

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA
Coordenação

A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 2 • RECURSOS GEOLÓGICOS E FORMAÇÃO



Coimbra • Imprensa da Universidade

MODELAÇÃO ESTOCÁSTICA DA COMPARTIMENTAÇÃO DOS MÁRMORES NA UNIDADE DE BORBA

J. A. ALMEIDA¹, C. VINTÉM², A. G. LUÍS² e M. LOPES¹

PALAVRAS-CHAVE: exploração de mármore, densidade linear de fracturação, simulação estocástica, zonamento de reservas, modelação da incerteza.

KEY WORDS: marble quarries, linear fractures density, stochastic simulation, reserves delimitation, uncertainty evaluation.

RESUMO

Uma das principais etapas da avaliação de um recurso geológico consiste na modelação numérica das respectivas propriedades que condicionam, técnica e economicamente a sua apropriação. Por exemplo, antes da fase de exploração é imprescindível possuir uma estimativa local e global dos respectivos comportamentos da tonelagem e valor médio de uma ou mais características, às quais seja possível associar um benefício resultante da sua exploração.

Quando o comportamento espacial de um recurso geológico é extremamente heterogéneo, e simultaneamente é reconhecido por um conjunto escasso de informação, existe sempre subjacente a cada avaliação de reservas uma elevada incerteza. Nestes casos, para quantificar as incertezas locais e globais é comum recorrer à utilização de algoritmos de simulação estocástica, que possuem as vantagens de gerarem diferentes comportamentos das características pontuais, que permitem conhecer as probabilidades de ocorrência de possíveis extremos ou quaisquer valores intermédios, e reproduzirem o histograma e a variabilidade espacial da amostragem.

¹ CIGA, Faculdade de Ciências e Tecnologia/UNL, Monte de Caparica, 2829-516 Caparica.

² Instituto Geológico e Mineiro, Estrada da Portela, Alfragide, 2720-866 Amadora.

Neste trabalho ilustram-se as potencialidades de aplicação das técnicas de simulação estocástica à caracterização da densidade linear de fracturação nos mármore na unidade de ordenamento de Borba. A interpretação regional dos valores obtidos permite a delimitação de zonamentos discriminados pelas classes de compartimentação encontradas.

ABSTRACT: Stochastic modelling for the block dimension and reserves in the marbles of the Borba Unit

One of the main stages concerning the evaluation of a geologic resource consists of the numerical modelling of its internal properties that technically and economically condition the exploitation. For example, before the exploitation step it is essential to forecast local and global estimators of the respective behaviours of the tonnage and the most likely value for one or a set of descriptive properties in order to compute a benefit.

When the internal architecture of a geological resource is extremely heterogeneous and, simultaneously, is recognized by a scarce set of information, it always exists a significant level of uncertainty underlying each reserve evaluation. In these cases, to quantify the local and global uncertainty it is usual to appeal for the use of stochastic simulation algorithms, that shows the advantage to generate the extreme scenarios and giving its probability of occurrence, and to reproduce both the histogram and the space variability measured by the sampling.

In this work, the potentialities of application of the stochastic simulation techniques to the characterization of the linear fractures density in a marble exploitation area (Borba) are illustrated. A regional interpretation of the simulated images allows the delimitation of zones discriminated by production quality.

1. INTRODUÇÃO

1.1. GEOLOGIA DO ANTICLINAL DE ESTREMOZ

Os mármore aflorantes na região de Borba, que desde há longos anos têm sido alvo de intensa exploração para fins ornamentais, enquadram-se, em termos tectono-estratigráficos, na Zona de Ossa Morena (LOTZE, 1945) e fazem parte do Complexo Vulcano Sedimentar Carbonatado de Estremoz (OLIVEIRA *et al.*, 1991). A idade deste Complexo está indefinida, podendo ser Câmbrico ou Ordovício, sendo actualmente alvo de discussão.

Texturalmente os mármore da região de Borba apresentam grão médio a grosseiro. As cores que ostentam são o rosa, o creme e o branco e a sua distribuição denota um controlo stratigráfico. Assim, os mármore de cor rosa ocorrem preferencialmente na base e no topo da sequência de mármore exploráveis do

referido Complexo, onde também são frequentes intercalações de metavulcanitos. Na parte média da sequência ocorrem os mármore de cores creme e branca.

