

# Aplicação de sistemas ópticos na avaliação granulométrica de granitóides para produção de inertes: o caso da Pedreira de Malaposta (NW de Portugal)

## Application of optical systems to the evaluation of size distributions in granitic rocks for aggregates production: Malaposta Quarry case study (NW Portugal)

PIZARRO, S.<sup>1</sup>, GOMES, L.<sup>1</sup>, DINIS DA GAMA, C.<sup>2</sup>, LOPES, A.<sup>3</sup> & CHAMINÉ, H. I.<sup>1,4</sup>

### Abstract

The current need for production cost reduction requires the analysis of all economic factors involved. As rock fragmentation is one of the most relevant aspects in the optimisation of production costs in mining, due to its direct effects on the costs of drilling a blasting, as well as on the economics of the subsequent unit operations, it seems essential to develop fragmentation evaluation and prediction. In recent years, many improvements on automation of size grading measurements have been achieved, particularly with image analysis systems and techniques. The purpose of these systems is to automate the process of data acquisition, because manual methods are unable to deal with large volumes of material to measure. With this work, a better understanding of image analysis methods for rock fragmentation studies is sought. Besides, the required theoretical background, a practical example is studied with the help of a computer program for the evaluation of fragmented rock blocks in a heap, upon the recording of photos by a digital camera. Thus, the applicability of this methodology to the optimisation of an aggregate production facility is made available, despite the anticipated knowledge of the fragmentation degree to be obtained in the blasts. The selected study area — Malaposta granitic rock quarry (Lourosa, NW Portugal, Iberian Massif) — is located in the vicinity of a regional megastructure, the Porto-Albergaria-a-Velha-Tomar shear zone. The regional and local structural geology and hydrogeotechnics features are also outlined in order to address an integrated geoengineering approach.

**Key words:** Rock fragmentation, blasting, structural geology, geotechnics, NW Portugal.

(1) Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Rua do Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto, Portugal, Portugal. (E-mail: sap@isep.ipp.pt)

(2) Departamento de Minas e Georrecursos e Centro de Geotecnia, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, Portugal.

(3) Departamento de Pedreiras, Irmãos Cavaco S.A., Vila da Feira, Portugal.

(4) Centro de Minerais Industriais e Argilas (MIA), Universidade de Aveiro, Portugal.

## INTRODUÇÃO GERAL

Durante muito tempo o desmonte de rocha com explosivos era simplesmente direccionado para o destaque de volumes de rocha, sem atribuir qualquer importância à dimensão e forma do material desmontado. A crescente preocupação com as questões ambientais e de ordenamento territorial, bem como o aumento do interesse económico do material britado, relacionado com as suas aplicações mais nobres, como por exemplo, produção de betão, construção de estradas e obras públicas, ditou a sua utilização preferencial como matéria prima de construção. Na maioria dos casos, o objectivo final do desmonte é a disponibilização de matéria prima destinada a alimentar uma unidade de transformação. Os fragmentos produzidos pelo rebentamento devem ser não só compatíveis com o equipamento de carga disponível e possuírem calibres de fácil admissão no primário (*e.g.*, DINIS da GAMA, 1971, 1996a,b; ALLER & MOUZA, 1996; BHANDARI, 1996; FRANKLIN, 1996).

Em muitas situações é necessário produzir elevadas quantidades de blocos regulares de grande dimensão, como por exemplo, na construção de barragens ou em obras portuárias ligadas à construção de quebra-mares. A unidade industrial que vai desenvolver essa actividade deverá ser capaz de colocar no mercado o material de maior calibre produzido; caso contrário, os custos de fornecimento do enrocamento serão agravados pelo material que terá que rejeitar. Mesmo quando o objectivo principal da escavação é criar um vazio (*e.g.*, túnel ou poço), a operação de desmonte está intimamente ligada à preocupação de obter determinados calibres, devido à sua influência na velocidade de carga e na capacidade do equipamento de transporte. Se a fragmentação não for adequada irão ser suportados custos suplementares devido à menor eficiência do binário carga/transporte. Por último, quando se pretende produzir material fino, se a solução encontrada for orientada no sentido de produzir uma fragmentação grosseira na fase de desmonte, esta faz-se com agravamento dos custos, evidenciado pelo aumento da carga e perfuração específicas. Em todos estes casos, o grau de fragmentação influencia de forma decisiva a economia da exploração. Assim sendo, a previsão da fragmentação, em operações de desmonte de maciços rochosos apresenta-se um

aspecto fundamental para a optimização destas operações (*e.g.*, DINIS da GAMA, 1971, 1988, 1996a,b; CHUNG & NOY, 1996; CHAVEZ *et al.*, 1996).

A previsão da fragmentação em operações de desmonte de maciços rochosos foi, desde sempre, um problema complexo (FRANKLIN & DUSSEAUT, 1992; FRANKLIN & MAERZ, 1996; FRANKLIN *et al.*, 1996; MOODLEY & CUNNINGHAM, 1996). Apesar dos esforços de vários grupos de investigação, tanto académicos como da indústria, verifica-se que certas questões fundamentais ainda não encontraram solução, como seja a possibilidade de formulação, num determinado maciço rochoso, de um diagrama de fogo que promova a sua fragmentação com um calibre pré-estabelecido, ou simplesmente alcançando uma dimensão pretendida para os fragmentos, especialmente na sua fracção mais graúda. Assim, o desmonte com explosivos constitui a primeira etapa do processo de fragmentação global das rochas, sendo seguido geralmente pela britagem e a granulação (e, em alguns casos, a moagem) até que se atinjam calibres compatíveis com a transformação desejada. Na prática, considera-se que a eficácia da operação de desmonte com explosivos é medida, entre outros aspectos, pela ausência de fragmentação secundária. O estabelecimento *a priori* de um critério de optimização (*i.e.*, em termos de minimização dos custos totais), função do grau de fragmentação óptimo (*i.e.*, atingir um tamanho máximo dos blocos), que corresponderá ao custo total mínimo, contribuirá, assim, para a optimização dos objectivos da produção (DINIS da GAMA, 1971).

## AVALIAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS

Ao vocábulo *fragmentação* é dado um sentido tão lato que pode significar desde “*limites de quebra*” à “*percentagem de material acima ou abaixo de um determinado calibre*” (FRANKLIN, 1996). O primeiro passo a estabelecer, quando se fala em resultado da fragmentação, será definir quais os calibres mais importantes. Desta forma, do ponto de vista económico, as fracções mais adequadas são normalmente classificadas como: calibre fino, calibre médio e calibre grosseiro (CUNNINGHAM, 1996a,b). A optimização de qualquer operação de desmonte com explosivos requer o conhecimento prévio do grau de frac-

turação natural no intuito de definir a compartimentação do maciço rochoso, ou seja, da caracterização geológico-estrutural e geotécnica do maciço (ROCHA, 1981).

