

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

**Análise Multivariada de Dados e Geoestatística da  
Recuperação de Pedreiras de Mármore**

**Maria Teresa Durães Albuquerque**  
(Licenciada)

**Dissertação para a obtenção do grau de mestre em  
Mineralurgia e Planeamento Mineiro**

**Março de 1993**

*"Chaque atome de silence est  
la chance d'un fruit mur"*

Ao meu Pai

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de investigação desenvolvida no Centro de Valorização de Recursos Minerais da Universidade Técnica de Lisboa, integrado no Laboratório de Mineralurgia e Planeamento Mineiro do Instituto Superior Técnico, nos últimos dois anos.

Um agradecimento muito especial ao Professor Amílcar Soares, meu orientador científico, pelo estímulo e sugestões críticas sem as quais não teria sido possível levar a bom termo este trabalho.

Aos Professores Henrique Garcia Pereira e Jorge de Sousa pelo apoio e pela imprescindível colaboração neste trabalho.

Um agradecimento muito especial à Graça Brito e ao Jorge Ribeiro pelo trabalho que desenvolveram neste projecto. Ao Pedro Pina e José António Almeida pelas sugestões e apoio constante.

Ao Engenheiro Nuno dos Santos e à Doutora Maria João Albuquerque pela disponibilidade de rever todo o texto apresentado.

A todos os colegas que integram o C.V.R.M pela simpatia, amizade e disponibilidade demonstrada.

À minha mãe e ao Manuel Afonso pela companhia e estímulo constantes.

À Junta Nacional de Investigação Científica (JNICT) cujo apoio financeiro, através do Programa CIÊNCIA, permitiu a realização deste trabalho.

## RESUMO

Pretendeu-se, neste trabalho, definir um índice que reflectisse as qualidades de recuperação de pedreiras de Mármore.

A informação geológica utilizada foi recolhida directamente nas frentes de trabalho de duas pedreiras da Região de Borba, definindo-se previamente os atributos que mais condicionam a exploração (em especial as descontinuidades). Procedeu-se, também, à recolha de todos os dados por fotografia, sendo esta efectuada individualmente para cada frente, e sempre à mesma escala.

Os dados recolhidos fotograficamente (**imagem real**) são confrontados com os dados recolhidos no campo procedendo-se, depois, à sua Identificação, Classificação e Interpretação criando-se uma nova imagem (**imagem interpretada**) onde, as descontinuidades constituirão o "**motivo**" de um "**padrão**".

A Digitalização ou a Análise de Imagem serão utilizadas como técnicas de aquisição de dados, para as quais os indivíduos apresentam as coordenadas nos eixos x, y e z , bem como os atributos escolhidos para a classificação.

A Análise de Correspondências permitiu calcular um índice que, como variável regionalizada, é ulteriormente analisado do ponto de vista da sua continuidade espacial através de variografia e estimado por Krigagem.

Dois índices diferentes são construídos com base em duas abordagens distintas e ulteriormente comparados com dados reais das pedreiras.

Finalmente para o índice seleccionado foram estimadas as áreas de maior probabilidade de ocorrência dos seus valores extremos com base na Morfologia Matemática.

### **Palavras - chave**

Pedreira

Variável Regionalizada

Índice de qualidade

Análise de Correspondências

Variografia

Krigagem.

Krigagem Morfológica

## ABSTRACT

A summary index reflecting marble recovery is calculated by applying Correspondence Analysis to a set of non-homogeneous attributes observed in the working faces of quarries. The index is taken as a Regionalized Variable and estimated by Kriging in the blocks to be extracted. Once validated by real production data, which matches the Kriged values of the index, it is possible to use it for the purpose of guiding the exploitation planning procedures.

A detailed case study regarding two Portuguese marble quarries is presented, to illustrate the proposed methodology.

### **Key - words**

Quarry

Regionalized variable

Recovery index

Correspondence Analysis

Variography

Kriging

Morphological Kriging

## ÍNDICE

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
PALAVRAS CHAVE	IV
ABSTRACT	V
KEY - WORDS	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE QUADROS	XIII
<b><u>1 - Introdução</u></b>	<b>1</b>
<b>1.1 - Resumo dos capítulos e metodologia genérica</b>	<b>2</b>
<b>1.2 - Localização da área estudada</b>	<b>5</b>
<b><u>2 - Amostragem dos atributos</u></b>	<b>8</b>
<b>2.1 - Características da qualidade do mármore</b>	<b>9</b>
<b><i>2.1.1 - Informação disponível</i></b>	<b>11</b>
<b>2.2 - Transformação de uma imagem real numa imagem interpretada</b>	<b>13</b>
<b>2.3 - Digitalização</b>	<b>14</b>
<b><i>2.3.1 - Mesa digitalizadora</i></b>	<b>15</b>
<b><i>2.3.2 - Análise de Imagem</i></b>	<b>16</b>

2.4 - Definição das coordenadas e dos atributos das discontinuidades - quadro de partida	22
<b><u>3 - Construção de <math>I_1</math> por Análise Multivariada de Dados</u></b>	26
3.1 - Definição do suporte	27
3.2 - Definição dos arquétipos "BOM" e "MAU"	30
3.3 - Aplicação da Análise Factorial de Correspondências	31
<b><u>4 - Reconstrução interactiva de <math>I_1</math></u></b>	33
4.1 - Estimacão Geoestatística	34
4.1.1 - <i>Introdução</i>	34
4.1.2 - <i>Dimensão do suporte</i>	34
4.1.3 - <i>Aditividade de <math>I_1</math></i>	35
4.2 - Análise Estatística de $I_1$	35
4.2.1 - <i>Histogramas</i>	35
4.2.2 - <i>Análise Estrutural - variogramas</i>	37
4.2.3 - <i>Modelo teórico de variogramas</i>	40
4.3 - Estimacão geoestatística, por krigagem, de $I_1$ nos blocos	41
4.3.1 - <i>Estimacão de <math>I_1</math> em blocos de 1.5 x 1.5 m</i>	41
4.3.2 - <i>Cartografia dos valores estimados</i>	
- <i>Pedreiras do Rosal e Encostinha</i>	42
4.3.3 - <i>Validacão do modelo com dados reais</i>	42

## 5 - Reformulação do "Índice" através do estudo das variáveis.

<u>Construção de I<sub>2</sub></u>	46
5.1 - Introdução	47
5.2 - Exemplo nº 1	48
5.2.1 - Redefinição dos atributos	48
5.2.2 - Variografia dos atributos - Modelos Teóricos	49
5.2.3 - Redefinição dos arquétipos "BOM" e "MAU"	55
5.2.4 - Variograma experimental de I <sub>2</sub>	56
5.2.5 - Modelo Teórico	57
5.2.6 - Krigagem de I <sub>2</sub> em blocos de 1.5 x 1.5 m	58
5.2.7 - Validação do modelo com dados reais	59
5.3 - Exemplo nº 2	59
5.3.1 - Redefinição dos atributos	59
5.3.2 - Redefinição dos arquétipos "BOM" e "MAU"	60
5.3.3 - Variograma experimental de I <sub>2</sub>	61
5.3.4 - Modelo Teórico	62
5.3.5 - Krigagem de I <sub>2</sub> em blocos de 1.5 x 1.5 m	62
5.3.6 - Validação do modelo com dados reais	63
5.3.7 - Estimação morfológica das classes do "ÍNDICE - I <sub>2</sub> "	64
i) <u>Krigagem Morfológica de uma variável Indicatriz</u>	64
ii) <u>Definição da variável Indicatriz para o Índice I<sub>2</sub></u>	66
iii) <u>Cartografia dos blocos para I<sub>3</sub>(x<sub>j</sub>) e I<sub>4</sub>(x<sub>j</sub>)</u>	69
iv) <u>Determinação da Morfologia Binária para I<sub>3</sub>(x<sub>j</sub>) e I<sub>4</sub>(x<sub>j</sub>)</u>	70

<u>Conclusões</u>	72
<u>Bibliografia</u>	75
<u>Anexo</u>	80

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores angulares entre as frentes de trabalho na pedreira da Encostinha e o Norte. As coordenadas do início e fim da frente são dadas nas colunas $(X_i, Y_i)$ e $(X_j, Y_j)$ .	24
Quadro 4.1 - valores dos estatísticos básicos para as pedreiras da Encostinha e do Rosal.	35
Quadro 4.2 - Parâmetros do modelo teórico ajustado aos variogramas omni-direccionais das pedreiras da Encostinha e do Rosal.	40
Quadro 5.3 - Variabilidade "consumida" dentro do suporte.	54
Quadro 5.4 - Parâmetros teóricos para o variograma omnidireccional de I2 pedreira da Encostinha.	57
Quadro 5.5 - a) Representação da coincidência espacial entre os valores reais e os valores estimados para os blocos. b) Representação da coincidência percentual dos valores reais e os valores estimados na zona de validação.	59
Quadro 5.6 - Parâmetros teóricos para o variograma omnidireccional de I2 - pedreira da Encostinha.	62
Quadro 5.7 - a) Representação da coincidência espacial entre os valores reais e os valores estimados para os blocos. b) Representação percentual dos valores reais e dos valores estimados.	64
Quadro 5.8 - Parâmetros ajustados aos variogramas de I3(xi) e de I4(xi).	68

## 1 - Introdução

## **1 - Introdução**

### **1.1 - Resumo dos capítulos e metodologia genérica**

A construção de um "ÍNDICE" capaz de quantificar a recuperação de pedreiras de mármore através de uma síntese da qualidade da pedra explorada, que possa servir de base para a optimização do planeamento da exploração, é um objectivo de inegável interesse para uma indústria que cresce desordenadamente, sem atender, na generalidade, a critérios de racionalidade.

Apesar de existirem trabalhos sobre aplicações da estatística à geotecnia (Soulié, 1983) e sobre modelos matemáticos de redes de fracturas (Miller, 1979, Chilès, 1989), verifica-se uma lacuna na literatura especializada, no que se refere à estimação espacial de características de fracturas em pequena escala, com objectivos de planeamento.