Em termos estruturais e por efeitos da orogenia hercínica, estas rochas foram, numa 1ª fase, dobradas e carregadas com movimento para NNE. Numa 2ª fase, com movimentação para NE, foram dobradas com geração de falhas inversas. Os movimentos desta 2ª fase, conduziram os estratos dos flancos normais das dobras anteriores para posições orientadas segundo N60°W,60°NE; e os dos flancos inversos para N10°W,50°ENE.

No final da orogenia hercínica, a exumação do maciço e a libertação das tensões produziu densa rede de fracturação: fracturas longitudinais segundo N30°W, transversais segundo N60°E e diagonais à estrutura dobrada, segundo N10°W.

Fenómenos de dissolução recente, com formação de cavidades cársticas, são mais evidentes ao longo das fracturas orientadas segundo N10°W. Estas são as principais responsáveis pela compartimentação que se verifica nesta região do Anticlinal de Estremoz.

1.2. QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE RESERVAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Praticamente todos os trabalhos de investigação no domínio das rochas ornamentais visam desenvolver novas metodologias que melhorem a cartografia da distribuição espacial dos parâmetros descritores da respectiva qualidade (densidade da fracturação, cor, presença de veios, etc.) e assim permitir auxiliar, quer na previsão da dimensão comercial e forma dos blocos quer no apoio às tarefas de planeamento (orientação das frentes e do corte).

Contrariamente ao que ocorre noutros jazigos minerais onde podemos caracterizar a respectiva qualidade com recurso ao teor, a grande dificuldade natural de um estudo de avaliação de reservas de rochas ornamentais, nomeadamente de mármore, reside na definição de uma variável regionalizada (VR) que seja reveladora do valor comercial de um determinado bloco em cada local. As VR (MATHERON, 1965), têm a particularidade de apresentar um duplo aspecto: por um lado, uma estrutura espacial que reflecte as ligações existentes entre cada ponto no espaço, por outro, uma variação aleatória que conduz a uma variação imprevisível de ponto para ponto. Deixando de parte os condicionalismos de ordem extrínseca, tais como, as variações de mercado, são alguns aspectos intrínsecos como a qualidade da rocha, a densidade linear de fracturação (dlf) e a orientação da fracturação que mais condicionam a blocometria e a recuperação global das pedreiras (GROSSMAN, 1977, 1988, SILVA, 1989, LUÍS, 1995 e LUÍS & SOUSA 1998).

Se estabelecermos um paralelismo entre um jazigo de minerais metálicos e uma exploração de rochas ornamentais, uma curva de parametrização que sintetiza o histograma de teores de metal para o jazigo terá como equivalente numa

exploração de rochas ornamentais uma curva blocométrica, que relaciona a fracção de blocos com a respectiva dimensão. A dificuldade está pois em relacionar quantitativamente uma variável do tipo *dlf* com a dimensão dos blocos por uma função de transferência *f*:

$$\text{Blocometria} = f(\text{dlf})$$

ou, caso sejam consideradas *n* famílias de fracturação:

$$\text{Blocometria} = f(\text{dlf}_1, \text{dlf}_2, \dots, \text{dlf}_n)$$

Relativamente a esta função sabemos que se *dlf* aumenta a blocometria diminui, mas existirá sempre muita dificuldade em quantificar esta relação, a menos que se conheçam experimentalmente múltiplos pares destas duas variáveis, o que é praticamente impossível, quer porque as atitudes das fracturas são bastante variáveis no espaço quer pela grande dificuldade em aceder aos valores históricos das empresas. A *dlf* actua assim como um índice quantitativo da qualidade dos maciços rochosos e reflecte a viabilidade das explorações aí implantadas, tornando imperativo o seu conhecimento na área em estudo. Em ALMEIDA & SOARES (1992), ALMEIDA *et al.* (1993), SOUSA *et al.* (1992), REYNAULD & VINTÉM (1992), LUÍS (1995), LUÍS & SOUSA (1998) e MUGE *et al.* (1993) são descritas metodologias para a caracterização regional e local da qualidade dos maciços rochosos que recorrem à análise de imagens e estimação por krigagem da morfologia das litologias e da *dlf* na região de Pardais, anticlinal de Estremoz. Mais recentemente foram apresentados novos trabalhos de caracterização espacial da qualidade dos maciços rochosos, realçando-se a construção de índices de qualidade (PEREIRA *et al.*, 1993, RIBEIRO, 1994, 1999 e ALBUQUERQUE, 1999) e a avaliação da blocometria por simulação da geometria de redes de fracturas (LUÍS, 1995 e LUÍS & SOUSA, 1998).