O grau de fragmentação do material desmontado interfere na eficiência e no custo das operações subsequentes, sendo, também, directamente afectado pelo esquema de perfuração e pela quantidade de explosivos consumidos (DINIS da GAMA, 1971). A partir do conhecimento do grau de fragmentação óptimo (ou tamanho máximo dos blocos), correspondente ao custo total mínimo, deve-se planear o diagrama de fogo de modo que este se aproxime o mais possível do critério de optimização do desmonte, ou seja à minimização dos custos totais (fig. 1). A quantificação da fragmentação em grande escala é uma tarefa extremamente difícil. O único método inteiramente quantitativo de previsão da fragmentação é a crivagem de toda a massa de material fragmentado. Contudo, isto é impraticável à escala da produção. Comparativamente, não existe nenhum método fiável e economicamente praticável de avaliação quantitativa da fragmentação num ambiente de produção, embora em algumas instalações de britagem primária existam crivos de “scalping” que permitem avaliar a composição granulo-

métrica dos fragmentos. Qualquer estimativa numérica atribuída ao material fragmentado afectará o projecto e optimização do diagrama de fogo.

Para se conseguir uma avaliação global, devem ser analisados os seguintes aspectos (DINIS da GAMA, 1971; MOODLEY & CUNNINGHAM, 1996):

- fragmentação e empolamento da pilha de material desmontado;
- geometria, altura e deslocamento da pilha;
- estado do maciço remanescente e da soleira da bancada;
- presença de blocos na pilha;
- vibrações, projecções e ruído produzidos.

Para além da classificação granulométrica do material da pilha na instalação de tratamento, não existe mais nenhum método que permita uma avaliação quantitativa fiável da fragmentação. A distribuição granulométrica é uma ferramenta básica no processo de optimização do rebentamento, uma vez que é o único meio de comparação da fragmentação obtida, quando se faz o estudo da influência dos diferentes parâmetros do diagrama de fogo sobre a dita fragmentação.

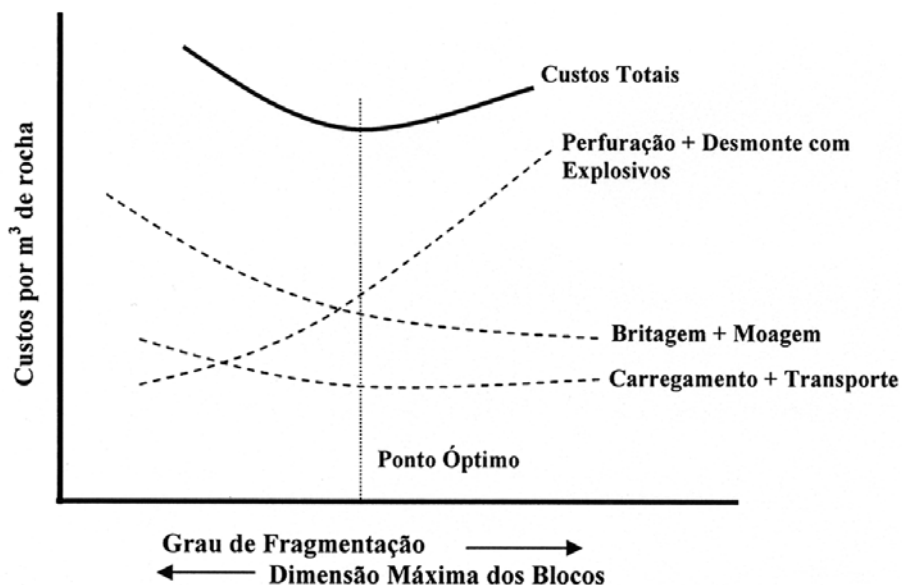


Fig. 1. Critério de optimização do desmonte em função do grau de fragmentação (adaptado de DINIS da GAMA, 1971).

Devido aos elevados custos e tempo gasto para se conseguir uma curva completa da distribuição granulométrica, são utilizados em operações de desmonte os seguintes métodos aproximados (fig. 2): i) análise qualitativa visual; ii) métodos fotográficos; iii) métodos fotogramétricos; iv) fotografia de alta velocidade; v) estudo de produtividade do equipamento de carga; vi) volume de material submetido a rebentamento secundário; vii) encravamento do britador primário; viii) crivagem; ix) análise de imagens por computador.

Os métodos modernos de análise de imagens usam “hardware” e “software” sofisticado para quantificar os aspectos geométricos com imagens a duas dimensões, como sejam a área, número, perímetro, forma, dimensão e orientação. Contudo, ainda subsistem alguns problemas não totalmente

resolvidos, como, por exemplo, a definição precisa dos contornos, a correcção de erros devidos à sobreposição dos fragmentos, etc. (DINIS da GAMA, 1984; KUSZMAUL, 1987; DINIS da GAMA & JIMENO, 1993; LACUBE *et al.*, 1993; PALANGIO & FRANKLIN, 1996; MAERZ *et al.*, 1996).

## MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da fragmentação não é mais do que a estimativa da população de fragmentos na pilha de escombro (*e.g.*, DINIS da GAMA, 1984; KONYA & WALTER, 1990; DOWNS & KETTUNEN, 1996; WANG & STEPHASSON, 1996). Para o efeito, foram tiradas fotografias e atribuídas as imagens dos fragmentos individuais na fotografia a um dado calibre, que é combinado com os outros cali-

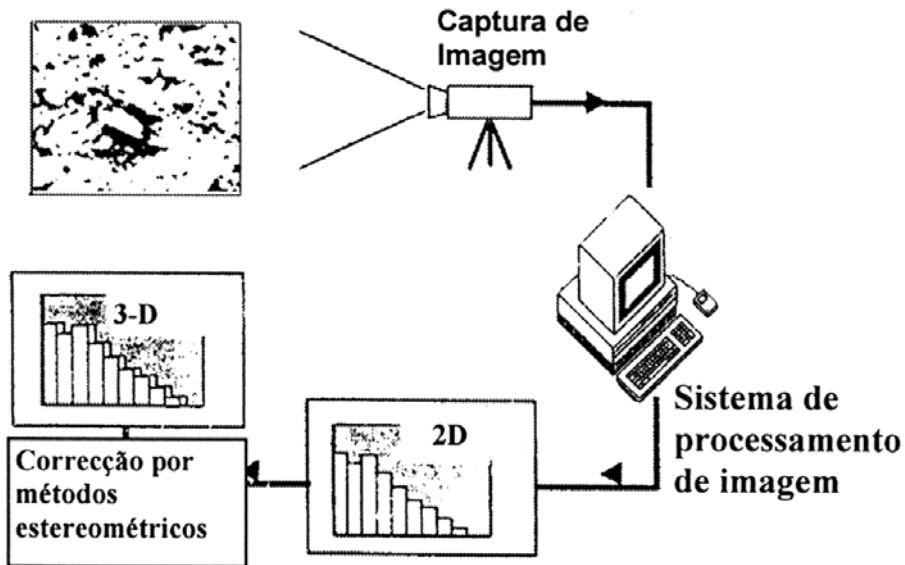


Fig. 2. Análise da fragmentação por processamento automático de imagens (adaptado de JIMENO *et al.*, 1995).

bres da mesma fotografia para criar uma única amostra da distribuição da população total. Desta forma, cada fotografia fornece uma amostra da distribuição de calibres do material da pilha.

