

# **Sistema Integrado de Planeamento de Explorações de Rochas Ornamentais**

**J. M. Escudeiro de Aguiar<sup>1,2,a</sup>, A. J. Sousa<sup>2,b</sup>, M. Faria<sup>2</sup>, J. Ribeiro<sup>2,3,c</sup>, J. Saraiva<sup>2</sup>, A. G. Luís<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Escola Superior de Tecnologia e de Gestão  
Instituto Politécnico de Bragança  
Campus de S<sup>ª</sup> Apolónia  
5301-857 Bragança, Portugal  
[mescudeiro@ipb.pt](mailto:mescudeiro@ipb.pt)

<sup>2</sup>Centro de Geo-Sistemas  
Departamento de Minas e Georrecursos  
Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais  
1049-001 Lisboa, Portugal  
[ajsousa@alfa.ist.utl.pt](mailto:ajsousa@alfa.ist.utl.pt)

<sup>3</sup>Faculdade de Arquitectura da UTL  
Rua Prof. Cid dos Santos  
(Pólo Universitário do Alto da Ajuda)  
1349-055 Lisboa  
[jribeiro@fa.utl.pt](mailto:jribeiro@fa.utl.pt)

<sup>4</sup>Instituto Geológico e Mineiro  
Estrada da Portela  
Zambujal  
2720 Alfragide

---

## **Resumo**

As rochas ornamentais constituem actualmente um dos mais importantes recursos geológicos do país, pelo que é fundamental avaliar e caracterizar as jazidas existentes e promover a sua valorização através do aproveitamento integral e racional das matérias-primas existentes.

O trabalho apresentado é o resultado de actividades de investigação levadas a cabo no Centro de Geo-Sistemas (CVRM) do Instituto Superior Técnico nos últimos anos e descreve de forma sucinta um sistema informático, ainda em desenvolvimento (Sistema SIPERO), concebido para servir de ferramenta de apoio ao planeamento de explorações de rochas ornamentais (Aguiar, 2003).

O Sistema SIPERO é um conjunto de seis programas informáticos desenvolvidos em ambiente *Windows* que permitem fazer a compilação e a análise da informação levantada nas frentes das pedreiras, com interesse para a modelação das redes de fracturação e para a definição de índices de qualidade e de recuperação de maciços rochosos com interesse ornamental.

Finalmente apresenta-se um exemplo de aplicação do Sistema ao estudo de uma pedreira de mármore localizada no anticlinal de Estremoz<sup>1</sup>, actualmente em exploração que permitirá a curto prazo validar a aplicabilidade das metodologias de simulação implementadas.

### **Palavras-Chave:**

Blocometria  
Geoestatística  
Rede de fracturação  
Simulação.

---

<sup>1</sup> Alentejo, Portugal.

## 1. INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais constituem um importante recurso mineral em Portugal, cuja exploração carece de ferramentas de planeamento adequadas. Atendendo a que o sector de exploração e transformação de rochas ornamentais se encontra actualmente muito dependente da procura de um mercado consumidor, extremamente exigente, volátil e diversificado, torna-se fundamental avaliar e caracterizar correctamente as jazidas existentes e promover a sua valorização, através do seu aproveitamento integral e racional.

O conhecimento correcto da rede de fracturação de um maciço é uma base essencial no desenvolvimento de ferramentas de planeamento que permitam conjugar a maximização do aproveitamento dos recursos com a minimização do impacto ambiental provocado pelos desperdícios resultantes da própria extracção.

O trabalho que a seguir se apresenta descreve um Sistema Informático de apoio ao planeamento de explorações de Rochas Ornamentais (Sistema SIPERO), resultante de trabalhos de investigação levados a cabo no Centro de Geo-Sistemas (CVRM) do Instituto Superior Técnico nos últimos anos e que assenta na modelação e na simulação das redes de fracturação, a partir de atributos geométrico-espaciais das fracturas observadas nas frentes de trabalho de explorações em actividade.

O Sistema tira proveito das potencialidades gráficas oferecidas pelo ambiente *Windows*, proporcionando a qualquer utilizador uma rápida integração. Dividido em seis módulos com funções distintas, consoante o tipo de estudo/trabalho a realizar, o sistema revela-se autónomo em relação a outros *softwares* comerciais existentes no mercado.

## 2. O SISTEMA SIPERO

### 2.1. Metodologias Implementadas

As metodologias implementadas no Sistema procuram fazer a ponte entre as metodologias geológicas descritivas e os métodos analíticos da engenharia, baseados na mecânica das rochas e apoiados nas medidas das características das discontinuidades dos maciços rochosos e no seu processamento matemático.

Da observação de um maciço rochoso, por mais superficial que ela seja, constata-se imediatamente que a sua homogeneidade é interrompida por diversos tipos de discontinuidades, o que se traduz em variações mais ou menos bruscas das suas propriedades. As heterogeneidades e a anisotropia das propriedades geomecânicas das rochas assumem uma importância considerável, quer na percentagem de recuperação, quer no rendimento da extracção e transformação. Do exposto, torna-se indispensável proceder à caracterização das discontinuidades observadas (atitudes, espaçamentos, persistência, etc.) uma vez que elas podem condicionar a orientação a dar às frentes de avanço, tendo em vista a optimização do processo de desmonte.