A *dlf* pode ser calculada através de levantamentos nas frentes, pelo método de amostragem sobre uma linha, conhecido na literatura como método de *scan-line*, que consiste no levantamento de todas as fracturas intersectadas por um segmento de recta traçado em qualquer direcção ou ao longo de sondagens (fig. 1). Este levantamento sistemático permite calcular posteriormente uma medida designada por *dlf*, que corresponde ao número médio de fracturas que intersectam a *scan-line* por unidade de comprimento. Num levantamento ideal, as *scan-lines* devem ser obtidas, quer horizontalmente quer verticalmente nas faces de frentes com direcções o mais heterogéneas possível, e serem acompanhadas das atitudes das fracturas para permitir uma posterior classificação por famílias. Efectivamente são as famílias de fracturas com orientações aproximadamente ortogonais que de um modo geral mais contribuem para a compartimentação do maciço e condicionam a blocometria e a recuperação da exploração. Poderão ainda coexistir outras famílias de menor importância em termos de frequência, mas que em conjunto com as primeiras introduzem uma compartimentação adicional, que contribuem para uma diminuição significativa da recuperação.

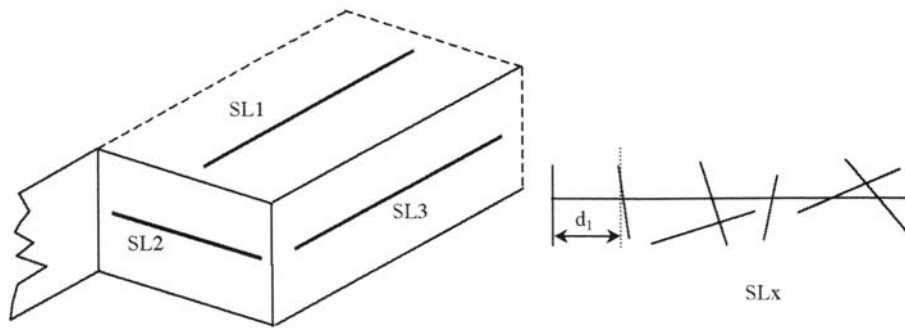


Fig. 1 – Orientação das *scan-lines* para a determinação da *dlf* numa frente de uma exploração de rochas ornamentais (adaptado de LÓPEZ-JIMENO, 1996).

No exemplo descrito neste trabalho foi utilizada como VR a *dlf* calculada com todas as fracturas identificadas, independentemente da orientação. Trata-se de uma simplificação que não compromete o objectivo de caracterização regional do reticulado deste maciço rochoso e a subsequente realização de classificações e delimitações de zonamentos em função da blocometria expectável.

2. UTILIZAÇÃO DE METODOLOGIAS GEOESTATÍSTICAS NA AVALIAÇÃO DE RESERVAS

2.1. MODELAÇÃO GEOESTATÍSTICA POR SIMULAÇÃO

Os modelos geoestatísticos utilizados na modelização dos fenómenos relacionados com a quantificação dos recursos naturais que sejam possuidores de uma estrutura espacial, resultam da associação do seu comportamento com os fundamentos teóricos da matemática e estatística, em particular da teoria das funções aleatórias. A escolha de um determinado modelo geoestatístico deve ter por base o estudo e o conhecimento do fenómeno natural em causa, incorporando-se a sua componente espacial na respectiva caracterização, que pode servir para aplicações distintas nas áreas do planeamento, do ordenamento, da valorização e monitorização do recurso natural. A validação destes modelos geoestatísticos é efectuada *à posteriori*, mediante o cruzamento entre os resultados obtidos pela modelização e o restante conhecimento do recurso em causa, o que permite encontrar um maior ou menor afastamento dos resultados à realidade.

A simulação geoestatística é um processo estocástico destinado a gerar imagens que reproduzem a distribuição espacial e a incerteza associada às diferentes variáveis tratadas nas Ciências da Terra. Esta classe de modelos tem como objectivo reproduzir imagens da realidade que reflectem características do recurso, como: a

variabilidade do conjunto de amostras; a lei de distribuição da variável em estudo; e a continuidade espacial. O resultado é um conjunto de imagens equiprováveis com a mesma distribuição espacial dos dados experimentais, e reprodução dos estatísticos e variabilidade espacial quantificados pelas amostras (histograma e variograma ou covariância espacial). Normalmente, com a simulação não se pretende obter a imagem média ou a mais provável das características de um dado recurso (que é o objectivo da estimação), mas sim um conjunto de imagens equiprováveis, que permitem visualizar diferentes comportamentos extremos das características internas ou morfológicas de um recurso, e simultaneamente quantificar a incerteza local dessas características.