O programa informático “GoldSize” foi desenvolvido para uma plataforma ‘Microsoft Windows’ e permite estimar a dimensão de determinados objec-

tos a partir de fotografias (GOLDSIZE, 1996). Este programa tem vindo a ser utilizado principalmente na estimativa das distribuições de calibres resultantes da fragmentação (DINIS da GAMA & JIMENO, 1993; KLEINE & CAMERON, 1996; MAERZ & NORBERT, 1996). Alguns dos seus módulos, como por exemplo a correcção de finos

para estimar a quantidade de material demasiadamente pequena para ser observada, são específicos para a análise da fragmentação. Igualmente, os calibres existentes no programa são, por defeito, ajustados empiricamente para coincidirem com os resultados obtidos quando os fragmentos são crivados.

O modelo de *Kuz-Ram* (FRANKLIN, 1996) para a previsão da fragmentação foi também incluído no programa de forma a que a distribuição da fragmentação medida pudesse ser comparada com a distribuição prevista e os parâmetros da fragmentação ajustados sob a forma de um modelo de calibração. Desta forma, uma técnica de previsão calibrada é combinada com a ferramenta de medição, o que permite melhorar grandemente o ciclo de optimização do desmonte. O processo de medição de calibres é realizado, fundamentalmente, em quatro passos: i) obtenção de fotografias do material fragmentado de forma a que uma grande franja de calibres possa ser identificada e seja obtida uma amostra de material estatisticamente aceitável; ii) digitalização dos objectos conseguida através do contorno dos objectos com o auxílio do rato do computador; iii) dimensionamento da imagem; iv) cálculo dos calibres baseado no comprimento do objecto.

Uma vez que não é possível dimensionar todos os fragmentos, a análise da fragmentação requiere uma avaliação geoestatística dos resultados. A versão corrente do *"GoldSize"* utiliza uma definição manual de contorno. O olho humano pode facilmente identificar os fragmentos de rocha e o operador faz a traçagem à volta do fragmento usando o cursor guiado pelo rato. É um sistema relativamente simples para contornar os fragmentos que necessita, aproximadamente, de 10 a 15 minutos por fotografia a analisar. Muito embora esta técnica seja extremamente morosa é também, de acordo com vários autores (VOGT & ABBROCK, 1993; PALANGIO & FRANKLIN, 1996; WANG *et al.*, 1996), aquela que em condições de incerteza e luminosidade variável, demonstrou ser a mais precisa.

### Escala

No *"GoldSize"*, cada imagem tem dois sistemas de coordenadas, normalizado e escalado. A coorde-

nada normalizada é relativa à largura e altura da imagem. A coordenada (0,0) está no topo superior esquerdo e a coordenada (1,1) no canto inferior direito. Esta escala é independente da proporção da imagem. Assume-se, contudo, que a imagem em si não está distorcida. Armazenando todos os elementos de informação usando coordenadas normalizadas é possível aplicar a mesma escala sobre mais do que uma amostra, por exemplo, para amostragem contínua em correias transportadoras ou, então, para ajustar a escala de uma amostra independentemente dos contornos dos fragmentos, para porventura corrigir um erro do operador. O *"GoldSize"* aplica uma transformação simples para converter coordenadas normalizadas em coordenadas escaladas, em metros. A transformação considera que a superfície da rocha na fotografia permanece, aproximadamente, num plano a três dimensões e que esse plano pode estar inclinado em relação ao plano da imagem, a não ser que o plano da imagem seja paralelo ao plano da rocha, logo, esta escala não é linear.

### Classificação por calibres

A medição do tamanho de um único fragmento a partir do seu contorno requer a definição prática da dimensão do fragmento. Para validação com uma técnica mais estável de classificação, o *"GoldSize"* define o tamanho do fragmento como sendo a sua largura, uma vez que a largura do fragmento se correlaciona mais estreitamente com o comportamento verificado na crivagem. O processo utilizado para a determinação da largura de cada fragmento escala cada ponto do contorno normalizado em coordenadas reais usando as equações de escala. Os pontos reais do contorno são rodados segundo pequenos incrementos angulares procurando o ângulo segundo o qual a extensão ao longo do eixo horizontal (eixo dos XX') é mínimo (fig. 3). Esta largura mínima projectada é usada para classificar o fragmento. Os lotes de calibres são baseados numa escala geométrica, determinando-se o número de lotes entre dois calibres. Para acomodar os fragmentos menores ou maiores do que esses limites, o "Zero" e o "Infinito" são sempre definidos.

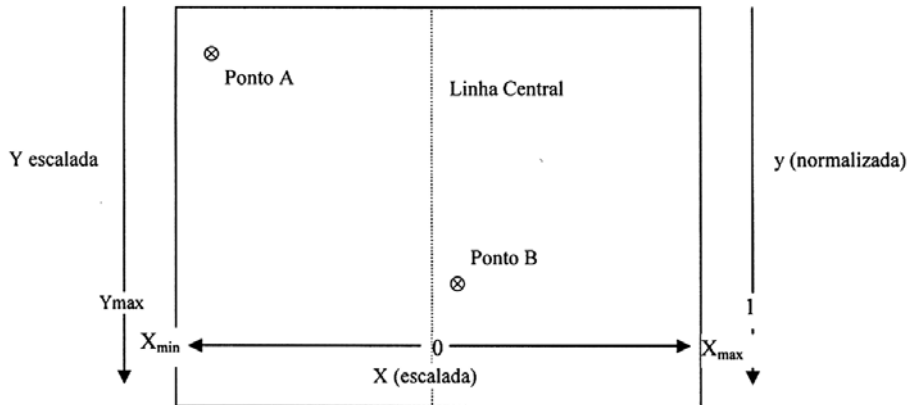


Fig. 3. Coordenadas normalizadas e escaladas (adaptado de KLEINE & CAMERON, 1996).



Fig. 4. Panorâmica do maciço rochoso da pedreira da Malaposta (A) e um exemplo de amostragem dos fragmentos do material-rocha gnáissico (B).

## O MACIÇO DA MALAPOSTA: UMA ABORDAGEM DA GEOENGENHARIA

### Generalidades

O objectivo do trabalho de campo realizado na pedreira da Malaposta foi a avaliação da aplicabilidade da metodologia na gestão de uma empresa de produção de britas, através do conhecimento antecipado do grau de fragmentação conseguido, utilizando um determinado diagrama de fogo, bem como o conhecimento da compartimentação do maciço rochoso em termos do estado da fracturação. A pedreira denominada de *Malaposta*, da empresa IRMÃOS CAVACO S.A., fica situada no lugar do

mesmo nome, na freguesia de S. Jorge, concelho de Santa Maria da Feira, distrito de Aveiro (NW Portugal). O material-rocha da pedreira é um granitóide de boa qualidade geotécnica, quer para a produção de britas, quer para ser usado como enrocamento (fig. 4).