De uma forma geral pode dizer-se que a fracturação que afecta os maciços rochosos reflecte a história geológica das formações em que estes se inserem, desde a sua origem à forma como os materiais que as compõem reagiram às tensões que actuaram na crosta terrestre ao longo do tempo.

Directamente ligado à caracterização dos sistemas de fracturação, surge o conceito de blocometria. A blocometria, conceito implementado no Sistema SIPERO, reflecte a geometria e o volume dos blocos *in situ*, e tem por base a modelação dos sistemas de fracturação dos maciços podendo, dessa forma, fornecer uma primeira previsão da qualidade dos blocos uma vez que os blocos irregulares são penalizados comercialmente por incorporarem volumes não aproveitáveis.

A metodologia adoptada para a simulação das redes de fracturação e cálculo da blocometria foi a desenvolvida por Luís (1995) e tem por base uma abordagem geoestatística que assenta na caracterização dos principais parâmetros espaciais e geométricos das fracturas levantadas nas frentes das explorações, nomeadamente, no comportamento da densidade linear de fracturação (DLF). Os restantes algoritmos que se encontram implementados no Sistema assentam, em grande parte, na compilação de metodologias desenvolvidas durante a última década por estudiosos da indústria das rochas ornamentais, dos quais se destacam os trabalhos de Albuquerque (1993), Ribeiro (1994) e Saraiva (1999).

## 2.2. Estrutura do Sistema

O Sistema apresenta-se dividido em seis módulos com funções específicas, que comunicam entre si através de ficheiros com um formato próprio. Durante o seu desenvolvimento existiu sempre o cuidado de manter a sua autonomia em relação a outros *softwares* comerciais tendo, para tal, sido incluídas algumas adaptações de algoritmos de cálculo presentes no Sistema Resmin (Sousa *et al*, 1990), disponibilizados pelo CVRM.

A estrutura do Sistema SIPERO é a representada na Fig. 1, na qual, além das funções principais e das relações existentes entre os diferentes módulos, se incluem os ícones que os identificam.

- SiperoCAD** - Compilação da informação levantada no terreno
- SiperoSTAT** - Análise e processamento da informação
- SiperoINDICE** - Definição de Índices de Recuperação e de Qualidade
- SiperoSIREF** - Simulação da Rede de Fracturação
- SiperoBLOC** - Cálculo da Blocometria associada à fracturação simulada
- SiperoVIPLAN** - Visualização da informação processada. Auxiliar do planeamento das explorações

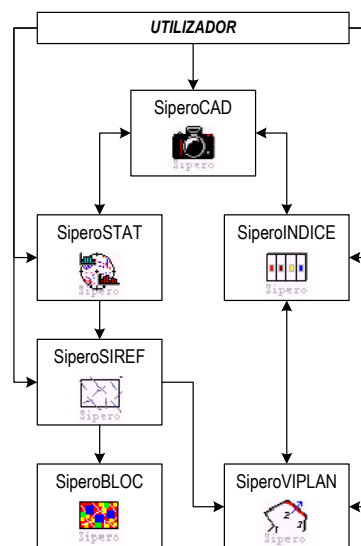


Fig. 1 - Estrutura do Sistema Sipero. Funcionalidades e relações entre os diferentes módulos.

Todos os módulos, à excepção do SiperoBLOC, contêm variáveis manipuláveis que interferem com os resultados finais. Este facto atribui à experiência do utilizador na actividade extractiva uma importância crucial em todas as etapas, desde a compilação e análise da informação até à estimação/modelação. Veja-se, em seguida, uma descrição ilustrada das principais funcionalidades implementadas em cada módulo.

## 2.2.1. SiperCAD

Este módulo constitui a base de todo o Sistema pois é nele que é feita a compilação da informação levantada no terreno. Permite visualizar e referenciar as fotografias tiradas às frentes das pedreiras e, sobre elas, definir os limites das frentes e os traços das descontinuidades visíveis. Outras características específicas das descontinuidades tais como a direcção, a inclinação, a intersecção com outras descontinuidades ou com veios podem igualmente ser registadas. A Fig. 2 ilustra as principais funções do módulo.

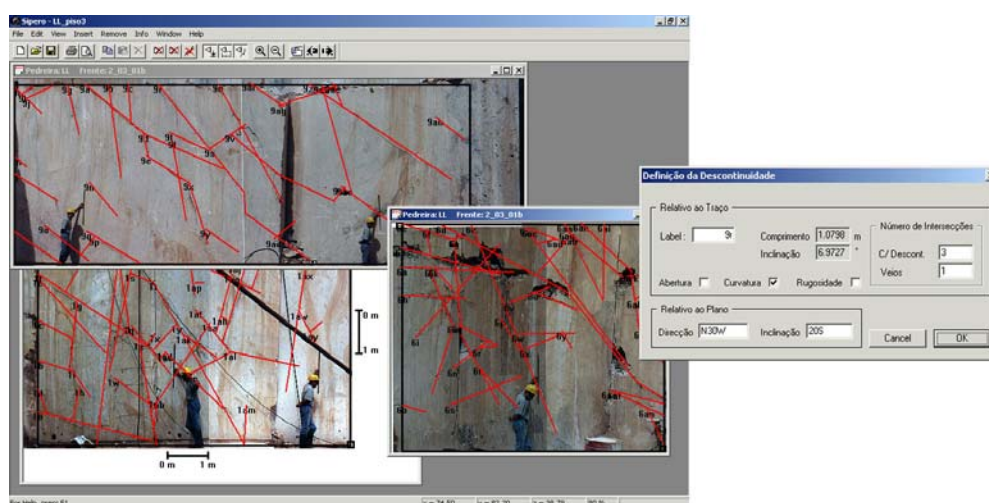


Fig. 2 – SiperCAD: Compilação e georreferenciação da informação levantada no terreno sobre as fotografias das frentes.