Existem vários algoritmos de simulação candidatos a gerar imagens da *dff*, onde se destacam os algoritmos de simulação sequencial. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo de simulação sequencial directa (SSD) proposto por Soares (SOARES, 2001).

2.2. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia utilizada na delimitação regional de zonamentos relativos à qualidade das rochas ornamentais em função da compartimentação expectável encontra-se sintetizada no diagrama da figura 2.

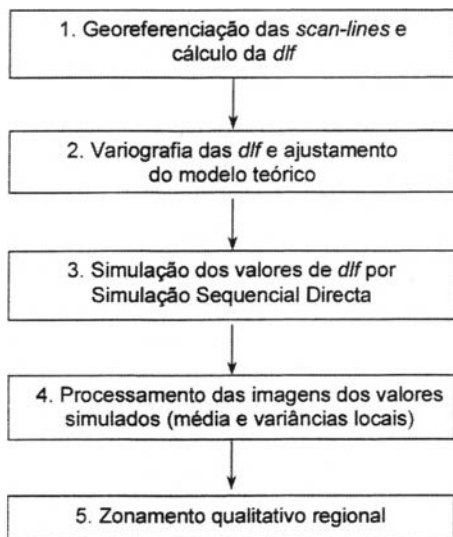


Fig. 2 – Diagrama da metodologia proposta para o estabelecimento do zonamento qualitativo regional.

3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS MÁRMORES NA REGIÃO DE BORBA

Para ilustrar as potencialidades das metodologias de simulação geoestatística na aplicação à caracterização regional da compartimentação de um maciço rochoso, utilizaram-se os dados obtidos no projecto “Cartografia temática do Anticlinal como Instrumento de Apoio à Indústria Extractiva”, no âmbito do plano AIZM – Acção Integrada das Zonas dos Mármore, financiado pelo Programa Operacional Regional do Alentejo 2000/6, desenvolvido conjuntamente pelo CEVALOR e IGM em pedreiras da Unidade de Ordenamento 2 (UNOR2) – Borba do PROZOM (Plano Regional de Ordenamento da Zona dos Mármore).

Estes dados são constituídos pelo levantamento e georeferenciação de 2947 fracturas referentes a 260 *scan-lines* de várias pedreiras da região. Relativamente a cada *scan-line* foi calculada a *dlf* através do quociente entre o número de fracturas e o respectivo comprimento. Esta informação foi georeferenciada à coordenada do ponto central da *scan-line*. Uma vez que a coordenada Z depende do local e da cota da frente, assumiu-se que o valor medido localmente é representativo de uma altura variável, entre a superfície e a profundidade a explorar no local avaliado, o que transforma esta medida numa VR que pode ser trabalhada a duas dimensões. Na figura 3 apresentam-se os estatísticos básicos da *dlf*.

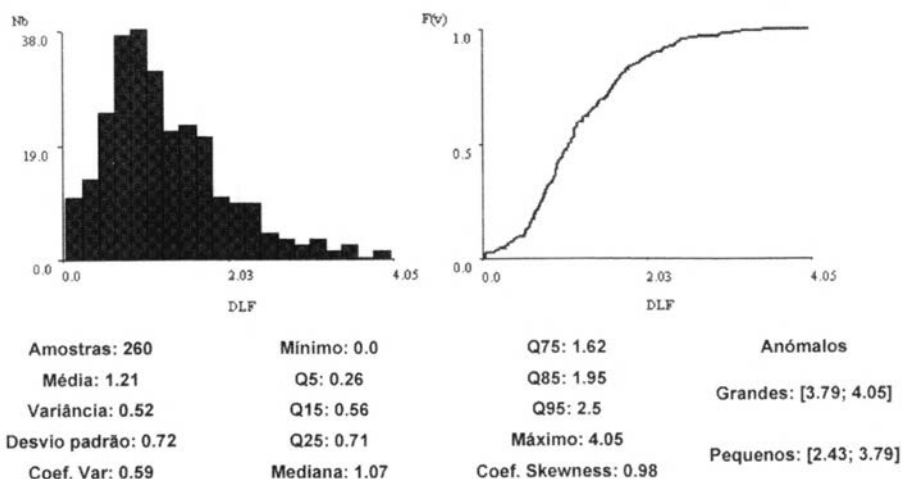


Fig. 3 – Estatísticos básicos da *dlf*.