No estudo aqui apresentado, pretende-se fazer uma abordagem diferente da análise clássica, aplicada ao estudo das descontinuidades dos maciços rochosos. Tal abordagem consiste essencialmente na utilização de uma série de atributos, sintetizados, através da estatística multivariada, num índice de qualidade, o qual, depois de estimado pela geoestatística e validado, através de informação sobre o valor dos blocos, pode ser aplicado num sistema de planeamento da exploração.

No primeiro capítulo encontra-se uma descrição sumária do enquadramento geográfico e geológico da região.

A definição de uma metodologia adequada para a recolha e pré - processamento da informação no campo, constitui a primeira etapa deste trabalho, sendo apresentada no segundo capítulo. A fotografia à mesma escala, de todas as frentes de trabalho, permitiu construir, em gabinete, imagens interpretadas, onde as descontinuidades são classificadas de acordo com um conjunto de variáveis que predominantemente condicionam o desmonte dos blocos e, conseqüentemente, a rentabilidade da exploração. A digitalização, utilizando uma mesa ou um analisador de imagem, de todas as descontinuidades e fracturas, permite registar, sob uma forma adequada ao tratamento informático, as características individuais de cada unidade estatística, interpretadas globalmente pelo confronto com as observações de campo.

No terceiro capítulo procede-se à construção do índice quantitativo que sintetiza a maior ou menor aptidão ao desmonte do material considerado, numa escala pré-definida, cujos extremos correspondem à melhor e pior recuperação previsível, para os atributos considerados. Desta forma, foi constituído um índice com base em duas abordagens distintas:

i) Os vectores "BOM" e "MAU", que caracterizam os polos extremos, são construídos seleccionando as "melhores" e as "piores" classes dos atributos considerados, do ponto de vista

da explorabilidade do material. Utiliza-se depois, a Análise Factorial de Correspondências como algoritmo discriminante, baseado nos dois polos anteriormente definidos, construindo o "índice" -  $I_1$  como o valor de cada observação experimental na escala considerada.

Uma vez que se pretende estimar a variável na configuração real dos blocos localizados na pedreira, torna-se necessário encontrar um modelo que tome em conta a sua distribuição espacial tomando  $I_1$  como Variável Regionalizada (VR) procede-se, no quarto capítulo ao seu estudo estrutural, por variografia e à estimação, por krigagem, do seu valor nos blocos de exploração (1.5m x 1.5m). Finalmente, efectua-se a validação de  $I_1$  através da comparação com valores reais fornecidos pela direcção da pedreira.

ii) A análise de  $I_1$  mostrou que a primeira escolha de atributos e respectivas classes não reflectia de um modo consistente, os valores reais, reflectindo um comportamento demasiado errático do índice. Assim, no capítulo 5 procede-se primeiramente a uma análise estrutural de todos os atributos envolvidos na construção de  $I_1$ . A redefinição de classes e/ou limites, tendo em conta a distribuição e contiguidade espacial desses atributos, permite reformular os extremos "BOM" e "MAU" do eixo de projecção. Uma nova aplicação da Análise Factorial de Correspondências como algoritmo discriminante conduziu a uma nova VR -  $I_2$ . Apresentam-se, neste capítulo, duas aplicações possíveis: uma primeira, onde, para a construção dos arquétipos, se inclui, ainda, uma variável sem estrutura espacial (classe 3 da variável densidade) (a) e uma segunda onde, para a construção de  $I_2$  só se consideraram variáveis com significado espacial (b). Comparativamente com  $I_1$ , a análise estrutural, nas duas aplicações apresentadas, mostra uma maior continuidade para  $I_2$ , onde o carácter errático da VR deixa de ser predominante.

A estimação geoestatística do valor de  $I_2$  nos mesmos blocos da zona de validação mostra uma melhor coincidência numérica e espacial, dos valores estimados com os reais.

A construção de uma variável indicatriz bifásica, baseada em  $I_2$ , permite visualizar os blocos de maior probabilidade de ocorrência de valores Bons e Maus.

A metodologia genérica aplicada neste trabalho é interactiva (fig.1.1), permitindo a introdução de novos atributos ou a redefinição dos já considerados, de forma a que o "ÍNDICE" final se aproxime cada vez mais da realidade que se pretende caracterizar, ou seja: dado um conjunto de atributos, este é submetido à AFC, produzindo um índice que é considerado uma VR (Variável Regionalizada). Esse índice é tratado por variografia e krigagem, conduzindo à previsão do valor dos blocos estimados, a qual é comparada com os dados reais. Se a coincidência não for satisfatória, a menos de uma tolerância fixada, o procedimento é repetido interactivamente, ajustando os parâmetros da AFC no que diz respeito aos atributos já registados ou recolha de novos atributos, até que se verifique uma concordância que respeite a tolerância fixada. Obviamente que o processo só converge se cada interacção for guiada pelo conteúdo pericial obtido na fase de recolha de dados e nas interacções anteriores.

Note-se que, no caso de I2 esta metodologia é precedida pela variografia de todas as classes dos atributos seleccionados.

É possível, deste modo, ajustar os parâmetros (pesos dados aos atributos, definição das classes e suporte de captura para os mesmos) de "partida" para a AFC, construindo interactivamente um "ÍNDICE" que reflecte, cada vez melhor as características do maciço marmóreo, do ponto de vista da sua aptidão para o desmonte.

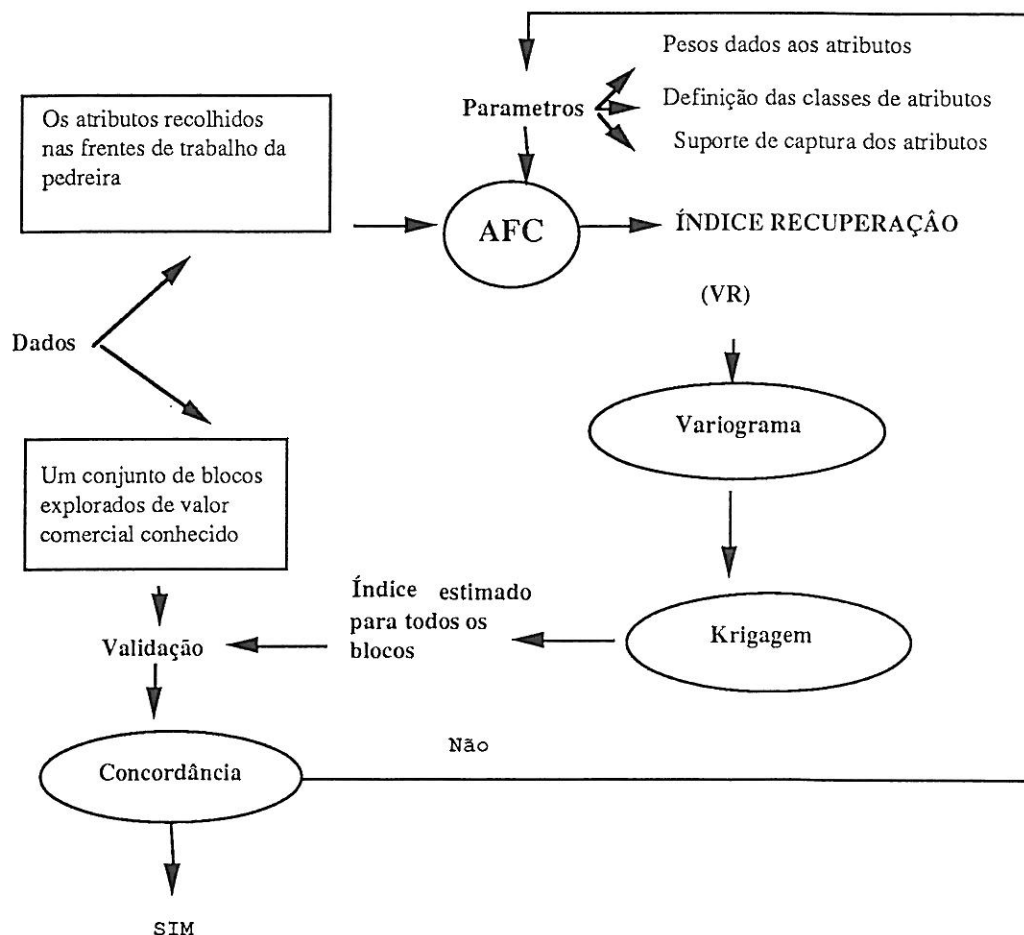


Fig.1.1 - Metodologia aplicada na definição do "índice".

A discussão e análise da possível inclusão de novos atributos condicionadores da rentabilidade da exploração constituem possíveis prolongamentos deste trabalho, que estão já incluídos na metodologia proposta e contemplados no respectivo software de apoio, o qual é suficientemente geral para aceitar um número qualquer de atributos, categorizados em qualquer número de classes.

## 1.2 - Localização da área estudada

O trabalho desenvolvido baseou-se em informação recolhida em duas pedreiras de mármore, denominadas Rosal e Encostinha, cuja localização geológica e geográfica se apresenta nas fig.1.2 e 1.3.

