por ela intersectadas, como se pode verificar na figura 16.

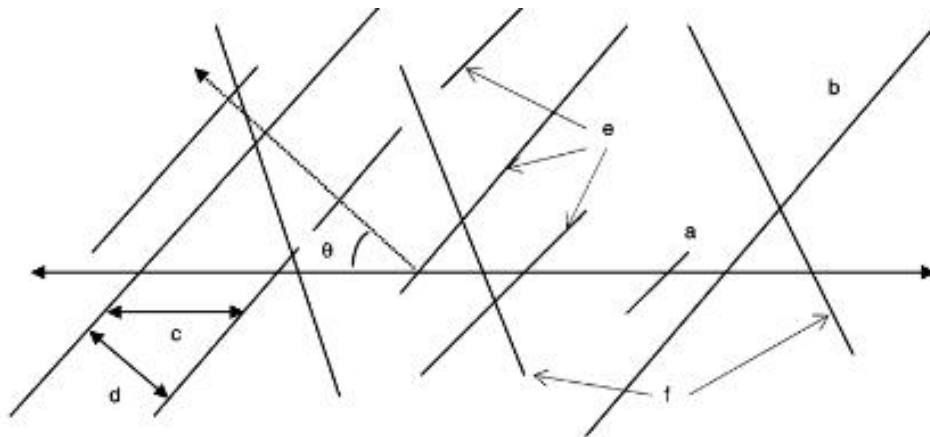


Figura 16 – Técnica de amostragem linear. (a) Descontinuidade interceptada; (b) descontinuidade persistente; (c) espaçamento; (d) espaçamento principal; (e) família principal; (f) família secundária (Latham, 2006)

Ao realizar o estudo das descontinuidades foi elaborado o seguinte quadro com todos os parâmetros do maciço rochoso como demonstra o exemplo do levantamento do maciço em estudo do desmonte número 31.

Quadro 7 – Exemplo do levantamento das descontinuidades do maciço em estudo

**GEOMECÂNICA**  
**FICHA DE LEVANTAMENTO Nº 1**

Data: 04-11-2009

Coordenadas do Ponto de Origem da Fita: 0

Orientação: *do Perfil:* N314E  
*da "Scanline":*

Alteração: Tipo: Ligeiramente alterada  
Class.: W2

Localização: A41

Litologia: Quartzito

Tipo de descontinuidade: Diaclase

Descontinuidade nº	Distância à origem (m) D	Atitude		Abertura	Espaçamento (m) F	Comprimento L	Terminação T	Curvatura C	Rugosidade R	Enchimento	Presença de água	Observações
		Dir.	Inc.									
P1	0,5	N51E	70SE	-	0	Persistente	D	1	1	-	Sim	-
P2	0,7	N12E	44NW	0,1	0,2	Interceptada	D	1	1	Rocha esmagada	Sim	-
P3	0,9	N8E	43NW	-	0,2	Interceptada	D	1	1	-	Sim	-
P4	1,4	N102E	79NW	-	0,5	Persistente	D	1	1	-	Não	-
P5	1,7	N15E	68NW	-	0,3	Interceptada	D	1	1	-	Sim	-
P6	1,8	N18E	77NW	-	0,1	Interceptada	D	1	1	-	Sim	-
P7	2,1	N17E	75NW	-	0,3	Interceptada	D	1	1	-	Não	-
P8	3,2	N10E	65NW	-	1,1	Interceptada	D	1	1	-	Sim	-
P9	3,4	N57E	74SE	-	0,2	Interceptada	D	1	2	-	Sim	-
P10	3,9	N11E	71NW	-	0,5	Persistente	D	1	1	-	Sim	-
P11	4,0	N111E	76NW	0,1	0,1	Interceptada	D	1	1	Rocha esmagada	Sim	-
P12	4,5	N106E	80NW	-	0,5	Interceptada	D	1	1	-	Sim	-

O espaçamento médio é determinado somando todos os espaçamentos a dividir pelo número de intercepções, de todas as descontinuidades que interceptam a fita graduada para cada levantamento (Palmström, 2005).

A posição tridimensional do bloco num determinado espaço do maciço rochoso pode ser calculada multiplicando o espaçamento por três, partindo assim do pressuposto que o bloco é cúbico (Palmström, 2005).

- Quantidades médias do explosivo

Para obter a força relativa em massa e a velocidade de detonação, procede-se da mesma forma trocando os valores do peso específico pelos valores da força relativa, da velocidade de detonação nominal e da velocidade de detonação efectiva, como mostra o seguinte quadro.

Quadro 8 – Quadro dos parâmetros médios usados no *Kuz-Ram*

	Velocidade de detonação (m/s)	Força relativa (%)	Densidade	31	33	34	35	37	40	43	50
Emulsão	5.600	195	1,25	1.400	2.347,5	2.550	3.357,5	1.687,5	2.490	1.195	860
ANFO	3.000	100	0,85	2.300	325	150		2.400	2.000	1.925	1.500
Velocidade de detonação (m/s)	4300			3.984	5.284	5.456	5.600	4.073	4.442	3.996	3.947
Força relativa		148		136	183	190	195	139	153	136	135
Densidade			1,05	1	1,2	1,23	1,25	1,02	1,07	1	1

O quadro em cima mostra todos os parâmetros dos desmontes realizados e os valores médios usados no modelo *Kuz-Ram*. As primeiras três colunas e linhas correspondem aos valores práticos, sendo os restantes valores médios utilizando os valores práticos.

### 3.4.7 Apresentação completa do modelo

Este programa não exige nenhum tipo de ajuste ou intervenção humana para a sua realização, realizando uma curva granulométrica para cada um dos desmonte de rocha utilizando todos os parâmetros que este programa exige, como podemos verificar na figura 18, remetendo as outras curvas granulométricas para o anexo 2.

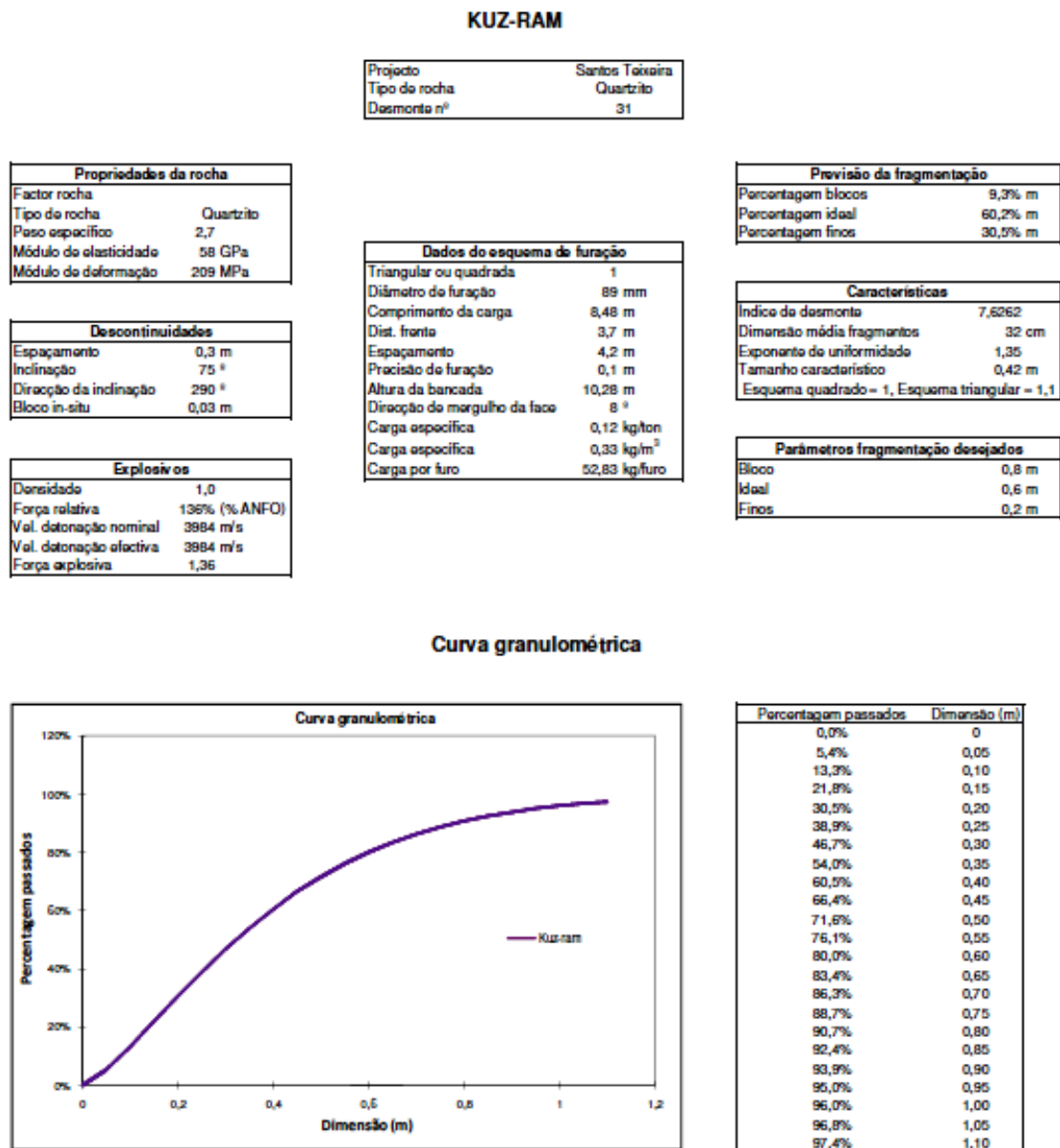


Figura 17 – Curva granulométrica pelo *Kuz-Ram*

Para a realização destas curvas granulométricas foi necessário estudar o maciço rochoso, para tal foi realizado um inventário dos parâmetros necessários como se apresenta anteriormente no quadro 7.

### 3.5 Modelos alternativos de classificação da fragmentação

Existem outros métodos capazes de determinar com alguma certeza na dimensão dos blocos resultantes do desmonte com explosivos, mas estes devem ser adaptados por sua vez a cada situação após alguns rebentamentos para desta maneira aumentarem o nível de confiança deste método.

Esta dimensão dos blocos tem significado para o processo de carga e transporte, como tal, devemos ter especial atenção ao dimensionamento do plano de fogo não só para se obter os calibres desejados mas também para uma redução de custos.

Neste método, a correlação entre o tamanho dos blocos que resultam do desmonte com explosivos e a carga específica é conseguida através da utilização de tempos com micro retardos e com distâncias à frente entre 10 e 0,25 m com alturas de bancadas que respeitam  $k=3V$  (figura 18).

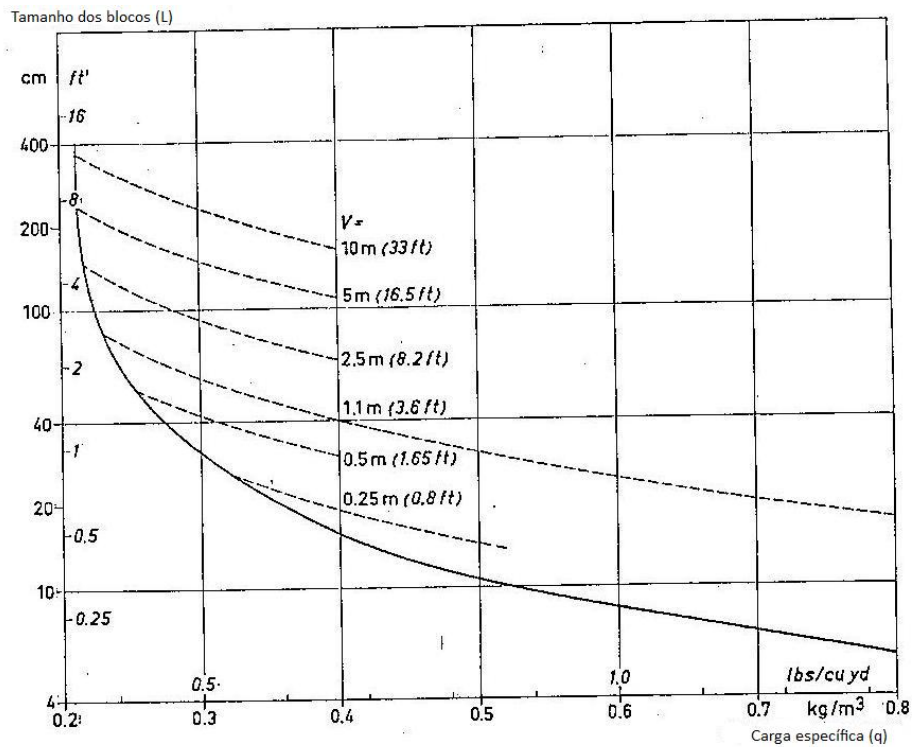


Figura 18 – Ligação entre o tamanho dos blocos do desmonte e a carga específica (Langefors e Kihlström, 1967)

Podemos desde já e sem efectuar quaisquer testes dizer que o tamanho dos blocos diminui com uma alta carga específica e com distâncias à frente pequenas. Uma grande carga específica significa blocos mais pequenos mas obtêm-se projecções indesejáveis, o mesmo se passa com a diminuição da distância a frente, pois, a mesma carga específica tem que vencer uma frente menor podendo dar origem a projecções.

Este exemplo consegue obter directamente o tamanho dos blocos, mas os parâmetros que o determina é a carga específica, não ajudando na elaboração de outros parâmetros como os do diagrama de fogo, para com mais pormenor obtermos a fragmentação desejada. Para este método será bom lembrar algumas noções:

- $S_{50}$  – Coeficiente de dimensão dos blocos

É a dimensão, em centímetros, da malha quadrada do crivo pela qual 50% em peso do material existente na pilha.

Quando este valor é conhecido é fácil determinar a curva e o fuso granulométrico. As experiências realizadas em diferentes locais mostram que o fuso granulométrico não difere da figura 19.

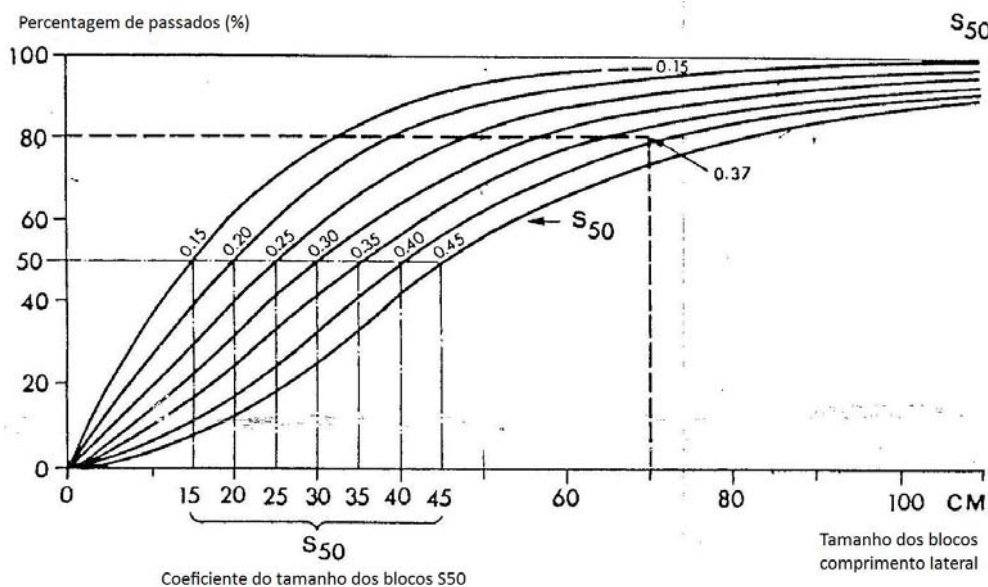


Figura 19 – Curvas de distribuição dos blocos por classe de acordo com a percentagem de volume total desmontado (Kendall, 1983)



A constante da rocha e de desmonte define a resistência da mesma, em quilogramas, de dinamite necessários à extração de um metro cúbico de rocha. Este valor varia entre 0,3 a 0,5 quilogramas por metro cúbico para rochas duras.

A constante de fragmentação avalia o estado da fragmentação do maciço rochoso, dando origem à seguinte classificação:

- Rocha muito fissurada 0,6 quilogramas por metro cúbico
- Rocha com juntas 0,55 quilogramas por metro cúbico
- Rocha com juntas muito finas 0,50 quilogramas por metro cúbico
- Rocha relativamente homogênea 0,45 quilogramas por metro cúbico
- Rocha homogênea 0,4 quilogramas por metro cúbico

AS figuras 21 e 22 permitem conhecer a altura da bancada a partir da carga específica e do diâmetro do furo.

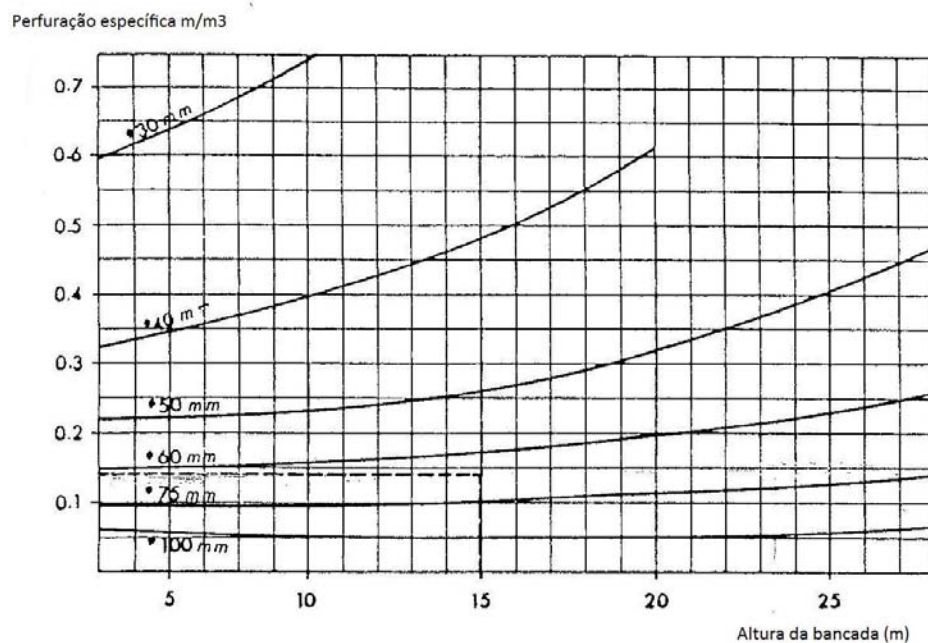


Figura 21 – Perfuração específica para as diferentes alturas de bancada e diâmetro do furo (Kendall, 1983)

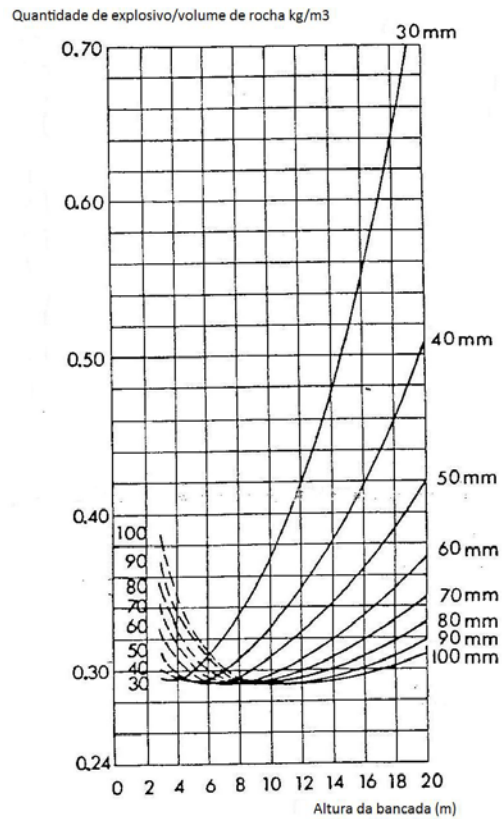


Figura 22 – Quantidade de explosivo necessário de acordo com a altura da bancada, diâmetro do furo e carga específica (Kendall, 1983)

Com a figura 23 conseguimos obter a distância a frente tendo em conta a altura da bancada e o diâmetro do furo.

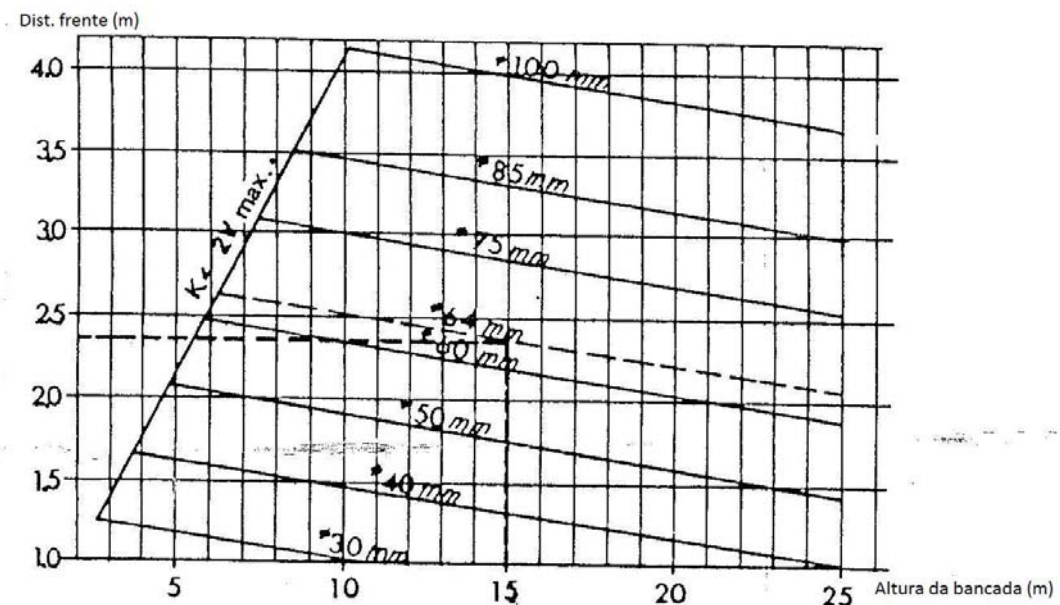


Figura 23 – Relacionamento entre a altura da bancada, distancia à frente e o diâmetro do furo (Kendall, 1983)

O exemplo aqui demonstrado utiliza estes cinco diagramas para determinar o diagrama de fogo mais adequado para a fragmentação pretendida.

Teoricamente pretende-se somente que 20% da pilha tenha dimensões superiores a 0,70 m.

No quadro 10 determinamos o valor de  $S50$ , isto é, 50% da pilha terá a dimensão igual ou menor que 0,37 m.

A partir do  $S50$ , e utilizando o quadro 11 e o conhecida constante de fragmentação (no exemplo é 0,50), com o valor escolhido do  $E/V=1,25$ , determinam-se os valores da carga específica e perfuração específica que satisfaçam as condições de serem o mais baixo possível tendo em conta a constante da rocha.



**ESTUDO DAS VIBRAÇÕES RESULTANTES DO REBENTAMENTO DE EXPLOSIVOS**



#### 4 VIBRAÇÕES RESULTANTES DO REBENTAMENTO COM EXPLOSIVOS

Esta parte do trabalho tem como objectivo caracterizar a onda vibratória que é produzida pelo rebentamento de explosivos, na tentativa de se perceber se existe uma relação detectável entre esta variável e a curva granulométrica da pilha desmontada. Para tal recorreu-se a um equipamento de registo de vibrações - o sismógrafo, que regista os valores de vibração para com eles se determinar a transmissibilidade do maciço. Aplicar-se-á a fórmula de Langefors para determinar a transmissibilidade e apresenta-se da seguinte forma (Formula 6):

$$V = K \times \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}}$$

(6)

Onde:

$V$  – velocidade de vibração

$K$  – Factor de transmissibilidade

$Q$  – carga instantânea

$R$  – Distância (do desmonte até ao elemento a proteger)

A vibração pode ser caracterizada por um movimento oscilatório de um material, sólido ou fluído, que foi afastado da sua posição de equilíbrio. Em Geotecnia, ela é designada como uma resposta elástica do terreno, quer se trate de solos ou rocha, à passagem de uma onda de tensão, com origem directa ou indirecta numa solicitação dinâmica, de génese natural ou artificial. (Bernardo, 2005)

Neste caso as vibrações são transmitidas ao maciço como consequência de uma detonação, que actua num tempo considerado curto. Essas vibrações podem ser classificadas em três grupos distintos:

- Contínuas – quando um determinado nível de vibração quase constante é conservado por um extenso período de tempo (quando maciços de fundação são solicitados por uma acção de máquinas de regime alternativo, como bombas ou compressores, em funcionamento regular); (Bernardo, P. et al, 2005)

- Transitórias – se os níveis de vibração derivam de um impacto súbito, seguido de um tempo de repouso relativamente alongado (caso de terrenos sujeitos a compactação dinâmica ou a detonação de cargas explosivas simultâneas); (Bernardo, P. et al, 2005)
- Intermitentes – caso se verifique uma sequência de acontecimentos vibratórios, cada um dos quais com pequena duração (caso da detonação de cargas explosivas microrretardadas, como este caso de estudo, ou, perfurações por percussão). (Bernardo, P. et al, 2005)

Como se percebe, para além das detonações de cargas explosivas, existe uma abundância de eventos que podem induzir um situação semelhante, de vibração, nos maciços. Ter em conta as outras fontes é muito importante, quer para a análise de condições de acumulação de efeitos, quer para estabelecer uma ligação apropriada entre os vários impactos causados pelas referidas detonações. No seio destas fontes acumulativas, evidenciam-se os sismos, os deslizamentos súbitos de massas rochosas ao longo de falhas geológicas, a cravação de estacas, a demolição de edifícios, a utilização de equipamentos pesados diversos e de veículos motorizados, entre outros. Esta acumulação acarreta um aumento das vibrações mecânicas como um agente de deterioração ambiental, com implicações na comodidade das pessoas, causando danos em estruturas, como a outros elementos sensíveis às vibrações.

É do conhecimento geral que só uma pequena parte da energia transmitida aos maciços é convertida em energia sísmica, como tal, estima-se que apenas cerca de 5 a 15% da energia libertada pelas detonações de explosivos é usada com a finalidade prevista, a fragmentação da rocha. Sendo a restante percentagem da energia contida nos explosivos transferida ao ambiente circundante sob a forma de calor, de ruído e de vibrações susceptíveis de causar impactos significativos.

Existem factores que funcionam como atenuantes diminuindo assim as vibrações. Entre esses factores encontra-se a distância à fonte originadora da vibração. (Figura 24) (Bernardo, P. et al, 2005)

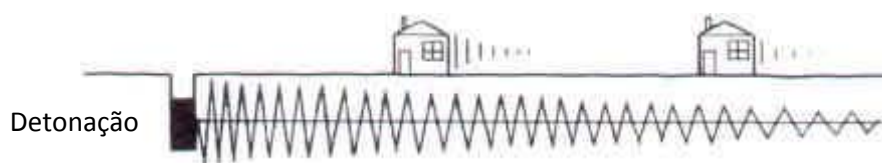


Figura 24 – Atenuação das vibrações com a distância (Bernardo, P. et al, 2005)

Esta situação nem sempre se verifica, pois em meios estratificados quando a sua geometria o permite, as ondas podem aglomerar-se ou sobrepor-se às reflectidas, chegando a medir-se maiores valores de amplitude da vibração em pontos mais afastados. (Bernardo, P. et al, 2005)

O tipo de estrutura não interfere directamente com o nível de vibração mas é sem dúvida abalada por ela, pois a qualidade da construção está directamente ligada ao nível de danos que irá sofrer, quando é solicitada por uma dada vibração.