Foram calculados os variogramas experimentais para as direcções N45°W, N45°E e omnidireccional (regularização de 180°). Uma vez que os variogramas nas direcções N45°W e N45°E não evidenciaram anisotropia e possuem valores semelhantes ao variograma omnidireccional, optou-se por ajustar apenas o variograma omnidireccional. Este variograma foi ajustado com a soma de dois modelos esféricos com amplitudes de 20 e 300 m (fig. 4).

$$\text{Modelo} = \text{Sph} (C_1 = 0.298; a_1 = 20\text{m}) + \text{Sph} (C_2 = 0.218; a_2 = 300\text{m})$$

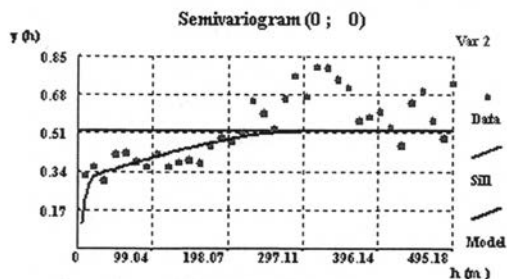


Fig. 4 – Variograma experimental e modelo teórico ajustado.

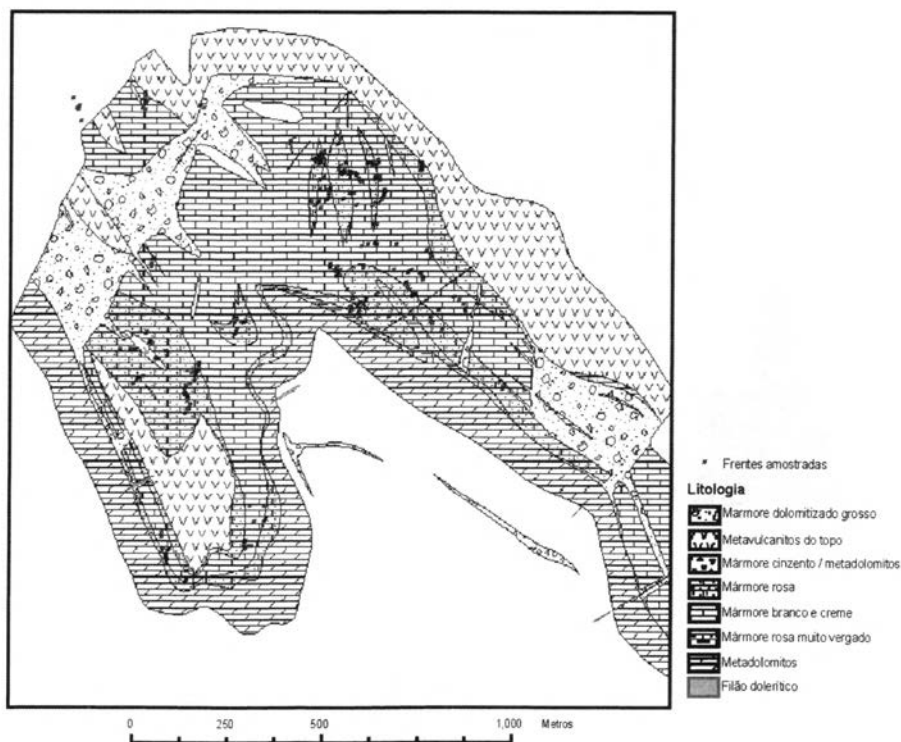


Fig. 5 – Carta litológica da unidade de Borba (fonte: IGM, 2003).

Simularam-se 250 imagens da *dlf* para a região em estudo nas litologias de mármore (figura 5), numa malha regular de 10×10 m num total de 10367 pontos.

Na figura 6 ilustram-se a título exemplificativo duas imagens simuladas para esta UNOR e os respectivos estatísticos básicos. É de realçar que cada imagem simulada da *dlf* é condicional aos locais amostrados e reproduz os estatísticos básicos e os variogramas.