## 2.2.2. SiperSTAT

A caracterização estatística e geoestatística da fracturação levantada no terreno é feita no SiperSTAT, sendo a etapa essencial, que suporta as etapas seguintes, a classificação das fracturas em famílias, que é realizada sobre o diagrama estereográfico de *Schmidt*, a partir de critérios de semelhança definidos pelo utilizador (Fig. 3). Outras descontinuidades medidas no campo mas que, por qualquer motivo não foram identificadas nas fotografias na fase de compilação da informação realizada no SiperCAD, podem igualmente ser introduzidas. O módulo calcula alguns elementos estatísticos simples de cada família e, para todos os atributos medidos (direcção, inclinação e comprimento das descontinuidades), constrói os respectivos histogramas.

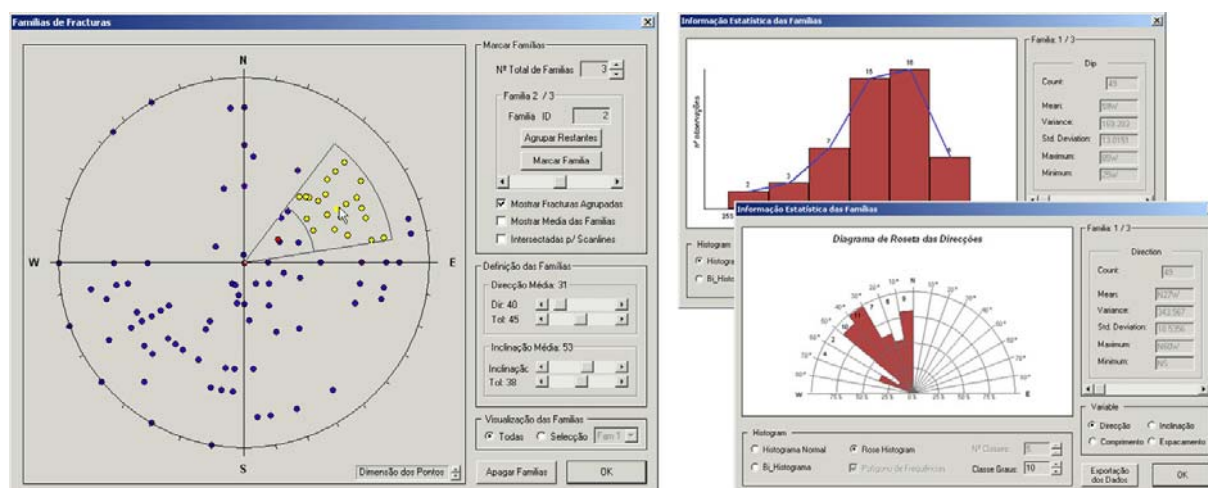


Fig. 3 - SiperSTAT: Classificação das descontinuidades em famílias sobre o diagrama de Schmidt (hemisfério inferior). Construção dos histogramas dos atributos.

A estimação dos espaçamentos e da DLF associados a cada família é feita através da análise da informação recolhida, recorrendo a linhas de amostragem (*scanlines*) desenhadas sobre as fotografias das frentes (Fig. 4). A estrutura espacial e a estimação das densidades lineares de fracturação são definidas através do formalismo geoestatístico (variografia e krigagem) - Fig. 5.

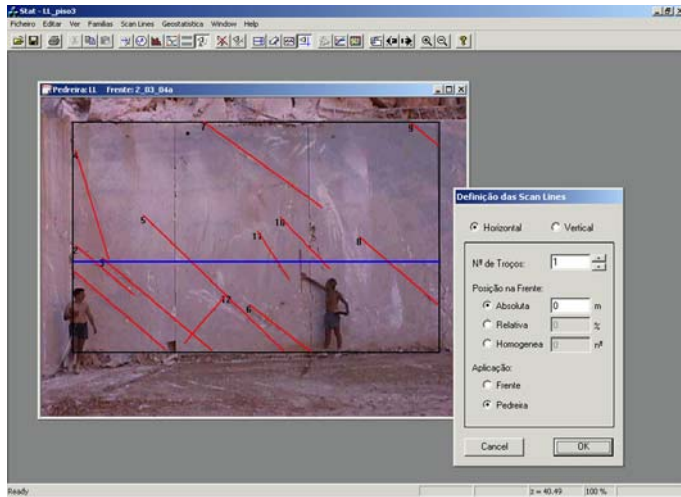


Fig. 4 - SiproSTAT: Técnica da scanline. Estimação dos espaçamentos e da DLF.