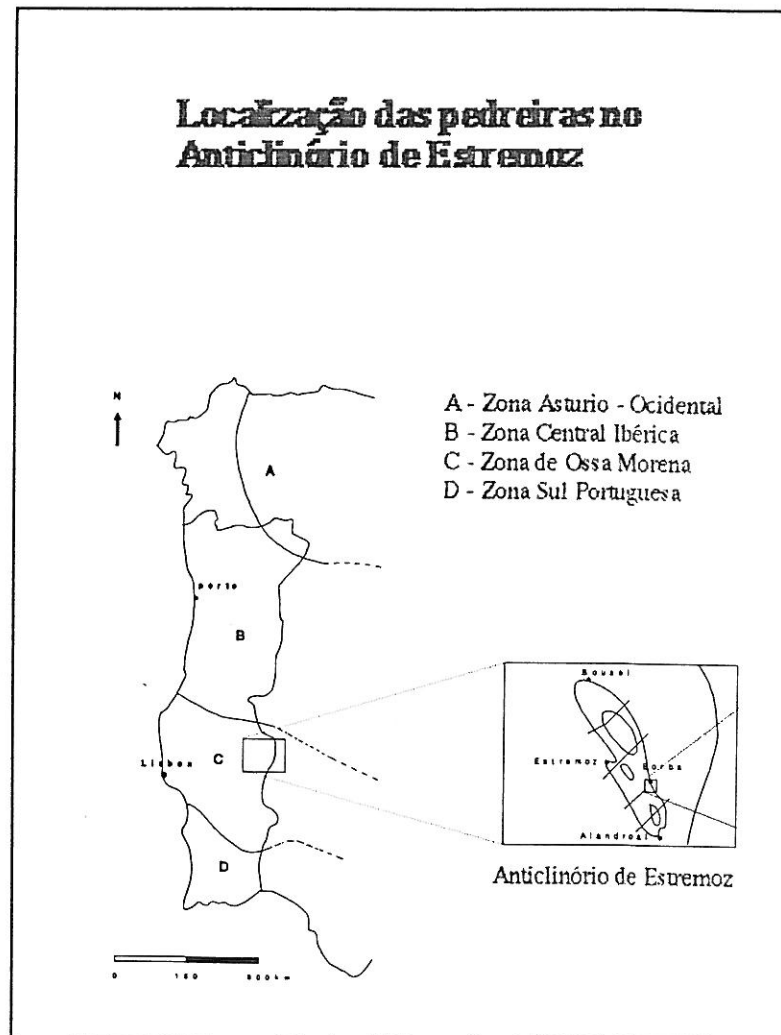


Fig.1.2 - Localização geográfica das pedreiras.

Trata-se de explorações que produzem o chamado Mármore Rosa, em blocos de cerca de 1.5 x 1.5 x 1.0 m, extraído de níveis pouco profundos. A pedra designada por Encostinha tem uma área aproximada de 300 m<sup>2</sup> e 17 frentes de trabalho divididas em dois níveis, onde se consegue uma recuperação média de 35% - 40%. A pedra designada Rosal, tem uma área de cerca de 1500 m<sup>2</sup> com 29 frentes de trabalho e recuperação média da ordem dos 20%.

As duas pedreiras estão integradas no maciço calcário de Estremoz (fig.1.2), o qual está inserido no vasto anticlinório assimétrico de Estremoz (direcção NW - SE) que se estende por cerca de 40Km (segundo o eixo maior), desde Sousel até ao Alandroal.



Fig.1.3 - Área geográfica das reservas de mármore da região de Vila Viçosa-Borba-Estremoz (F. Gonçalves - Revista da ordem dos Engenheiros, 1984).

No maciço ocorrem principalmente três tipos de rochas carbonatadas:

- i) Calcários cristalinos dolomíticos, acinzentados e acastanhados, de grão fino e bastante fracturados, designados localmente por "pedra cascalva";
- ii) Mármore calcíticos, esbranquiçados e rosados, mais ou menos venados, de granulometria média a fina;
- iii) Calcários lacustres, às vezes brechoides, situando-se na periferia do maciço calcário.

Na base de todas estas formações, encontra-se uma formação do Precâmbrico Superior, representada pela "Série Negra", (xistos negros siliciosos, um pouco micácios, com intercalações de quartzitos negros e liditos), no seu conjunto muito dobrada ( F. Gonçalves, 1971, Martins, 1991).

Sobre esta formação assenta em discordância uma série clástica constituída por conglomerados e arenitos arcósicos transformados em rochas quartzíticas, geralmente muito deformada. Sobre a série clástica assenta a série carbonatada, que é a única que tem interesse económico.

Sobreposta à série carbonatada, surgem, em discordância, xistos luzentes alternados com grauvaques e silicitos chérticos, contendo na base, metavulcanitos ácidos e básicos dispostos em faixas alternadas.

O anticlinório de Estremoz foi afectado por duas fases de dobramento (posterior ao Devónico inferior), seguidas de processos de ruptura e metamorfismo regional. Algumas fracturas, nomeadamente as de orientação ENE - WSW, encontram-se preenchidas por rochas básicas - doleritos - constituindo filões cuja designação local é "cabos reais". Em relação à tectónica de fracturação, ocorreram fenómenos de dolomitização e silicificação, actuando do interior para o exterior do maciço, não atingindo, geralmente, grande profundidade.

As características geológicas apresentadas, anteriormente, são responsáveis pelas grandes heterogeneidades do maciço calcário, manifestando-se em vários aspectos, como sejam a presença de discontinuidades, constituição mineralógica, cristalização, cor, granulometria, presença de veios, etc.

## 2 - Amostragem dos atributos

## 2 - Amostragem dos atributos

### 2.1 - Características da qualidade do mármore

O objectivo final do presente trabalho é o da definição de um "ÍNDICE" que caracterize quantitativamente a rentabilidade da exploração de pedreiras de mármore.

A definição das variáveis que contribuirão para a construção do "ÍNDICE" implica o estudo do maciço rochoso, estabelecendo-se, deste modo, o quadro das características que de uma forma predominante condicionam a exploração.

Os mármore, rochas resultantes da recristalização de calcários ou de dolomias, devido a acções metamórficas, são essencialmente constituídos por calcite ou por dolomite. Granulometricamente podem ser formados por grãos que não se distinguem macroscopicamente, ou fanerocristalinos, de grão fino, médio ou grosseiro. Apresentam-se muitas vezes corados (por óxidos de ferro ou matérias carbonosas) de uma forma uniforme, ou desenhando padrões variados. São de uma forma geral maciços embora existam variedades apresentando xistosidade mais ou menos desenvolvida (Botelho da Costa, J., 1979).

Torna-se, deste modo, necessário conhecer as características litológicas e genéticas da pedra mármore que se pretende explorar, de forma a que se possam definir os factores que de uma forma decisiva condicionam a sua resposta às acções dos agentes atmosféricos. Resumindo, os tipos de deterioração mais comuns nas rochas carbonatadas são devidos a (A. Casal Moura, 1991):

- 1 - Congelação da água nos poros e fissuras - provoca o aumento da fissuração e a desagregação do mármore.
- 2 - Erosão devido a partículas em suspensão no ar - dá lugar à destruição das camadas superficiais.
- 3 - Corrosão de componentes metálicos - conduz a fissuração e desagregação.
- 4 - Reacções químicas diversas favorecidas pelas águas pluviais - leva a dissolução dos mármore, desagregação de fragmentos, formação de cavidades.

A acção destes factores, conjuntamente com os da geodinâmica interna, vão ao longo do tempo definir as características do maciço marmóreo, permitindo distinguir, na caracterização da qualidade dos mesmos, basicamente dois domínios: o do padrão do bloco e o das anisotropias do maciço. As características que os definem agrupam, na generalidade, os seguintes aspectos:

i) - **O padrão do bloco** - Caracterizado pelos seguintes aspectos principais (A. Casal Moura, 1991):

- Cor.
- Textura.
- Homogeneidade.
- Heterogeneidades - presença de vergadas, nódulos,...
- Orientação do corte de placas - escolha de face ou faces com melhor aspecto ornamental.

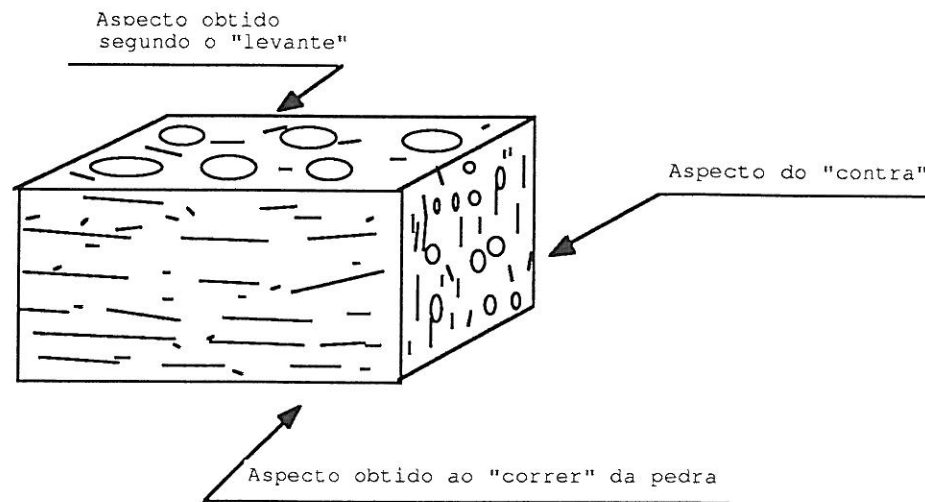


Fig.2.1 - Representação esquemática de possíveis aspectos ornamentais num bloco comercial (A.Casal Moura, 1991).

ii) - **As anisotropias do maciço** -Dever-se-ão considerar os seguintes aspectos mais relevantes :

-Presença de vergadas; presença de nódulos.; presença de cavidades; presença de descontinuidades - falhas, diaclases, xistosidades, clivagens e planos de estratificação.

As variáveis que nos permitem caracterizar o padrão do bloco (cor; veios; granulometria; etc) funcionam como indicador da **qualidade do bloco** de mármore (análise à escala do bloco), aquelas que nos permitem caracterizar as anisotropias do maciço, funcionam como um indicador da qualidade de exploração da pedreira, ou seja, a **rentabilidade da pedreira** (análise à escala da pedreira).

O problema pode, então, discutir-se a duas escalas diferentes:

A escala da pedreira, em que se pretende caracterizar e otimizar a rentabilidade da produção, e a escala do bloco, em que se pretende caracterizar o valor comercial da pedra mármore.

No âmbito do presente trabalho de construção de um "Índice" que caracterize a rentabilidade da pedreira, tomaram-se fundamentalmente as descontinuidades e as fracturas que são, sem dúvida, as variáveis que mais influenciam a exploração. Entre elas salientam-se: os planos de Estratificação, Clivagens, Xistosidades, Diaclases e Falhas.

Deve referir-se, no entanto, que não se procedeu a qualquer diferenciação genética entre estas. Aceitou-se a linguagem corrente que denomina como "fractura", todas as descontinuidades que se apresentam abertas (com ou sem preenchimento) e contínuas e como "descontinuidade" todas as outras em que isto não se observa.