Contudo, os efeitos das vibrações não dependem só da distância e do tipo da estrutura, mas também da litologia dos terrenos de fundação, sobre os quais as estruturas assentam. (Figura 25)



Figura 25 – Efeito da litologia do terreno de fundação nas velocidades vibratórias (Bernardo, P. et al, 2005)

Em vigor encontra-se desde 1983 a NP2074 (Norma Portuguesa), que estabelece, de modo conservador, os limites de vibração aceitáveis em função do tipo de construção e de terreno de fundação, com um máximo admissível de 60 mm/s. Esta norma estabelece o valor limite para a velocidade da vibração de pico através de três factores: tipo de construção, tipo de terreno de fundação e a periodicidade diária das solicitações. (Gama, D., 998) (Bernardo, P. et al, 2005)

Há, no entanto, correntes discordantes quanto à forma como a norma está estabelecida, pois ela não incorpora a frequência ondulatória. Esta parte é como, já comprovada, de extrema importância sendo necessário considerá-la no contexto da maioria dos critérios vigentes a nível internacional. (Bernardo, P. et al, 2005) (quadro 9)

Quadro 9 – Quadro resumo da norma NP-2074

TIPO DE TERRENO	TIPO DE CONSTRUÇÃO	Nº MÉDIO DE SOLICITAÇÕES DIÁRIAS	VALORES LIMITE	
			VL= $(\alpha \times \beta \times \delta) \times 10^{-2}$ m/s	
( a )	( b )	( d )	VL= $(\alpha \times \beta \times \delta) \times 10$ mm/s	
Solos incoerentes, soltos, areias emisturas areia-seixo, solos coerentes moles e muito moles $v < 1000$ m/s $\alpha = 0,5$	<b>Construções que exigem cuidados especiais:</b> Monumentos e outro património histórico sensível, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	$\leq 3$ (1,0)	2,5	mm/s
		$> 3$ (0,7)	1,8	mm/s
	<b>Construções correntes:</b> Como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	$\leq 3$ (1,0)	5,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	3,5	mm/s
	<b>Construções reforçadas:</b> Como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	$\leq 3$ (1,0)	15,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	10,5	mm/s
Solos coerentes, solos incoerentes compactos, areias e misturas areia-seixo uniformes e bem graduadas $1000$ m/s $< v < 2000$ m/s $\alpha = 1,0$	<b>Construções que exigem cuidados especiais:</b> Monumentos e outro património histórico sensível, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	$\leq 3$ (1,0)	5,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	3,5	mm/s
	<b>Construções correntes:</b> Como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	$\leq 3$ (1,0)	10,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	7,0	mm/s
	<b>Construções reforçadas:</b> Como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	$\leq 3$ (1,0)	30,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	21,0	mm/s
Rocha e solos coerentes rijos $v > 2000$ m/s $\alpha = 2,0$	<b>Construções que exigem cuidados especiais:</b> Monumentos e outro património histórico sensível, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	$\leq 3$ (1,0)	10,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	7,0	mm/s
	<b>Construções correntes:</b> Como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	$\leq 3$ (1,0)	20,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	14,0	mm/s
	<b>Construções reforçadas:</b> Como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	$\leq 3$ (1,0)	60,0	mm/s
		$> 3$ (0,7)	42,0	mm/s

O processo de desmonte envolve um conjunto de operações com uma sequência de eventos que culmina numa explosão. Esta explosão com origem dentro do maciço rochoso, liberta pressão em forma de gases, porém na proximidade da detonação comprime e fragmenta um pequeno volume de rocha. A pressão diminui rapidamente para valores inferiores à força à compressão da rocha. Neste ponto a rocha já não é fragmentada e a restante energia move-se através do maciço como onda de pressão. Esta pressão percorre o maciço afastando-se da zona que lhe deu origem até entrar em contacto com a frente livre, a onda de pressão é reflectida para o interior do maciço como onda de tensão.

Através do conjunto dos dois tipos de ondas o maciço é fragmentado. Contudo a restante onda de pressão pode encontrar uma nova frente livre e reflectir outra vez, podendo este processo repetir-se varias vezes.

É ainda usado um conjunto de retardos por furo em milissegundos, conseguindo com isto aumentar as frentes de reflexão, para que a detonação não funcione como um todo mas sim como um conjunto de eventos separados, melhorando a fragmentação. Esta técnica permite também reduzir a quantidade de energia em forma de vibração que atravessa todo o maciço em redor sem produzir trabalho efectivo, diminuindo desta maneira qualquer possível dano que possa ser obtido pela vibração.

Na zona circundante do desmonte só parte do volume é rodeada por frente livre. Para o resto do maciço, a pressão diminui rapidamente para um estado de onda elástica, tanto em profundidade como à superfície, sendo esta onda o causador da vibração que por vezes abala estruturas próximas da detonação.

As ondas elásticas movimentam-se a uma determinada velocidade que depende das características do tipo de material no qual se movimentam. À medida que se afastam da fonte de ignição, as ondas ficam cada vez mais separadas e fracas tendo em conta as suas diferenças de velocidade propagação e acabam eventualmente por desaparecer. (Leet, 1960)

## 4.1 Sismógrafo

O sismógrafo é o equipamento que tem como finalidade visualizar e armazenar os dados sísmicos. Os registadores podem ser analógicos ou digitais mas todos eles aplicam os seguintes funcionamentos:

- **Amplificação de Sinal:** É o efeito aplicado à amplitude do sinal original que foi captado pelo sensor e é geralmente medida em dBs (Decibéis).
- **Banda de Frequência:** É a faixa activa de operação ou utilização em frequência e é medida em Hz.
- **Marcas de tempo:** São marcas temporais colocados nos registos para identificar o tempo de cada evento. Normalmente são marcas de segundos, minutos, horas ou códigos digitais de hora geradas por um relógio. Este relógio é sempre sincronizado com a hora universal (UT Universal Time – Hora do Meridiano de Greenwich). Assim, a hora universal é utilizada pelos sismólogos do mundo inteiro para padronizar o tempo dos registos sismográficos, devido aos diferentes fusos horários.
- **Ruído:** Ruído é todo sinal indesejável que esteja associado ao sinal original. O sinal sísmico geralmente está acompanhado de ruído, o qual quando é muito intenso pode prejudicar a leitura ou interpretação do sinal sísmico, pelo que normalmente é feita filtragem do sinal.

## 4.2 Teoria vibratória

As vibrações são uma forma de energia que percorre o maciço e podem afectar estruturas. Alguma da energia libertada pelo desmonte propaga-se em todas as direcções do furo como uma onda sísmica com diferentes frequências. A energia que deriva desta onda sísmica é amortecida pela distância e a onda com mais frequência é amortecida mais rapidamente, concluindo assim, que a frequência dominante derivada do desmonte é mais intensa a curtas distância do que a longas distâncias e depende dos seguintes factores:

- Carga cooperante
- Confinamento do local do desmonte
- Características do maciço
- Distância ao rebentamento

A escolha do correcto método de desmonte, do equipamento de furação e da correcta temporização pode ser controlada para minimizar os efeitos das vibrações.

As vibrações são um aglomerado de ondas sísmicas e consiste em diferentes tipos de ondas:

- Ondas de compressão – são as ondas mais rápidas a percorrer o maciço e as partículas da onda movimentam-se na mesma direcção que as ondas de propagação. A densidade do material muda com o passar da onda.
- Onda transversais – move-se através do ângulo médio da onda de propagação mas mais lenta que a onda de compressão. Esta onda muda a forma do material e não a densidade.
- Onda de Rayleigh – é a onda superficial que desaparece rapidamente com a profundidade. É mais lentas que as duas anteriores e as partículas movem-se elipticamente no plano vertical e na mesma direcção da propagação. Na superfície o movimento é retrógrado ao movimento da onda.

Para uma análise total são medidas três direcções de onda, uma vertical, outra longitudinal e outra transversal. Normalmente a componente vertical é dominante a distâncias curtas por isso é suficiente medir só essa onda. (Olofsson, 2002)



**5**

**CASO DE ESTUDO**



## 5 CASO DE ESTUDO

### 5.1 História e acessibilidade da zona em estudo

Tal como referido no início do presente trabalho, o estudo tem como base a análise dos dados recolhidos durante a execução da escavação em rocha para a implantação de uma obra rodoviária.

Para a recolha de dados sobre as características geológicas e os resultados dos rebentamentos na frente de escavação houve necessidade de utilizar os tempos mortos da obra de forma a não interferir com o normal andamento dos trabalhos.

O estudo foi realizado no trecho 2 (A41 – PICOTO (IC2) / NÓ DA ERMIDA (IC25)), que se inicia próximo do nó A32/A42 e termina após o nó de Aguiar de Sousa, na zona de Oregas / Recarei (concelho de Paredes).

Este estudo teve os seguintes objectivos:

- A. Comparar dois modelos de avaliação da fragmentação (utilizando a simulação *Kuz-Ram* e a análise digital *SPLIT-Desktop*) de forma a validar a sua eficácia no controlo de fragmentação na frente da obra e as principais diferenças encontradas.
- B. Analisar o comportamento das vibrações resultantes dos rebentamentos e tipificar um modelo de dissipação da energia para o tipo de formação geológica regional.

A zona em estudo situa-se na freguesia de Recarei, do Concelho de Paredes. O actual Concelho de Paredes assenta no antigo concelho de Aguiar de Sousa que data dos primórdios da Monarquia. O concelho de Aguiar de Sousa surgiu num pacto de povoamento do Vale do Sousa tendo sido criado em meados do século XII. De facto, consta nas inquirições de 1258 mandadas fazer por D. Afonso III, que algumas das actuais freguesias do concelho de Paredes, pertenceriam ao grande julgado de Aguiar de Sousa (Estremir, Crestelo, Vilela, Bendoma, Ceti, Gondalães, Veiri, Gandra).

Foi por volta do séc. XVIII que o pequeno lugar de Paredes, integrado na freguesia de Castelões de Cepeda, foi ganhando importância. Assim, em finais do séc. XVIII, já existiam os Paços do Concelho e o pelourinho. Paredes tinha então o aspecto de uma verdadeira cidade, embora nem sequer tivesse a categoria de vila.

A freguesia de Aguiar de Sousa é vila e sede de um extenso Concelho até ao início do século XIX, com 39 freguesias dos actuais municípios de Gondomar, Valongo, Lousada, Paredes e Paços de Ferreira. Tinha em 1801, 21.643 habitantes e ocupava uma superfície de cerca de 260 km<sup>2</sup>.



Apesar de não ter grande incidência, este traçado atravessa o Concelho de Santa Maria da Feira, no distrito de Aveiro, nos primeiros 50 m de extensão.

Na figura 27 apresenta-se o traçado em toda a sua extensão, onde se observa a passagem sobre o rio Douro.

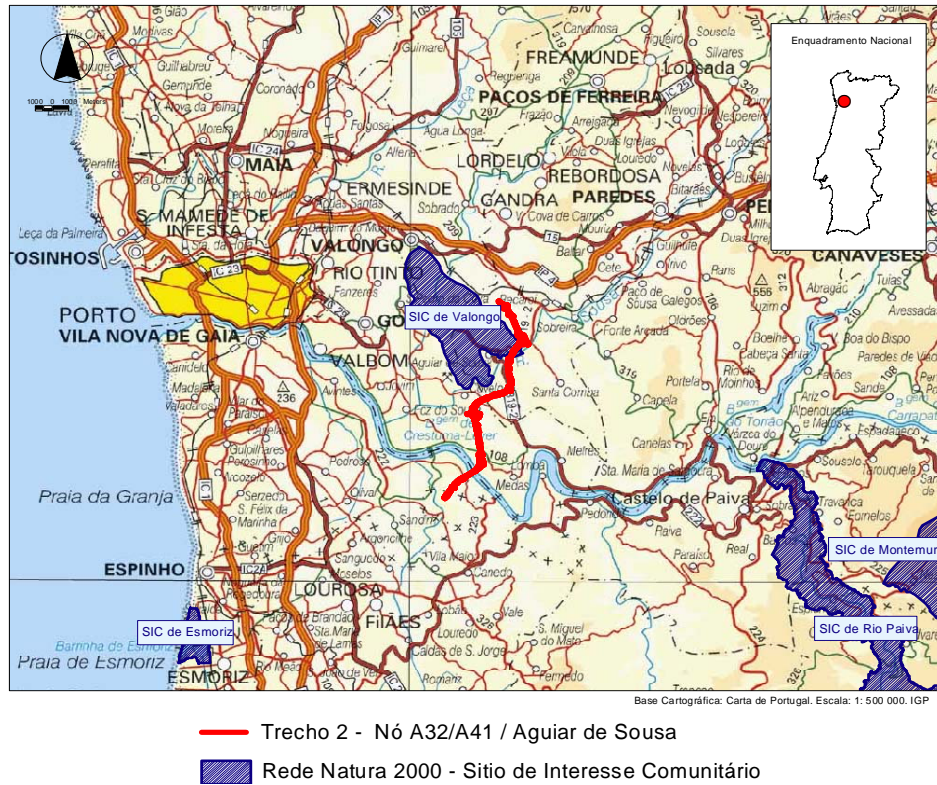


Figura 27 – Localização da área do projecto

#### 5.4 Geologia regional

Localizada no Centro-Norte litoral do país, é uma região de transição entre os relevos acentuados e muito antigos do extremo ocidental da Meseta Ibérica e os solos recentes, terciários e quaternários, que confinam com a orla marítima do Oceano Atlântico.

Este território possui um clima ameno, e uma influência marítima decrescente à medida que nos vamos deslocando para o interior, levando a que, sobretudo nos vales e encostas virados a Sul, exista uma vegetação luxuriante e diversificada.

Estas zonas, constituídas maioritariamente por xistos e granitos, sofrem uma erosão acentuada devido ao clima e pastoreio intensivo, levando à expansão para as encostas íngremes, através de um trabalho árduo de construção de terraços e socalcos, moldando e alterando lentamente a paisagem secular. (Figura 28)

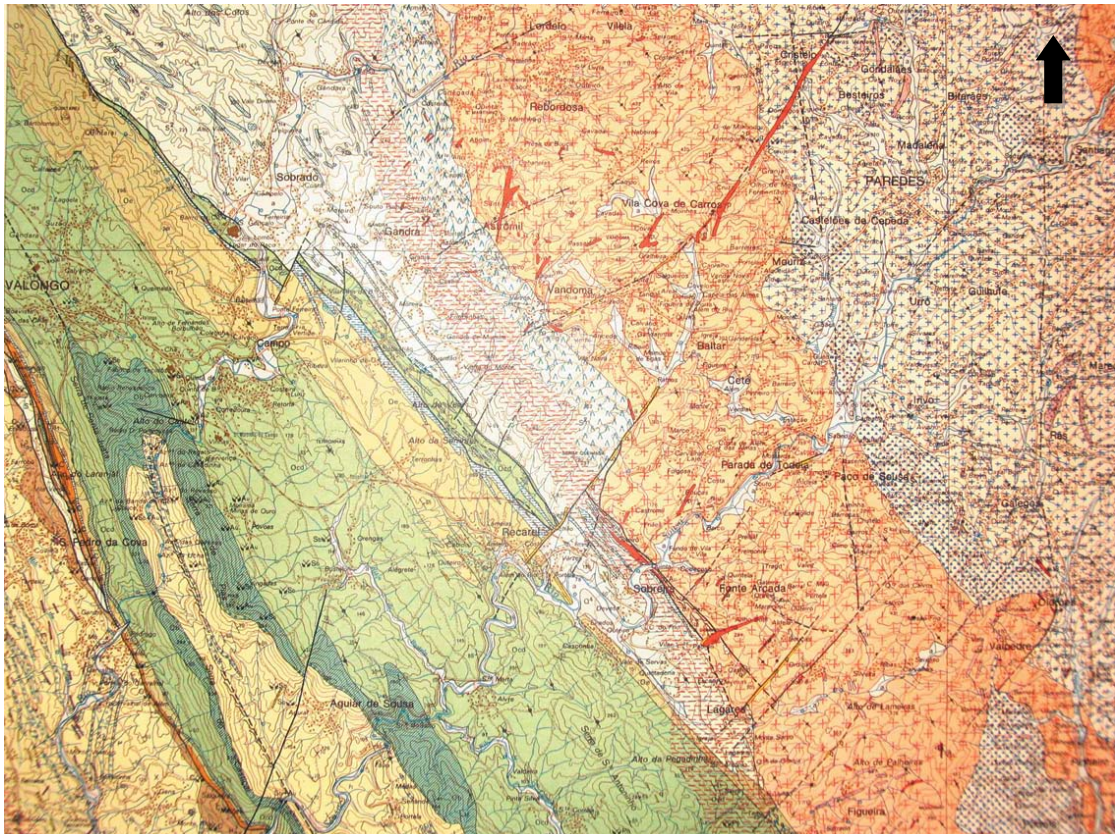


Figura 28 – Extracto da carta geológica, à escala 1/50000, 9-D (Penafiel)

## 5.5 Geologia localizada à zona em estudo

### 5.5.1 Geomorfologia

Geomorfologicamente, o trecho 2 insere-se numa zona de rochas xisto-grauvácicas e quartzíticas, sendo o relevo típico da morfologia destes maciços.

A área, apesar de relativamente aplanada, é constituída por vários vales onde se encaixam linhas de água pouco profundas que se ramificam, o que oferece à região uma morfologia característica, representada por uma série de cabeços, de formas relativamente arredondadas e de vales apertados.

Sobressai no trecho em estudo, a crista quartzítica das Serras do Castiçal e das Flores, orientada segundo a direcção NNW-SSE e intercalada nos xistos e grauvaques. Esta crista atinge cotas superiores a 300 m.

O entalhamento dos cursos de água que ocorrem ao longo do trecho originou uma rede de drenagem organizada, controlada estruturalmente pela rede de fracturas e pela xistosidade, com alguns depósitos aluvionares, em regra delgados e de reduzida espessura. Os principais cursos de água que atravessam estes materiais são os rios Douro e Sousa:

- O rio Douro, que se desenvolve de Este para Oeste, originou um vale apertado e profundo com vertentes de grande inclinação e elevadas;
- O rio Sousa que se desenvolve de Nordeste para Sudoeste com um percurso algo flexuoso, aprofundou um vale relativamente apertado e profundo com vertentes muito declivosas.

### **5.5.2 Litoestratigrafia**

As unidades geológicas relevantes ao longo do traçado correspondem, essencialmente a:

#### **Ordovício**

- **Grauvaques do Sobrido**

Em termos litológicos, esta formação é constituída por xistos e grauvaques de cor cinzenta escura a negra, algo ardosíferos, em geral micáceos, com matriz sericítica, quártzica e argilosa. Refere-se ainda que esta formação é cortada por numerosos filões de quartzo.

Os Grauvaques do Sobrido deverão ocorrer cerca dos quilómetros 6+425 e 6+475.

- **Xistos de Valongo**

Trata-se de uma formação constituída por xistos cinzentos escuros, argilosos, ardosíferos e, por vezes, muito fossilíferos. Faz parte desta formação a faixa de xistos ardosíferos amplamente explorados em diversas louseiras.

O traçado intersectará os Xistos de Valongo desde o quilómetro 10+925 até ao fim do trecho em estudo e ainda num pequeno troço, entre o quilómetro 6+475 e o quilómetro 6+750.

- **Quartzitos e xistos argilosos intercalados**

Trata-se de quartzitos de grão fino, com intercalações de bancadas gresosas, por vezes conglomeráticas mas com elementos de pequenas dimensões e de xistos argilosos duros, azulados e fossilíferos.

### 5.5.3 Zonografia

A frente de desmonte tem uma direcção N312E e as descontinuidades têm uma direcção principal de N14E e com uma inclinação média de 63SW.

O quadro que se segue tenta demonstrar resultados obtidos na amostragem linear das descontinuidades. Os valores de cada frente de desmonte são valores médios.

Quadro 10 – Quadro resumo das descontinuidades.

DATA	REBENT.	ATITUDE MÉDIA FAMÍLIA PRINCIPAL		FRENTE REBENT.	ABERTUR A (cm)	ESPAÇAMENTO MÉDIO (cm)	BLOCO IN-SITU (m3)	TERMINAÇÃO (D-Diacfase)	PRESENÇA DE ÁGUA
		DIR.	INC.	DIR.					
04-11-09	31	N20E	75NW	N314E	0,1	0,3	0,04	D	sim
06-01-10	33	N10E	55NW	N312E	0,1	0,3	0,04	D	sim
08-01-10	34	N12E	70NW	N318E	0,1	0,5	0,13	D	sim
13-01-10	35	N15E	79NW	N309E	0,1	0,3	0,04	D	sim
29-01-10	37	N15E	55NW	N314E	0,1	0,3	0,04	D	sim
04-02-10	40	N15E	70NW	N311E	0,1	0,3	0,04	D	sim
18-03-10	43	N12E	50NW	N309E	0,1	0,3	0,04	D	sim
14-04-10	50	N15E	50NW	N312E	0,1	0,3	0,04	D	sim
Média		N14E	63NW	N312E	0,1	0,3	0,05	D	sim

Assim o maciço demonstra uma elevada compartimentação, pois existe um conjunto elevado de descontinuidades muito próximas, o que dá origem a um bloco de volume reduzido.

As distâncias entre descontinuidades da mesma família mantêm-se regular e muito próximas obtendo como este estudo uma reduzida blocometria, o mesmo se verifica na atitude, pois a direcção e inclinação da família principal são praticamente iguais em todos os desmontes, mostrando assim uma atitude constante com uma blocometria também constante ao longo do maciço em estudo.

A abertura das fracturas, a terminação, o comprimento, o enchimento e a quantidade de água é igual em todos os rebentamentos. Estes resultados indicam que os desmontes avançam com as mesmas características ao longo do percurso em estudo. A curvatura e a rugosidade tem uma pequena variações em dois dos desmontes, que não é no entanto significativa.

## 5.6 Apreciação dos métodos

Para este trabalho foram avaliados oito rebentamentos de rocha aleatoriamente, identificados no quadro e com números não sequenciais representando cada número um plano de fogo realizado em obra. A numeração não é seguida porque nem sempre é possível avaliar todos os desmontes em dias consecutivos.

Para avaliar os parâmetros das variáveis que são inseridas no *Kuz-Ram* foi elaborado um quadro (quadro 11) para melhor analisar os valores. Os dados aqui apresentados foram pesquisados em várias fontes (trabalho sobre a matéria, sites de fabricantes de explosivos, etc.) para tentar inserir todos os dados pedido pelo programa. Alguns desses derivam de médias e outros no levantamento realizado das descontinuidades.

Quadro 11 – Parâmetros das variáveis do *Kuz-Ram*

Data	Rebent.	Espaçamento (m)	Inclinação (°)	Direcção da inclinação (°)	Bloco in-situ (m)	Densidade do explosivo	Força relativa (% ANFO)	Velocidade detonação nominal (m/s)	Velocidade detonação efectiva (m/s)	Força explosiva
04-11-2009	31	0,3	75	290	0,03	1	136	3984	3984	1,36
06-01-2010	33	0,3	55	280	0,03	1,2	183	5284	5284	1,83
08-01-2010	34	0,5	70	282	0,13	1,2	190	5456	5456	1,9
13-01-2010	35	0,3	79	285	0,03	1,3	195	5600	5600	1,95
29-01-2010	37	0,3	55	285	0,03	1	139	4073	4073	1,39
04-02-2010	40	0,3	70	285	0,03	1,1	153	4442	4442	1,53
18-03-2010	43	0,3	50	282	0,03	1	136	3996	3996	1,36
14-04-2010	50	0,3	50	285	0,03	1	135	3947	3947	1,35
Média		0,3	63	284	0,04	1,1	158	4598	4598	1,58

O espaçamento e o bloco “*in-situ*” apresentam dados regulares excepto no desmorte número 34 que apresenta um valor superior porque existe um distância entre duas descontinuidades muito superior ao normal (provavelmente por uma descontinuidade vertical quase paralela a frente). A direcção e inclinação são iguais na sua evolução de valores, com valores médios próximos dos valores práticos unitários.

A densidade e a força explosiva estão ligados directamente com a quantidade do tipo de explosivo gasto, pois quanto maior é o consumo de emulsão maiores são os valores obtidos. Como se comprova no desmorte número 35, no qual só é usado emulsão, os valores são mais elevados, logo, é esperada a melhor qualidade na fragmentação neste desmorte.

A velocidade de detonação nominal e efectiva são exactamente iguais porque não existem dados para o diferenciar, como tal, a força relativa e explosiva é consequentemente igual.

### 5.6.1 Fragmentação

No quadro que se segue apresenta-se a identificação temporal, as características geométricas e a quantidade de explosivo de cada desmorte de rocha.

Quadro 12 – Quadro resumo das características do desmorte de rocha

DESMORTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMORTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXP. TOTAL (kg)	CARGA ESP. (kg/m <sup>3</sup> )
04-11-2009	31	4,2	3,7	10,28	80	46,25	3.700,00	0,325
06-01-2010	33	4	3,5	10,02	63	42,42	2.672,46	0,338
08-01-2010	34	4	3,5	10,82	53	50,94	2.699,82	0,372
13-01-2010	35	4	3,5	9,2	92	36,49	3.357,08	0,32
29-01-2010	37	4	3,7	12,44	72	56,77	4.087,44	0,339
04-02-2010	40	4,2	3,7	12,98	66	68,03	4.489,98	0,369
18-03-2010	43	4,2	3,7	12,61	55	56,73	3.120,15	0,317
14-04-2010	50	4,3	3,7	12,43	43	54,88	2.359,84	0,305

O espaçamento e o afastamento apresentam pequenas variações resultantes dos ajustes que é necessário realizar para corresponder aos requisitos da obra, no que respeita à máxima dimensão dos blocos resultantes da fragmentação com explosivo.

A altura da bancada mostra mais flutuação de desmorte para desmorte, mas ainda assim a diferença não é muito acentuada, visto não ser um desmorte realizado na banquetta superior onde é necessário ajustar o comprimento do furo de acordo com a variação do terreno.

A quantidade de explosivo apresenta variações significativas pelas seguintes razões: diferente altura do furo, presença de água no furo que afecta directamente o tipo de explosivo a usar e a existência ou não de infra-estruturas e equipamento nas imediações do desmorte. Como é de prever esta situação influencia a quantidade de explosivo total do desmorte de rocha em função do número de furos da cada rebentamento.

Por último temos a carga específica que nos indica a quantidade de explosivo utilizado para desmontar um metro cúbico de rocha. Este valor apresenta variações entre as 300 e 400 gramas por metro cúbico.

As alterações introduzidas no que respeita ao tipo e quantidade de explosivo utilizado em cada rebentamento estão resumidos quadro 13.

Quadro 13 – Quadro resumo das características do desmorte de rocha

	31	33	34	35	37	40	43	50
Emulsão	1400	2347,5	2550	3357,5	1687,5	2490	1195	860
ANFO	2300	325	150		2400	2000	1925	1500

Verifica-se que existe uma variação significativa da quantidade de explosivo gasto em cada desmorte, fundamentalmente devido à variação do nível de água nos furos em cada operação de desmorte. No limite não é possível utilizar ANFO como acontece no desmorte número 35, em que todos o furos foram carregados com emulsão encartuchada.