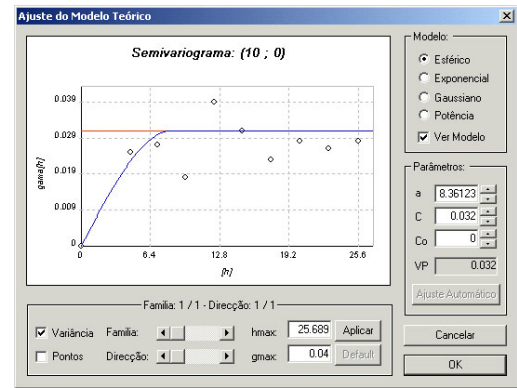


Fig. 5 – SiproSTAT: Análise espacial e modelação da DLF.

Porque as simulações têm como meta reproduzir, tanto quanto possível, o detalhe e a complexidade da realidade em estudo, são ainda determinadas as intersecções entre os traços das fracturas em todas as frentes levantadas, no sentido de estimar as probabilidades de passagem associadas.

Concluída a análise e a caracterização das discontinuidades, os histogramas e os estatísticos básicos, juntamente com os critérios de passagem e os parâmetros geoestatísticos, característicos de cada família, que se destinam a alimentar o módulo de simulação da rede de fracturação (SiproSIREF), são exportados na forma de ficheiros independentes.

### 2.2.3. SiproINDICE

Este módulo tem como meta a obtenção de Índices de Recuperação e/ou Qualidade para a área em estudo, a partir da caracterização das discontinuidades presentes nas frentes de trabalho levantadas. Para tal parte-se da definição e da caracterização de janelas de amostragem em cada frente, segundo critérios definidos pelo utilizador tendo por base a sua experiência e bom senso (Fig. 6). A aplicação da Análise Factorial das Correspondências permite sintetizar quantitativamente num único índice, as características presentes em cada suporte (Fig. 7).

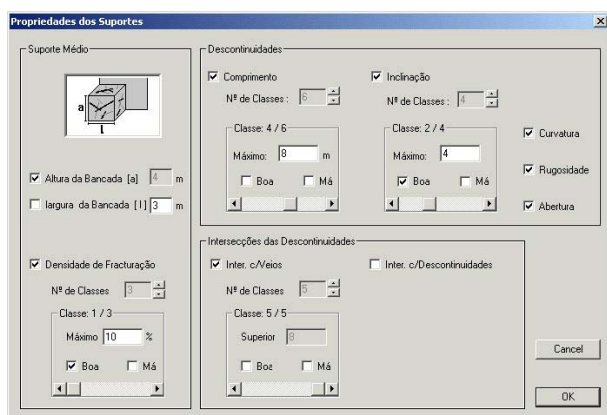


Fig. 6 – SiproINDICE: Definição das janelas de amostragem.

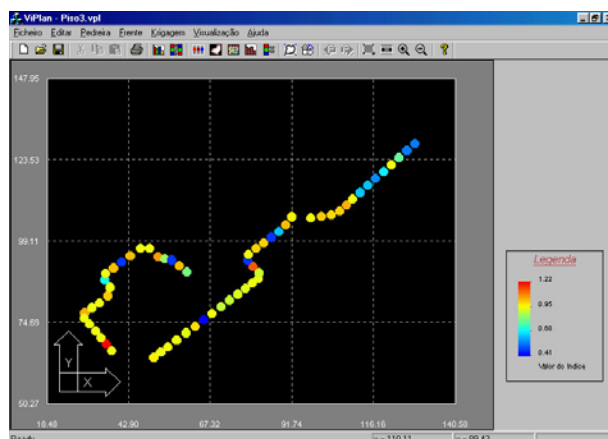


Fig. 7 – Visualização da distribuição espacial do Índice no SiproVIPLAN.

Após a modelação da continuidade espacial desse índice, o seu valor é estimado por krigagem ordinária nas zonas não exploradas da pedra, por recurso ao formalismo geoestatístico. Esta última etapa é apoiada pelo módulo SiproVIPLAN, que se descreve adiante, e que permite criar os ficheiros de controlo para a estimação, além de possibilitar a visualização dos mapas com os valores estimados utilizados na identificação das áreas potencialmente mais favoráveis do ponto de vista da recuperação/qualidade.

#### 2.2.4. SiproSIREF

O SiproSIREF constitui o módulo de modelação da rede de fracturação tendo por base a informação disponibilizada pelos trabalhos de campo, depois de analisada e processada pelo SiproSTAT. Como em qualquer simulação, o primeiro passo a ultrapassar consiste na definição dos valores dos seus parâmetros. Dessa forma, começam por definir-se as dimensões do volume a simular, o tipo de malha de geração das linhas de suporte das DLF's e a sua orientação em relação à atitude média das famílias juntamente com o valor da espessura do volume de discretização.

Depois de definidos os parâmetros, o processo de simulação desenvolve-se automaticamente. Começa por fazer-se a simulação geoestatística das DLF's com base nos histogramas, nos modelos de continuidade ajustados e nas medidas feitas sobre as *scanlines* através do Método das Bandas Rotativas (Sousa, 1983). As fracturas pertencentes a cada família são então geradas com respeito aos histogramas, através do Método de Monte Carlo. O volume simulado é posteriormente dividido em planos de espessura igual à espessura de discretização e são determinadas as intersecções com os planos das fracturas.

No final do processo aplicam-se as probabilidades de passagem, estimadas no SiproSTAT, aos traços das fracturas presentes nos diferentes planos. Na Fig. 8 pode observar-se o aspecto dos traços das fracturas simuladas num dos planos.