### Enquadramento geológico regional

A região entre Porto e Albergaria-a-Velha insere-se numa complexa faixa de cisalhamento, com orientação média NNW–SSE, que se prolonga desde o Porto (Foz do Douro) até Tomar sendo designada por faixa de cisalhamento de Porto–Coimbra–Tomar (*e.g.*, GAMA PEREIRA, 1987; DIAS & RIBEIRO, 1993; CHAMINÉ, 2000;

CHAMINÉ *et al.*, 2003). Esta faixa é constituída por uma série de unidades tectonoestratigráficas do Proterozóico médio-superior ao Paleozóico superior (CHAMINÉ *et al.*, 2003), fazendo parte do Maciço Ibérico, estando tradicionalmente inserida na Zona de Ossa-Morena (RIBEIRO *et al.*, 1990; CHAMINÉ *et al.*, 2003).

O afloramento crítico de Souto Redondo (Lourosa) — Pedreira da Malaposta (fig. 5) — inclui-se na unidade tectonoestratigráfica de Lourosa (CHAMINÉ, 2000). A unidade de Lourosa é constituída por rochas metamórficas de alto grau, designadamente, migmatitos, ortognaisses, micaxistos e anfíbolitos. Esta unidade foi dividida em dois membros, inferior e superior, consoante o predomínio, respectivamente, de migmatitos e anfíbolitos (CHAMINÉ *et al.*, 2003).

#### Constrangimentos geológicos, geotécnicos e geomecânicos

Na Pedreira da Malaposta é possível diferenciar no terreno os seguintes litótipos, a saber (FREIRE de ANDRADE, 1938/40; CHAMINÉ *et al.*, 1996, 2001; CHAMINÉ, 2000): i) granitóides gnáissicos moscovíticos de grão médio a fino; ii) ortognaisses (*s.l.*); iii) milonitos e/ou ultramilonitos; iv) micaxistos, paragnaisses e migmatitos. Os enclaves, de natureza metassedimentar, são escassos. Todos os litótipos referidos são recortados por um sistema de filões quartzosos com sulfuretos (nomeadamente, pirite e arsenopirite) com direcção geral ENE-WSW a NE-SW e subverticais. Foram registadas zonas de cisalhamento dúcteis de movimentação direita, com direcção tectónica para o quadrante NW. A Pedreira da Malaposta encontra-se muito fracturada, sendo esta fracturação traduzida por um apertado e intenso diaclasamento dos distintos litótipos, destacando-se uma família de diaclases de orientação NNW-SSE, subvertical. Muitas das falhas observadas, de direcção NW-SE, resultam da reactivação destas descontinuidades, gerando, por vezes, intenso esmagamento e argilitização, principalmente nos litótipos granitóides de grão médio a fino.

O gnaíse biotítico da Pedreira da Malaposta apresenta uma cor azulada e/ou branca-amarelada e uma granularidade média a grosseira. Em termos petrográficos o material-rocha apresenta uma mineralogia essencial que consta de quartzo, plagioclase

(oligoclase) e biotite. O quartzo é xenomórfico de tamanho médio, muito suturado e quando intercrecido com feldspato potássico constitui a matriz de recristalização; os fenoclastos de plagioclase (oligoclase, An<sub>15</sub>) podem integrar a matriz ou constituir intercalações de bandas de recristalização de plagioclase denotando-se frequentemente a reacção desta com o quartzo formando mirmequites; a matriz é de natureza microcristalina, ocorrendo também microclina, muito suturada, com quartzo e mesmo constituindo fenocristais que incluem poiciliticamente todos os minerais; a biotite encontra-se muitas vezes cloritizada. Acessoriamente é constituído por clorite, moscovite, granada, apatite e zircão (CHAMINÉ *et al.*, 1996, 2001; CHAMINÉ, 2000). O granitóide biotítico de Malaposta classifica-se, segundo BARBARIN (1999), como peraluminoso do tipo CPG (*“cordierite-bearing and biotite-rich peraluminous granitoids”*; *i.e.*,  $A/CNK \sim 1.3, FeO_{TOTAL}/(FeO_{TOTAL} + MgO) < 0.8$ ) e, na classificação químico-mineralógica (La ROCHE *et al.* 1980) projecta-se no domínio dos granodioritos (CHAMINÉ *et al.*, 2001). Estes materiais geológicos ortoderivados foram datados radiometricamente, pelo método de U/Pb (CHAMINÉ *et al.*, 1998; CHAMINÉ, 2000) conferindo uma idade aos gnaisses biotíticos da pedreira da Malaposta de *ca.* 419 Milhões de anos (Ma). O estudo geocronológico permitiu, ainda, estimar a instalação dos granitóides, tanto a idade mínima como a idade máxima, em 420 Ma e 460 Ma, respectivamente.

A caracterização geotécnica e geomecânica do maciço da Malaposta pode ser avaliada com base nos seguintes parâmetros, a saber (PIZARRO, 1999): i) a densidade média do material gnáissico é 2.64; ii) módulo de Young (*E*) 63.4 GPa; iii) uma resistência à compressão (*Co*) de 211.7 MPa. Os valores considerados relativamente ao estado da fracturação do maciço (com atitude média das diaclases de N20°W;80°NE e, um espaçamento médio 1.2m) e a dimensão máxima dos blocos antes do rebentamento ( $S_b = 3.0m$ ).

#### Resultados e discussão

O primeiro passo para a avaliação da distribuição granulométrica é a documentação da pilha de material desmontado através de um sistema de aquisição de imagens. A amostragem foi feita por meio