### *2.1.1 - Informação disponível*

A recolha de dados numa pedreira de mármore é um processo moroso que levanta problemas práticos que têm de ser ultrapassados através de aproximações razoáveis.

Uma das razões determinantes para esses problemas é a dificuldade de acesso à informação de superfície, não só pela espessa camada de material proveniente do desmonte ("natas") que cobre por vezes grandes extensões na vizinhança da pedreira, como pela localização das escombrelas que se dispõem, muitas vezes em auréola, em torno da abertura da pedreira.

O levantamento cartográfico das fracturas e descontinuidades, à escala da pedreira, fundamental para a sua caracterização é, na maior parte das vezes, uma tarefa que está forçosamente limitada pela acessibilidade das frentes, e cujos resultados têm de ser cuidadosamente criticados e discutidos, relativamente à representatividade das amostras que é possível recolher.

A informação disponível na pedreira, ou seja as descontinuidades e fracturas visíveis, são, normalmente, aquelas que se apresentam em perfil nas frentes de trabalho. É, deste modo possível caracterizar as lineações resultantes da intersecção entre os planos das fracturas e descontinuidades com os planos das frentes de trabalho.

Note-se, porém, que a exploração se faz em pisos assimétricos (fig.2.2), o que permite, em certos casos, recolher informação segundo direcções diferentes. Consegue-se, assim, caracterizar as três direcções principais: x, y e z, trabalhando individualmente com "painéis" de informação bidimensional (fig.2.3).

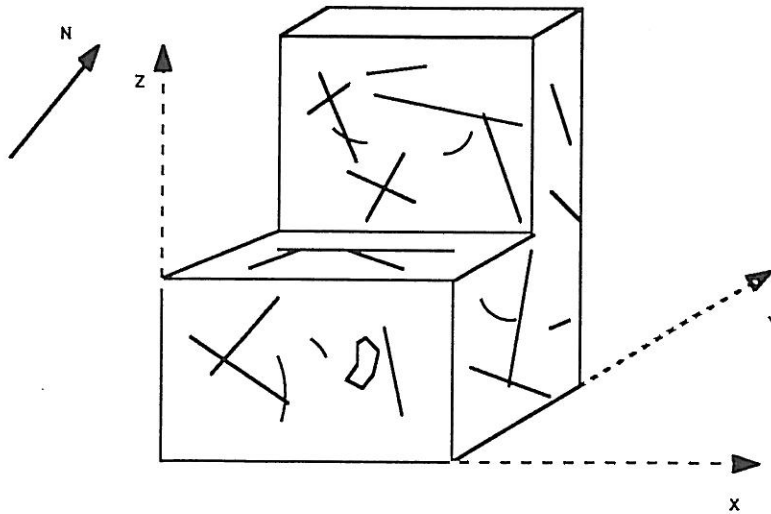


Fig.2.2- Representação de frentes de trabalho. A recolha de dados disponibiliza informação nas três direcções principais X, Y, Z.

### Frente de Trabalho

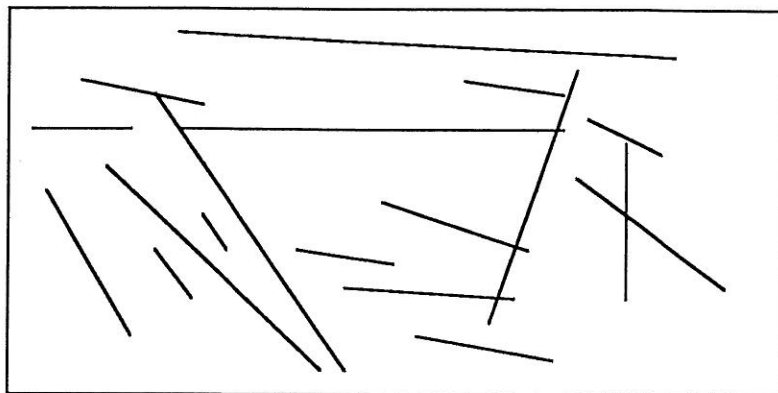


Fig.2.3 - Representação de uma frente de trabalho - "padrão" bidimensional resultante das intersecções das fracturas e descontinuidades com o plano da frente.

## 2.2 - Transformação de uma imagem real numa imagem interpretada

Como pode ser visto na fig.2.3, as fracturas e descontinuidades não podem ser tratadas como planos, mas sim como lineações, resultantes da intersecção entre os planos das frentes de trabalho e os planos dos acidentes considerados.

Depois de devidamente seleccionada a informação, em que se excluem descontinuidades e fracturas cuja origem seja considerada duvidosa, como por exemplo as que resultaram de desmontes prévios ou são devidas a deslocamentos de terreno, procede-se à caracterização das mesmas no que diz respeito aos seguintes atributos:

- Comprimento.
- Curvatura.
- Nº de intersecções com outras descontinuidades.
- Intersecção com veios.
- Inclinação da lineação no plano da frente.
- Densidade.

A escolha destas variáveis foi determinada por conhecimento pericial sobre alguns dos aspectos geológicos e de engenharia que mais condicionam a exploração deste tipo de maciços. Assim poderá dizer-se que, um bloco é tanto "melhor" quanto menos fracturado for e quanto mais pequenas forem as fracturas e descontinuidades que apresente, por outro lado a curvatura de uma fractura ou descontinuidade pode alterar as dimensões e forma do bloco "comercial"; as intersecções entre descontinuidades / fracturas ou veios constituem pontos preferenciais de confluência de fluidos para as quais a dissolução se faz sentir com mais intensidade, constituindo zonas de fragilidade onde o aparecimento de inclusões argilosas se poderá intensificar; também a inclinação apresentada pelas lineações no plano da frente de trabalho permite agrupar as descontinuidades e fracturas por "famílias" possibilitando uma melhor ordenação dos dados segundo o seu carácter mais ou menos penalizante para a exploração; finalmente considerou-se, ainda, a densidade de fracturas e descontinuidades no plano da frente de trabalho.

A necessidade de "transportar" informação das frentes de trabalho da pedreira para o gabinete, conduziu à definição de uma metodologia, onde, a partir da fotografia sistemática, à mesma escala, de todas as frentes de trabalho da pedreira, se obtêm as "**imagens reais**". A partir destas é possível criar "**imagens interpretadas**", nas quais as descontinuidades e fracturas são agrupadas em "famílias". É sobre a imagem final, sobreposição das duas

anteriores, que assenta o processo de obtenção de informação numérica, para a construção do índice (fig.2.4).

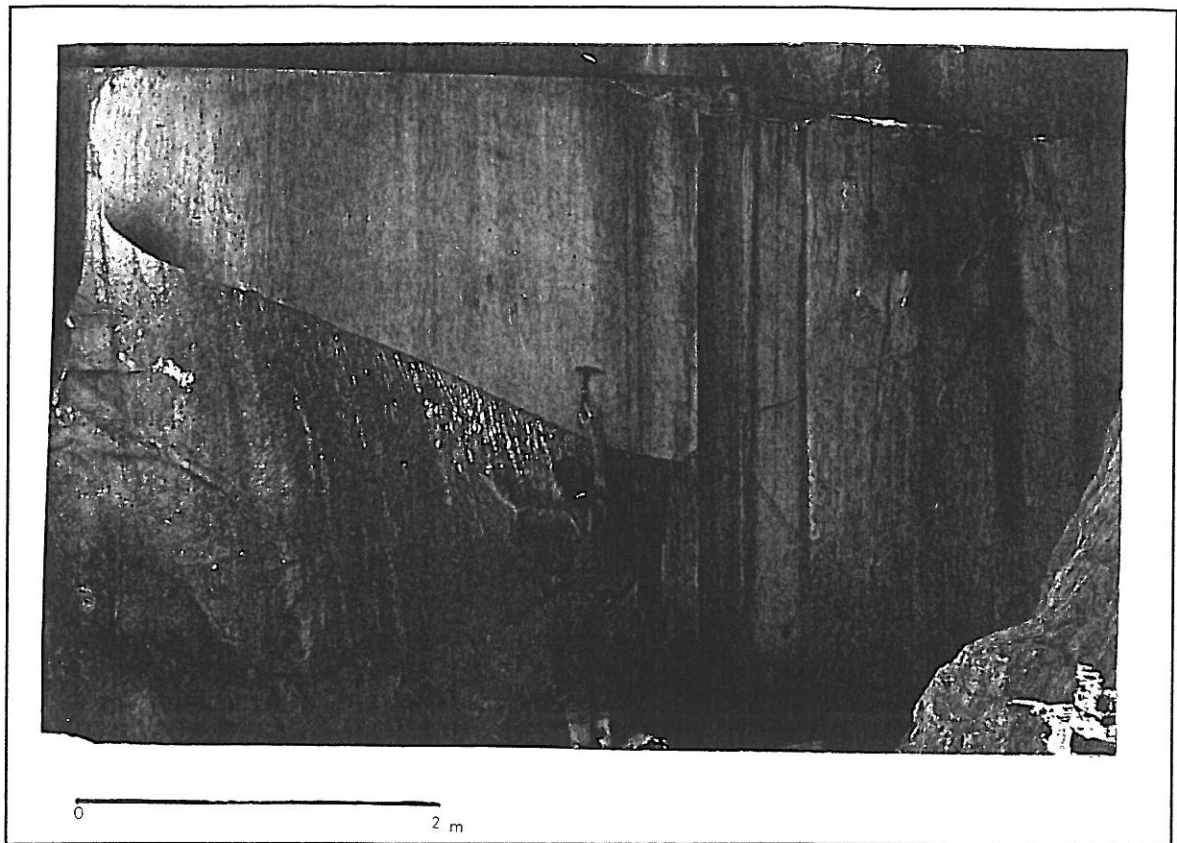


Fig.2.4 - Imagem interpretada sobreposta à imagem real (fotografia). Frente de trabalho nº 2 - pedreira da Encostinha.