Com as 250 imagens das *dlf* simuladas, podemos dizer que conhecemos localmente a função de distribuição cumulativa desta variável, formada pelos 250 valores simulados em cada ponto. Os dois primeiros momentos destas distribuições locais representam, a posição central da distribuição ou seja a média (valor que é aproximadamente igual ao que seria obtido por krigagem), e a variância (dispersão em torno da média), que é um bom indicador da incerteza local e reflecte a densidade da amostragem, o variograma ajustado e a variabilidade local. Nas figuras 7 e 8 encontram-se representados, respectivamente o mapa dos valores médios e o mapa das variâncias locais.

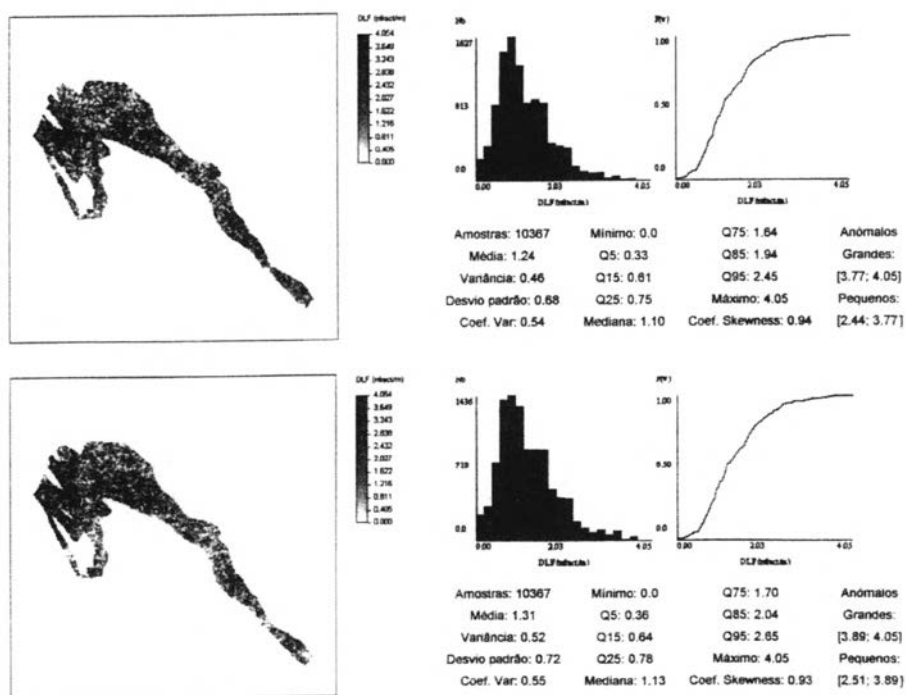


Fig. 6 – Exemplo de duas imagens simuladas da *dlf* e respectivos estatísticos básicos.

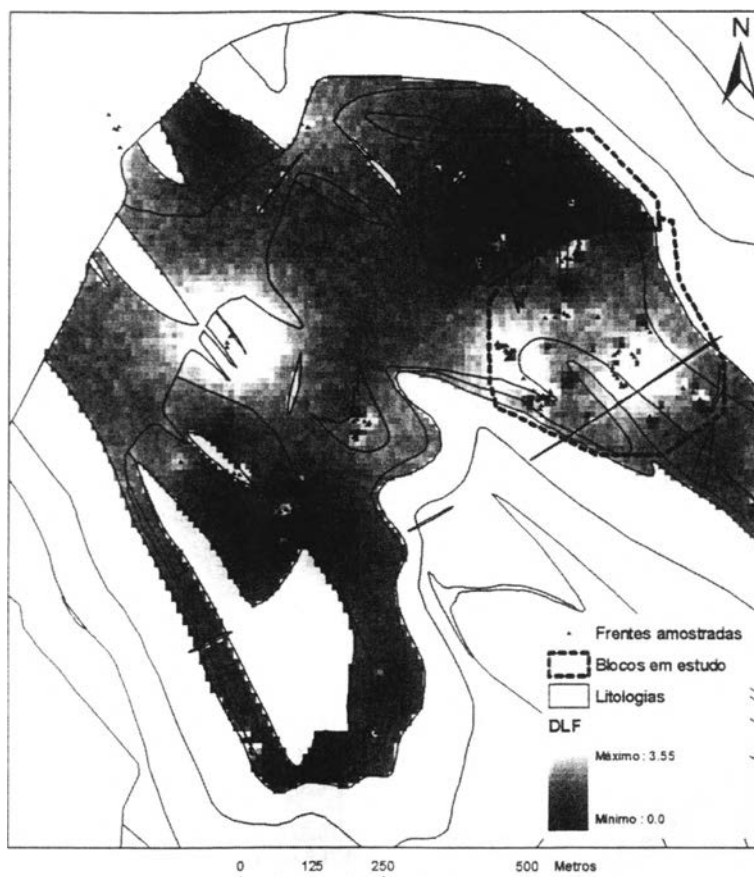


Fig. 7 – Mapa dos valores médios locais das *dlf* simuladas.