A utilização de um revestimento de plástico impermeável ao longo do furo, para além de ser um custo adicional, aumentará o tempo da operação de carga do explosivo, tempo esse que é incompatível com o ciclo de trabalho previsto para a obra.

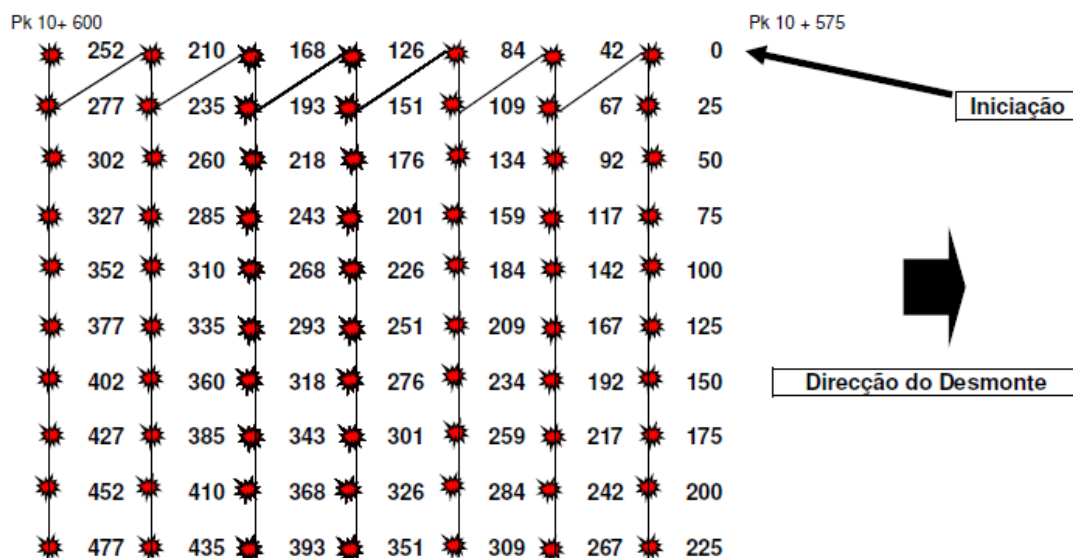


Figura 29 – Ligação e temporização

Na iniciação realizada com detonadores não eléctricos, a temporização utilizada é representada na figura 29, organiza-se em linhas corridas ao longo da frente livre do desmonte. A escolha foi tomada por se tratar de uma forma simples de ligação, sequencial sem sobreposição de tempos que possibilita a criação de novas frentes livres para a movimentação de cada furo, de modo que o furo seguinte da ordem de rebentamento possua sempre espaço para se deslocar.

Esta ligação minimiza possíveis cortes por fragmentos do próprio desmonte devido a organização de tempos. Neste caso só dois ligadores é que ainda não se tinham iniciado antes de detonar o primeiro furo, proporcionando uma elevada diferença entre a detonação do primeiro furo e a iniciação dos ligadores.

A temporização de cada furo numa sequência deste tipo e a criação de frentes livres adequadas ao movimento da rocha pela utilização de uma sequência temporizada superior entre cada fiada de furos, contribui para a melhoria da fragmentação.

A ligação do desmonte é realizada por uma única pessoa para reduzir o risco de erros sendo verificada por outro elemento da equipa imediatamente antes de detonar, depois do equipamento e pessoal se encontrar fora do perímetro de segurança.

O perímetro de segurança varia de zona para zona conforme se a localização de habitações ou outros elementos a proteger. Neste trabalho a distância de segurança encontra-se entre os 500 m e os 300 m, conforme a existência de caminhos de serventia na zona, onde era necessário colocar elementos da equipa de segurança com a distância mínima garantida.

A orientação das discontinuidades relativamente ao posicionamento e temporização dos furos do rebentamento tem uma grande influência na qualidade da fragmentação, podendo essa direcção ser vantajosa ou prejudicial. É de boa prática tentar explorar esta situação o mais intensamente possível para daí conseguir a melhoria dos resultados tirando partido das condições geológicas de cada local a rebentar.

Apesar da família principal ser relativamente perpendicular à frente livre, existe uma série de discontinuidades horizontais visíveis na frente de desmonte, sendo estas mais evidenciadas em algumas das frentes, e em geral a sua quantidade é determinante para a qualidade da fragmentação.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 31**

Quadro 14 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
04-11-2009	31	4,2	3,7	10,28	80	46,25	3.700,00	0,325

É o rebentamento de rocha com maior número de furos e com o terceiro maior consumo de explosivo em termos absolutos mas com uma carga específica relativamente pequena. Não existe muita de água nos furos sendo possível cumprir com a quantidade de carga prevista no plano de rebentamento, pelo que é esperada uma fragmentação com elevada qualidade.

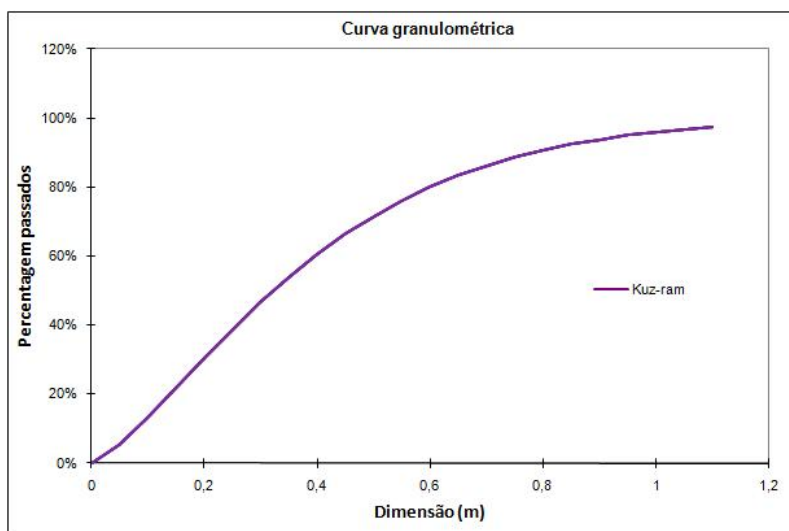


Figura 30 – Gráfico do *Kuz-Ram* do rebentamento de rocha número 31

O modelo *Kuz-Ram* descreve uma curva suave onde se prevê uma distribuição uniforme e regular, com uma fragmentação contínua ao longo da curva, o que na realidade não se verifica, pois tal como previsto, obteve-se uma fragmentação excelente com uma dimensão máxima dos blocos muito reduzida.

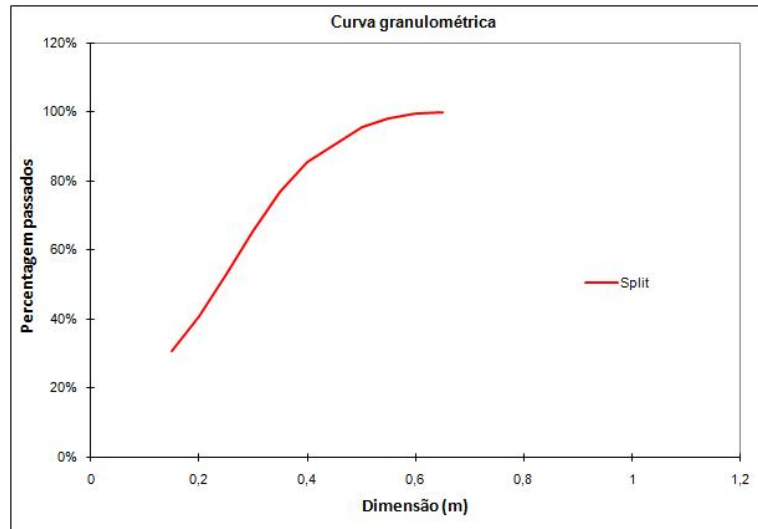


Figura 31 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do rebentamento de rocha número 31

O modelo de análise de fragmentação *SPLIT-Desktop* apresenta uma curva com um início mais acentuado correspondendo a uma blocometria de menor dimensão e uma dimensão máxima da ordem de 0,70 m.

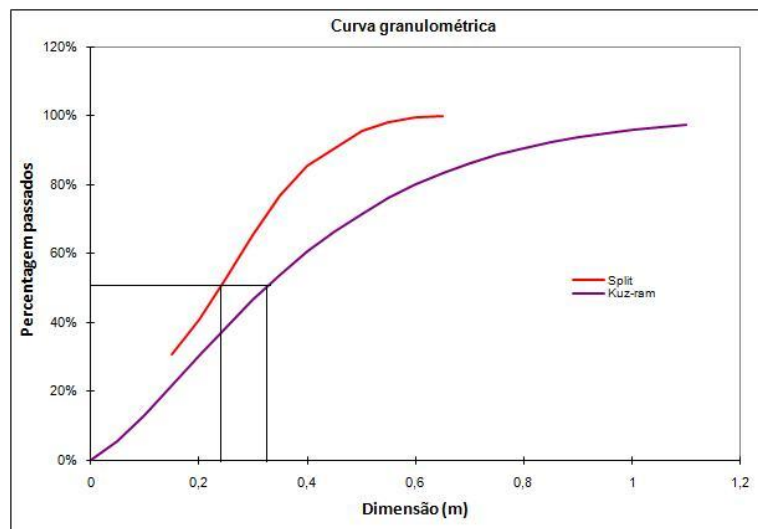


Figura 32 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 31

Quando comparadas as duas curvas, verificamos que existe uma aproximação na percentagem de fragmentos com 0,2 m, mas a partir deste ponto a análise do *SPLIT-Desktop* mostra uma subida acentuada até próximo de 0,4 m, altura em que a curva tende a aproximar-se do patamar, sem que contudo se sobreponha à curva *Kuz-Ram* já que a dimensão máxima dos fragmentos termina nos 0,65 m.

É provável que as diferenças encontradas nos dois métodos estejam relacionadas com a introdução de dados no simulador *Kuz-Ram* o que dará origem a uma curva mais extensa e com maior percentagem de fragmentos de maior dimensão.

Analisando a dimensão dos blocos verificamos que a avaliação *SPLIT-Desktop* sobre os fragmentos resultantes do desmonte indica que 50% dos blocos possuem uma dimensão inferior a cerca de 0,22 m enquanto o simulador *Kuz-Ram* indica o valor de máximo de 0,32 m para a dimensão de 50% dos fragmentos esperados no desmonte.

Como já referido, o *SPLIT-Desktop* utilizado neste estudo é o da versão teste, pelo que contém uma limitação quanto à apresentação da curva de finos. Ainda assim, dada a tendência de aproximação das duas curvas na parte inferior do gráfico, admite-se que o erro de interpretação não seja significativo.

A fragmentação obtida com este desmonte foi aceitável, pelo que a avaliação efectuada com o *SPLIT-Desktop* parece adequar-se ao objectivo de controlo de qualidade em operações correntes nas mesmas condições operacionais.

Quadro 15 – Percentagem de passados do rebentamento 31

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
5,4%	0,05	
13,3%	0,10	
21,8%	0,15	30,9%
30,5%	0,20	40,9%
38,9%	0,25	53,0%
46,7%	0,30	65,5%
54,0%	0,35	76,8%
60,5%	0,40	85,4%
71,6%	0,50	95,5%
76,1%	0,55	98,1%
80,0%	0,60	99,7%
83,4%	0,65	100,0%
86,3%	0,70	
88,7%	0,75	
90,7%	0,80	
92,4%	0,85	
93,9%	0,90	
95,0%	0,95	
96,0%	1,00	
96,8%	1,05	
97,4%	1,10	

Avaliando o quadro anterior verifica-se que na análise do *SPLIT-Desktop* encontramos 95,5% dos blocos com dimensão inferior a 0,5 m em comparação com os 71,6% do simulador *Kuz-Ram*.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 33**

Quadro 16 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
06-01-2010	33	4	3,5	10,02	63	42,42	2.672,46	0,338

Este rebentamento mantém a carga específica num valor médio dentro dos rebentamentos estudados. Contudo não foi possível cumprir com o plano inicial, porque se utilizou na maior parte dos furos e em quase todo o seu comprimento, a emulsão encartuchada, devido à quantidade de água.

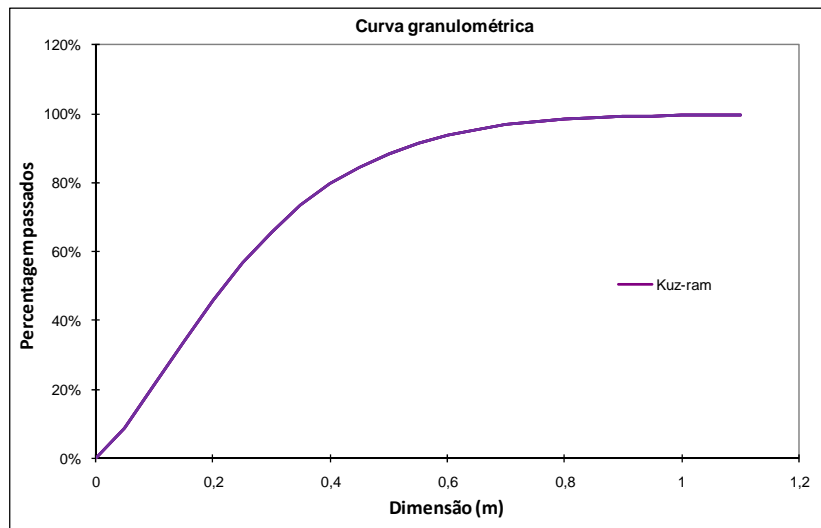


Figura 33 – Gráfico do *Kuz-Ram* do rebentamento número 33

O simulador *Kuz-Ram* apresenta uma curva com uma subida rápida, mostrando uma boa fragmentação na parte inicial. De novo verifica-se que a curva é bastante extensa, embora a partir dos 0,85 m a curva seja praticamente horizontal indicando que não existem blocos acima dessa dimensão.

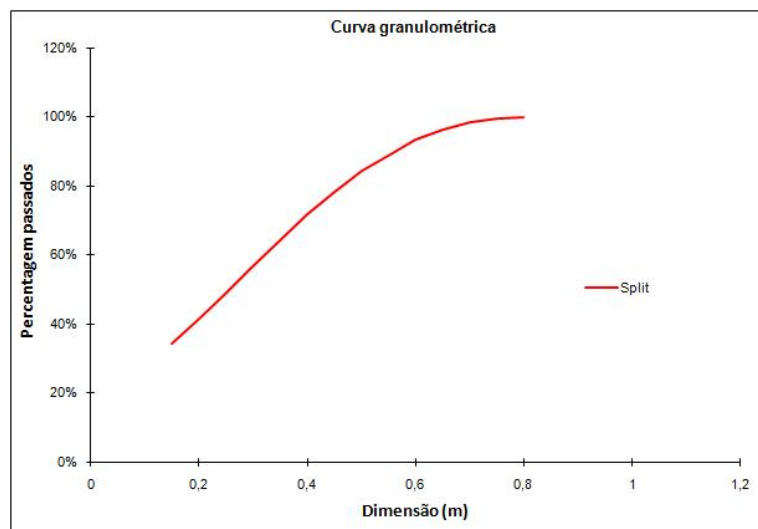


Figura 34 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do rebentamento número 33

O modelo *SPLIT-Desktop* apresenta uma curva suave que estabiliza aos 0,7 m, com o seu final próximo de 0,8 m.

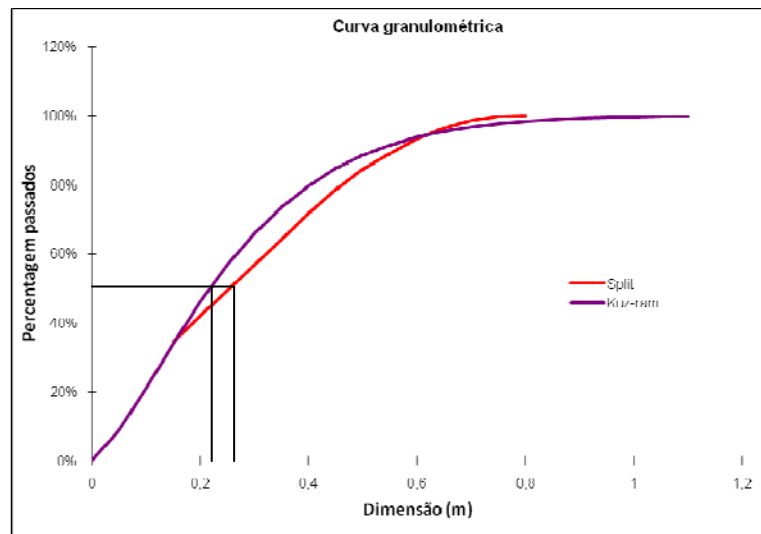


Figura 35 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 33

Quando analisadas em conjunto, as curvas são quase coincidentes próximo do valor de 35% de passados com de dimensão inferior a cerca de 0,15 m, afastando-se me seguida até se voltarem a encontrar próximo do 0,7 m. No trajecto afastado a curva *SPLIT-Desktop* é um pouco mais grosseira com um  $K_{50}$  próximo de 0,25 m enquanto no simulador *Kuz-Ram* era indicado um valor de  $K_{50}$  ligeiramente superior a 0,2 m.

A fragmentação mais grosseira que o esperado resultante do rebentamento, teve como provável origem a dificuldade de aplicação do explosivo nos furos com água e lama, impossibilitando a colocação das cargas nas condições ideais.

Quadro 17 – Percentagem de passados do rebentamento 33

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
8,7%	0,05	
21,1%	0,10	
33,9%	0,15	34,5%
45,9%	0,20	41,8%
56,6%	0,25	49,2%
65,7%	0,30	56,7%
73,4%	0,35	64,2%
79,6%	0,40	71,8%
84,6%	0,45	78,4%
<b>88,5%</b>	<b>0,50</b>	<b>84,4%</b>
91,5%	0,55	88,9%
93,8%	0,60	93,4%
95,5%	0,65	96,5%
96,8%	0,70	98,5%
97,7%	0,75	99,8%
98,4%	0,80	100,0%
98,9%	0,85	
99,2%	0,90	
99,5%	0,95	
99,6%	1,00	
99,7%	1,05	
99,8%	1,10	

No quadro comparativo entre os dois métodos de avaliação, verificamos que no *SPLIT-Desktop* quantificam-se 84,4% de passados na dimensão 0,5 m, enquanto no simulador *Kuz-Ram* estavam previstos 88,5% de passados.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 34**

Quadro 18 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
08-01-2010	<b>34</b>	4	3,5	10,82	53	50,94	2.699,82	0,372

Este desmonte, embora tenha sido o que utilizou a maior carga específica dos rebentamentos estudados, não evidenciou contudo, alterações em mais nenhum campo, situando-se com valores médios nos restantes parâmetros. O nível de água nos furos era elevado o que obrigou a manter os parâmetros geométricos e o carregamento efectuado na sua maior parte com emulsão encartuchada, fugindo assim ao plano de fogo inicial.

Devido às más condições de carregamento do explosivo nos furos, esperava-se uma fragmentação mais grossa.

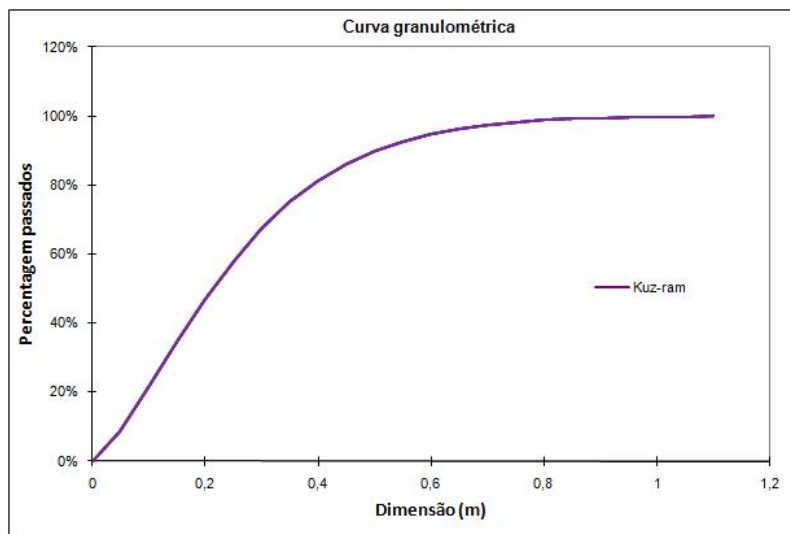


Figura 36 – Gráfico do *Kuz-Ram* do rebentamento de rocha número 34

O simulador *Kuz-Ram* mostra mais uma vez uma curva com uma subida rápida, dando a entender que existem condições para uma boa fragmentação em condições normais de execução. Tal como em curvas anteriores verifica-se um patamar depois de 0,8 m, pelo que não é de esperar a existência de blocos acima deste valor ainda que a curva só termine próximo de 1,1 m.

Este facto foi confirmado pela observação do resultado do rebentamento onde não se identificaram blocos com aquela dimensão.

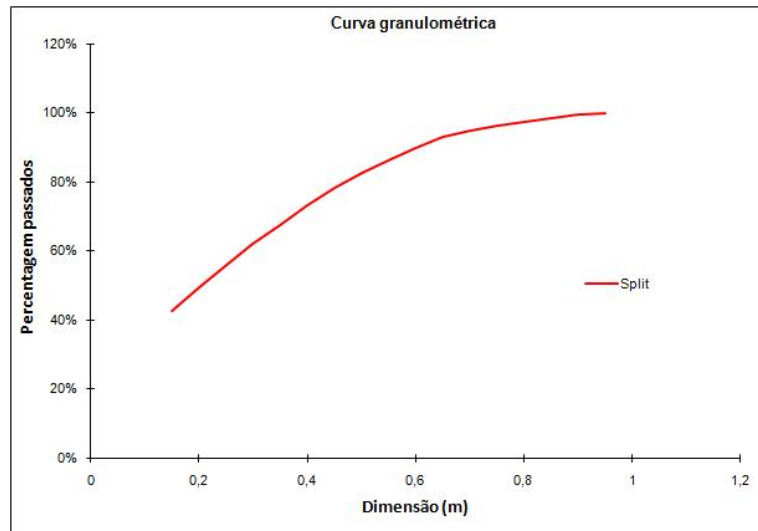


Figura 37 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do rebentamento de rocha número 34

A análise *SPLIT-Desktop* apresenta uma curva extensa com uma inicio com inclinação mais suave que estabiliza aos 0,9 m.

A quantidade de blocos da máxima dimensão representada na curva não é significativa, o que aliás também se confirmou na observação directa do resultado do rebentamento.

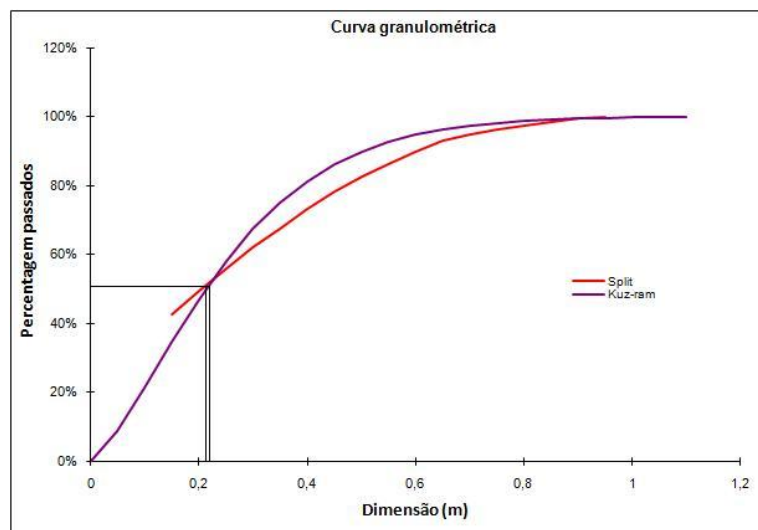


Figura 38 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 34

Analisadas as curvas verifica-se que se sobrepõe no  $K_{50}$  para 0,22 m afastando-se desde aqui para se voltarem a sobrepôr próximo dos 0,8 m.

As diferenças entre as duas curvas não sendo significativas, são mais evidentes nos 80% de passados, onde existe uma variação de cerca de 0,1 m na dimensão dos blocos analisados por cada um dos métodos.

Quadro 19 – Percentagem de passados do rebentamento 34

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
8,8%	0,05	
21,5%	0,10	
34,7%	0,15	42,5%
47,1%	0,20	49,4%
58,1%	0,25	55,9%
67,4%	0,30	61,9%
75,1%	0,35	67,6%
81,3%	0,40	73,1%
86,1%	0,45	78,2%
89,8%	0,50	82,8%
92,7%	0,55	86,4%
94,8%	0,60	90,0%
96,3%	0,65	92,9%
97,4%	0,70	94,8%
98,2%	0,75	96,3%
98,8%	0,80	97,4%
99,2%	0,85	98,5%
99,4%	0,90	99,5%
99,6%	0,95	100,0%
99,8%	1,00	
99,8%	1,05	
99,9%	1,10	

A análise do quadro anterior permite concluir que a avaliação com o *SPLIT-Desktop* mostra 82,8% de blocos com dimensão inferior a 0,5 m enquanto no simulador *Kuz-Ram* a percentagem prevista era de 89,8.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 35**

Quadro 20 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m3)
13-01-2010	35	4	3,5	9,2	92	36,49	3.357,08	0,32

Este rebentamento teve o maior número de furos e o menor consumo de explosivo por furo. Os furos encontram-se completamente cheios de água, pelo que foi necessário manter a mesma geometria de furação e utilizar apenas emulsão em cartucho na constituição das cargas.

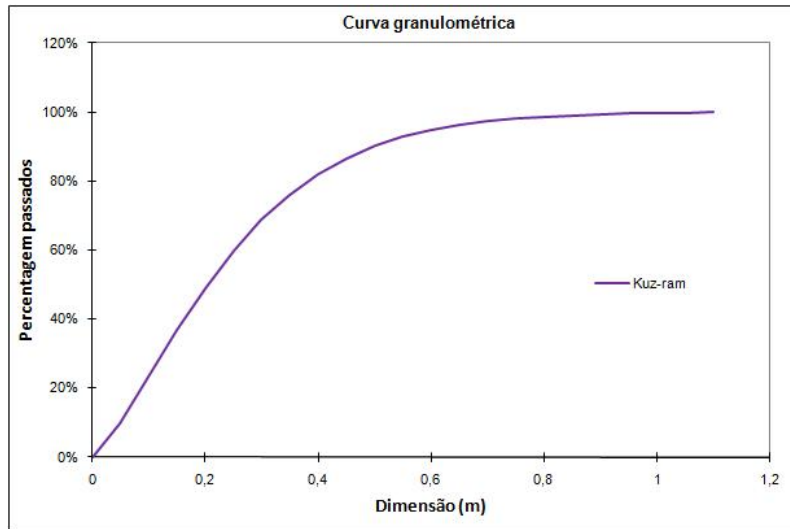


Figura 39 – Gráfico do *Kuz-Ram* do rebentamento de rocha número 35

O simulador *Kuz-Ram* tem uma curva com inclinação típica e próxima do indicado para os rebentamentos anteriores com um patamar na fase final da curva próximo de 0,9 m. Contudo, o resultado observado na pilha do rebentamento é semelhante pois detectaram-se alguns blocos com dimensões próximas de 1 m.