### 2.3 - Digitalização

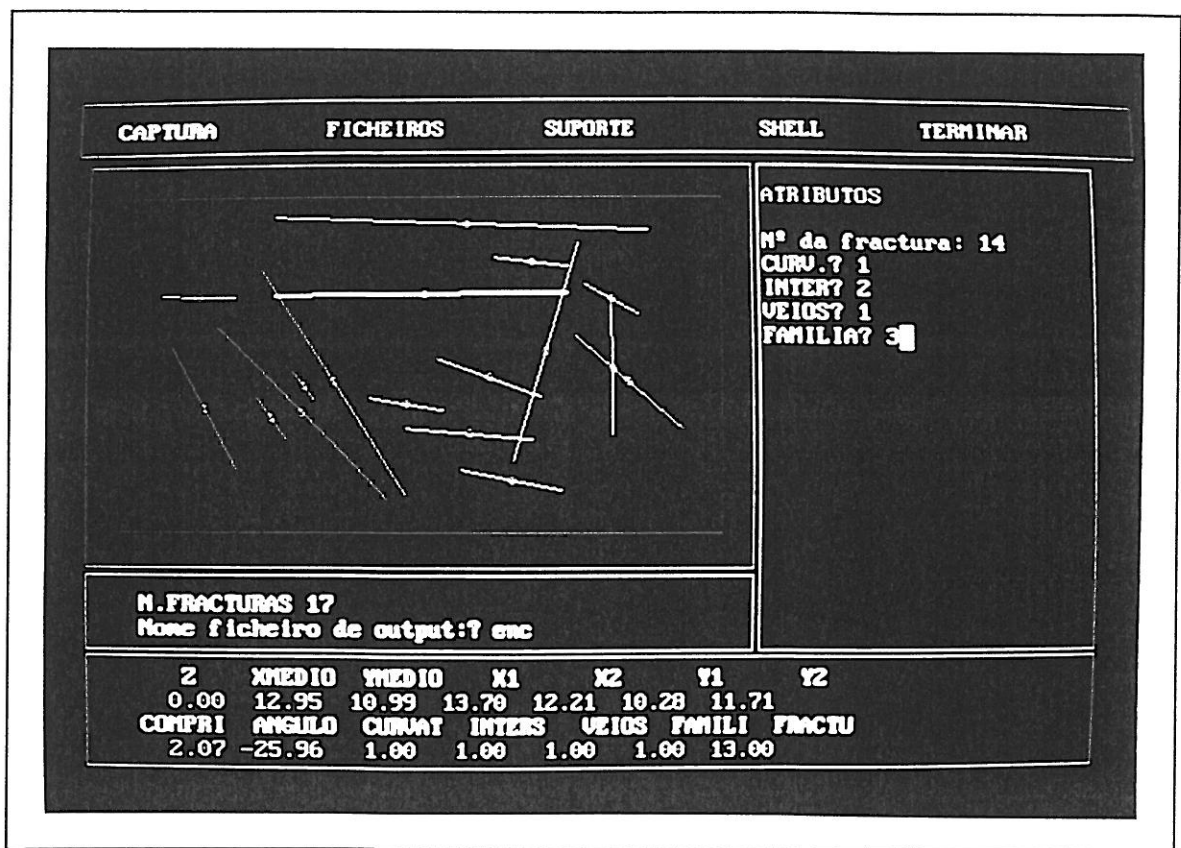
A partir da imagem interpretada, na qual se encontra resumida a informação gráfica sobre as fracturas, é possível quantificar as mesmas: comprimentos, curvaturas, inclinações, etc.

Apresenta-se seguidamente a aplicação de duas metodologias diferentes, na quantificação de imagens interpretadas: i) a primeira consiste na digitalização de todas as fracturas e registo dos seus atributos, com uma mesa digitalizadora ii) a segunda baseia-se nas técnicas de Análise de Imagem e Morfologia Matemática e caracteriza-se por uma maior automatização e rapidez do processo de quantificação numérica das fracturas.

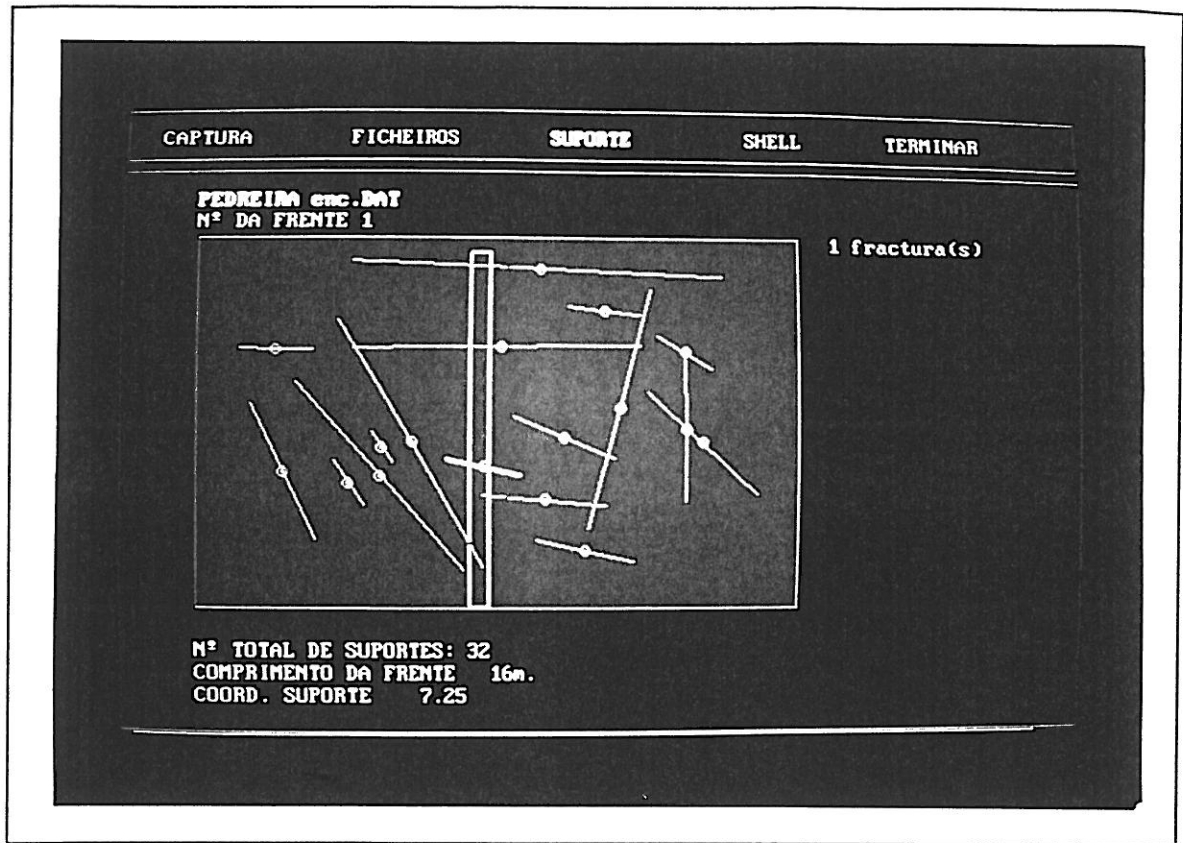
### 2.3.1 - Mesa Digitalizadora

Trata-se de um processo lento que exige uma componente manual acentuada e é aplicável àqueles casos em que a quantidade de fracturas e descontinuidades não é muito grande.

A forma como os dados foram obtidos implicou o desenvolvimento de software para mesa digitalizadora (Brito, G., 1992). Deste modo, para todas as fracturas e descontinuidades, introduz-se não só as suas coordenadas, como também, a classificação de cada atributo (ver anexo).



a)



b)

Fig.2.5 - Sequência fotográfica representando o processamento de aquisição de dados por uma mesa digitalizadora.

Para cada frente de trabalho obtém-se, um ficheiro onde as descontinuidades e fracturas são caracterizadas pelas suas coordenadas e atributos.

### 2.3.2 - Análise de Imagem

Outra metodologia que se poderá aplicar nesta primeira selecção de dados é baseada na **Análise de Imagem**.

A análise de Imagem permite, seleccionar, classificar e coordenar a informação escolhida, de uma forma automática. A aplicação desta técnica a pedreiras, onde existe grande quantidade de informação, torna-se de particular interesse.

Os métodos morfológicos utilizados na análise de imagem, decorrem da teoria da Morfologia Matemática e consistem em transformações sequenciais da imagem, onde a identificação de uma estrutura, implica o seu isolamento na imagem final (Pina, P., 1992).

A sequência de operações em análise de imagem encontram-se esquematizadas na fig.2.6:

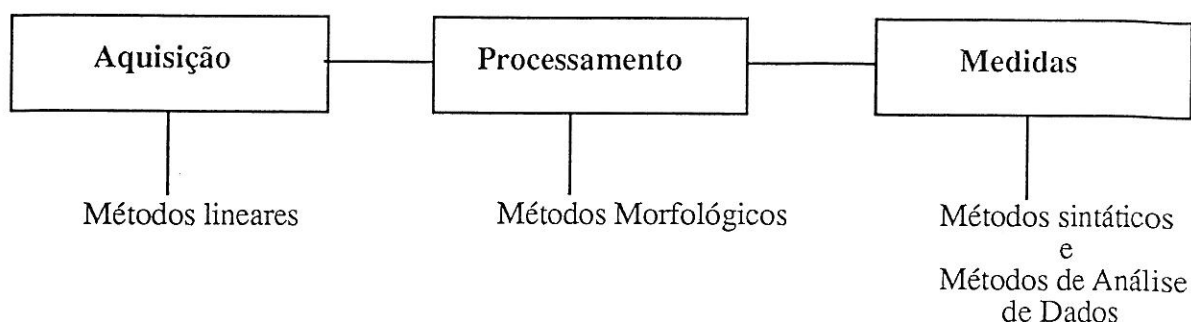


Fig 2.6 - Sequência de operações em Análise de Imagem (Pina, P., 1992).

O objectivo da morfologia matemática é o da quantificação de estruturas do ponto de vista geométrico, baseando-se em conceitos da teoria de conjuntos. Para tal, o conjunto de objectos em estudo é confrontado com um outro objecto, este de forma conhecida, denominado elemento estruturante. A interacção entre o elemento estruturante e o conjunto em estudo processa-se na totalidade do campo em análise (imagem), conferindo, a estas operações, um carácter global. A transformação do conjunto inicial, depois das sucessivas operações, evidência as suas características estruturais, sendo o conjunto resultante da transformação ou sequência de transformações mais simples do que o conjunto inicial (Pina, P., 1992).