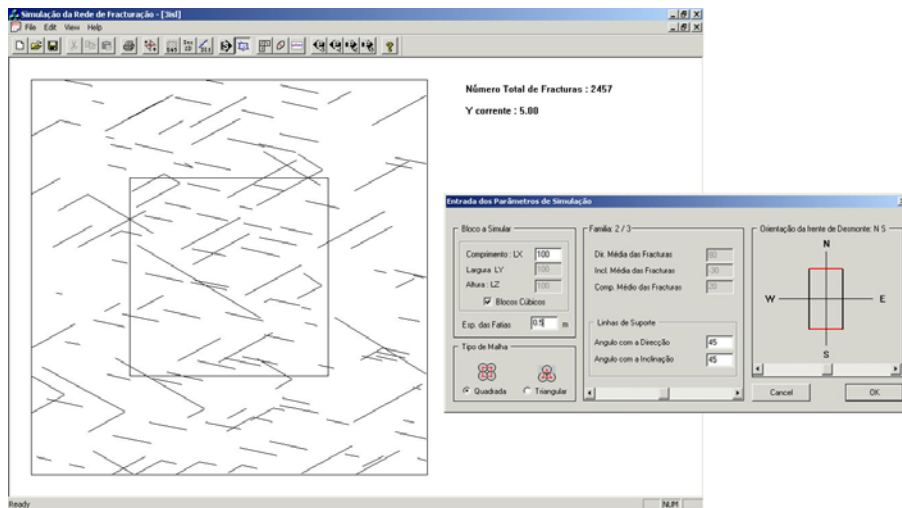


Fig. 8 - SiproSIREF: Definição dos parâmetros da simulação e visualização da fracturação simulada.

Refira-se que o módulo de simulação desenvolvido se apresenta suficientemente flexível para processar informação de outra proveniência, desde que ela se encontre registada com a forma e a estrutura dos três ficheiros criados no SiproSTAT. Os resultados da simulação da rede de fracturação são exportados num único ficheiro, com toda a informação necessária para poderem ser utilizados pelos módulos SiproBLOC e SiproVIPLAN no cálculo da Blocometria.

## 2.2.5. SiproBLOC

O módulo SiproBLOC destina-se ao cálculo da blocometria associada à fracturação simulada. O módulo recebe os resultados da simulação da rede de fracturação obtidos no SiproSIREF e procede à sua “rasterização” através da sobreposição de uma malha cúbica sobre os planos de discretização, dividindo-os em volumes unitários, ficando desde logo identificados os volumes não aproveitáveis, correspondentes aos blocos interceptados pelas fracturas.

O algoritmo de aglomeração tridimensional dos blocos não interceptados tem por base a análise conjunta de todos os planos de discretização, sendo a aglomeração efectuada no sentido da obtenção do maior volume que é possível aglomerar em cada plano, para o volume unitário. O processo de aglomeração dá origem a volumes cúbicos de diferentes dimensões, múltiplas da dimensão do volume unitário (Fig. 9).

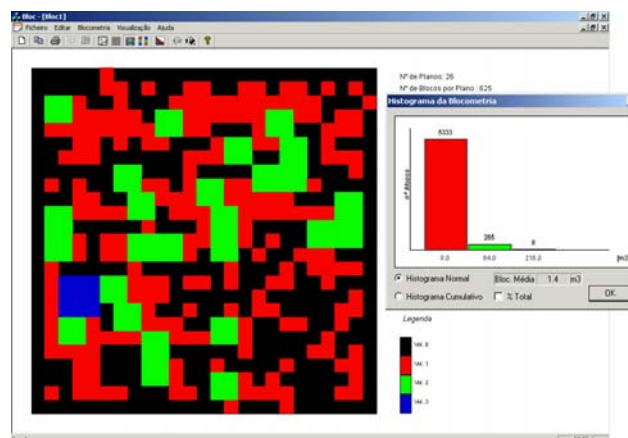


Fig. 9 - SiproBLOC: Visualização da blocometria nos planos de discretização e dos histogramas blocométricos.

Depois de efectuada a aglomeração é contabilizado o número de blocos pertencentes a cada classe blocométrica e calculados os histogramas blocométricos juntamente com a blocometria média expectável. Com base nos histogramas pode estimar-se a recuperação esperada com base num qualquer valor de corte, definido em relação à dimensão dos blocos não interceptados pela fracturação. Como complemento, a visualização da distribuição espacial das classes blocométricas ao longo dos diferentes planos de discretização fornece uma classificação qualitativa e quantitativa das áreas de exploração.

## 2.2.6. SiperoVIPLAN

Este último módulo destina-se essencialmente a servir de auxiliar ao planeamento do desmonte. A planta da pedra que contém os limites da exploração e os pisos é inicialmente introduzida no Sistema. Os limites dos pisos correspondentes ao conjunto de todas as frentes de avanço podem ser importados directamente a partir do SiperCAD, enquanto que os limites da exploração podem ser introduzidos manualmente pelo utilizador ou lidos a partir de ficheiro.