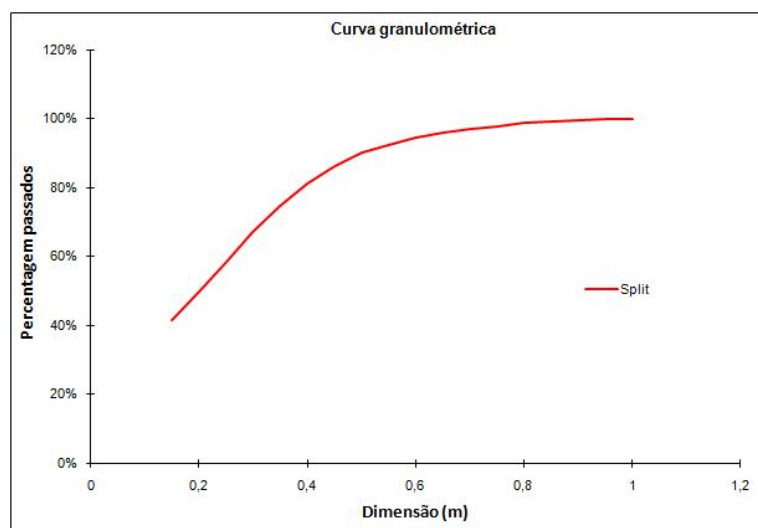


Figura 40 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do rebentamento de rocha número 35

A análise *SPLIT-Desktop* descreve uma curva com desenvolvimento suave que começa a horizontalizar por volta dos 0,5 m.

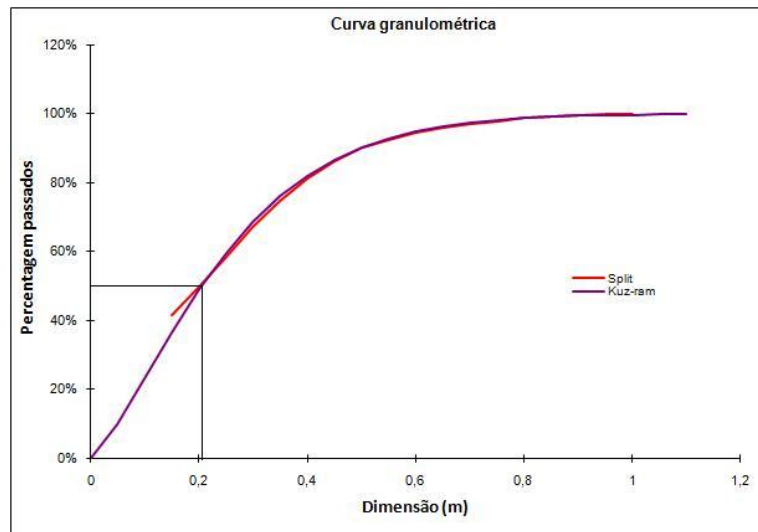


Figura 41 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 35

Analisando as duas curvas verificamos que se encontram praticamente sobrepostas, com uma ligeira separação nos blocos de dimensão inferior a 0,2 m, valor que corresponde ao  $K_{50}$  é para os dois casos.

Quadro 21 – Percentagem de passados do rebentamento 33

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
9,9%	0,05	
23,3%	0,10	
36,7%	0,15	41,4%
49,0%	0,20	49,8%
59,7%	0,25	58,6%
68,7%	0,30	67,0%
76,1%	0,35	74,6%
82,0%	0,40	81,1%
86,6%	0,45	86,3%
90,1%	0,50	90,3%
92,8%	0,55	92,5%
94,8%	0,60	94,7%
96,3%	0,65	95,8%
97,4%	0,70	96,9%
98,2%	0,75	97,9%
98,7%	0,80	98,7%
99,1%	0,85	99,2%
99,4%	0,90	99,6%
99,6%	0,95	100,0%
99,7%	1,00	100,0%
99,8%	1,05	
99,9%	1,10	

No quadro anterior verifica-se que para o *SPLIT-Desktop* existem 90,3% de blocos com dimensão inferior a 0,5 m, praticamente igual aos 90,1% previstos pelo *Kuz-Ram*.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 37**

Quadro 22 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
29-01-2010	<b>37</b>	4	3,7	12,44	72	56,77	4.087,44	0,339

O rebentamento utilizou uma carga específica média quando comparada com os restantes. Durante a perfuração notou-se que a quantidade de água nos furos era menor que nas operações anteriores, tendo por isso sido alterada a geometria dos furos aumentando o afastamento, de modo a obter maior produção.

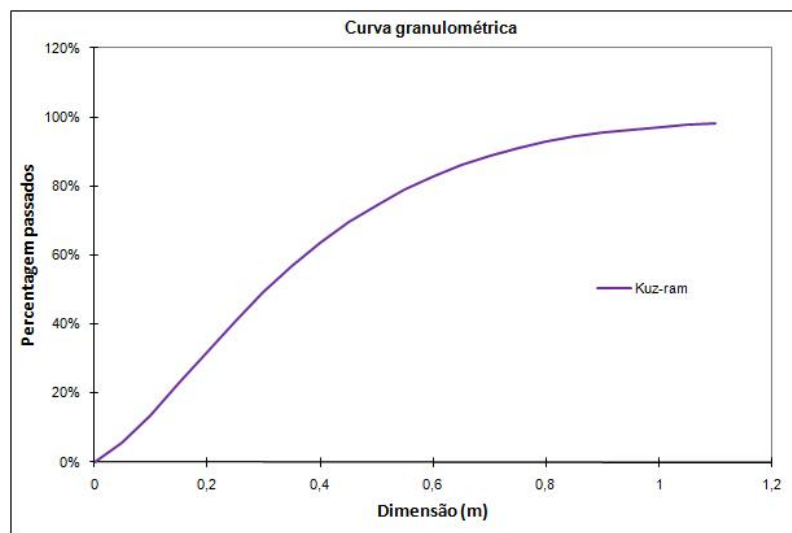


Figura 42 – Gráfico do *Kuz-Ram* do desmonte de rocha número 37

A curva do simulador *Kuz-Ram* possui uma subida muito suave e extensa com tendência para uma granulometria mais grosseira, possivelmente em resultado da modificação do afastamento dos furos e da utilização de um explosivo de menor velocidade de detonação como era o caso do ANFO.

A curva prolonga-se até ao 1,1 m, praticamente sem um patamar horizontal como observado em curvas anteriores, o que indica que existe a possibilidade para o aparecimento de alguns blocos com dimensão próxima de 1 m.

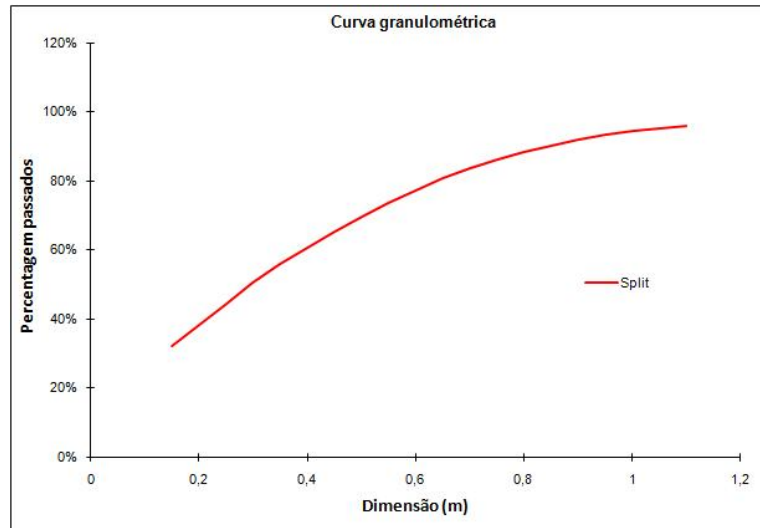


Figura 43 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do desmonte de rocha número 37

A curva da análise *SPLIT-Desktop* apresenta-se igualmente com inclinação pouco acentuada, prolongando-se até próximo de 1,1 m. Admitindo que esta curva é o resultado de uma análise correcta, confirma-se a tendência para uma pior fragmentação com origem no maior afastamento e utilização de ANFO com explosivo principal.

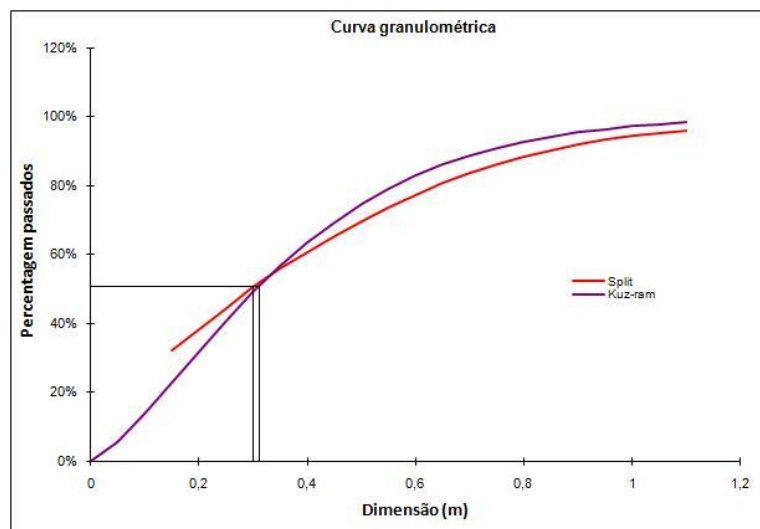


Figura 44 – Gráfico resumo do desmonte de rocha número 37

As duas curvas apresentam uma curvatura semelhante, tendo o modelo *SPLIT-Desktop* um início com maior percentagem de blocos menores. As curvas cruzam-se por volta dos 0,3 m, mantendo posteriormente um paralelismo a uma distância muito próxima uma da outra. As duas têm como limite máximo dos 1,1 m, com uma diferença da percentagem de passados muito reduzida.

Examinando a dimensão dos blocos verificamos que a avaliação *SPLIT-Desktop* e o *Kuz-Ram* conseguem valores semelhantes dos fragmentos resultantes do desmonte com 50% de passados inferior a 0,3 m e 0,31 m respectivamente.

Na realidade, a avaliação visual do resultado do rebentamento não evidencia uma fragmentação tão grosseira facto que se atribui numa má recolha de dados para o *SPLIT-Desktop* provavelmente numa das áreas de maiores bloco.

Quadro 23 – Percentagem de passados do rebentamento 37

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
5,5%	0,05	
13,7%	0,10	
22,8%	0,15	32,3%
32,0%	0,20	38,2%
40,8%	0,25	44,4%
49,1%	0,30	50,4%
56,7%	0,35	55,9%
63,5%	0,40	60,7%
69,5%	0,45	65,4%
74,7%	0,50	69,8%
79,1%	0,55	73,8%
82,9%	0,60	77,3%
86,1%	0,65	80,7%
88,8%	0,70	83,7%
91,0%	0,75	86,1%
92,8%	0,80	88,3%
94,3%	0,85	90,3%
95,5%	0,90	92,2%
96,5%	0,95	93,5%
97,2%	1,00	94,6%
97,9%	1,05	95,4%
98,3%	1,10	96,1%

Analisando o quadro anterior verifica-se que para o *SPLIT-Desktop* existem 69,8% de blocos menos que 0,5 m enquanto para o *Kuz-Ram* essa percentagem é de 74,7.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 40**

Quadro 24 – Parte do quadro resumo das características do desmonte de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
04-02-2010	40	4,2	3,7	12,98	66	68,03	4.489,98	0,369

Este rebentamento foi o realizado com o maior comprimento de furos e maior quantidade de explosivo por furo. Foi aumentado o espaçamento entre furos e esperava-se um maior consumo de ANFO pelo facto de ter diminuído a quantidade de água nos furos. Na realidade veio a verificar-se a necessidade de utilizar emulsão em cartucho em alguns furos do rebentamento.

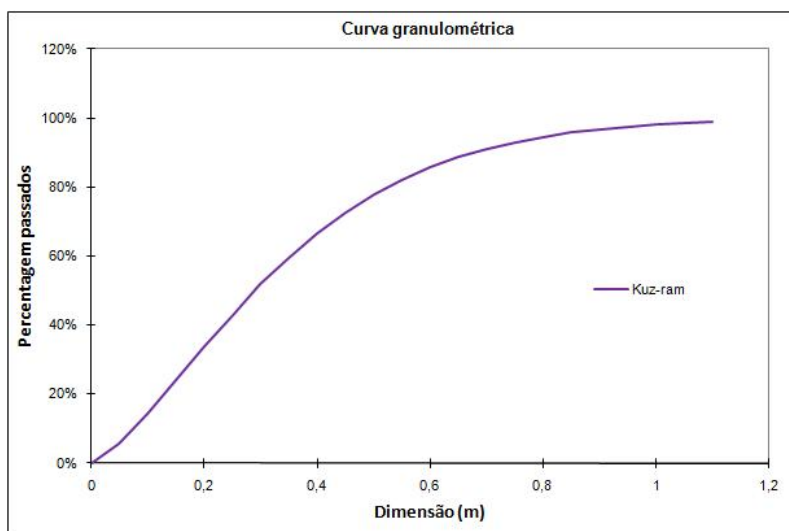


Figura 45 – Gráfico do *Kuz-Ram* do desmonte de rocha número 40

A curva da simulação *Kuz-Ram* idêntica à anterior com uma subida muito suave e extensa até cerca de 1,1 m. No desmonte foi possível confirmar a existência de blocos com a dimensão próxima de 1 m.

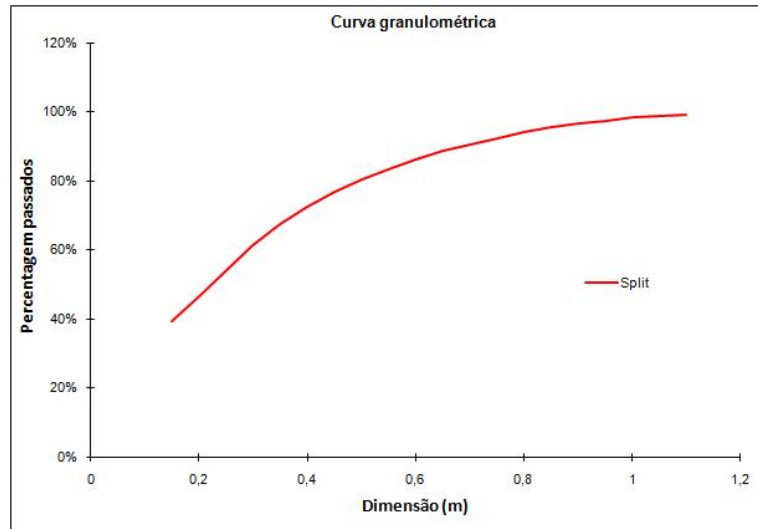


Figura 46 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do desmonte de rocha número 40

A análise *SPLIT-Desktop* desenvolve uma curva inicial suave e regular em toda a sua extensão. A curva termina próximo de 1 m confirmando o que se pode observar na análise visual ao resultado do rebentamento.

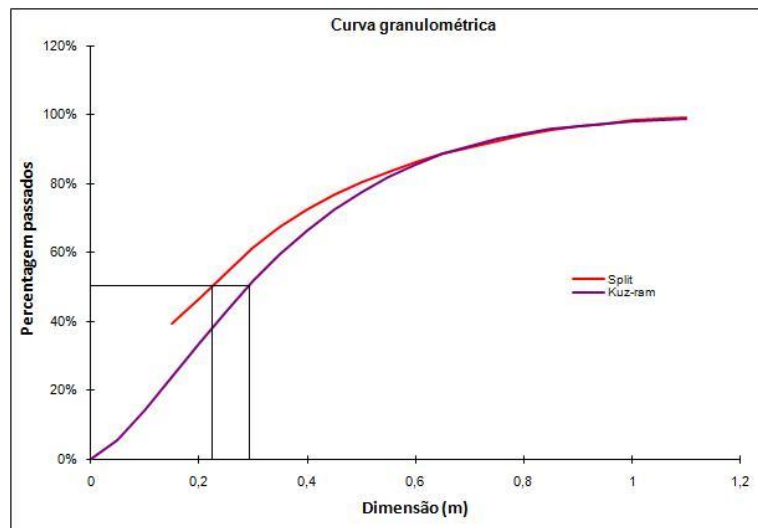


Figura 47 – Gráfico resumo do desmonte de rocha número 40

Analisando as duas curvas verificamos que a *SPLIT-Desktop* indica uma maior percentagem de fragmentos de menor dimensão, sobrepondo-se a partir do 0,6 m terminando ambas próximo de 1,1 m.

Analisando a dimensão dos blocos verificamos que a avaliação *SPLIT-Desktop* indica um  $K_{50}$  de 0,22 m enquanto o simulador *Kuz-Ram* indica um  $K_{50}$  de 0,3 m.

Qualquer dos métodos mostrou-se adequado à avaliação da fracção mais grosseira do rebentamento.

Quadro 25 – Percentagem de passados do rebentamento 40

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
5,6%	0,05	
14,3%	0,10	
23,9%	0,15	39,3%
33,7%	0,20	46,6%
43,1%	0,25	54,4%
51,7%	0,30	61,3%
59,6%	0,35	67,4%
66,5%	0,40	72,6%
72,6%	0,45	77,1%
77,7%	0,50	80,5%
82,0%	0,55	83,4%
85,7%	0,60	86,2%
88,6%	0,65	88,6%
91,1%	0,70	90,6%
93,0%	0,75	92,5%
94,6%	0,80	94,3%
95,8%	0,85	95,7%
96,8%	0,90	96,6%
97,6%	0,95	97,5%
98,2%	1,00	98,4%
98,6%	1,05	98,9%
99,0%	1,10	99,4%

Analisando o quadro anterior verificamos que para o *SPLIT-Desktop* existem 80,5% de fragmentos menores que 0,5 m enquanto para o *Kuz-Ram* esse valor é de 77,7%.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 43**

Quadro 26 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
18-03-2010	<b>43</b>	4,2	3,7	12,61	55	56,73	3.120,15	0,317

A geometria de perfuração, a profundidade, explosivo por furo são dos mais altos, mas a carga específica é uma das mais baixas. A quantidade de água é menor, conseguindo-se assim o cumprir quase na totalidade o plano de rebentamento calculado, prognosticando uma fragmentação com uma qualidade elevada.

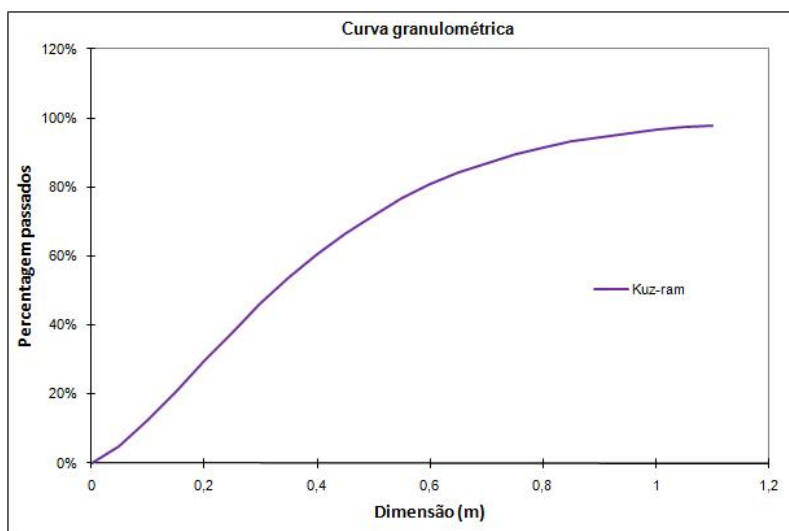


Figura 48 – Gráfico do *Kuz-Ram* do rebentamento de rocha número 43

O simulador *Kuz-Ram* descreve uma curva linear e contínua, onde prevê uma distribuição de blocos até 1,1 m.

Na realidade isso não se verifica, porque a observação do resultado do rebentamento mostra uma fragmentação muito boa com a dimensão máxima dos blocos menor que 1,1 m.

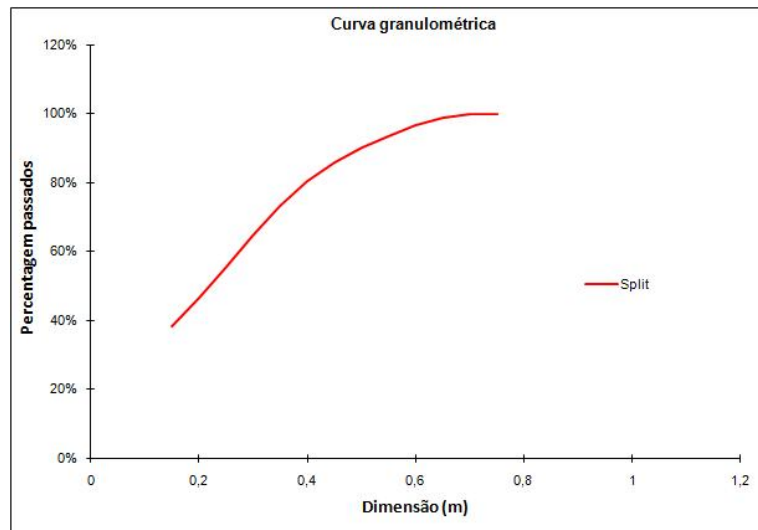


Figura 49 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do rebentamento de rocha número 43

A análise com o *SPLIT-Desktop* apresenta uma curva com um início acentuado, que termina na horizontal por volta dos 0,70 m. A dimensão máxima dos blocos é de pouco mais de 0,70 m, aparentemente de acordo com o que é observado.

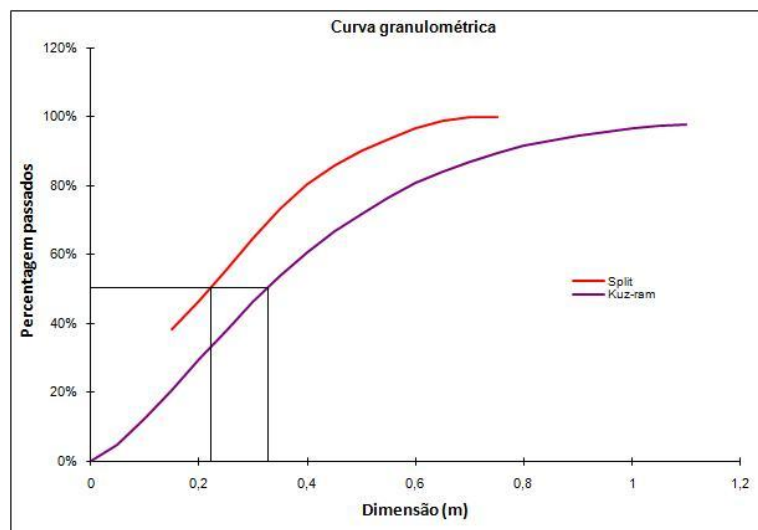


Figura 50 – Gráfico resumo do rebentamento de rocha número 43

Analisando as duas curvas verificamos que se mantêm quase paralelas, embora a *SPLIT-Desktop* termine antes do 0,8 m. A dimensão máxima no *SPLIT-Desktop* é um pouco mais de 0,7 m, aceitando-se este valor tendo em conta o que se visualizou na pilha. Apresenta mais de 50% de blocos de dimensão inferior a 0,23 m, enquanto o simulador *Kuz-Ram* indicava um  $K_{50}$  de 0,34 m.

Quadro 27 – Percentagem de passados do rebentamento 43

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
4,9%	0,05	
12,4%	0,10	
20,8%	0,15	38,2%
29,6%	0,20	46,6%
38,1%	0,25	55,5%
46,2%	0,30	64,7%
53,7%	0,35	73,2%
60,5%	0,40	80,4%
66,6%	0,45	85,8%
72,0%	0,50	90,2%
76,7%	0,55	93,4%
80,7%	0,60	96,6%
84,1%	0,65	98,7%
87,0%	0,70	99,9%
89,5%	0,75	100,0%
91,5%	0,80	
93,2%	0,85	
94,6%	0,90	
95,7%	0,95	
96,6%	1,00	
97,3%	1,05	
97,9%	1,10	

Analisando o quadro anterior verificamos que a avaliação *SPLIT-Desktop* mostra 90,2% de blocos de dimensão inferior a 0,5 m enquanto o simulador *Kuz-Ram* indicava apenas 72,0%.

- **Análise da fragmentação do rebentamento número 50**

Quadro 28 – Parte do quadro resumo das características do rebentamento de rocha

DESMONTE COM EXPLOSIVOS		GEOMETRIA DA DESMONTE				EXPLOSIVO		
DATA	REBENTAMENTO	ESPAÇAMENTO (m)	AFASTAMENTO (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	EXPLOSIVO POR FURO (kg)	EXPLOSIVO TOTAL (kg)	CARGA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )
14-04-2010	50	4,3	3,7	12,43	43	54,88	2.359,84	0,305

Partilha das mesmas condições do rebentamento de rocha anterior, excepto a carga específica que neste caso é a mais baixa de todas. Uma vez que a presença de água era significativamente menor foi possível aumentar o espaçamento entre furos.

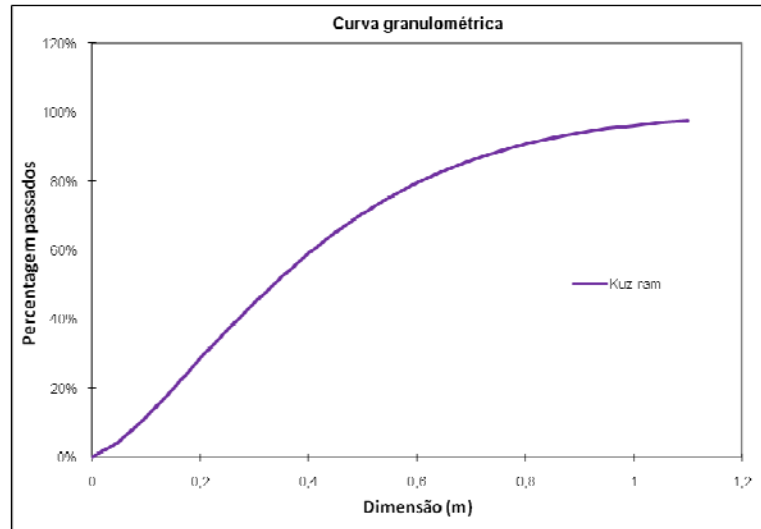


Figura 51 – Gráfico do *Kuz-Ram* do desmonte de rocha número 50

O simulador *Kuz-Ram* descreve uma curva extensa dando origem a uma fragmentação com calibres mais elevados e termina com bloco de dimensão próximo de 1,1 m.