A Análise de Imagem permite, deste modo:

- Seleccionar automaticamente a informação, agrupando-a em famílias.
- Coordenar individualmente todas as fracturas e descontinuidades presentes na imagem (frente de trabalho).
- Efectuar medições (comprimentos, áreas,...).
- Classificar as fracturas e descontinuidades de acordo com as classes dos atributos seleccionados.

Comparando os dois métodos apresentados, digitalização por mesa e quantificação por análise de imagem, este último oferece mais vantagens, devido à rapidez e automatização do processo. Neste contexto, permite tratar informação não linear (veios por exemplo), aplicando os conceitos e as transformações da Morfologia Matemática\*.

Com o objectivo de ilustrar as potencialidades da análise de imagem, neste tipo de problemas, apresenta-se a sequência de tratamento de uma imagem (frente de trabalho), desde a sua aquisição (imagem inicial) até à imagem final, onde se encontra isolada a família das descontinuidades sub-horizontais. Foi utilizado como sistema de Análise de Imagem, o Nacet Ns 1500, constituído por unidades de aquisição e processamento de imagem, permitindo, ainda, proceder à execução de medidas.

### Digitalização da frente de trabalho nº9 da pedreira da Encostinha:

#### 1 - Imagem inicial

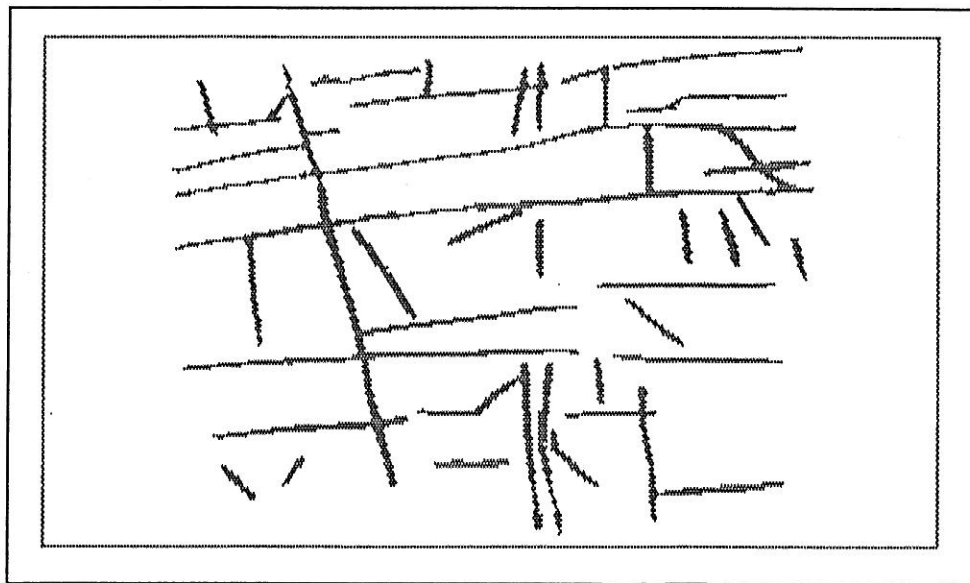


Fig.2.7 - Imagem da frente de trabalho. Imagem inicial.

A imagem inicial resulta da captação da "imagem interpretada" (fig.2.6), com uma câmara video e digitalizada pelo analisador e representa todas as fracturas e descontinuidades presentes numa frente de trabalho.

---

\* - A experiência recolhida no decorrer da investigação que levou a este trabalho permite concluir, que para um volume de dados pequeno, os benefícios resultantes da análise de imagem não compensam o esforço necessário para configurar o sistema para esta aplicação. Para uma dimensão de informação mais importante, é de esperar que a situação inversa se verifique, em especial se for possível automatizar completamente todo o processo de aquisição e processamento da imagem.

## 2 - Definição do esqueleto

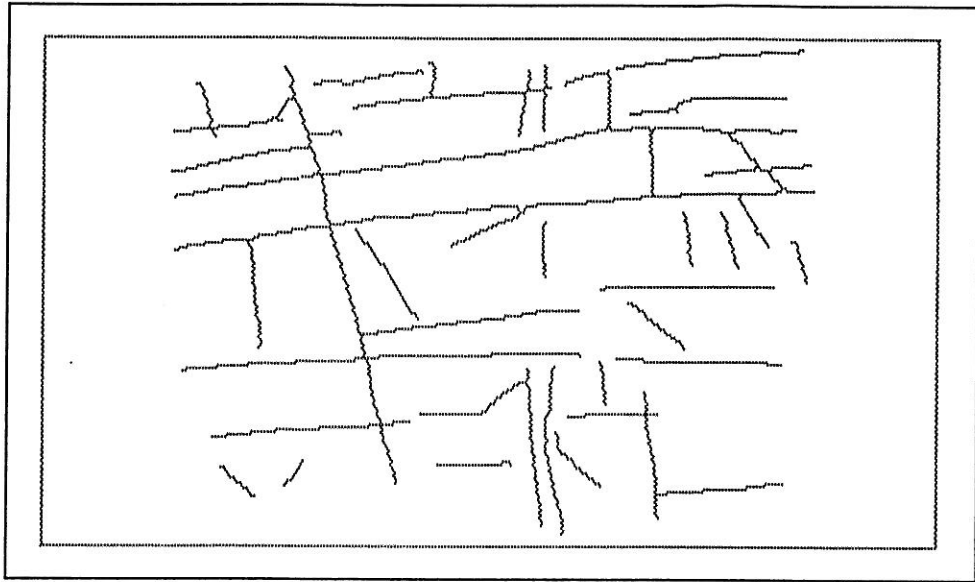


Fig.2.8 - Esqueleto da imagem 1. Permite-nos determinar os pontos múltiplos.

O esqueleto é a imagem resultante da redução, de uma forma isótropa, do conjunto inicial, por aplicação de uma transformação, até se chegar a um conjunto infinitamente pequeno, sem modificação das propriedades topológicas. É, deste modo, possível localizar na imagem os pontos múltiplos, correspondentes à intersecção de lineações (fracturas e discontinuidades).

## 3 - Eliminação de pontos múltiplos

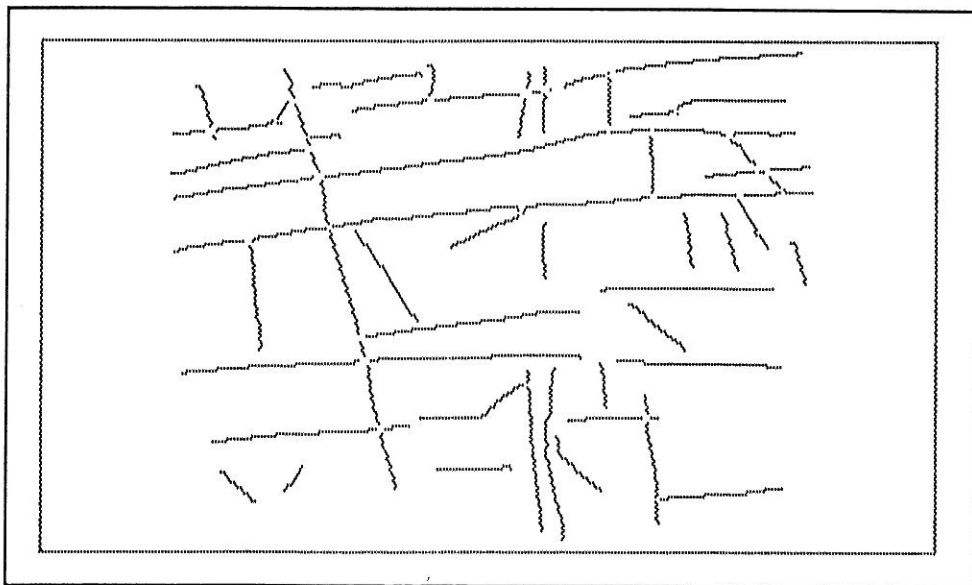


Fig.2.9 - Esqueleto depois de retirados os pontos múltiplos.

Tal operação consiste em retirar da imagem todos os pontos que pertencem a pelo menos duas discontinuidades ou fracturas. Na prática resulta no varrimento de todos os pontos que constituem a imagem digital para a identificação de determinadas configurações de vizinhança. Da subtracção entre esta imagem e a inicial resulta uma outra onde a ausência de pontos múltiplos permitirá ulteriormente a reconstrução da estrutura desejada. O facto de todas as fracturas e discontinuidades ficarem independentes possibilita a selecção da informação segundo a direcção desejada.

#### 4 - Erosão

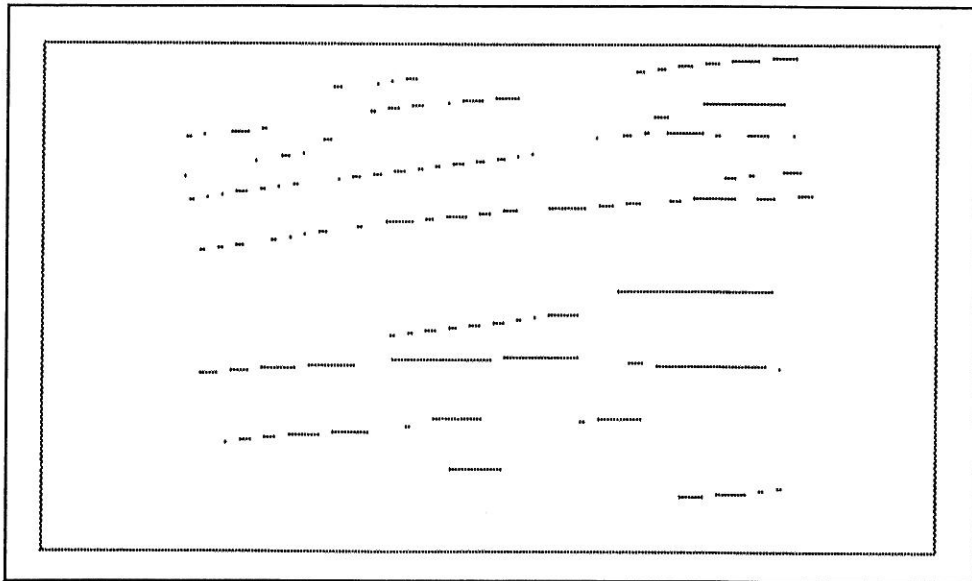


Fig.2.10 - Erosão segundo a direcção horizontal (direcção 1).