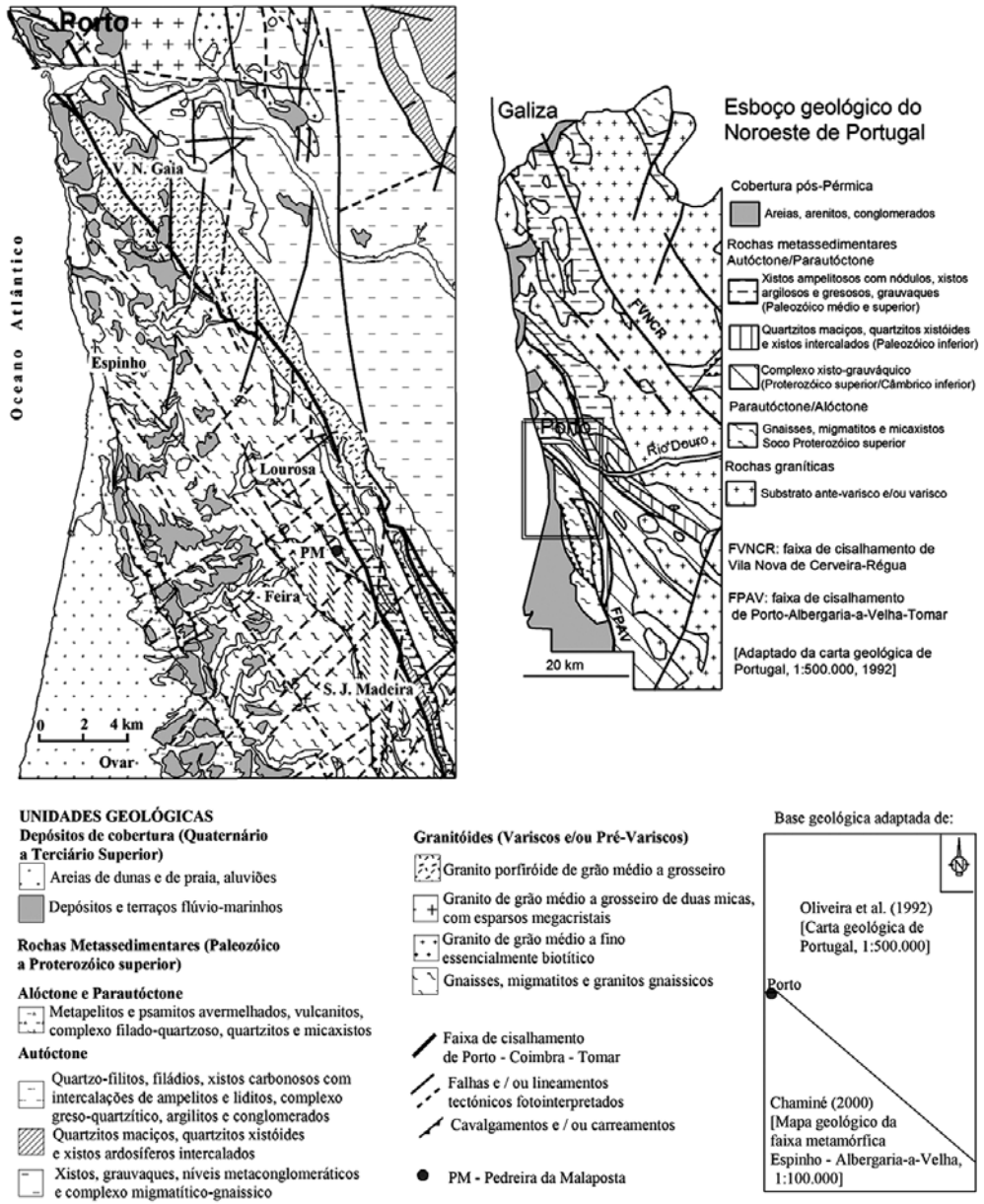


Fig. 5. Enquadramento geológico regional da Pedreira da Malaposta, na faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Tomar (adaptado de CHAMINÉ, 2000).



de uma câmara digital munida de um monitor de cristais líquidos, *Casio QV-100*. A amostragem fotográfica, muito embora pareça ser uma tarefa extremamente simples, mostrou ser difícil devido à obrigatoriedade, muitas vezes impossível, de conciliar o horário dos rebentamentos com as condições atmosféricas.

De acordo com o objectivo do trabalho, foi feita uma amostragem fotográfica da pilha de material em seis frentes de desmonte diferentes, consideradas como sendo um número razoável para posterior análise, as quais foram realizadas imediatamente após o rebentamento e antes de qualquer operação de remoção. Assim, e em conformidade com a configuração da pilha, extensão, tipo de granulometria e principalmente da acessibilidade da mesma, foram feitas tantas fotografias quanto possível. Tentou-se que a superfície da pilha fosse amostrada na sua totalidade através de fotografias feitas de forma sequencial ao longo do comprimento de toda a frente desmontada.

Salienta-se ainda que a tentativa de tomada de fotografias de secções da pilha, durante a operação de remoção, tendo-se verificado, no entanto, grandes dificuldades devido às paragens que tal implicava na operação de carga. Convém referir que, durante o período em que foi feita a amostragem a empresa estava interessada em produzir, para além de material que iria alimentar a instalação de britagem, material de grande dimensão para enrocamento, o que se reflectiu na distribuição granulométrica medida através das fotografias. Incluiu-se, em cada fotografia, um objecto de dimensões conhecidas, mais especificamente uma *bola de basquete* (diâmetro considerado 250 mm), para servir como elemento de referência de escala.

Após a obtenção de fotografias do material desmontado, estas foram copiadas por meio de um programa de transferência de dados, o *QV-Link*, para um programa informático de tratamento de imagem, o que permitiu que as fotografias fossem retocadas em termos de cor, luminosidade e contraste, de forma a melhorar a capacidade para distinguir os fragmentos na imagem; cada imagem foi, posteriormente, convertida num ficheiro *bitmap*.

Na fase de tratamento das fotografias através do programa *GoldSize*, os passos dados até à criação do gráfico final da distribuição granulométrica foram os seguintes:

criação dum projecto para cada grupo de foto-

grafias de cada desmonte, referenciados por *Desm1,2,3...6* (quadro 1). Cada imagem foi considerada uma amostra pertencente ao projecto (e às quais foram atribuídas as designações P, Q, R, S, T, V, de acordo com o projecto);

para escalar a imagem, foi digitalizado um objecto previamente conhecido (neste caso, uma *"bola de basquete"*), referindo a sua máxima dimensão. Este procedimento levou à criação dum ficheiro, único para cada imagem, de extensão *“.dig"*.

o passo seguinte consistiu no contorno das partículas mais relevantes da imagem e em cada imagem visualizada foram distinguidas todas as partículas possíveis. Ao ficheiro criado que continha a digitalização dos fragmentos na imagem foi denominado de ficheiro de digitalização (fig. 6). Este tipo de ficheiros continham os polígonos de todas as partículas na imagem bem como a informação sobre a escala da amostra. Essa informação, foi utilizada durante o processo de cálculo dos calibres para converter as coordenadas da imagem em coordenadas reais, conforme referido anteriormente.

a colecção de ficheiros digitalizados, designada por família, foi processada e combinada para produzir as distribuições granulométricas, de acordo com o método de estimação escolhido.

Os valores introduzidos no programa, relativos à classificação granulométrica, encontraram-se resumidos no quadro 2. Após várias combinações de valores dos parâmetros introduzidos, verificou-se que os três primeiros valores não influenciam grandemente os resultados. Pelo contrário, verificou-se que a escolha dos valores adequados para a classificação granulométrica é crítica para os resultados.