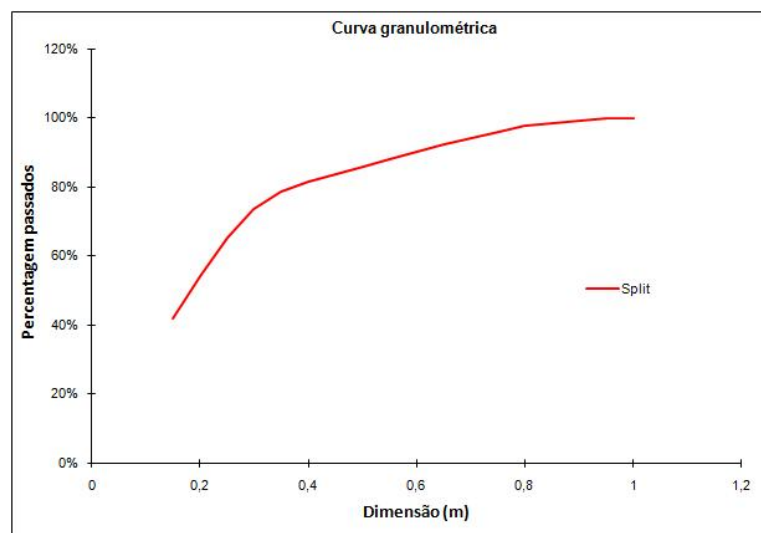


Figura 52 – Gráfico do *SPLIT-Desktop* do desmonte de rocha número 50

A análise do *SPLIT-Desktop* apresenta uma curva com um início regular, mas próximo de 0,35 m sofre uma mudança brusca de direcção.

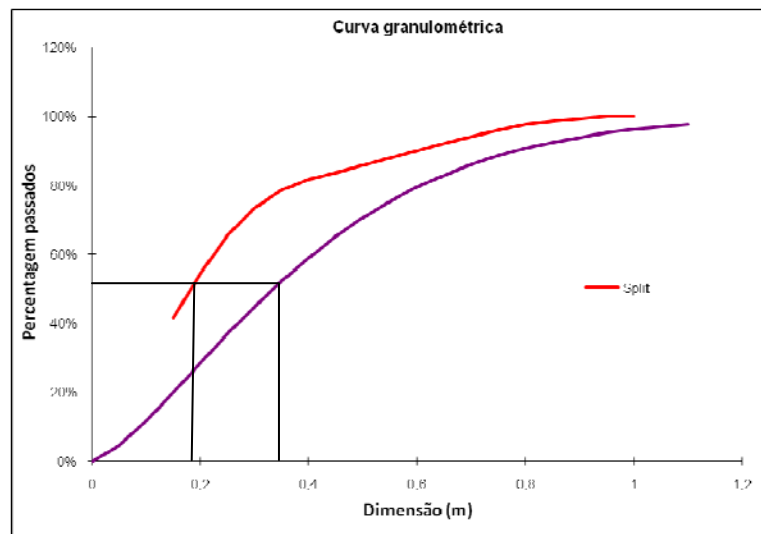


Figura 53 – Gráfico resumo do desmonte de rocha número 50

As curvas começam separadas com a análise *SPLIT-Desktop* a apresentar uma fragmentação com menores calibres, mas após a mudança de direcção as curvas juntam-se, continuando assim até ao final, embora a curva *SPLIT-Desktop* termine próximo de 1 m.

A mudança de direcção da curva pode ter ocorrido possivelmente devido a uma má delineação de uma ou mais imagens analisadas pelo *SPLIT-Desktop* para este desmonte de rocha, ou a uma má tomada de imagens não ideais para a realização deste modelo.

Observando a dimensão dos blocos verificamos que o *SPLIT-Desktop* apresenta um  $K_{50}$  de 0,19 m enquanto o simulador *Kuz-Ram* indica um  $K_{50}$  de 0,35 m.

Quadro 29 – Percentagem de passados do rebentamento 50

<i>Kuz-Ram</i>	Dimensão (m)	<i>SPLIT-Desktop</i>
Percentagem passados		Percentagem passados
0,0%	0	
4,6%	0,05	
11,9%	0,10	
20,1%	0,15	41,8%
28,5%	0,20	54,4%
36,9%	0,25	65,4%
44,9%	0,30	73,5%
52,4%	0,35	78,8%
59,1%	0,40	81,7%
65,3%	0,45	83,8%
70,7%	0,50	85,9%
75,4%	0,55	88,0%
79,6%	0,60	90,2%
83,1%	0,65	92,3%
86,1%	0,70	94,2%
88,7%	0,75	96,1%
90,8%	0,80	97,7%
92,6%	0,85	98,6%
94,0%	0,90	99,3%
95,2%	0,95	100,0%
96,2%	1,00	100,0%
97,0%	1,05	
97,6%	1,10	

Analisando o quadro anterior verificamos que a avaliação *SPLIT-Desktop* mostra 85,9% de blocos de dimensão inferior a 0,5 m enquanto o simulador *Kuz-Ram* indicava apenas 70,7%.

**6**

**ANÁLISE AO COMPORTAMENTO DAS VIBRAÇÕES**



## 6 ANÁLISE AO COMPORTAMENTO DAS VIBRAÇÕES

Esta parte do trabalho tem como objectivo comprovar se a fórmula de Langefors é compatível com o maciço em estudo, para futuras utilizações neste campo.

No quadro seguinte apresentam-se os valores que foram considerados para o cálculo da transmissibilidade do maciço em estudo. Os registos das vibrações podem ser consultados do anexo 3. Os rebentamentos com explosivos deste estudo são os que foram utilizados para a avaliação da fragmentação, partilhando assim das mesmas características.

Como é do conhecimento geral as vibrações atenuam-se com a distância, e variam de acordo com a carga por tempo e com o tipo de maciço. Os dois primeiros podem ser considerados como controláveis, mas as características geológicas são inerentes a cada local de rebentamento podendo apresentar alterações significativas em locais muito próximos.

Utilizando a fórmula de Langefors consegue-se calcular o factor de transmissibilidade da rocha sendo necessário conhecer os seguintes dados: a carga instantânea por tempo, a distância da fonte emissora até ao receptor da vibração e a velocidade de vibração.

A carga instantânea é a carga por furo, se cada furo possuir um tempo diferente para rebentamento. As distâncias que aqui se apresentam são medidas entre o local do rebentamento com explosivos e do local onde está colocado o sismógrafo. Os registos de vibração são realizados por aparelhos certificados com calibrações periódicas.

Quadro 30 – Quadro resumo das características do desmonte de rocha

CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL		GEOMETRIA DA PEGA					EXPLOSIVO	VIBRAÇÃO		FACTOR DE TRANSMISSIBILIDADE
DATA	PLANO DE FOGO	ESP. (m)	AFAST. (m)	ALTURA MÉDIA BANCADA (m)	N.º FUROS	CARGA POR FURO (kg)	DIST. REAL (m)	VIBRAÇÃO (mm/s)		
04-11-2009	31	4,2	3,7	10,28	80	46,25	50	9,25	26	
06-01-2010	33	4	3,5	10,02	63	42,42	200	2,92	24	
08-01-2010	34	4	3,5	10,82	53	50,94	200	2,42	18	
13-01-2010	35	4	3,5	9,2	92	36,49	190	2,77	23	
29-01-2010	37	4	3,7	12,44	72	56,77	165	3,2	20	
04-02-2010	40	4,2	3,7	12,98	66	68,03	110	8,87	37	
18-03-2010	43	4,2	3,7	12,61	55	56,73	70	25,88	83	
14-04-2010	50	4,3	3,7	12,43	43	54,88	45	20,99	49	
Valor a 90%		3,7	3,3	10,21	59	46,41	116	8,58	31	

- Legislação

Os valores da velocidade vibratória máxima em estruturas civis estão limitados pela norma NP-2074 de 1983, "Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares". Ela estabelece valores para a velocidade de vibração de pico VL, de acordo com a expressão (Formula 7):

$$VL = \alpha \times \beta \times \delta \times 10^{-2} \text{ (mm/s)}$$

(7)

A utilização desta expressão dentro da gama possível das constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$  permite a construção do quadro 31.

Quadro 31 – Parte do quadro resumo da norma NP-2074

TIPO DE TERRENO	TIPO DE CONSTRUÇÃO	Nº MÉDIO DE SOLICITAÇÕES DIÁRIAS	VALORES LIMITE	
			VL= ( $\alpha \times \beta \times \delta$ ) x 10 <sup>-2</sup> m/s	
( a )	( b )	( d )	VL= ( $\alpha \times \beta \times \delta$ ) x 10 mm/s	
Rocha e solos coerentes rijos v > 2000 m/s $\alpha = 2,0$	<b>Construções que exigem cuidados especiais:</b> Monumentos e outros patrimónios históricos sensíveis, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	≤ 3 (1,0)	10,0	mm/s
		> 3 (0,7)	7,0	mm/s
	<b>Construções correntes:</b> Como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	≤ 3 (1,0)	20,0	mm/s
		> 3 (0,7)	14,0	mm/s
	<b>Construções reforçadas:</b> Como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	≤ 3 (1,0)	60,0	mm/s
		> 3 (0,7)	42,0	mm/s

Esta Norma destina-se a fixar um critério de limitação dos parâmetros característicos das vibrações produzidas por explosões, cravação de estacas e outras operações. Aplica-se a vibrações provocadas em construções de habitação, indústria ou serviços.

- Equipamento utilizado

Os equipamentos utilizados para a medição das vibrações foram do tipo UVS 1500 e Vibracord VX com as seguintes características:

O sismógrafo UVS 1500:

- 4 canais, munido de monitor que possui uma gama de frequências de 0 a 250 Hz
- O geofone triaxial modelo Std 4015-225 incorporado no aparelho, possui as seguintes características:

- Sensibilidade: 20 mV/mm/m, +- 15%;
- Gama de frequências: 4 – 1000 Hz;
- Gama dinâmica: 12500 mm/s a 1000 Hz.

O sismógrafo Vibracord VX:

Quadro 32 – Adaptado do quadro resumo das características do sismógrafo vibracord VX (Proyectos Mineros ICAM, S.L., 2008)

Número de canais	7
Memória de armazenamento (megas)	25
Alcance da frequência (Hz)	0 - 300
Tempo de gravação (segundos)	1 - 32 em intervalos de 1
Transferência de dados	USB
Bateria exterior (volt)	12
Bateria interior	Li-ion
Autonomia (horas)	20
Visor	4X20
Dimensões (mm)	340X300X150
Peso (sem acessórios) (Kg)	4

- Localização do sismógrafo

Por razões lógicas o sismógrafo deve ser colocado na estrutura mais próxima e se possível no elemento que se pretende proteger das vibrações. Assim o sismógrafo era colocado no encontro da passagem superior mais próxima, permitindo com isto uma leitura consistente e válida para todos os desmontes. Esta localização foi mantida fixa para todos os rebentamentos para melhor avaliar os resultados obtidos.

O sismógrafo está localizado numa direcção contrária à direcção do desmorte, isto é, está situado no lado contrario ao movimento do desmorte, aproximadamente no eixo da via de rodagem.

- Orientação das descontinuidades

Quanto a organização das descontinuidades, podemos dizer que a família principal encontra-se perpendicular à frente de desmorte. O tipo de maciço em si também proporciona uma boa atenuação ou dificulta a passagem das ondas vibratórias, porque apesar de estarmos na presença de um quartzito este apresenta-se muito fracturado e com sinais de alteração. Assim pode-se dizer que se existe uma situação vantajosa que permite aumentar a carga instantânea, sem nunca ultrapassar o limite admissível para o tipo de estrutura que se pretende proteger.

As ondas vibratórias possuem como já descrito, dificuldade em atravessar zonas com descontinuidades, funcionando estas como uma barreira natural e reduzindo ou atenuando a sua intensidade.

## **6.1 Avaliação dos resultados**

O valor limite de velocidade e vibração para o caso estudado situava-se em 60 mm/s, determinado nas seguintes condições: rocha e solos coerentes rijos com velocidade sísmica superior a 2000 m/s e um alfa igual a dois, construções reforçadas como edifícios com estrutura de betão armado ou edifícios industriais de construção recente, etc., com beta igual a três e por último com um número médio de solicitações diárias inferior a três.

De notar que o uso de detonadores não eléctricos permite detonar cada furo com um tempo diferente assegurando assim que a quantidade de carga instantânea é igual à carga por furo.

Seria espectável que à medida que os rebentamentos se fossem aproximando do local onde se situa o sismógrafo, os valores da vibração aumentassem se as cargas instantâneas forem aproximadamente iguais.

No entanto tal não se verifica, o que permite concluir que o factor distância não é o único a interferir com a intensidade das vibrações produzidos pelos rebentamentos.

Verifica-se por isso que o coeficiente de dissipação da rocha (K) tem um comportamento irregular. Contudo existem cinco rebentamentos onde foi possível obter um valor de K entre 18 e 26, em resultado de velocidades de vibração da partícula entre 2,42 mm/s e 9,25 mm/s. A carga específica destes cinco rebentamentos variou entre 0,32 e 0,37 kg/m<sup>3</sup>. Curiosamente o menor valor de

velocidade de vibração foi obtido com a carga específica mais elevada e corresponde também ao menor valor K.

Daqui concluí-se que a carga específica mais elevada poderá ser a que melhor comportamento possuiu para contrariar a resistência da rocha e o efeito de confinamento.

Outras das conclusões reconhecidas é o facto de alguns dos maiores valores de K estarem associados a rebentamentos com ANFO. A irregularidade dos valores registados para o coeficiente K só pode ser encontrada nas condições geológicas locais ou na dinâmica do rebentamento, que por utilizar o ANFO com baixa velocidade de detonação e eventualmente prejudicado pela existência de água, poderá ter conduzido a uma detonação lenta, de baixa pressão no interior do furo com mau aproveitamento da energia para fragmentar a rocha e conseqüentemente uma maior transmissão de energia ao maciço rochoso.

**7**

## **CONCLUSÕES**



## 7 CONCLUSÕES

O estudo da fragmentação resultante do rebentamento com explosivos é uma matéria complexa pelo elevado número de variáveis envolvidas. Foi intenção deste trabalho compreender de que modo a fragmentação natural condiciona a fragmentação resultante de um rebentamento com explosivos e como segundo objectivo, comparar dois modelos de avaliação de fragmentação, um por previsão com base em dados conhecidos (simulador *Kuz-Ram*) e outro por aplicação prática de um método de avaliação com digitalização de imagens para formulação de uma curva granulométrica (*SPLIT-Desktop*).

Quando analisada a percentagem de blocos com a dimensão média,  $K_{50}$ , os modelos de previsão e avaliação da fragmentação mostram possuir alguma proximidade, existindo inclusive 3 rebentamentos onde as curvas praticamente coincidem (rebetamentos nº 34, 35 e 37).

Nos restantes rebentamentos verifica-se uma diferença no diâmetro médio dos blocos de cerca de 0,1 m. O método de avaliação *SPLIT-Desktop* dá indicação de blocos de menor dimensão.

De um modo geral, também se verifica que o simulador *Kuz-Ram* indica a existência de blocos com dimensão ligeiramente acima de 1,1 m em todas as curvas analisadas, enquanto na análise *SPLIT-Desktop* esse valor situa-se geralmente abaixo de 1 m só o ultrapassando nos rebentamentos 37 e 40. Pelo facto da curva *Kuz-Ram* se desenvolver em patamar na fase superior, indicando uma pequena quantidade de blocos de dimensão superior a 1 m, leva-nos a concluir que a diferença relativa entra as duas curvas não tem um significado elevado nos resultados do rebentamento. De qualquer modo, é de realçar que a curva *Kuz-Ram* tem pouca variação na dimensão máxima dos blocos independentemente da dimensão do bloco *in situ*. As variações mais significativas no desenvolvimento de diferentes curvas são só observadas na percentagem de blocos de maior dimensão, que vai aumentando sempre que aumenta a dimensão do bloco *in situ*. O simulador *Kuz-Ram* está estruturado de modo a desenhar uma curva completa em todas as situações avaliadas, pelo que as diferenças de resultados em função dos modelos de rebentamento utilizados só podem ser avaliadas no relatório anexo à curva.

A utilização do software *SPLIT-Desktop* para avaliação da fragmentação dos rebentamentos de rocha com explosivos, parece ser um método adequado, embora para que os resultados sejam mais fiáveis, seja necessário realizar um razoável número de fotografias quer da parte superior da pilha quer da parte interior durante a fase de movimentação.

É ainda possível concluir que o simulador *Kuz-Ram*, quando obtidos os dados reais das circunstâncias particulares de cada rebentamento, pode ser um bom indicador da previsão de fragmentação.

O trabalho não foi conclusivo quanto à variação da fragmentação decorrente da variação da carga específica. De facto, porque a recolha de dados decorreu em ambiente de produção, as alterações introduzidas aos diferentes rebentamentos originaram sempre circunstâncias diferentes. Não existem por isso dois rebentamentos completamente iguais, o que para um trabalho de análise é uma situação desfavorável.

Os rebentamentos nº 34 e 35 com cargas específicas diferentes (0,37 e 0,32 kg/m<sup>3</sup> respectivamente) apresentam um K<sub>50</sub> de 0,22 m nos dois modelos de análise.

Outro exemplo interessante é a comparação entre os rebentamentos nº 50 e 40 com cargas específicas respectivamente de 0,30 e 0,37 kg/m<sup>3</sup>. O rebentamento 50 foi o que utilizou menor carga específica de todos os realizados e uma área desmontada superior aos restantes, tendo, na análise com o *SPLIT-Desktop* evidenciado uma fragmentação com K<sub>50</sub> de 0,19 m, enquanto o rebentamento 40 evidenciou um K<sub>50</sub> de 0,22 m.

Outra análise possível é a comparação entre os rebentamentos 33 e 50 com cargas específicas, tipo de explosivo e áreas desmontadas por furo significativamente diferentes. No caso do desmonte 33 foi utilizada a emulsão, a área desmontada foi de 4 x 3,5 m, a carga específica de 0,338 kg/m<sup>3</sup> e resultou um K<sub>50</sub> de 0,25 m. Já o desmonte 50 utilizou ANFO, uma área desmontada de 4,3 x 3,7 m, uma carga específica de 0,305 kg/m<sup>3</sup> e produziu um K<sub>50</sub> de 0,19 m.

Conclui-se também, que as alterações introduzidas no conteúdo da carga de coluna por existência de água nos furos, não deverá ter interferido significativamente com o resultado dos rebentamentos, uma vez que os rebentamentos nº 35 onde se utilizou emulsão e o rebentamento nº 37 onde se utilizou o ANFO apresentam valores idênticos do K<sub>50</sub>.

Perante estes dados poder-se-á concluir que a fragmentação obtida nos diversos rebentamentos, se encontra condicionada pela geologia particular de cada local e grau de fracturação, não tendo, nos casos analisados, sido encontrado um padrão de comportamento associada à carga específica, tipo de explosivo, área desmontada por furo ou presença de água nos furos.

Durante a investigação relativa à fragmentação foi também analisado o comportamento das vibrações no tipo de maciço rochoso em que se realizaram os rebentamentos.

O coeficiente de dissipação da rocha (K) tem um comportamento irregular. Contudo existem cinco rebentamentos onde foi possível obter um valor de K entre 18 e 26, em resultado de velocidades de vibração da partícula entre 2,42 mm/s e 9,25 mm/s. A carga específica destes cinco rebentamentos variou entre 0,32 e 0,37 kg/m<sup>3</sup>. Curiosamente o menor valor de velocidade de vibração foi obtido com a carga específica mais elevada e corresponde também ao menor valor K.

Daqui concluí-se que a carga específica mais elevada poderá ser a que melhor comportamento possuiu para contrariar a resistência da rocha e o efeito de confinamento.

Outras das conclusões reconhecidas é o facto de alguns dos maiores valores de K estarem associados a rebentamentos com ANFO. A irregularidade dos valores registados para o coeficiente K só pode ser encontrada nas condições geológicas locais ou na dinâmica do rebentamento, que por utilizar o ANFO com baixa velocidade de detonação e eventualmente prejudicado pela existência de água, poderá ter conduzido a uma detonação lenta, de baixa pressão no interior do furo com mau aproveitamento da energia para fragmentar a rocha e conseqüentemente uma maior transmissão de energia ao maciço rochoso.



**8**

**REFERÊNCIAS**



## 8 REFERÊNCIAS

Albertão G. A. & Martisn P., 2006. Estratos Calcários da Pedreira Poty (Paulista), PE. Publicado na Internet no endereço <http://www.unb.br>.

Bernardo, P. & Dinis da Gama C., 2005. Sugestões para melhoria da norma portuguesa de controle de vibrações em construções. Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal.

Cook M. A., 1974. The Science of Industrial Explosives. Primeira edição. Ireco Chemicals, United States of America.

Dick R. A., Fletcher L. & D'Andrea D., 1986. Explosives and Blasting Procedures. Westport, Washington.

Durand Aldo, 1995. Estudo de Estabilidade de Taludes em Mineração a partir de Classificação Geomecânica. Universidade de Brasília. (Tese Mestrado) (<http://www.geotecnia.unb.br>)

Explosives Limited. Bullk SuperAN Explosive: Booster Sensitive Emulsion and ANFO Explosive Mixture. Explosives Limited, Canada. (<http://www.explosives.com>)

Fraenkel K. H., 1958. Manual on Rock Blasting. Segunda edição. Atlas Copco Aktiebolag, Stockholm.

Franklin J. & Katsabanis T., 1996. Measurement of Blast Fragmentation. A. A. Balkema, Netherlands.

Francisco V. R., Guerreiro H. & Ferreira N. 2005. Optimização do diagrama de fogo numa exploração de basalto, com objectivos industriais e ambientais. In: optimização do diagrama de fogo numa exploração de basalto, com objectivos industriais e ambientais, 2005.

Galery Robert. Fragmentação de minérios: primeira parte. Departamento de Engenharia de Minas UFMG.

Gama C. D., 1998. 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 e Mineiro, 1998.

Gomes L., Carneiro G. & Vieira A., 2004/2005. Desmonte com Explosivos I. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Sebenta)

Gomes L., Carneiro G. & Vieira A., 2004/2005. Desmonte com Explosivos II. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Sebenta)

Gustafsson R., 1973. Swedish Blasting Technique. Nora Boktryckeri AB, Nora.

Herrmann C., 1968. Manual de Perfuração de Rocha. Segunda edição. Editora Poligno, São Paulo.

Holmberg, R., 2000. Explosives & Blasting Technique. A. A. Balkema, Netherlands. (<http://www.sciencedirect.com>)

Kinney G. F., 1962. Explosives socks in Air. Primeira edição. The Macmillan Company, New York.

Langefors U. & Kihlström, 1963. The Modern Technique of Rock Blasting. Segunda edição. Almqvist & Wiksell, Stockholm.

Leet L. D., 1960. Vibrations from Blasting Rock. Library of Congress Catalog, United States of America.

Morais J. L. & Gripp M., 2004. Fundamentos para Simulação dos Desmontes de Rocha por Explosivos. R. Esc. Minas de Ouro Preto. pp 241 – 248. (Publicação)

Moser P., et al, 2007. Fourth EFEE World Conference on Explosives and Blasting. European Federation of Explosives Engineers, UK.

Olofsson S. O, 2002. Applied Explosives Technology for Construction and Mining. Applex AB, Sweden

Orica 2001. Orica Loggers: Paper Packaged. Detonator Sensitive Emulsion Explosive. Orica Canada Inc., Mississauga, Canada.

Palangio T. W. & Palangio T. C., 2005. Advanced automatic optical blast fragmentation sizing and tracking. Brighton Conference Proceedings, European Federation of Explosives Engineers, 2005.

Palmström A. & Singh R., 2001. The Deformation Modulus of Rock Masses. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 16, no. 3. pp 115 – 131

Silva M. A. & Félix N., 2008. Mineração Romana no Concelho de Paredes. Oppidum, número especial. (<http://www.rotadoromanico.com>)

Split Engineering, LLC, 2003-2004. Split-Net: Instrution Manual. Split Engeneering, Tucson, USA.