A erosão do conjunto, por um elemento estruturante horizontal, conduz à união de todos os lugares geométricos dos centros do elemento estruturante, quando este está completamente contido no conjunto. Como resultado, obtém-se uma imagem, onde todas as estruturas, não orientadas segundo a horizontal, são eliminadas: subsistem partes (marcadores) das estruturas orientadas segundo a horizontal.

5 - Reconstrução da imagem anterior

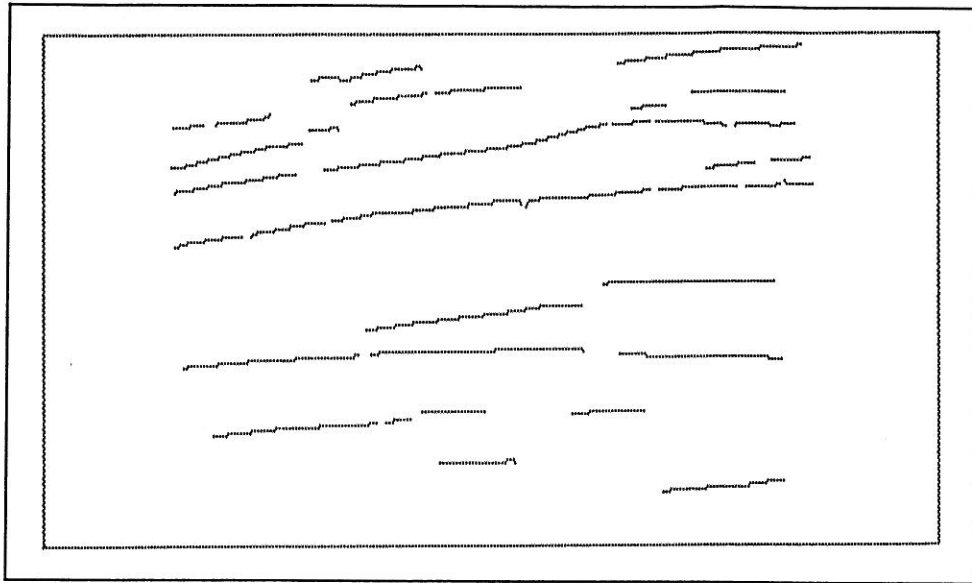


Fig.2.11 - Reconstrução da imagem anterior.

A reconstrução, a partir dos marcadores da imagem anterior, na máscara constituída pela fig.2.10, mostra a família das fracturas e descontinuidades horizontais.

6 - Rosa de direcções

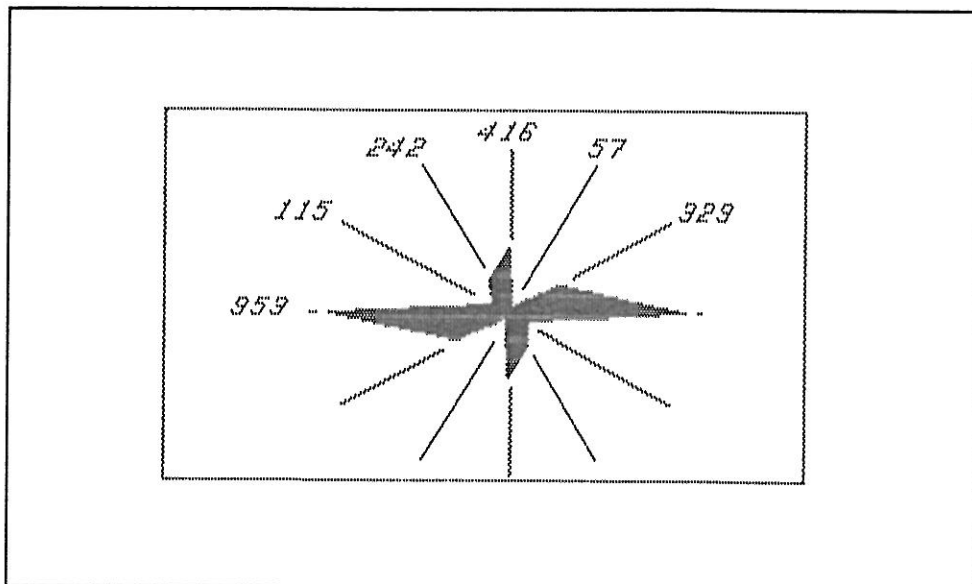


fig.2.12 - Rosa de direcções.

A rosa de direcções, indica a predominância das direcções das descontinuidades e fracturas. Tendo estas um pixel de espessura, os valores que a rosa de direcções toma (em pixels), indicam o comprimento total das descontinuidades, segundo as diferentes direcções. Neste caso, a direcção predominante é a das descontinuidades e fracturas sub-horizontais.

#### 2.4 - Definição das coordenadas e dos atributos das descontinuidades - quadro de partida

Depois de registadas em suporte informático todas as fracturas e descontinuidades, obtém-se, para cada frente de trabalho, um ficheiro, onde cada registo, apresenta as coordenadas do ponto médio de cada fractura e descontinuidade e uma codificação dos atributos considerados (fig.2.13).

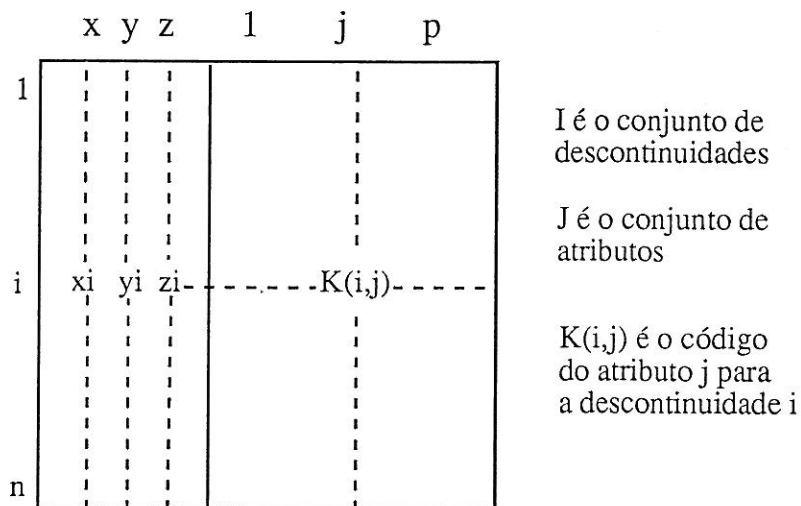


fig.2.13 - Representação das fracturas e descontinuidades depois de classificadas.

De acordo com a matriz da fig.2.13, encontra-se, na intersecção da linha i com a coluna x, a coordenada no eixo dos x da fractura i, assim como, na intersecção da linha i com a coluna j, se encontra o código do atributo j para essa descontinuidade ou fractura.

Na figura 2.14 exemplifica-se graficamente a atribuição de códigos às modalidades dos atributos seleccionados para o conjunto de fracturas e descontinuidades.

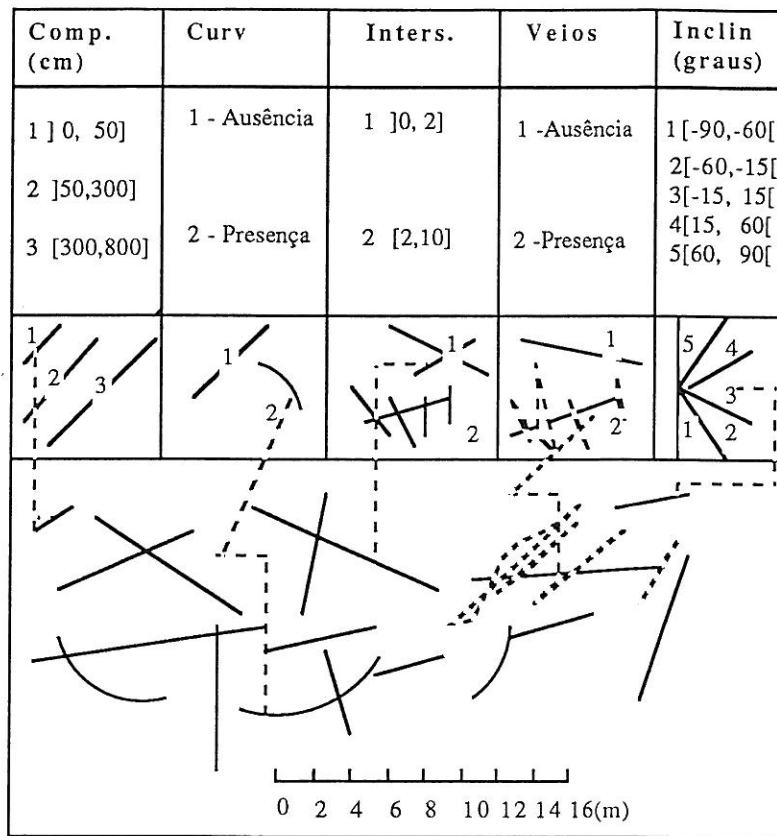


Fig.2.14 - Exemplo da atribuição das classes dos atributos às discontinuidades, numa frente de trabalho.

Com base nas "imagens interpretadas" elaboram-se tantos ficheiros quanto o número de frentes de trabalho existentes. Note-se que, sendo a digitalização das discontinuidades e fracturas efectuada de acordo com o referencial da frente onde estão incluídas (fig.2.14), obtem-se, no final, valores coordenados de acordo com referenciais diferentes. Na realidade, tantos quanto o número de frentes da pedreira.