O *GoldSize* apresenta quatro métodos diferentes de estimativa para a distribuição granulométrica do material fragmentado. A estimativa simples, que se baseia na contagem de cada partícula digitalizada no lote próprio, sendo o resultado convertido numa distribuição por peso. Uma outra estimativa, mais adequada que a anterior, aplica um algoritmo de busca para encontrar a distribuição de *Rosin-Rammler*, estimando com maior aproximação os calibres observados em cada amostra. Através desta técnica podem ser encontrados os parâmetros de *Rosin-Rammler*, nomeadamente, o calibre característico e o índice de uniformidade. Estas estimativas podem ser visualizadas graficamente, sob a forma de histogramas ou curvas de percentagens acumuladas (fig. 7). Uma vez que a apresentação de todos os

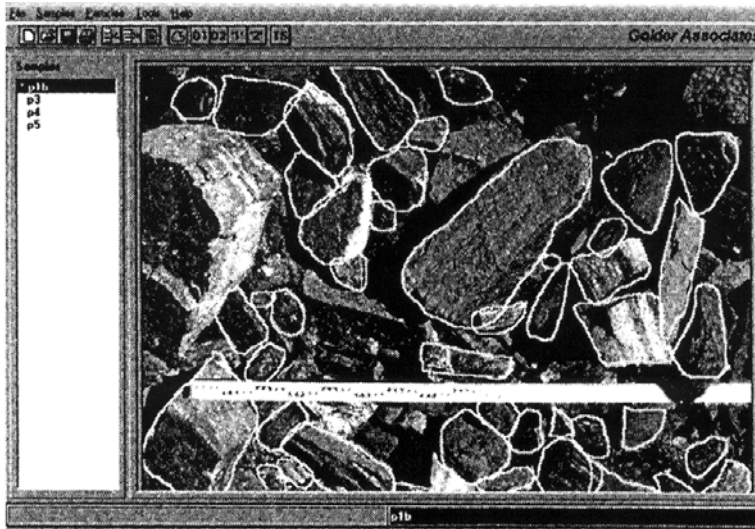


Fig. 6. Exemplo do contorno dos fragmentos (adaptado de KLEINE & CAMERON, 1996).

resultados dos projectos realizados seria exaustiva, optou-se por apresentar todas as formas de visualização gráfica de apenas um dos exemplos, o projecto referenciado como “*Desm5*” (quadro 3).

Os histogramas apresentam a distribuição granulométrica por percentagem de peso dos fragmentos em cada lote de calibres. As curvas acumulativas representam a percentagem de passados por peso em cada calibre. Uma outra forma de apresentar a distribuição granulométrica aplica um algoritmo simples de correcção de finos para aumentar a quantidade de material fino abaixo de um calibre pré-definido. Esta correcção tenta minimizar a dificuldade existente, em qualquer sistema deste tipo, de definição e posterior quantificação do material demasiadamente pequeno para ser detectado pela resolução do programa. Para além destas representações individuais da distribuição granulométrica, foi possível combinar os vários modos de visualização, de forma a obtermos um meio de comparação entre as várias curvas ou histogramas e que fosse de fácil interpretação. Apresentam-se, (fig. 7) exemplos dessas combinações: a curva da distribuição de *Rosin-Rammler* em combinação com a curva da amostra medida e uma combinação entre a distribuição granulométrica conseguida pela medição da fragmentação através das fotografias e a previsão da

distribuição granulométrica segundo o modelo de *Kuz-Ram*, a partir dos parâmetros do diagrama de fogo introduzidos.

É possível ter uma ideia da diferença entre o resultado obtido e o previsto, através de três dos quatro métodos disponíveis para estimar a distribuição granulométrica, fazendo uma combinação de três curvas: fragmentação medida, fragmentação prevista pelo modelo de *Kuz-Ram* e fragmentação prevista pela distribuição de *Rosin-Rammler*. A informação acerca de um determinado projecto e das amostras seleccionadas, pode ser impressa sob a forma de listagens tabulares de valores numéricos, incluindo os valores instantâneos e acumulativos e os calibres correspondentes.

Apesar da variabilidade das condições que se verificam “in situ”, principalmente a nível da compartimentação do maciço nos diversos desmontes onde foi feita amostragem fotográfica, e cuja avaliação não se encontra no âmbito deste trabalho, verificou-se que existe uma concordância razoável entre os resultados obtidos. Esta concordância parece dever-se principalmente à adopção de diagramas de fogo similares e de o mesmo tipo de explosivo. Assinale-se que os desmontes amostrados foram realizados tendo em vista a produção de grandes blocos para enrocamento, o que se reflectiu na

Projecto	Nº de fotografias	Amostras	Nº Partículas
Desmonte1	7	P1	41
		P2	54
		P3	33
		P4	47
		P5	58
		P6	35
		P7	27
Desmonte1	7	Q1	30
		Q2	41
		Q3	41
		Q4	40
		Q5	33
		Q6	31
		Q7	28
Desmonte 3	5	R1	231
		R2	79
		R3	69
		R4	68
		R5	129
Desmonte 4	4	S1	38
		S2	46
		S3	35
		S4	75
Desmonte 5	4	T1	103
		T2	185
		T3	135
		T4	54
Desmonte 6	5	V1	92
		V2	67
		V3	93
		V4	55
		V5	85

Quadro 1. Amostragem fotográfica efectuada na Pedreira da Malaposta (PIZARRO, 1999).

curva de distribuição granulométrica dos fragmentos medidos na fotografia, com predominância de grandes calibres.

Verificou-se, (CUNNINGHAM 1996a,b) que a curva de *Rosin-Rammler* era na generalidade reconhecida como uma descrição razoável do calibre médio da fragmentação, tanto para material britado como para o resultante do rebentamento. De acordo com os valores obtidos através do programa *GoldSize*, utilizando a estimativa de *Rosin-Rammler*, verificou-se que estes, em geral, são da mesma ordem de gran-deza.

O parâmetro  $X_c$  representa um ponto da curva de *Rosin-Rammler*, o valor do calibre médio, o qual pode ser calculado através da equação de Kuznetsov. O parâmetro  $n$  determina a curva de distribuição granulométrica, significando que quanto maior for o valor de  $n$  maior é a uniformidade da fragmentação e, pelo contrário, o seu decréscimo reflecte uma maior quantidade de finos bem como a existência de blocos na pilha (quadro 4).

<b>Objectivo</b>	
Calibre máximo (“over size”)	2,00 m
Calibre óptimo	1,00 m
Calibre inferior (“under size”)	0,50 m
<b>Classificação Granulométrica</b>	
Factor de Conversão	2.2
Relação de crivagem	1.4
Calibre de correcção de finos	0,02 m
Número de lotes	50
Calibre superior	2,00 m
Calibre inferior	0.01 m

Quadro 2. Valores introduzidos no programa GoldSize (PIZARRO, 1999).

<b>Lote (mm)</b>	<b>Nº de Partículas Digitalizadas</b>				<b>Total</b>	<b>% Passados</b>
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>		
0-50	4	15	27	5	51	10,69
50-100	31	72	51	15	169	35,43
100-200	51	77	45	20	193	40,46
200-500	15	21	11	14	61	12,79
>500	2	0	1	0	3	0,63
<b>TOTAL</b>	103	185	135	54	477	100,00

Quadro 3. Resultados da análise granulométrica relativos ao projecto Desm5 (PIZARRO, 1999).