A função principal do SiperoVIPLAN como auxiliar do planeamento reside no cálculo da blocometria expectável para um determinado avanço de uma frente. O volume com a rede de fracturação simulada que constitui o *output* do SiperoSIREF é posicionado na área de estudo. Seguidamente é seleccionada a frente em que se pretende efectuar o avanço, juntamente com o seu sentido e dimensão. Uma vez definido o avanço é calculada a blocometria de forma idêntica ao realizado pelo SiperobLOC (Fig. 10).

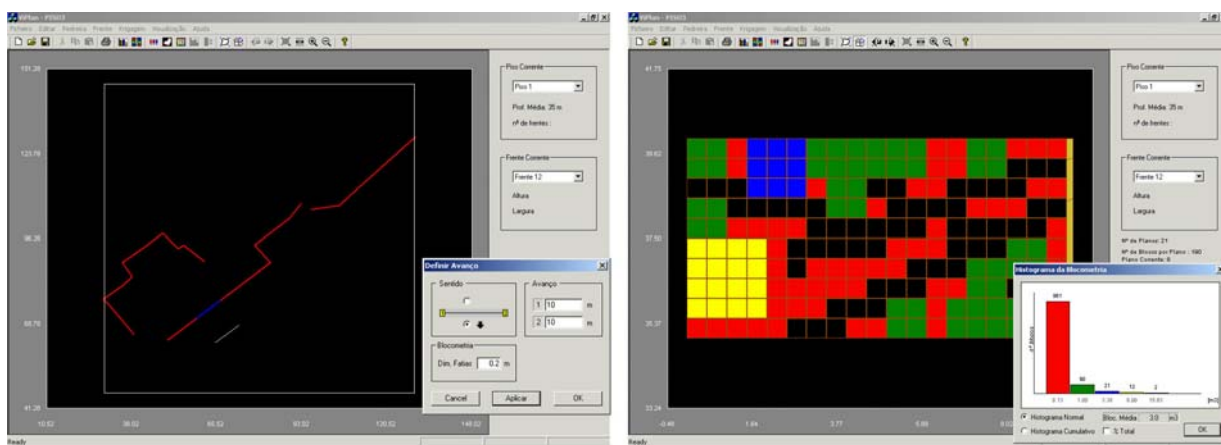


Fig. 10 – SiperoVIPLAN: Estimação da blocometria para um dado avanço de uma frente.

Como complemento, e como foi anteriormente referido, o módulo serve de apoio ao SiperoINDICE no cálculo e na visualização dos valores do índice de qualidade, estimados por krigagem ordinária, para um determinado piso. A escala de representação do mapa de valores estimados pode ser alterada de acordo com a preferência do utilizador, podendo inclusive, optar-se por escalas discretas constituídas por três ou quatro fases (Fig. 11).



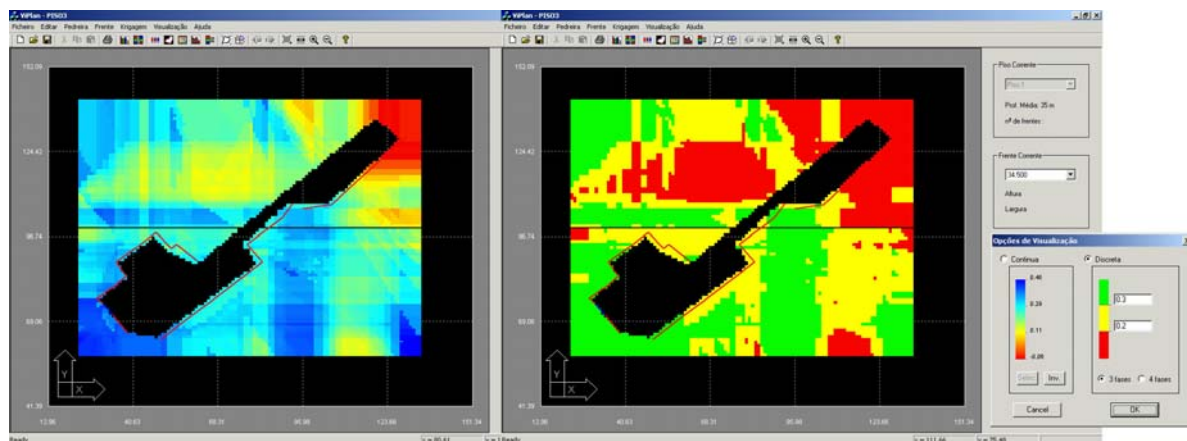


Fig. 11 - SiperovIPLAN: Visualização de mapas de valores estimados (escala de representação contínua e discreta).

### 3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A pedra escolhida para ilustrar a aplicação prática do Sistema Informático à simulação da fracturação localiza-se na faixa de mármore compreendida entre Estremoz, Borba e Vila Viçosa, designada genericamente por anticlinal de Estremoz, que constitui a mais importante jazida portuguesa de rochas ornamentais. A exploração é constituída por vários níveis, ou pisos, dos quais apenas dois (os inferiores) se encontravam, à altura do estudo, a ser explorados e, como tal, acessíveis para o levantamento da informação necessária à modelação da rede de fracturação e ao cálculo da blocometria a ela associada. Os níveis referidos foram designados de piso inferior e piso superior, correspondendo ao primeiro o nível de cota mais baixa.