Thornton D. M., Kanchibotla S. S. & Esterle J. S.. A Fragmentation Model to Estimate ROM Size Distribution of Soft Rock Types. Publicação das empresas, Julius Kruttsschnitt Mineral Research Center, DynoConsult, CSIRO. (<http://www.sciencedirect.com>)

## **SITES DE PESQUISA**

<http://e-geo.ineti.pt> (Consultado em 05 de Outubro de 2010)

<http://www.dynonobel.com> (Consultado em 26 de Maio de 2010)

<http://www.orica.com> (Consultado em 5 de Janeiro de 2010)

<http://www.scielo.br> (Consultado em 12 de Março de 2009)

<http://www.spliteng.com> (Consultado em 16 de Março de 2009)

<http://www.unb.br> (Consultado em 30 de Novembro de 2009)

<http://www.geotecnia.unb.br> (Consultado em 14 de Janeiro de 2010)

<http://www.explosives.com> (Consultado em 27 de Fevereiro de 2010)

<http://www.sciencedirect.com> (Consultado em 10 de Março de 2010)

<http://www.rotadoromanico.com> (Consultado em 8 de Abril de 2010)

<http://www.univ-ab.pt> (Consultado em 03 de Outubro de 2010)

<http://www.geotecnia.unb.br> (Consultado em 14 de Janeiro de 2010)



***ANEXOS***

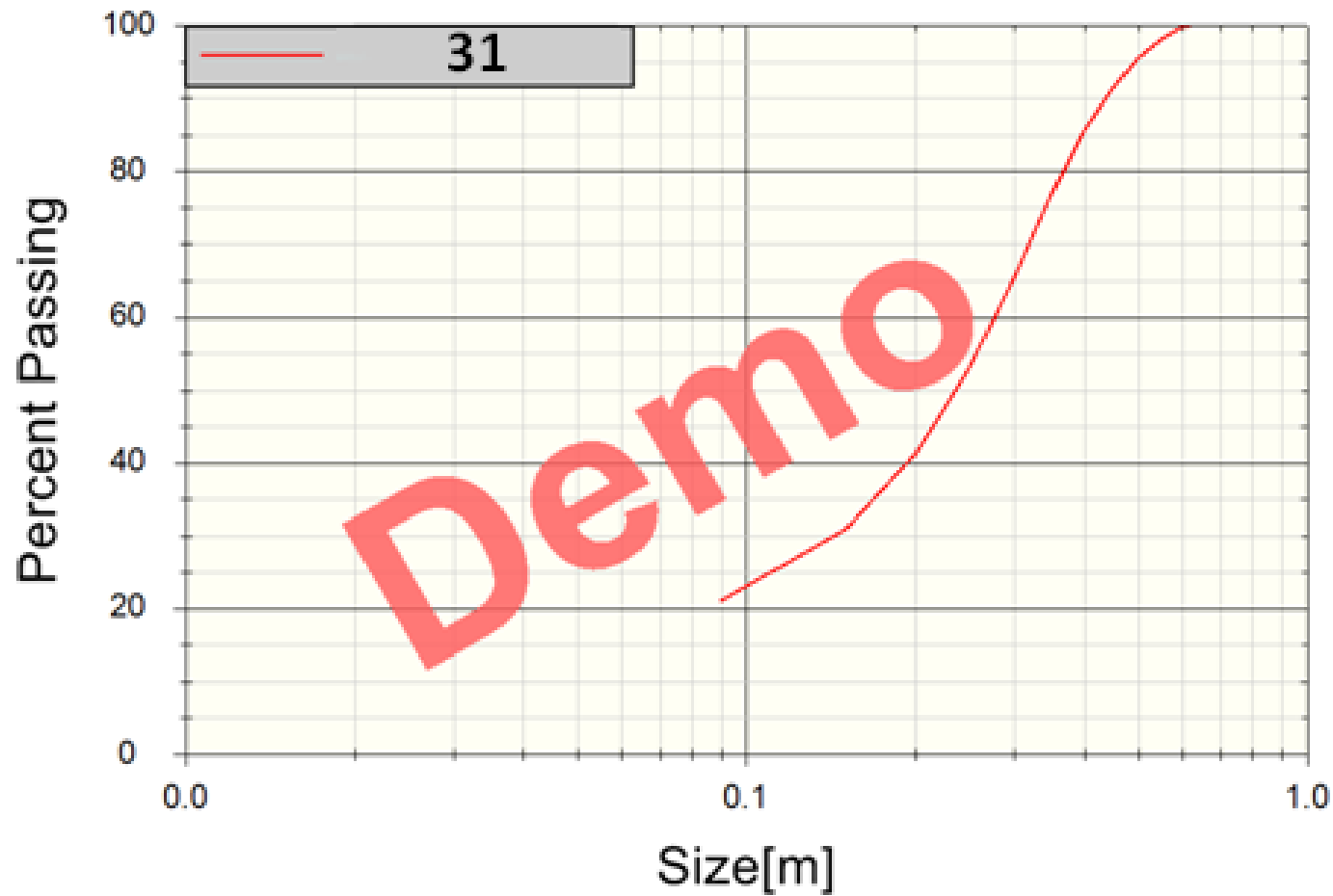


## **Anexo 1**

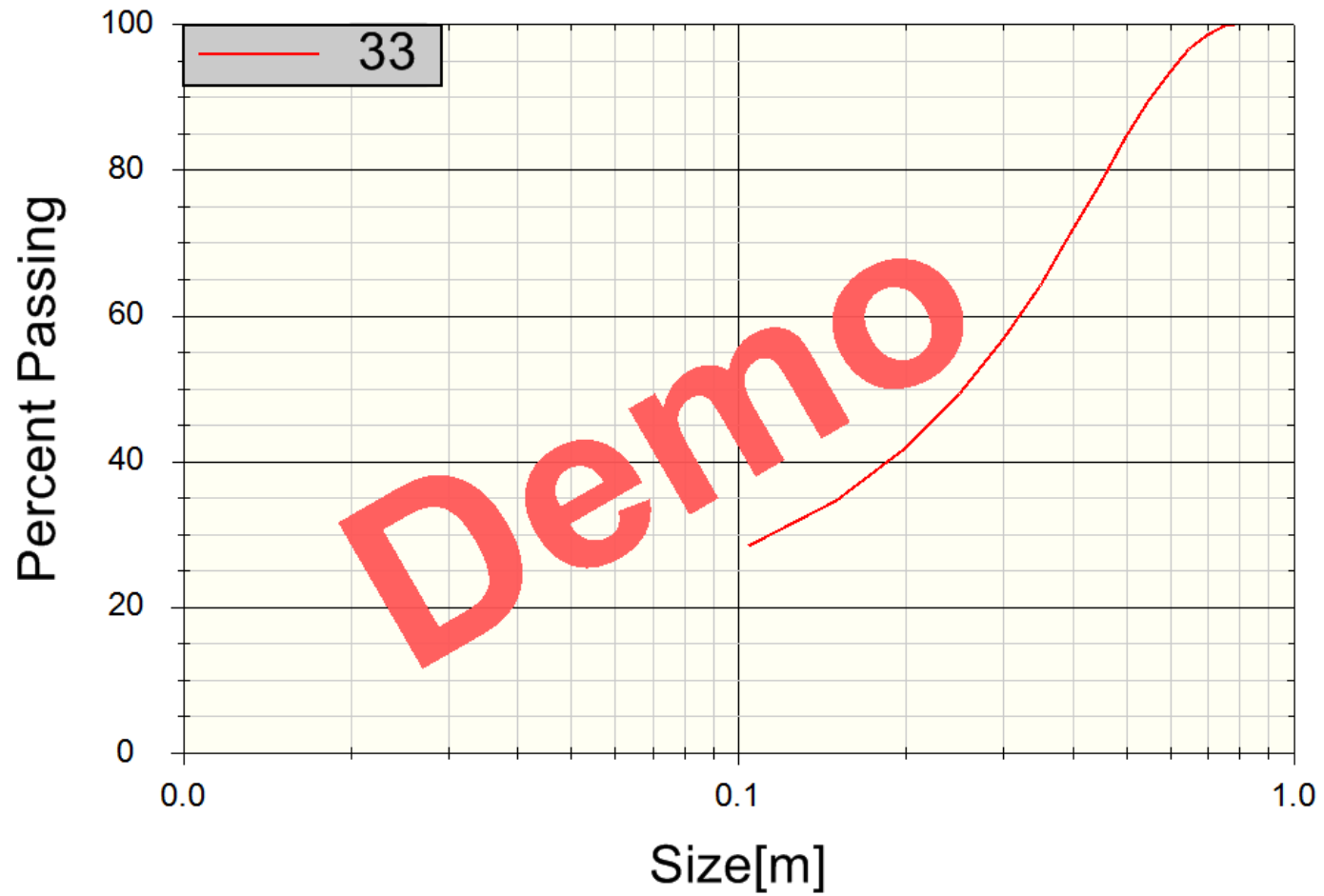
CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO SPLIT-DESKTOP



# Size Distribution



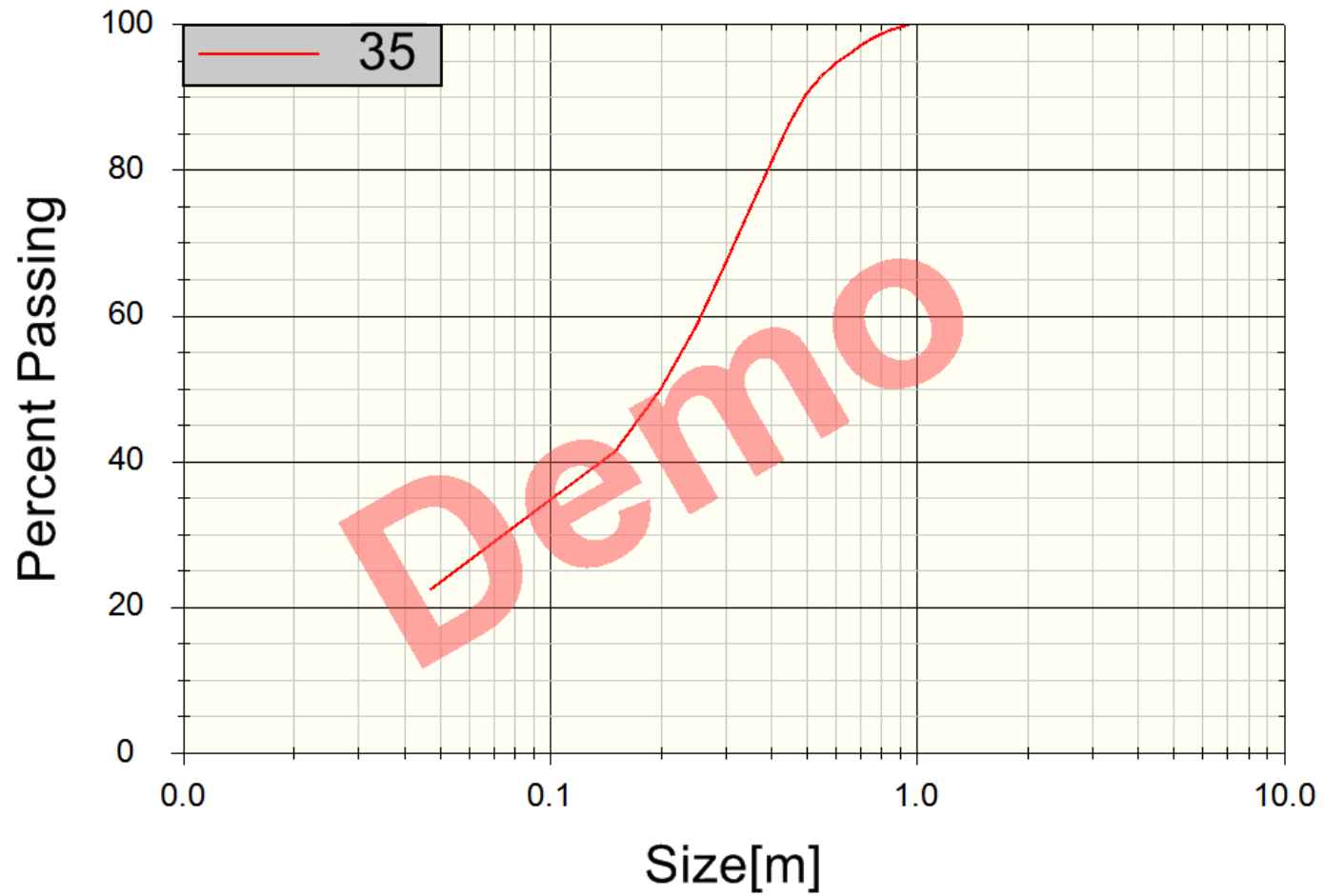
# Size Distribution



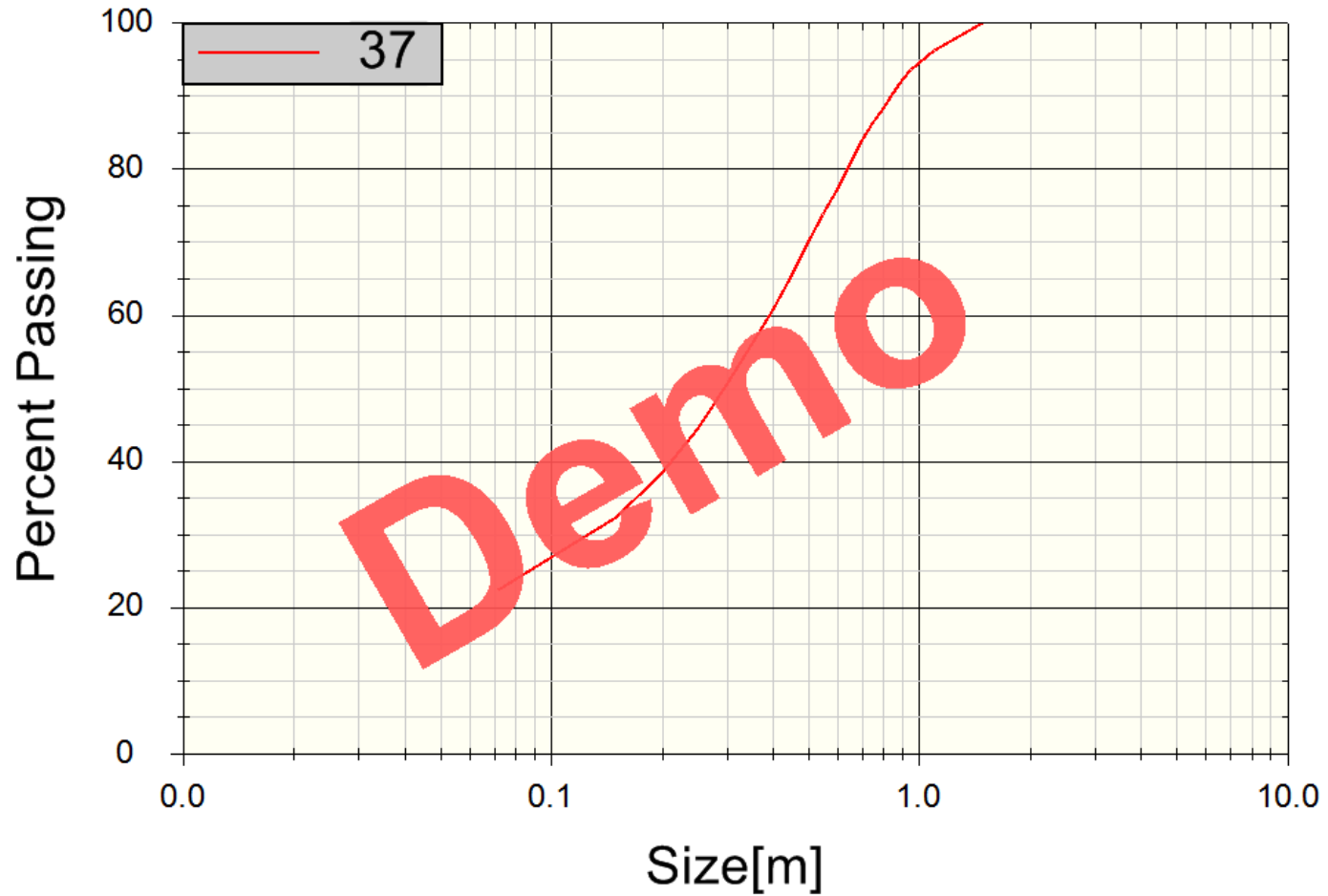
# Size Distribution



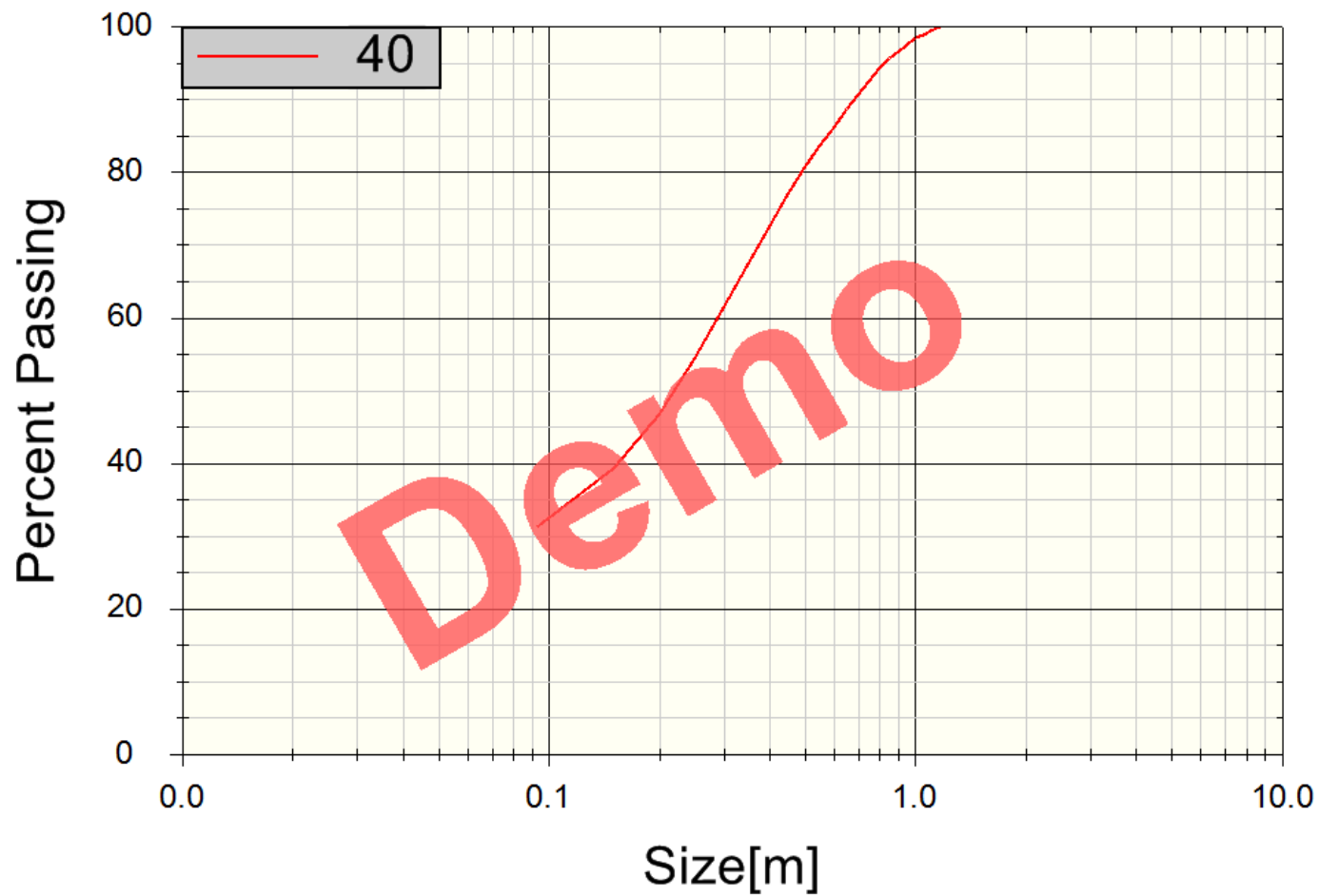
# Size Distribution



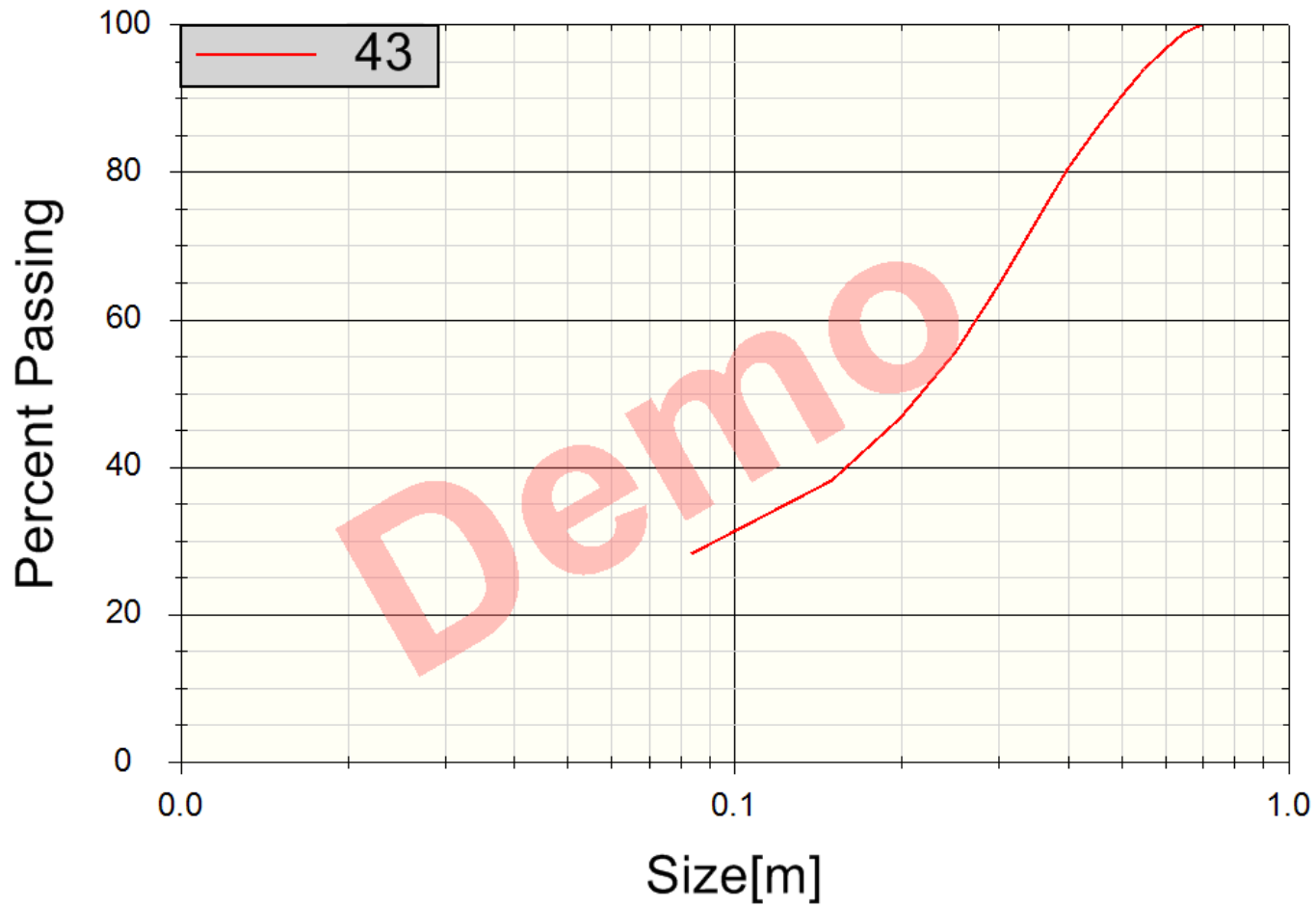
# Size Distribution



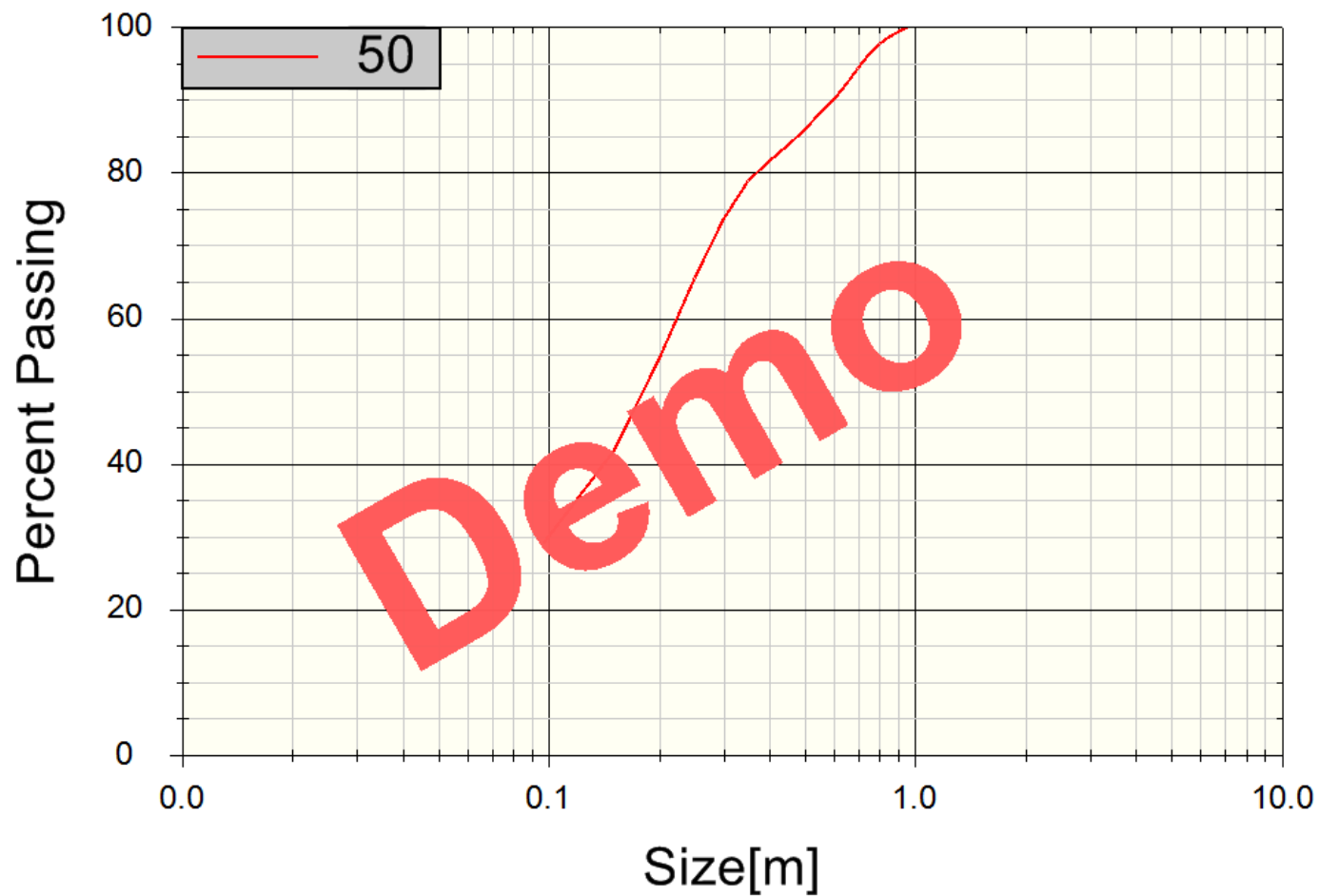
# Size Distribution



# Size Distribution



# Size Distribution



## **Anexo 2**

VALORES DE CALCULO KUZ-RAM E CURVA GRANULOMÉTRICA



## KUZ-RAM

Projecto	Santos
Tipo de rocha	Teixeira
Desmorte nº	Quartzito
	31

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	75 °
Direcção da inclinação	290 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,0
Força relativa	136% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	3984 m/s
Vel. detonação efectiva	3984 m/s
Força explosiva	1,36

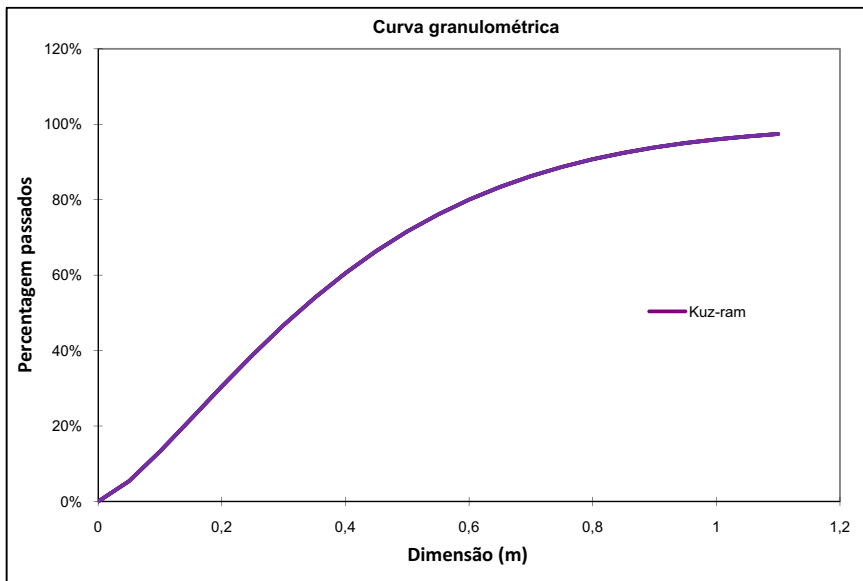
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	8,48 m
Dist. frente	3,7 m
Espaçamento	4,2 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	10,28 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,12 kg/ton
Carga específica	0,33 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	52,83 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	9,3% m
Percentagem ideal	60,2% m
Percentagem finos	30,5% m

Características	
Índice de desmorte	7,6262
Dimensão média fragmentos	32 cm
Exponente de uniformidade	1,35
Tamanho característico	0,42 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
5,4%	0,05
13,3%	0,10
21,8%	0,15
30,5%	0,20
38,9%	0,25
46,7%	0,30
54,0%	0,35
60,5%	0,40
66,4%	0,45
71,6%	0,50
76,1%	0,55
80,0%	0,60
83,4%	0,65
86,3%	0,70
88,7%	0,75
90,7%	0,80
92,4%	0,85
93,9%	0,90
95,0%	0,95
96,0%	1,00
96,8%	1,05
97,4%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos
Tipo de rocha	Teixeira
Desmorte nº	Quartzito
	33

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	55 °
Direcção da inclinação	280 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,2
Força relativa	183% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	5284 m/s
Vel. detonação efectiva	5284 m/s
Força explosiva	1,83