318

Com base nos resultados expressos nestes dois mapas, foram delimitados dois blocos tipo (identificados a tracejado) no flanco noroeste do anticlinal, onde se concentram várias explorações (esta escolha deve-se ao facto de nestes dois blocos existem amostras suficientes que garantem uma boa caracterização destes locais). O bloco localizado mais a norte evidencia uma baixa *dlf* em praticamente todas as frentes e uma boa homogeneidade espacial da *dlf* (ver figura 7), facto que é confirmado pela baixa incerteza dos valores simulados (as variâncias locais dos valores simulados nesta zona são sempre muito baixas, fig. 8). No bloco localizado mais a sul coexistem frentes muito próximas com baixas e elevadas *dlf* (fig. 7), o que torna esta zona de elevada incerteza. Este facto é também evidenciado pelo mapa de variâncias uma vez que a influência dos valores medidos na frente é espacialmente baixa (ver figura 8).

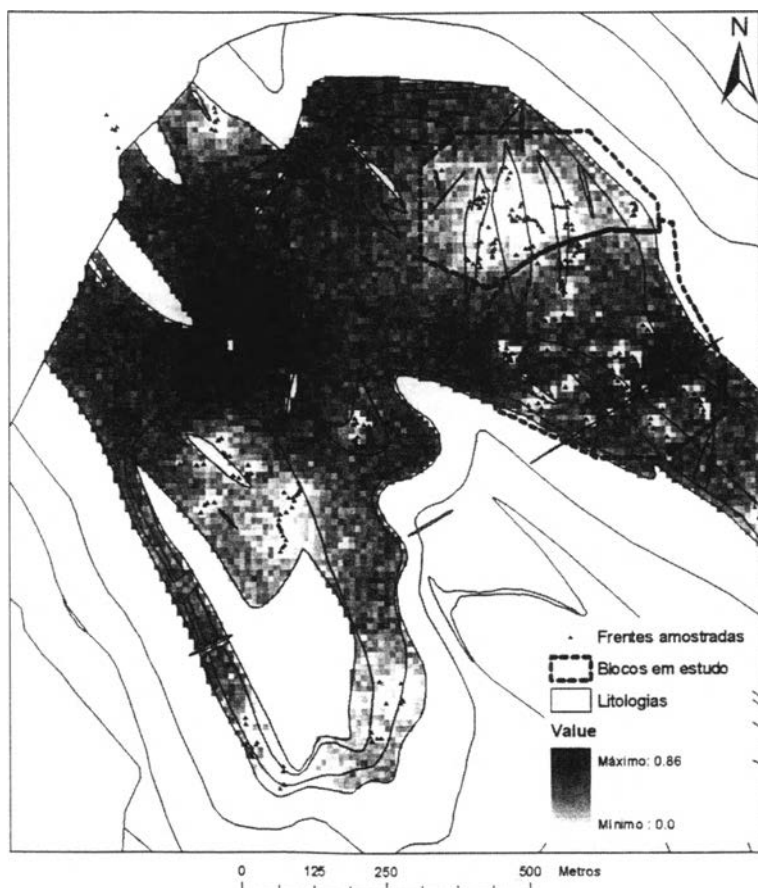


Fig. 8 – Mapa da variância local das *dlf* simuladas.

4. CONCLUSÕES

Este exemplo permite demonstrar a capacidade das técnicas de simulação estocástica na caracterização regional de maciços rochosos e no estabelecimento de zonamentos em função de parâmetros indicadores da qualidade, avaliados nas frentes.