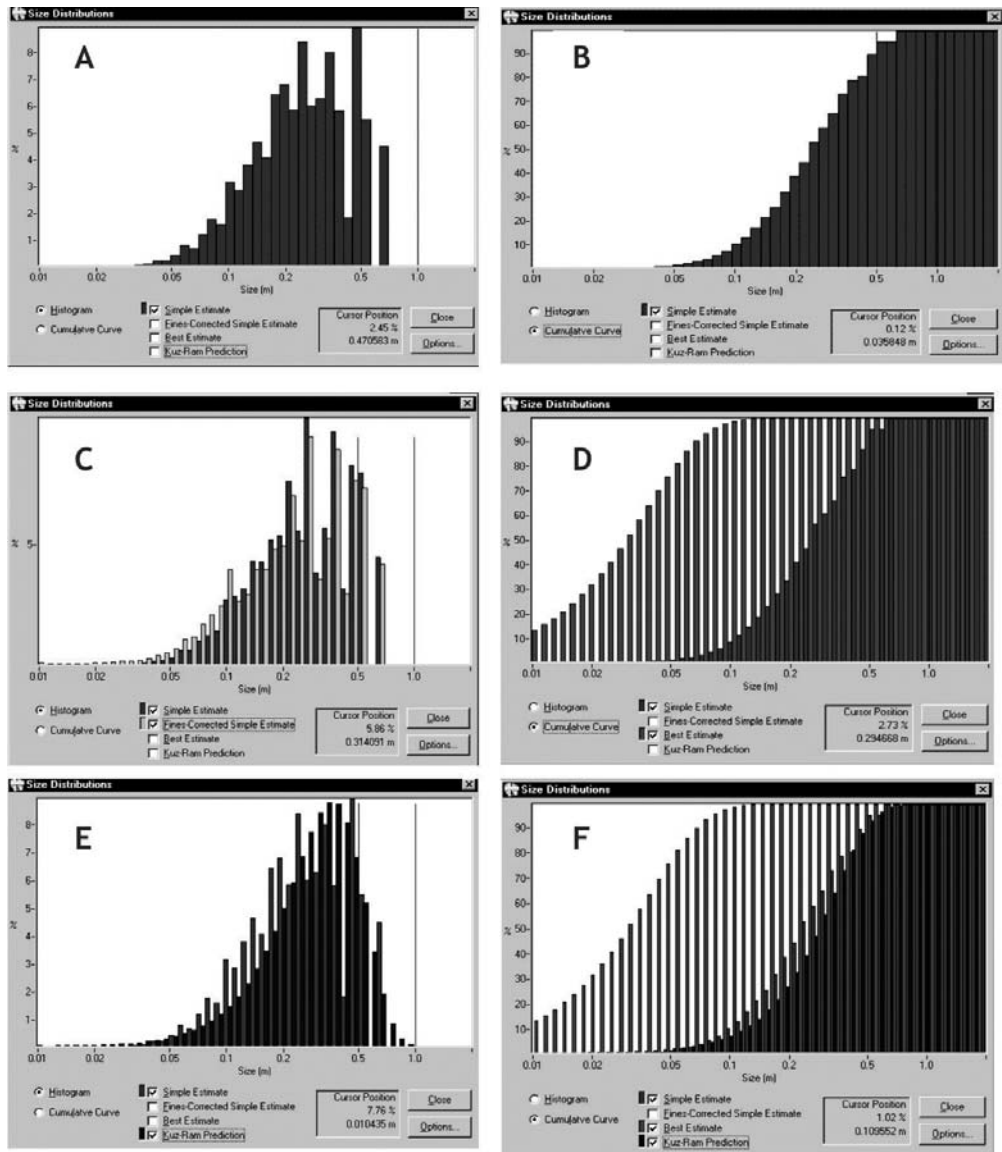


Fig. 7. A) Histograma da distribuição granulométrica das partículas digitalizadas do desmonte de uma frente; B) Curva de distribuição granulométrica das partículas digitalizadas do desmonte de uma frente. C) Histograma da distribuição granulométrica com correcção de finos; D) Curva de simulação da distribuição granulométrica de Rosin-Rammler; E) Combinação de dois histogramas; F) Visualização das três formas de apresentação gráfica da distribuição granulométrica.

<b>Amostra</b>	<b>Xc</b>	<b>N</b>
Desmonte 1	4,57623E-02	1,4769
Desmonte 2	3,02539E-02	1,5184
Desmonte 3	3,75006E-02	1,4955
Desmonte 4	0,86240E-02	1,2397
Desmonte 5	3,68688E-02	1,5083
Desmonte 6	3,54732E-02	1,5016

Quadro 4. Parâmetros de Rosin-Rammler (PIZARRO, 1999).

## CONCLUSÕES

Com o presente trabalho pretendeu-se contribuir para um melhor conhecimento das técnicas de análise de imagens, aplicando-as ao estudo e optimização dos diagramas de fogo em maciços rochosos com um estado de fracturação complexo. Do exposto resultam como aspectos mais importantes, os seguintes:

Os estudos da fragmentação são importantes no projecto dos diagramas de fogo para optimização do rendimento de uma exploração com uma geologia complexa, como é o caso da Pedreira de Malaposta;

O estudo da fragmentação por análise fotográfica, apoiada por levantamentos geológico-geotécnicos de pormenor do maciço, é uma técnica interessante uma vez que é a que causa menor perturbação nas actividades de rotina de produção;

A metodologia abordada é uma boa ferramenta,

no que diz respeito à comparação de distribuições granulométricas medidas em ambientes de rebentamento similares, levando a modelos de predição para a diminuição da utilização de crivagem, trabalhosa e onerosa, com o objectivo de obtenção da fragmentação absoluta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as facilidades operacionais dadas pela administração da empresa Irmãos Cavaco, SA e pelo apoio do seu corpo técnico de engenharia. Um agradecimento especial à Dra. M. J. Afonso (ISEP) e ao revisor anónimo pelas sugestões críticas ao manuscrito original.