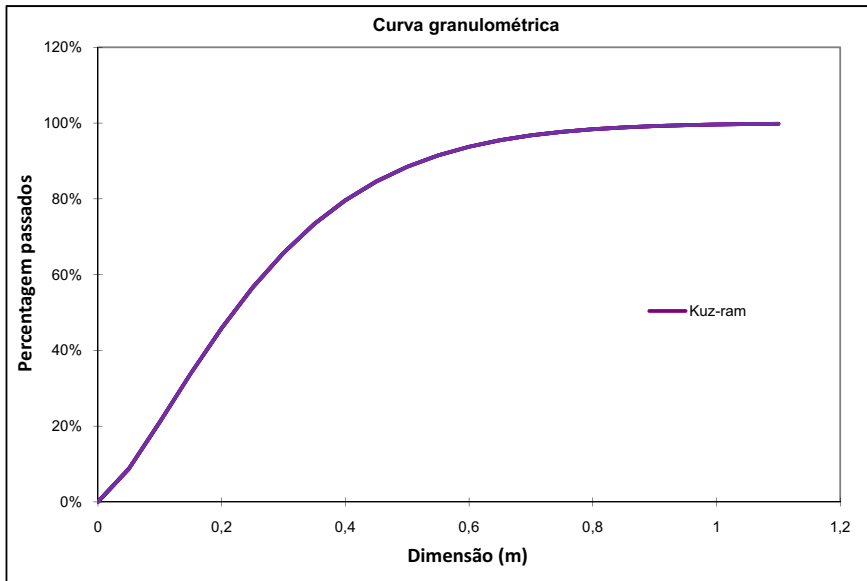
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	8,22 m
Dist. frente	3,5 m
Espaçamento	4 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	10,02 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,16 kg/ton
Carga específica	0,44 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	61,43 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	1,6% m
Percentagem ideal	52,5% m
Percentagem finos	45,9% m

Características	
Índice de desmorte	7,63
Dimensão média fragmentos	22 cm
Exponente de uniformidade	1,37
Tamanho característico	0,29 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
8,7%	0,05
21,1%	0,10
33,9%	0,15
45,9%	0,20
56,6%	0,25
65,7%	0,30
73,4%	0,35
79,6%	0,40
84,6%	0,45
88,5%	0,50
91,5%	0,55
93,8%	0,60
95,5%	0,65
96,8%	0,70
97,7%	0,75
98,4%	0,80
98,9%	0,85
99,2%	0,90
99,5%	0,95
99,6%	1,00
99,7%	1,05
99,8%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos
Tipo de rocha	Teixeira
Desmorte nº	Quartzito
	34

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,5 m
Inclinação	70 °
Direcção da inclinação	282 °
Bloco in-situ	0,13 m

Explosivos	
Densidade	1,2
Força relativa	190% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	5456 m/s
Vel. detonação efectiva	5456 m/s
Força explosiva	1,9

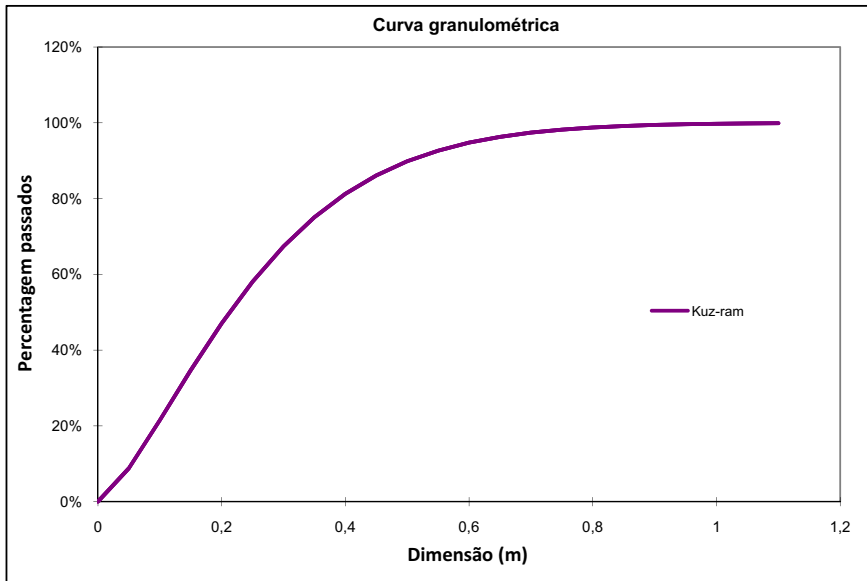
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	9,02 m
Dist. frente	3,5 m
Espaçamento	4 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	10,82 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,17 kg/ton
Carga específica	0,45 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	68,90 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	1,2% m
Percentagem ideal	51,7% m
Percentagem finos	47,1% m

Características	
Índice de desmorte	7,69
Dimensão média fragmentos	21 cm
Exponente de uniformidade	1,40
Tamanho característico	0,28 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
8,8%	0,05
21,5%	0,10
34,7%	0,15
47,1%	0,20
58,1%	0,25
67,4%	0,30
75,1%	0,35
81,3%	0,40
86,1%	0,45
89,8%	0,50
92,7%	0,55
94,8%	0,60
96,3%	0,65
97,4%	0,70
98,2%	0,75
98,8%	0,80
99,2%	0,85
99,4%	0,90
99,6%	0,95
99,8%	1,00
99,8%	1,05
99,9%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos
Tipo de rocha	Teixeira
Desmorte nº	Quartzito
	35

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	79 °
Direcção da inclinação	285 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,3
Força relativa	195% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	5600 m/s
Vel. detonação efectiva	5600 m/s
Força explosiva	1,95

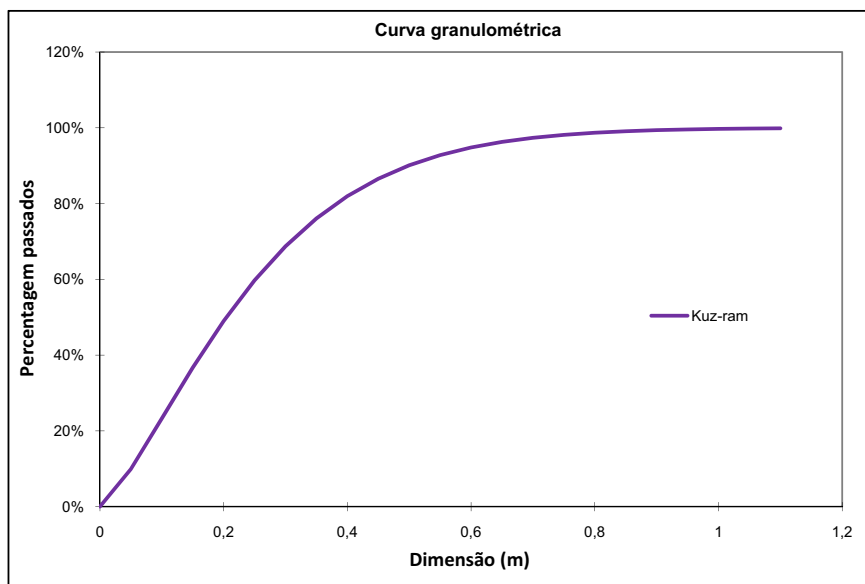
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	7,4 m
Dist. frente	3,5 m
Espaçamento	4 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	9,2 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,17 kg/ton
Carga específica	0,45 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	57,55 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	1,3% m
Percentagem ideal	49,7% m
Percentagem finos	49,0% m

Características	
Índice de desmorte	7,63
Dimensão média fragmentos	20 cm
Exponente de uniformidade	1,35
Tamanho característico	0,27 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
9,9%	0,05
23,3%	0,10
36,7%	0,15
49,0%	0,20
59,7%	0,25
68,7%	0,30
76,1%	0,35
82,0%	0,40
86,6%	0,45
90,1%	0,50
92,8%	0,55
94,8%	0,60
96,3%	0,65
97,4%	0,70
98,2%	0,75
98,7%	0,80
99,1%	0,85
99,4%	0,90
99,6%	0,95
99,7%	1,00
99,8%	1,05
99,9%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos Teixeira
Tipo de rocha	Quartzito
Desmonte nº	37

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	55 °
Direcção da inclinação	285 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,0
Força relativa	139% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	4073 m/s
Vel. detonação efectiva	4073 m/s
Força explosiva	1,39

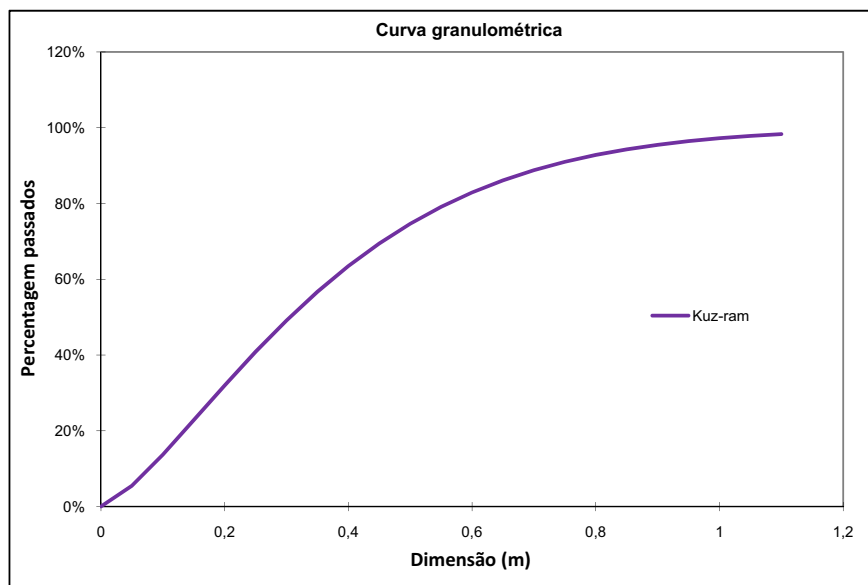
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	10,64 m
Dist. frente	3,7 m
Espaçamento	4 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	12,44 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,14 kg/ton
Carga específica	0,36 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	67,19 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	7,2% m
Percentagem ideal	60,8% m
Percentagem finos	32,0% m

Características	
Índice de desmonte	7,63
Dimensão média fragmentos	31 cm
Exponente de uniformidade	1,39
Tamanho característico	0,40 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
5,5%	0,05
13,7%	0,10
22,8%	0,15
32,0%	0,20
40,8%	0,25
49,1%	0,30
56,7%	0,35
63,5%	0,40
69,5%	0,45
74,7%	0,50
79,1%	0,55
82,9%	0,60
86,1%	0,65
88,8%	0,70
91,0%	0,75
92,8%	0,80
94,3%	0,85
95,5%	0,90
96,5%	0,95
97,2%	1,00
97,9%	1,05
98,3%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos Teixeira
Tipo de rocha	Quartzito
Desmorte nº	40

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	70 °
Direcção da inclinação	285 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,1
Força relativa	153% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	4442 m/s
Vel. detonação efectiva	4442 m/s
Força explosiva	1,53

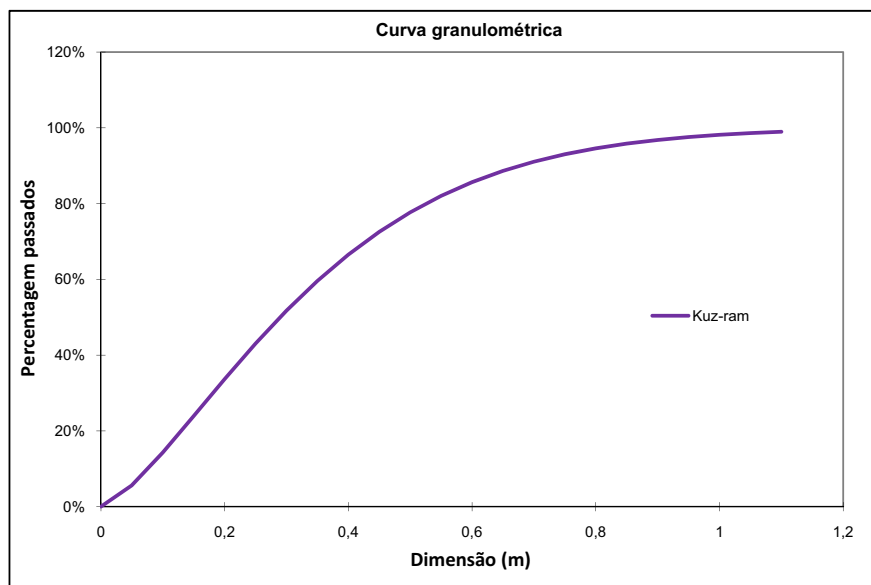
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	11,18 m
Dist. frente	3,7 m
Espaçamento	4,2 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	12,98 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,14 kg/ton
Carga específica	0,37 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	74,55 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	5,4% m
Percentagem ideal	60,9% m
Percentagem finos	33,7% m

Características	
Índice de desmorte	7,63
Dimensão média fragmentos	29 cm
Exponente de uniformidade	1,41
Tamanho característico	0,38 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
5,6%	0,05
14,3%	0,10
23,9%	0,15
33,7%	0,20
43,1%	0,25
51,7%	0,30
59,6%	0,35
66,5%	0,40
72,6%	0,45
77,7%	0,50
82,0%	0,55
85,7%	0,60
88,6%	0,65
91,1%	0,70
93,0%	0,75
94,6%	0,80
95,8%	0,85
96,8%	0,90
97,6%	0,95
98,2%	1,00
98,6%	1,05
99,0%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos Teixeira
Tipo de rocha	Quartzito
Desmorte nº	43

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	50 °
Direcção da inclinação	282 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,0
Força relativa	136% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	3996 m/s
Vel. detonação efectiva	3996 m/s
Força explosiva	1,36

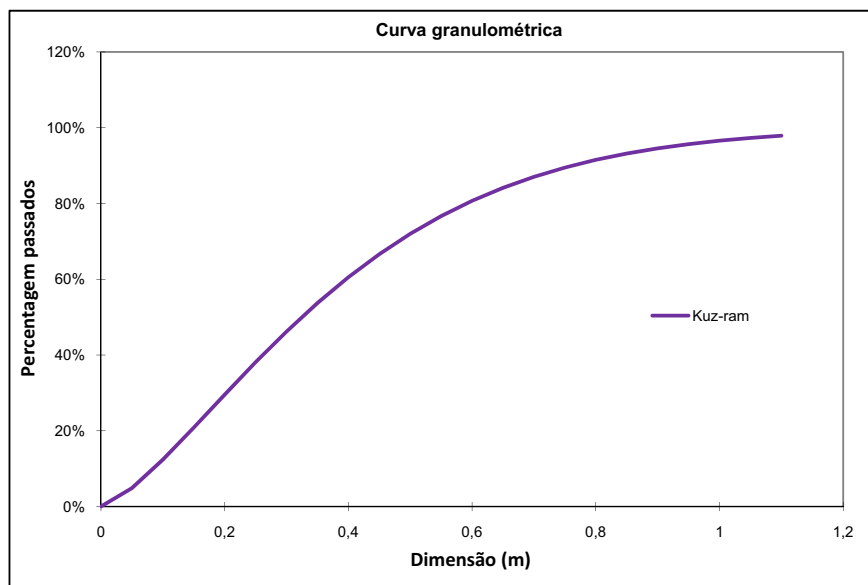
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	10,81 m
Dist. frente	3,7 m
Espaçamento	4,2 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	12,61 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,13 kg/ton
Carga específica	0,34 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	67,47 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	8,5% m
Percentagem ideal	62,0% m
Percentagem finos	29,6% m

Características	
Índice de desmorte	7,63
Dimensão média fragmentos	32 cm
Exponente de uniformidade	1,41
Tamanho característico	0,42 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
4,9%	0,05
12,4%	0,10
20,8%	0,15
29,6%	0,20
38,1%	0,25
46,2%	0,30
53,7%	0,35
60,5%	0,40
66,6%	0,45
72,0%	0,50
76,7%	0,55
80,7%	0,60
84,1%	0,65
87,0%	0,70
89,5%	0,75
91,5%	0,80
93,2%	0,85
94,6%	0,90
95,7%	0,95
96,6%	1,00
97,3%	1,05
97,9%	1,10

## KUZ-RAM

Projecto	Santos Teixeira
Tipo de rocha	Quartzito
Desmorte nº	50

Propriedades da rocha	
Factor rocha	
Tipo de rocha	Quartzito
Peso específico	2,7
Módulo de elasticidade	58 GPa
Módulo de deformação	209 MPa

Descontinuidades	
Espaçamento	0,3 m
Inclinação	50 °
Direcção da inclinação	285 °
Bloco in-situ	0,03 m

Explosivos	
Densidade	1,0
Força relativa	135% (% ANFO)
Vel. detonação nominal	3947 m/s
Vel. detonação efectiva	3947 m/s
Força explosiva	1,35

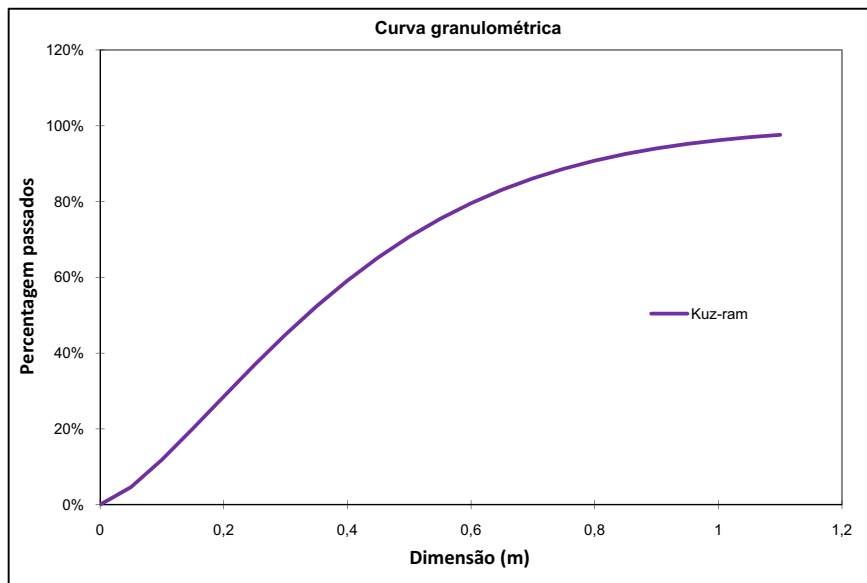
Dados do esquema de furação	
Triangular ou quadrada	1
Diâmetro de furação	89 mm
Comprimento da carga	10,63 m
Dist. frente	3,7 m
Espaçamento	4,3 m
Precisão de furação	0,1 m
Altura da bancada	12,43 m
Direcção de mergulho da face	8 °
Carga específica	0,12 kg/ton
Carga específica	0,33 kg/m <sup>3</sup>
Carga por furo	65,85 kg/furo

Previsão da fragmentação	
Percentagem blocos	9,2% m
Percentagem ideal	62,2% m
Percentagem finos	28,5% m

Características	
Índice de desmorte	7,63
Dimensão média fragmentos	33 cm
Exponente de uniformidade	1,41
Tamanho característico	0,43 m
Esquema quadrado = 1, Esquema triangular = 1,1	

Parâmetros fragmentação desejados	
Bloco	0,8 m
Ideal	0,6 m
Finos	0,2 m

## Curva granulométrica



Percentagem passados	Dimensão (m)
0,0%	0
4,6%	0,05
11,9%	0,10
20,1%	0,15
28,5%	0,20
36,9%	0,25
44,9%	0,30
52,4%	0,35
59,1%	0,40
65,3%	0,45
70,7%	0,50
75,4%	0,55
79,6%	0,60
83,1%	0,65
86,1%	0,70
88,7%	0,75
90,8%	0,80
92,6%	0,85
94,0%	0,90
95,2%	0,95
96,2%	1,00
97,0%	1,05
97,6%	1,10

### **Anexo 3**

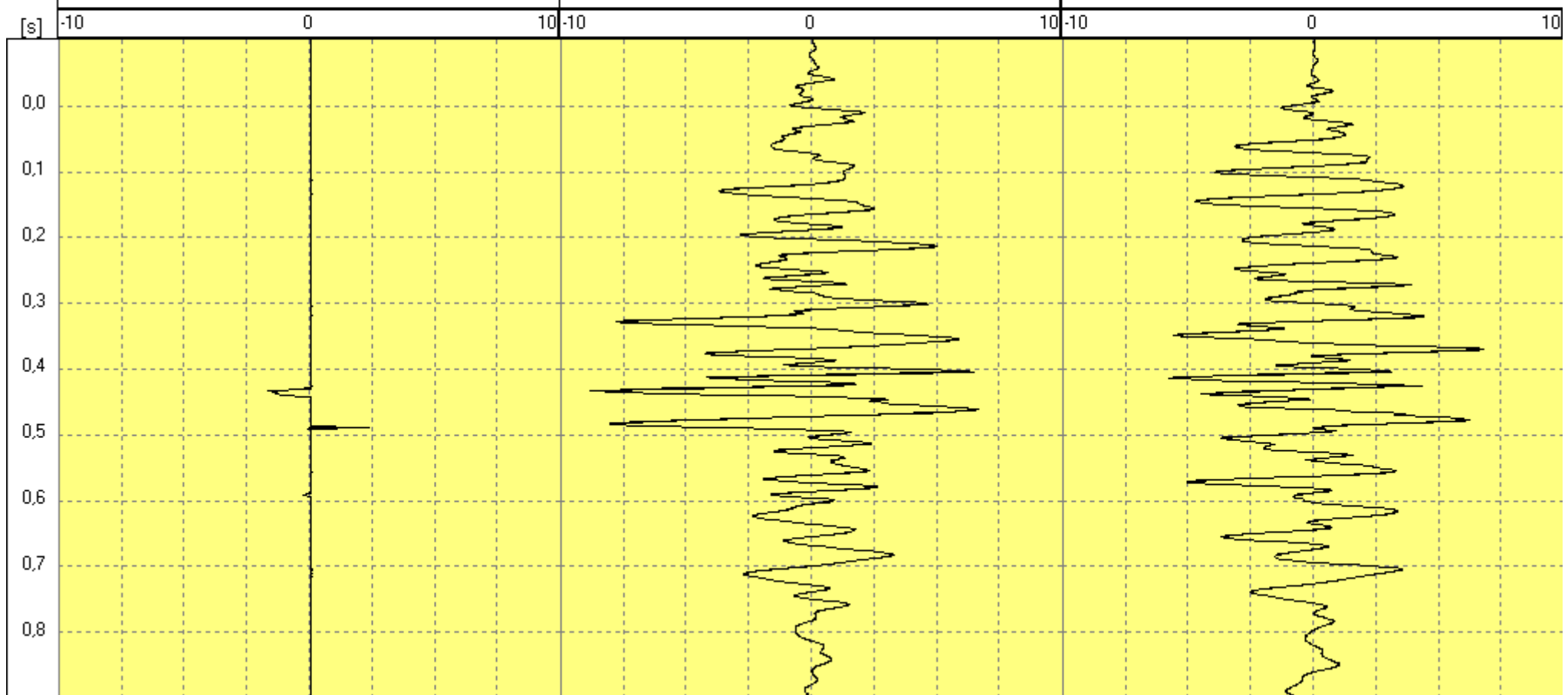
#### **REGISTOS DE VIBRAÇÃO**



Instrument S/N	715	Client:	
Event number	901	Operation:	
Date & time	qua 4 Nov 2009 13:13:45	Location:	
Reg Length	1 s / 2 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	9,29 mm/s at 0,435 s	Notes:	
Timescale	0,1 s/div		

More...

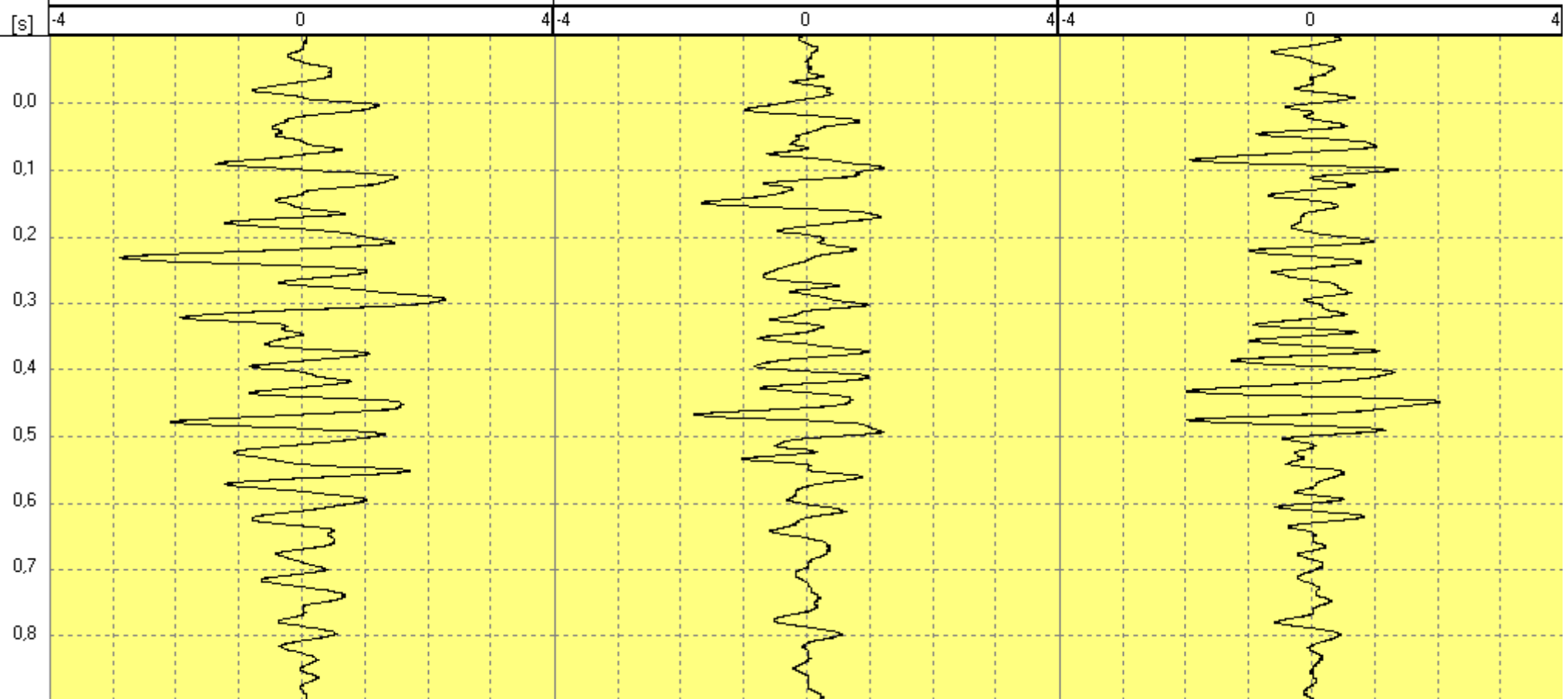
Channel	1	Channel	2	Channel	3
Input	Geo	Input	Geo	Input	Geo
Unit	mm/s	Unit	mm/s	Unit	mm/s
Trig level	1	Trig level	1	Trig level	1
Pk	2,350	Pk	8,850	Pk	6,750
Diff m/s <sup>2</sup>	1,67	Diff m/s <sup>2</sup>	2,92	Diff m/s <sup>2</sup>	2,55
Integ $\mu$ m	7,57	Integ $\mu$ m	62,7	Integ $\mu$ m	48,9
Frq(zx) Hz	143	Frq(zx) Hz	32,8	Frq(zx) Hz	26,3



Instrument S/N	715	Client:	
Event number	926	Operation:	
Date & time	qua 6 Jan 2010 13:16:48	Location:	
Reg Length	1 s / 2 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	2,92 mm/s at 0,233 s	Notes:	
Timescale	0,1 s/div		

More...