As imagens simuladas podem assim constituir uma ferramenta essencial no planeamento estratégico de um maciço rochoso possuidor das características essenciais à implantação de explorações de rocha ornamental, uma vez que permitem antever com uma determinada resolução espacial a qualidade das matérias primas a explorar. O conhecimento local de uma variável como a *dlf* e a consequente

possibilidade de construir curvas de parametrização de reservas em cada um dos locais é de enorme importância para os industriais da região, uma vez que podem antecipadamente obter indicações sobre o risco que constitui a abertura de uma nova exploração, ou sobre o avanço de novas frentes.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALBUQUERQUE, M. T. D. (1998) – Metodologias geoestatísticas para a caracterização e avaliação de rochas ornamentais, *Tese doutoramento*, IST/UTL, Lisboa, 167 p.
- ALMEIDA, J. & SOARES, A. (1992) – Modelos geométricos para caracterização de recursos minerais, *Número especial 3, Geo-Novas*: 188-196.
- ALMEIDA, J., SOARES, A. & REYNAUD, R. (1993) – Modelling the shape of several marble types in a quarry, *Proceedings XXIV International Symposium APCOM*, Montreal, vol. 3: 452-459.
- GROSSMANN, N. (1972) – Contribuição para o estudo da compartimentação dos maciços rochosos, *Tese concurso especialista LNEC*, Lisboa, 251 p.
- GROSSMANN, N. (1988) – Estudo das descontinuidades e sua influência no comportamento das rochas e maciços rochosos. As descontinuidades nos maciços rochosos. Características geométricas e influência na deformabilidade dos maciços, *LNEC*, Lisboa, 118 p.
- LÓPEZ-JIMENO, C. (1995) – Manual de Rocas Ornamentales, Entorno Gráfico, SL, Madrid, 696 p.
- LOTZE, F. (1945) – Zur Gliederung der Vartszidender Iberischen Meseta. *Geoteknische Forchunge*, Fasc. 6: 78-92 Berlin (Versão Espanhola in Publ. Estr. sobre Geol. Espanha, Tomo V, 43-58, Madrid 1950).
- LUÍS, A. G. (1995) – Caracterização, avaliação e simulação da blocometria de um jazigo de mármore, *Tese mestrado*, IST/UTL, 75 p.
- LUÍS, A. G. & SOUSA, A. J. (1998) – Simulação geoestatística de redes de fracturas. Aplicação à avaliação da blocometria de um jazigo de mármore, *Comunicações Instituto Geológico Mineiro*, tomo 85: 117-136.
- MATHERON, G. (1965) – Les variables regionalisées et leur estimation, *PhD thesis*, Ed Masson et Cie., Paris, 305 p.
- MUGE, F., SOUSA, A., BRITO, M. G., PINA, P. & ALMEIDA, J. (1993) – Characterization of ornamental rock deposits quality, *Proceedings Third Codata Conference Geomathematics and Geostatistics*, Part II, ITC, Holanda.
- OLIVEIRA, J. T., OLIVEIRA, V. M. & PIÇARRA, J. M. (1991) – Traços gerais da evolução tectono-estratigráfica da Zona de Ossa Morena em Portugal. *Cuadernos Lab. Xeológico de Laxe*, Coruña, vol 16: 221-250.
- PEREIRA, H. G., BRITO, M. G., ALBUQUERQUE, M. T. D. & RIBEIRO, J. (1993) – Geostatistical estimation of a summary recover index for marble quarries, A. Soares Ed, *Geostatistics Tróia '92*, Kluwer Academic Publishers, vol 2: 1029-1040.
- REYNAUD, R. & VINTÉM, C. (1992) – Estudo da jazida de calcários cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa (Sectoros de Lagoa-Vigária e Borba), IGM, Lisboa, 42 p.
- RIBEIRO, J. (1994) – Planeamento da exploração de pedreiras de mármore com base em um índice de recuperação, *Tese mestrado*, IST/UTL, 121 p.
- RIBEIRO, J. (1999) – Formulação de índices quantitativos com base na discriminação baricêntrica, *Tese doutoramento*, IST/UTL, 322 p.

- SILVA, C. G. (1989) – Mármore de Estremoz-Borba-Vila Viçosa. Caracterização mineralo-petrográfica, geoquímica e geomecânica. Contribuição para o conhecimento da sua alterabilidade, fracturação e blocometria, *Tese doutoramento*, IST/UTL, 158 p.
- SOARES, A (2001) – Direct Sequential Simulation and Cosimulation, *Mathematical Geology*, Vol. 33(8): 911-926.
- SOUSA, A., MUGE, F., ALMEIDA, J., PINA, P. & REYNAULD, R. (1992) – Advanced computerized techniques applied to ornamental rocks, *The Mining Outlook*, vol. 1, R. Manãna Ed., *XV World Mining Congress*, Madrid-Espanha: 685-693.