*Recibido: 27/7/2005*

*Aceptado: 2/8/2005*

## REFERÊNCIAS

- ALLER, J. & MOUZA, J. (1996). Measuring fragmentation efficiency of mine blasts. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 1257-263.
- BARBARIN, B. (1999). A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605-626.
- BHANDARI, S. (1996). Changes in fragmentation process with blasting conditions. In: MOHANTY (Ed.), *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema, Rotterdam. pp. 301-309.
- CHAMINÉ, H. I. (2000). *Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas*. Universidade do Porto. 497 pp, 2 anexos, 3 mapas. (Tese de doutoramento).
- CHAMINÉ, H. I.; ALMEIDA, A.; MOREIRA, M. E.; LEMOS DE SOUSA, M. J. & FONSECA, P. E. (2001a). Caracterização geoquímica preliminar de rochas ortoderivadas da faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena, NW de Portugal): implicações geotectónicas. In: LAGO, M.; ARRANZ, E. & GALÉ, C., eds., *Proceedings III<sup>er</sup> Congreso Ibérico de Geoquímica/VIII Congreso de Geoquímica de España*. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, Spain. pp. 331-336.
- CHAMINÉ, H. I.; GAMA PEREIRA, L. C.; FONSECA, P. E.; NORONHA, F. & LEMOS DE SOUSA, M. J. (2003c) - Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto-Albergaria-a-Velha-Coimbra-Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, 28: 37-78.
- CHAMINÉ, H. I.; LETERRIER, J.; FONSECA, P. E.; RIBEIRO, A. & LEMOS DE SOUSA, M. J. (1998). Geocronologia U/Pb em zircões e monazites de rochas ortoderivadas do sector Espinho-Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena, NW de Portugal). *Comunicações Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 84, 1: B115B118.
- CHAMINÉ, H. I.; FONSECA, P. E.; PEREIRA, E. & RIBEIRO, A. (1996). Estruturas desenvolvidas em ortognaisses da Unidade de Lourosa induzidas pelo carreamento de S. João-de-Ver. Aspectos da deformação no autóctone (Sector Espinho-Albergaria, Zona de Ossa Morena). *Resumos alargados, 2<sup>a</sup> Conferência Anual do Grupo de Geologia Estrutural e Tectónica*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. pp. 45-48.
- CHAVEZ, R.; CHEÏMANOFF, N.; SCHLEIFER, J. (1996). Sampling problems during grain size distribution measurements. In: MOHANTY (Ed.), *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema, Rotterdam. pp. 245-252.
- CHUNG, S.H. & NOY, M.J. (1996). Experience in fragmentation control. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 247-252.
- CUNNINGHAM, C.V. (1996a). Optical fragmentation assessment: a technical challenge. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 13-19.
- CUNNINGHAM, C.V. (1996b). Lessons from compaphoto technique of fragmentation. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 53-57.
- DIAS, R. & RIBEIRO, A. (1993). Porto-Tomar shear zone, a major structure since the beginning of the variscan orogeny. *Comun. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 79: 31-40.
- DINIS da GAMA, C. & JIMENO, C.L. (1993). Rock fragmentation control for blasting cost minimization and environment impact abatement. *Proceedings 4<sup>th</sup> Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting*, Vienna, pp. 273-280.
- DINIS da GAMA, C. (1971). Optimização do arranque de rochas com explosivos. *Memória MI-4, Universidade de Luanda*.
- DINIS DA GAMA, C. (1984). Microcomputer simulation of rock blasting to predict fragmentation. *Proceedings 25<sup>th</sup> US Symp. Rock Mechanics*, Evanston, Illinois, pp. 1018-1030.
- DINIS da GAMA, C. (1988). Recomendações técnicas para realização de desmontes com explosivos em pedreiras e minas a céu aberto. *Boletim de Minas*, Lisboa, pp. 319-330.
- DINIS da GAMA, C. (1996a). Um modelo para a fragmentação de rochas sob acção de explosivos. *Geotecnia, Rev. Assoc. Portg. Geot.*, Lisboa, 76: 41-51.

- DINIS da GAMA, C. (1996b). The concept of rock mass fragmentability. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 209-214.
- DOWNS, D.C. & KETTUNEN, B.E. (1996). On-line size analysis for the measurement of blast fragmentation. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 175-177.
- FRANKLIN, J.A. (1996). Fragment size measurements and statistics. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 23-31.
- FRANKLIN, J.A. & DUSSEAUT, M.B. (1992). *Rock engineering applications*. Ed. McGraw-Hill, Singapore.
- FRANKLIN, J.A. & MAERZ, N.H. (1996). Empirical design and rock mass characterization. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 193-201.
- FRANKLIN, J.A.; KEMENY, J.M. & GIRDNER, K.K. (1996). Evolution of measuring systems: a review. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 47-52.
- FREIRE DE ANDRADE, C. (1938/40). Algumas considerações sobre a geologia dos arredores de Espinho e das Caldas de S. Jorge. *Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciênc. Univ. Lisboa*, 7-8 (3ª série): 23-35.
- GAMA PEREIRA, L. C. (1987). *Tipologia e evolução da sutura entre a Zona Centro Ibérica e a Zona Ossa Morena no sector entre Alvaiázere e Figueiró dos Vinhos (Portugal Central)*. Universidade de Coimbra. 331 pp. (Tese de doutoramento).
- GOLDSIZE (1996). Goldsize User Guide, *Golder Associates Inc.*
- KLEINE, T.H. & CAMERON, A.R. (1996). Blast fragmentation measurement using *GoldSize*. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 83-89.
- KONYA, C.J. & WALTER, E.J. (1990). *Surface blast design*. Prentice-Hall, Inc.
- KUSZMAUL, J.S. (1987). A Technique for predicting fragmentation and fragment sizes resulting from rock blasting. *Proceedings 28<sup>th</sup> U. S. Symp. on Rock Mechanics*. Tucson, pp. 893-900.
- La ROCHE, H. ; LETERRIER, J., GRAND-CLAUDE, P. & MARCHAL, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses. Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29: 183-210.
- LACUBE, J.; BISSAINTE, M. & HERNANDEZ, J. (1993). Traitement d'image applique aux materiaux: exemple d'une analyse quantitative des feldspaths dans les roches. *Bulletin LAEG*, 47 : 109-117.
- MAERZ, N.H. & NORBERT H. (1996). Image sampling technique and requirements for automated image analysis of rock fragmentation. *Proceedings ISRM, FragBlast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement*, Montreal. A.A. Balkema.
- MAERZ, N.H.; PALANGIO & FRANKLIN (1996). Wip frag image based granulometry system. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 91-99.
- MOODLEY, L. & CUNNINGHAM, C. (1996). Measuring the effect of blasting fragmentation on hard rock quarrying operations. In: MOHANTY (Ed.), *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema, Rotterdam, pp. 353-359.
- PALANGIO, T.C. & FRANKLIN, J.A. (1996). Practical guidelines for lighting and photography. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 111-114.
- PIZARRO, S. (1999). *Aplicação de sistemas ópticos na avaliação da granulometria de granitos para produção de inertes*. Instituto Superior Técnico. 111 pp. (tese de mestrado).
- RIBEIRO, A.; QUESADA, C. & DALLMEYER, R. D. (1990). Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: DALLMEYER, R. D. & MARTÍNEZ-GARCÍA, E. (eds.). *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. pp. 397-410.
- ROCHA, M. (1981). *Mecânica das rochas*. LNEC, Lisboa.
- VOGT, W. & ABBROCK, O. (1993). Digital image processing as an instrument to evaluate rock fragmentation by blasting. *FragBlast 4*, Balkema, Rotterdam.
- WANG, W.; BERGHOLM, F. & STEPHANSSON, O. (1996). Image analysis of fragment size and



- shape. In: MOHANTY (Ed.), *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema, Rotterdam, pp. 233-243.
- WANG, W.X. & STEPHANSSON, O. (1996). Comparison between sieving and image analysis of aggregates. In: FRANKLIN & KATSABANIS (Ed.), *Measurement of Blast Fragmentation*, Balkema, Rotterdam. pp. 141-149.