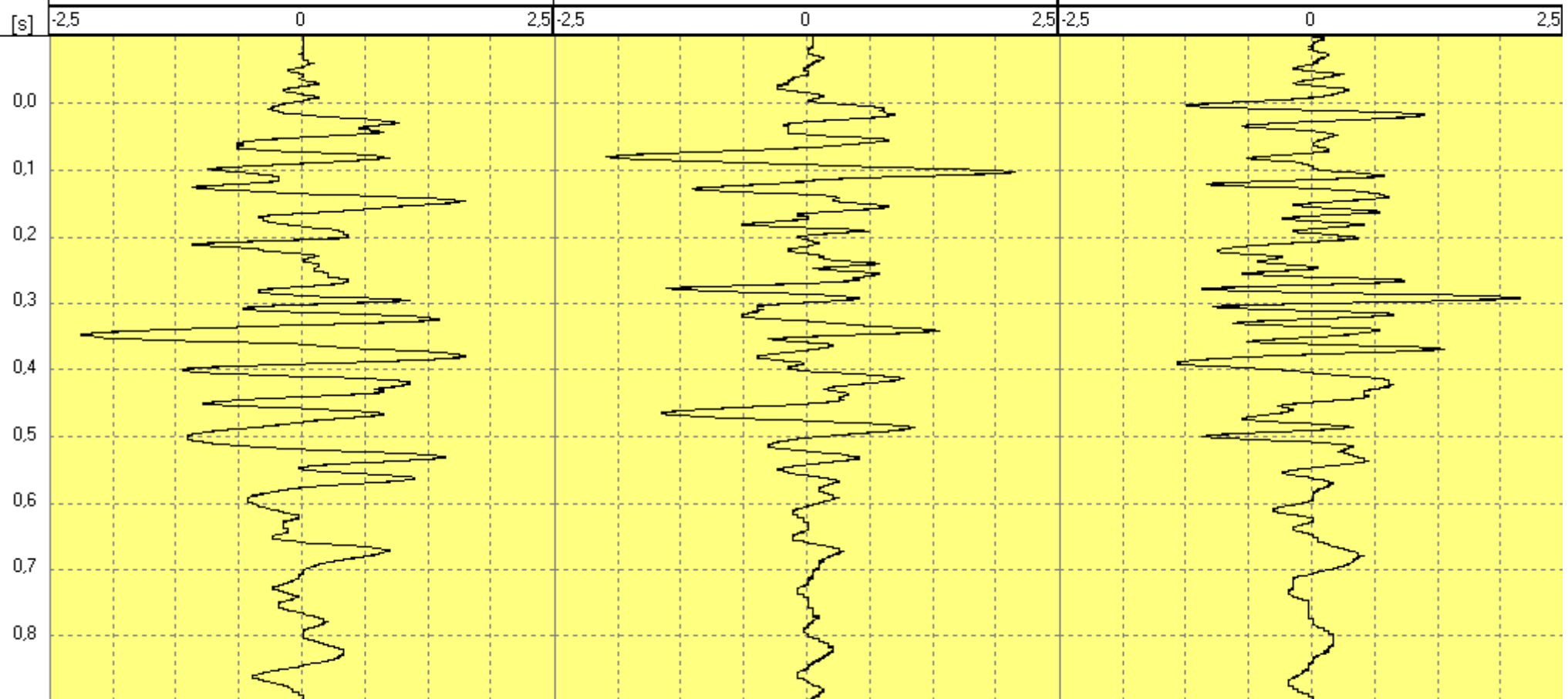
Channel	1	Channel	2	Channel	3
Input	Geo	Input	Geo	Input	Geo
Unit	mm/s	Unit	mm/s	Unit	mm/s
Trig level	1	Trig level	1	Trig level	1
Pk	2,900	Pk	1,800	Pk	2,000
Diff m/s <sup>2</sup>	0,35	Diff m/s <sup>2</sup>	0,3	Diff m/s <sup>2</sup>	0,4
Integ $\mu$ m	31,1	Integ $\mu$ m	17,1	Integ $\mu$ m	16,4
Frq(zx) Hz	19,6	Frq(zx) Hz	25,6	Frq(zx) Hz	24,4



Instrument S/N	715	Client:	
Event number	927	Operation:	
Date & time	sex 8 Jan 2010 13:11:44	Location:	
Reg Length	1 s / 2 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	2,42 mm/s at 0,345 s	Notes:	
Timescale	0,1 s/div		

More...

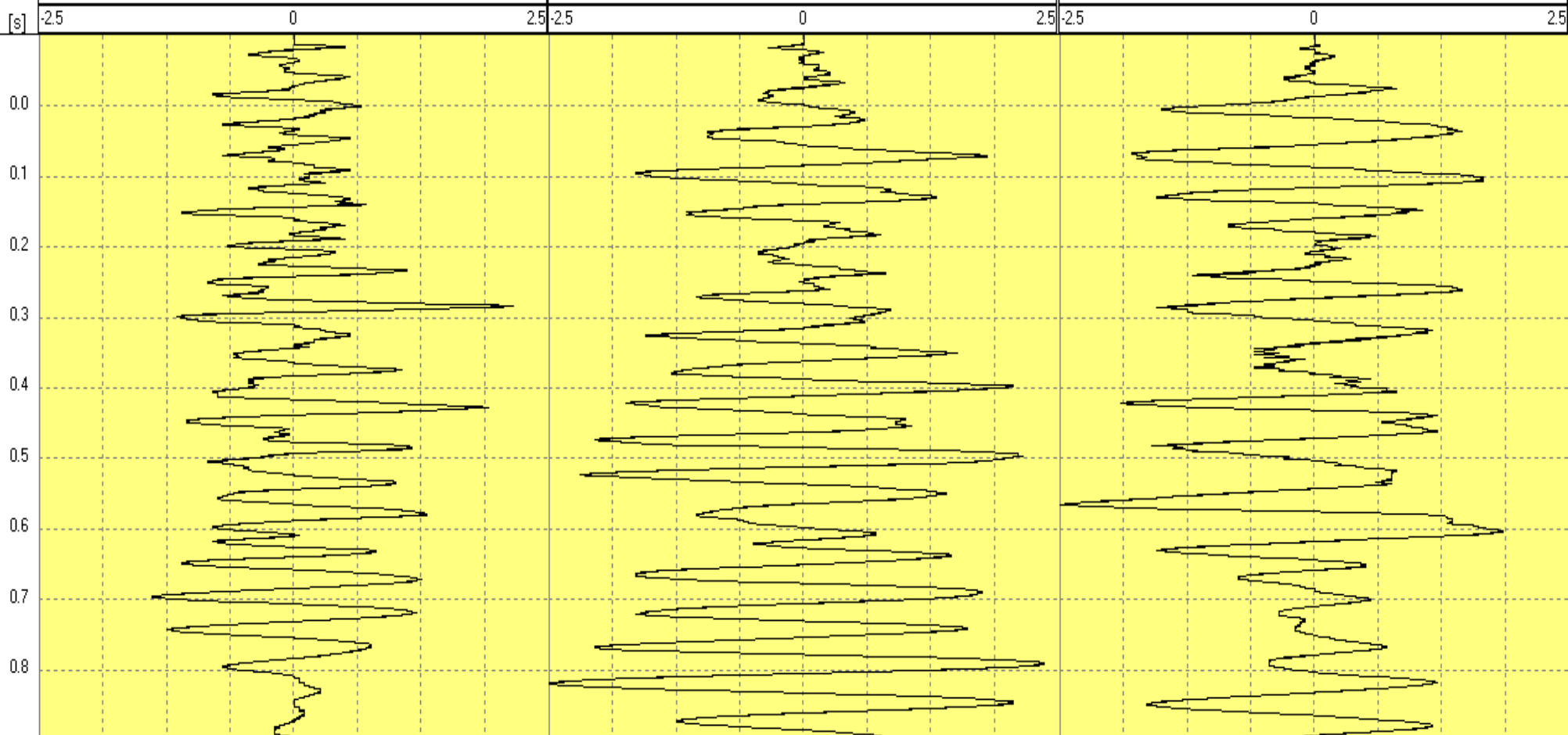
Channel	1	Channel	2	Channel	3
Input	Geo	Input	Geo	Input	Geo
Unit	mm/s	Unit	mm/s	Unit	mm/s
Trig level	1	Trig level	1	Trig level	1
Pk	2,200	Pk	2,050	Pk	2,050
Diff m/s <sup>2</sup>	0,275	Diff m/s <sup>2</sup>	0,25	Diff m/s <sup>2</sup>	0,375
Integ $\mu$ m	20,4	Integ $\mu$ m	17,9	Integ $\mu$ m	15,2
Frq(zx) Hz	17,2	Frq(zx) Hz	20,8	Frq(zx) Hz	30,8



Instrument S/N	715	Client:	
Event number	934	Operation:	
Date & time	qua 13 Jan 2010 12:37:38	Location:	
Reg Length	1 s / 2 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	2.77 mm/s at 0.820 s	Notes:	
Timescale	0.1 s/div		

More...

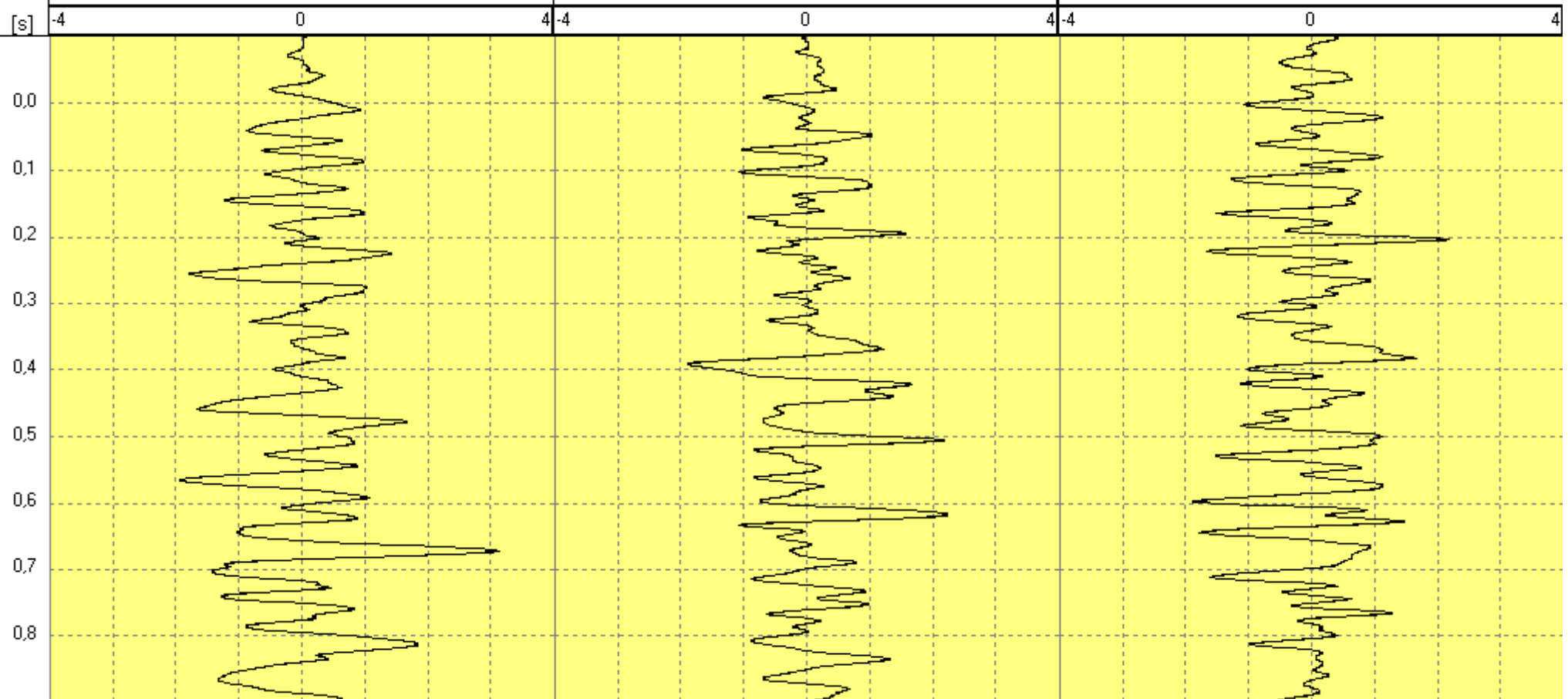
Channel	1	Channel	2	Channel	3
Input	Geo	Input	Geo	Input	Geo
Unit	mm/s	Unit	mm/s	Unit	mm/s
Trig level	1	Trig level	1	Trig level	1
Pk	2.150	Pk	2.500	Pk	2.500
Diff m/s <sup>2</sup>	0.35	Diff m/s <sup>2</sup>	0.4	Diff m/s <sup>2</sup>	0.45
Integ $\mu$ m	13.1	Integ $\mu$ m	23.7	Integ $\mu$ m	34.2
Frq(zx) Hz	29.4	Frq(zx) Hz	18	Frq(zx) Hz	15.4



Instrument S/N	715	Client:	
Event number	938	Operation:	
Date & time	sex 29 Jan 2010 13:26:45	Location:	
Reg Length	1 s / 2 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	3,20 mm/s at 0,672 s	Notes:	
Timescale	0,1 s/div		

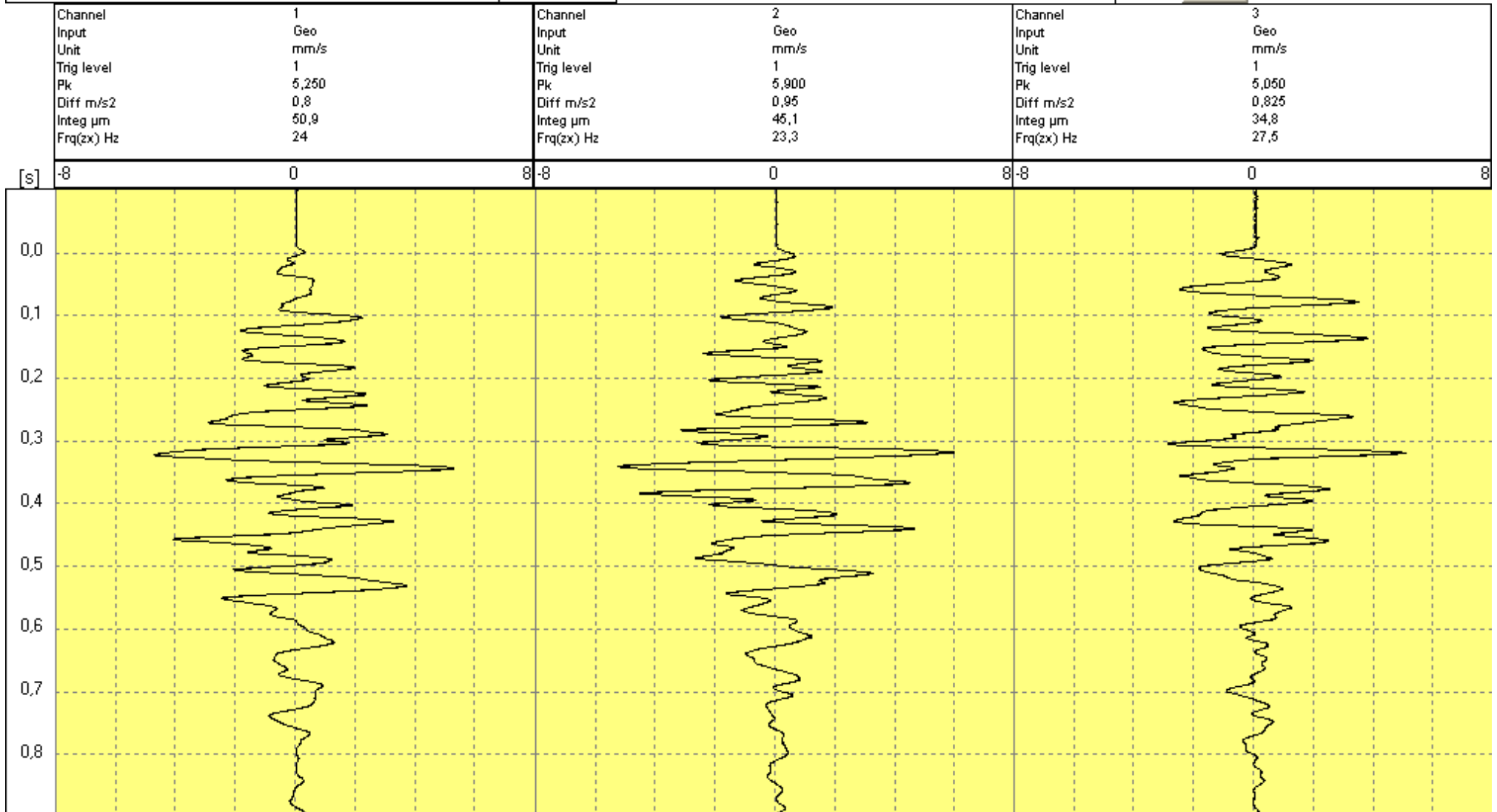
More...

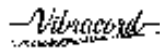
Channel	1	Channel	2	Channel	3
Input	Geo	Input	Geo	Input	Geo
Unit	mm/s	Unit	mm/s	Unit	mm/s
Trig level	1	Trig level	1	Trig level	1
Pk	3,100	Pk	2,200	Pk	2,150
Diff m/s <sup>2</sup>	0,35	Diff m/s <sup>2</sup>	0,375	Diff m/s <sup>2</sup>	0,35
Integ $\mu$ m	41,8	Integ $\mu$ m	27,6	Integ $\mu$ m	19,9
Frq(zx) Hz	18,2	Frq(zx) Hz	20,8	Frq(zx) Hz	27,8



Instrument S/N	715	Client:	
Event number	941	Operation:	
Date & time	qui 4 Fev 2010 17:05:56	Location:	
Reg Length	1 s / 2 kHz	Operator:	
Vector max (ch 1-3)	8,87 mm/s at 0,320 s	Notes:	
Timescale	0,1 s/div		

More...



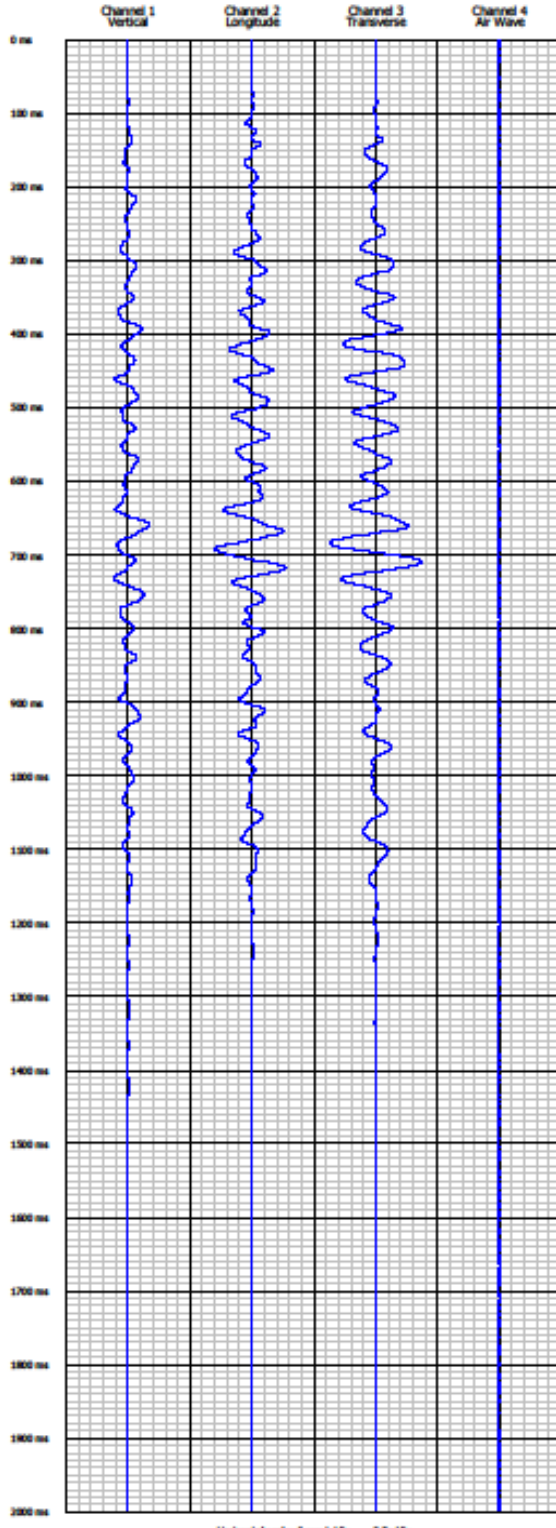


# Vibracord Digital Seismograph

## Seismograph record report

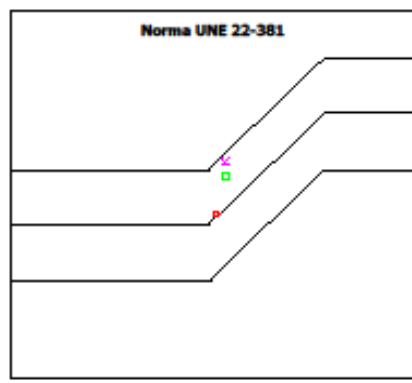
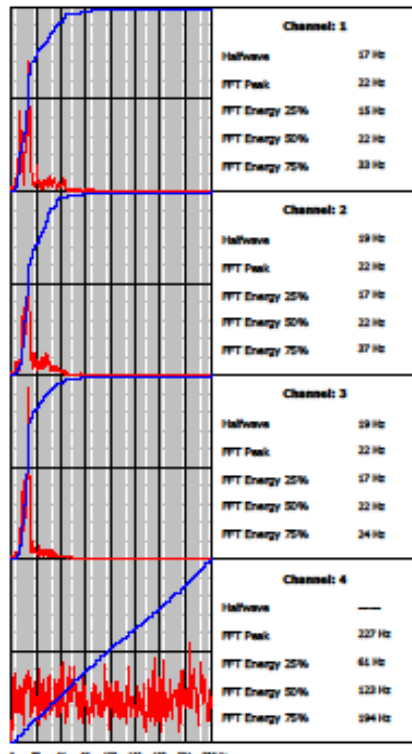
File: 4ba2278b.sis

Record Time: 2 s

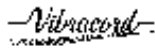


Horizontal scale: 6 mm/1div - 2 Pa/div

Data summary			
Date:	18-03-09	Serial number:	0072
Time:	12:15:55	Calibration date:	02-10-09
Note 1: VIBRACORD			
Note 2: SEISMOGRAPH			
Post-Event Note:			
Peak values			
Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
18.41 mm/s	18.42 mm/s	22.68 mm/s	0.1 Pa <100 dB
Vector Sum:		25.88 mm/s	



♦ Vertical    □ Longitude    ✕ Transverse  
 Frequency applied to the prevention criteria: Halfwave

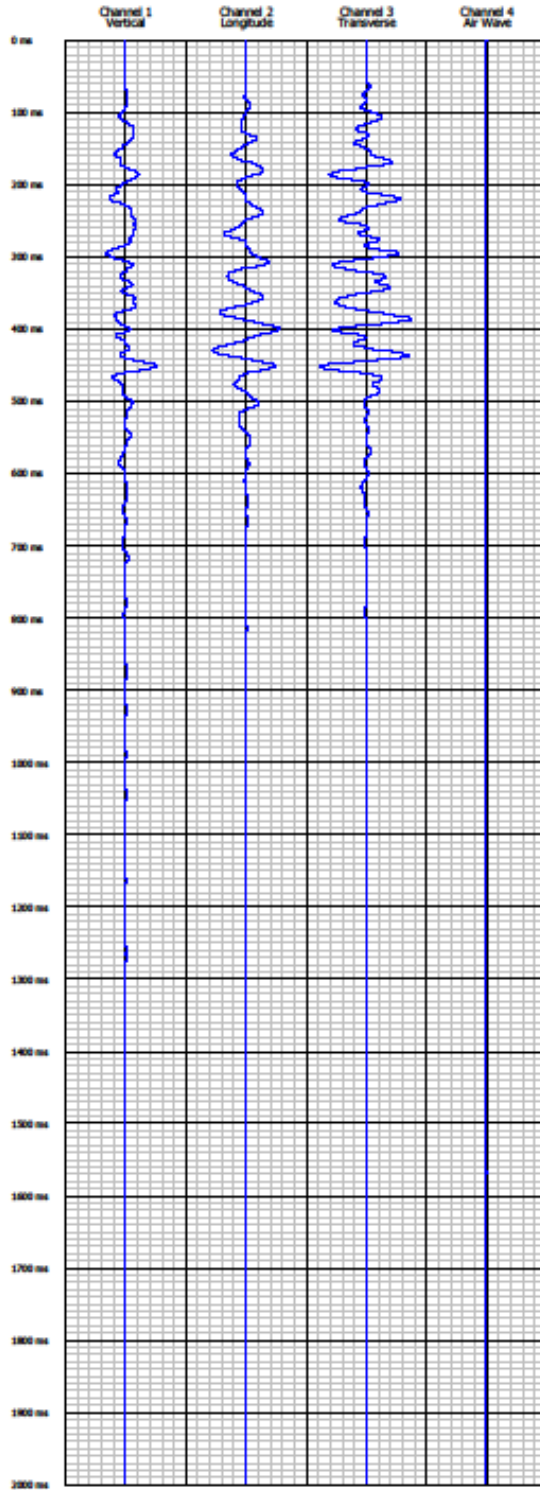


## Vibracord Digital Seismograph

### Seismograph record report

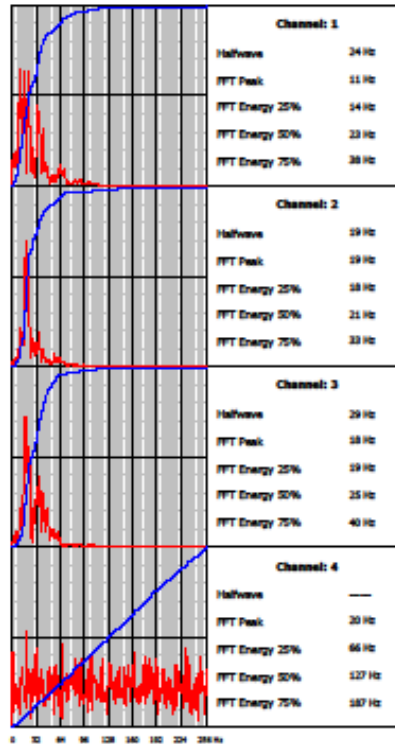
File: 4bc5c22a.sis

Record Time: 2 s



Horizontal scale: 4 mm/s/div - 2 Pa/div

Data summary			
Date:	14-04-10	Serial number:	0385
Time:	12:24:58	Calibration date:	06-05-09
Note 1:			
Note 2:			
Post-Event Note:			
Peak values			
Channel: 1	Channel: 2	Channel: 3	Channel: 4
10.88 mm/s	11.39 mm/s	15.79 mm/s	0.2 Pa <100 dB
Vector sum: 20.99 mm/s			



#### Norma NP-2074

$$V_r = (W^2 + V_L^2 + V_T^2)^{0.5} = 21.92 \text{ mm/s}$$

$$V_r = (V_L(t)^2 + V_T(t)^2 + V_V(t)^2)^{0.5} = 20.99 \text{ mm/s}$$