O trabalho de campo iniciou-se com a realização do esboço das plantas dos pisos e a sua divisão em frentes de avanço. Assim, o piso superior foi dividido em 17 frentes de avanço de extensão variável, e o piso Inferior em 13 frentes, também de extensão variável, conforme se pode observar através da planta representada na Fig. 12.

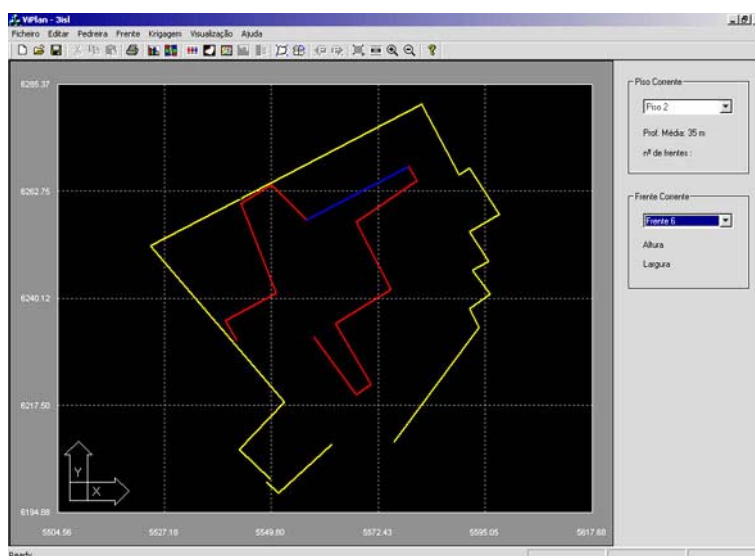


Fig. 12 – Visualização da planta da exploração.

Depois de feita a compilação da informação pelo SiperCAD, a modelação da fracturação avançou dentro do ambiente do SiperSTAT com o agrupamento das fracturas em famílias e, para cada uma, com o cálculo dos histogramas das atitudes e comprimentos dos traços das descontinuidades, o cálculo dos espaçamentos, a estimação das DLF's e o estudo da sua continuidade espacial. A análise da informação ficou concluída com a estimação das probabilidades de passagem entre fracturas.

Provavelmente, devido à escassez do número de fracturas com atitudes medidas, a projecção dos pólos das fracturas sobre o Diagrama de *Schmidt* não permitiu identificar claramente nenhuma família, razão pela qual se considerou apenas uma família (Fig. 13).

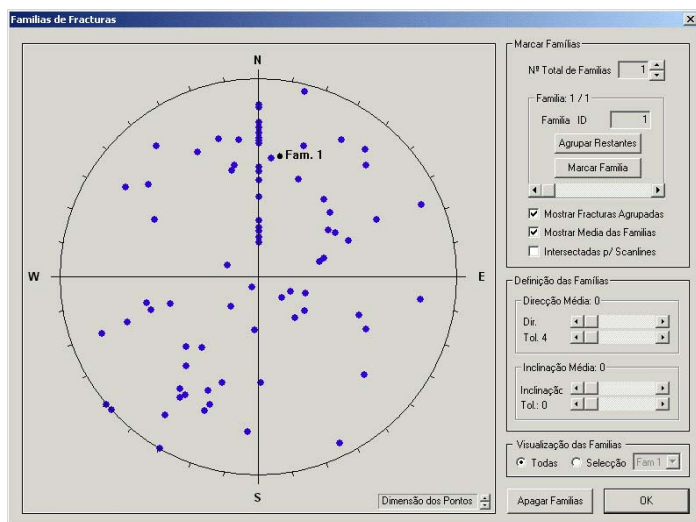


Fig. 13 – Classificação das descontinuidades em famílias.

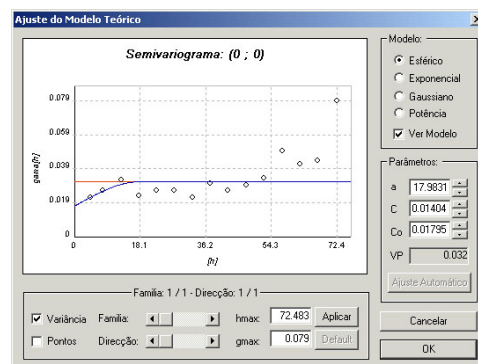


Fig. 14 – Estudo da continuidade espacial da DLF.

O cálculo dos espaçamentos e a estimação das DLF's foi conseguido com recurso a linhas de amostragem desenhadas sobre as frentes. Tendo em conta o levantamento existente, optou-se pela traçagem de *scanlines* horizontais divididas em troços de comprimento próximo dos 5 m, definidas a cerca de metade da altura das frentes. A projecção isolada dos pólos das fracturas intersectadas pelas *scanlines* sobre o diagrama de *Schmidt* permitiu verificar que cerca de metade das fracturas levantadas foram cobertas pela amostragem.

O variograma omnidireccional para a DLF, calculado para uma distância entre classes próxima da dimensão dos troços das *scanlines* considerados (5m), apresenta um comportamento estruturado, modelado por um modelo esférico de amplitude próxima dos 18m e com um efeito de pepita de 0.01795 (Fig. 14).

Processada toda a informação necessária à realização da simulação da fracturação efectuou-se um número relativamente elevado de simulações através do SiperSIREF, das quais se apresenta apenas uma. Todas elas foram o resultado da simulação de um volume de 50x50x50 m<sup>3</sup>, tendo como única diferença de parâmetros a espessura dos planos de discretização (Fig. 15).

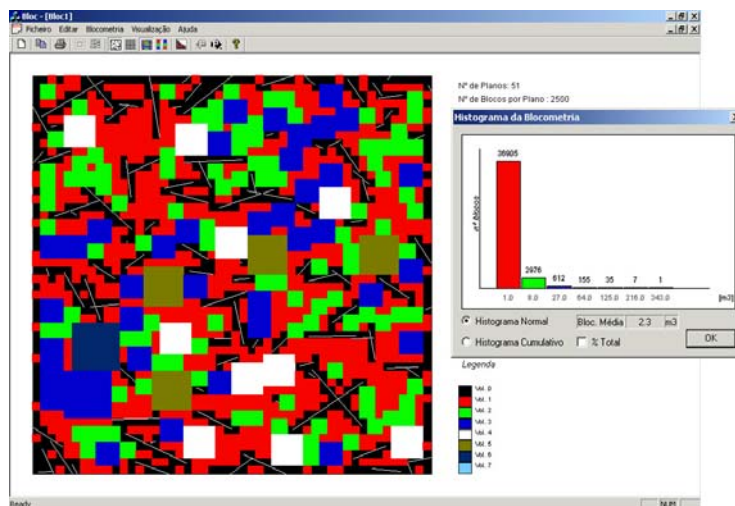


Fig. 15 – Visualização da blocometria correspondente à fracturação simulada.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Sistema em desenvolvimento fornece, à semelhança de outros *softwares* existentes, um valor estimado para a blocometria média da fracturação simulada. Além deste resultado, acrescenta o cálculo dos histogramas blocométricos e a visualização da distribuição espacial das respectivas classes, fornecendo simultaneamente uma classificação qualitativa e quantitativa das áreas de exploração e a avaliação da incerteza associada, resultados exclusivos do SIPERO.

A flexibilidade do Módulo de Simulação permite-lhe processar informação proveniente de outra origem que não as frentes das explorações, desde que ela se encontre registada na forma de ficheiros com a mesma estrutura daqueles criados pelo módulo de análise e processamento da informação - Siperostat

O facto de, no estado actual de desenvolvimento do Sistema, as simulações não reproduzirem as posições conhecidas das fracturas levantadas no terreno faz com que os resultados da blocometria só devam ser usados com objectivos de planeamento a médio e a longo prazo das explorações

Desenvolvimentos futuros passarão, antes de mais, pela reprodução espacial da fracturação levantada no terreno. Seguir-se-ão o aperfeiçoamento do algoritmo de aglomeração dos blocos unitários de forma a permitir a definição de blocos paralelepípedicos com dimensões e formas mais próximas dos blocos realmente extraídos nas pedreiras e a possibilidade de análise conjunta da informação recolhida nas frentes, nos afloramentos e trabalhos de sondagem.

Em conclusão, a previsão do volume dos blocos úteis tendo por base a modelação das rede de fracturação realizada pelo Sistema Informático, desenvolvido a partir de dados recolhidos nas frentes das pedreiras, poderá vir a constituir uma ferramenta importante na avaliação económica das explorações e na planificação dos trabalhos das pedreiras em actividade.

## 5. AGRADECIMENTOS

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) agradece-se o apoio concedido no âmbito do Programa Praxis XXI. Às empresas envolvidas no Projecto de Investigação, Pedramoca, Assimagra e Marmetal, as facilidades concedidas ao longo de todo o período de desenvolvimento do Sistema Informático.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, J. M. E.** (2003) – “*Modelação da Rede de Fracturação para o Planeamento da exploração de Rochas Ornamentais*”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 63 p.
- ALBUQUERQUE, M. T. D.** (1993) – “*Análise Multivariada de Dados e Geoestatística da Recuperação de Pedreiras de Mármore*”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 82 p.
- LUÍS, António Alberto Gabriel** (1995) – “*Caracterização, Avaliação e Simulação da Blocometria de um jazigo de Mármore*”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 75 p.
- LUÍS, A. A. Gabriel & Sousa, A. J. Gonçalves** (1998) – “*Simulação Geoestatística de Redes de Fracturas. Aplicação à Avaliação da Blocometria de um Jazigo de Mármore*”. Lisboa. 20 p.
- RIBEIRO, J. M. Tavares.** (1994) – “*Planeamento da Exploração de Pedreiras de Mármore com base em um Índice de Recuperação*”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 121 p.
- SARAIVA, J. Alberto.** (1999) – “*Generalização da Aplicação de um Índice de Qualidade de Rochas Ornamentais. Estudo Comparativo de Diferentes Litologias*”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 181 p.
- Sousa, A. J.** (1983) – “*Aplicação da simulação condicional a uma jazida de ferro*”. Encontros sobre métodos quantitativos aplicados às variáveis regionalizadas. I.N.I.C.. Lisboa. pp. 173-180.
- Sousa, A. J.; Muge, F.; Almeida, J. A.; Travassos, J.F.; Vieira, J. L.; Guerreiro, L.; Brito, G.** (1990) – “*RESMIN – Sistema de Desenho Geológico e Avaliação de Reservas*”. Registo do 10º Encontro Nacional dos Engenheiros de Minas. Faro. pp. 253-256.