Para proceder à projecção das discontinuidades das várias frentes de trabalho num referencial único, é necessário conhecer os ângulos entre as diferentes frentes bem como ângulo que fazem com o Norte.

No quadro 2.1 apresentam-se as 17 frentes de trabalho da Pedreira da Encostinha referenciadas pelo ângulo que fazem com o Norte e pelas coordenadas dos vértices inicial e final da frente.

<u>Designação</u>	<u>Ângulo com o Norte</u>	<u>(X<sub>i</sub>,Y<sub>i</sub>)</u>	<u>(X<sub>f</sub>,Y<sub>f</sub>)</u>
1	75º	(8.7, 20.7)	(20.3,24.0)
2	350º	(10.5,14.7)	( 9.3,21,2)
3	70º	(7.8,13.65)	(10.5,14.7)
4	335	( 9.2, 11.1)	(7.8, 13.7)
5	253	(10.7,11.6)	(9.2, 11.1)
6	330	( 16.4, 2.4)	(10.5,11.4)
7	160	(19.8, 25.8)	(21.6,19.7)
8	55	(21.0, 20.6)	(23.3,24.2)
9	175	(25.2, 22.2)	(26.1,12.0)
10	----	----	----
11	123	(26.1, 12.0)	(30.6, 9.0)
12	245	( 30.6, 9.0)	(16.35,2.4)
13	165	(19.8,25.9)	(21.2,21.0)
14	60	(17.6,24.6)	(19.8,25.9)
15	162	(15.6,30.3)	(17.6,24.6)
16	65	(7.7, 26.6)	(15.6,30.3)
17	345	(9.6, 14.7)	(7.7, 26.6)

Quadro 2.1 - Valores angulares entre as frentes de trabalho na pedreira da Encostinha e o Norte. As coordenadas do início e fim da frente são dadas nas colunas (X<sub>i</sub>,Y<sub>i</sub>) e (X<sub>f</sub>, Y<sub>f</sub>).

Na figura 2.15 está representada, em planta, a pedreira da Encostinha. Os referenciais individuais para cada frente encontram-se situados no referencial único da pedreira, cujo eixo dos yy coincide com o Norte.

Os dados podem então ser agrupados num único ficheiro que permitirá o tratamento de todo o conjunto de informação disponível no mesmo referencial.

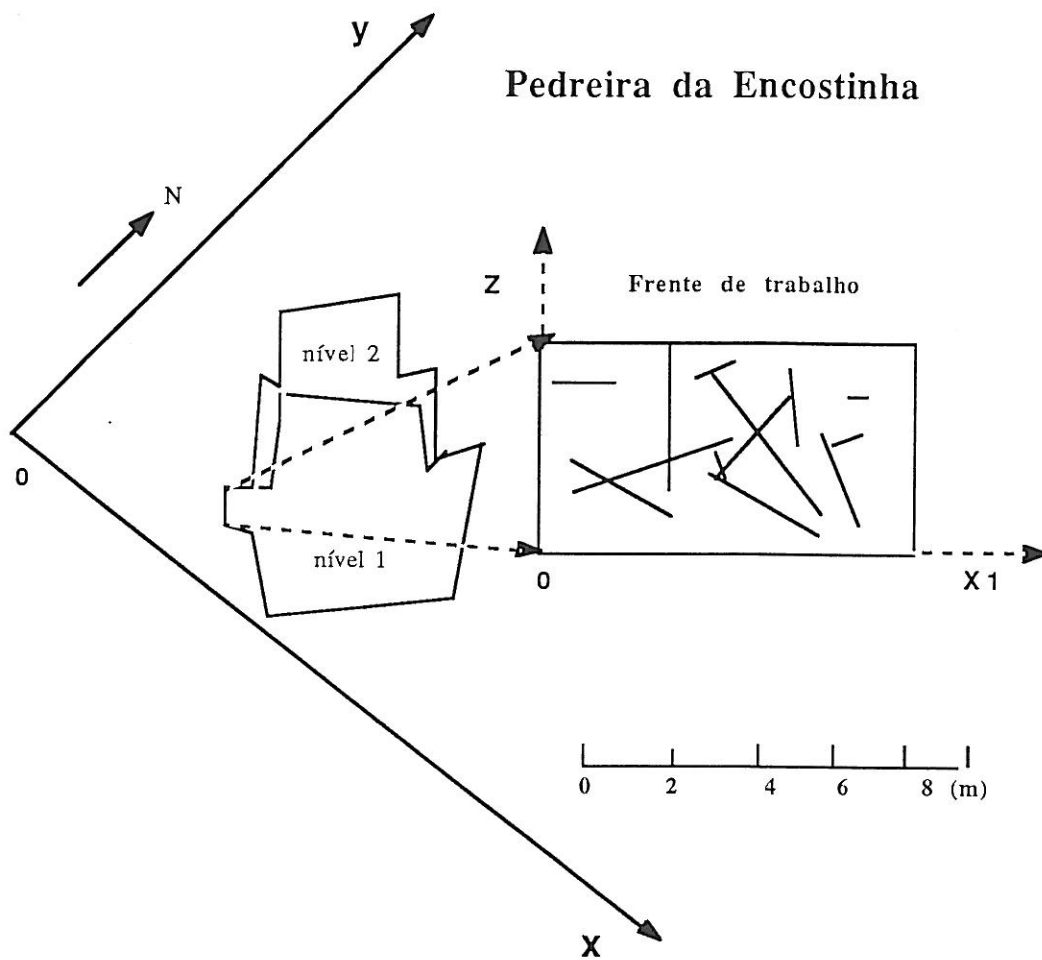


Fig.2.15 - Planta da pedreira da Encostinha. Projecção das coordenadas relativas no referencial único da pedreira.

### 3 - Construção do Índice "I<sub>1</sub>" por Análise Multivariada de Dados

### 3 - Construção do Índice "I<sub>1</sub>" por Análise Multivariada de Dados

Uma vez quantificadas todas as descontinuidades e fracturas e recalculadas as respectivas coordenadas, no referencial único da pedra, obtém-se um quadro, em que as colunas representam as classes das diferentes variáveis (ATRIBUTOS) e as linhas todas as descontinuidades e fracturas identificadas na totalidade de frentes de trabalho da pedra estudada.

O objectivo deste capítulo é, o da construção de um "ÍNDICE" que resuma os atributos numa escala de qualidade da pedra, entre os dois extremos, arquétipos "BOM" e "MAU", por intermédio das técnicas de Análise Multivariada de Dados.

#### 3.1 Definição do suporte

Para o objectivo de caracterizar a qualidade do mármore, é necessário referir as descontinuidades a uma determinada área de influência, designada por suporte, o qual permite materializar geometricamente a amostragem efectuada. O suporte é uma "janela" de observação, no interior da qual, é quantificada a ocorrência dos diferentes atributos, contabilizados de acordo com o esquema da fig. 3.1.

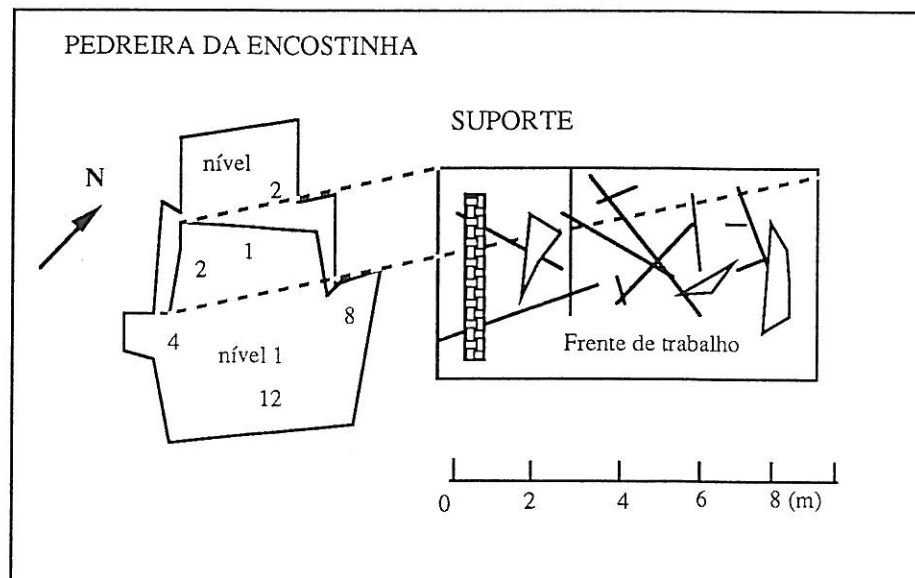
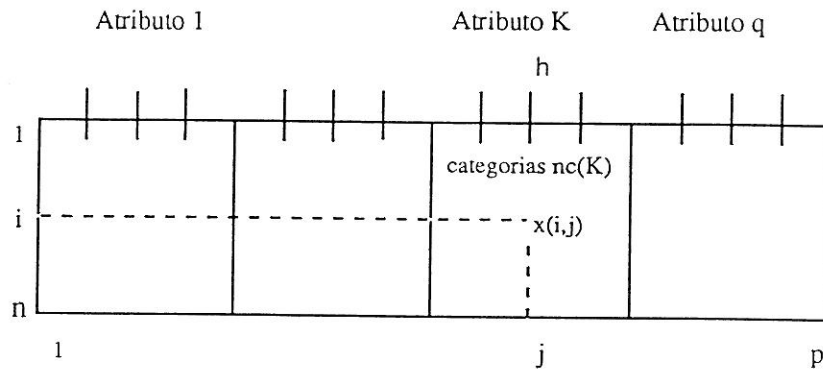


Fig.3.1 - Exemplificação da captura de dados pelo suporte, nas frentes de trabalho da pedra (Pereira, H. *et al*, 1992).

Dados q atributos desdobrados em p modalidades, e considerando n suportes S (área elementar de observação dos atributos na frente), estes podem ser simbolicamente representados por uma nuvem de n pontos no espaço p - dimensional das modalidades dos atributos (fig.3.2).



$x(i,j)$  - grau de pertença do suporte  $i$  à categoria  $j$

$i$  - Suportes (1, ...,n)  
 $K$  - atributos (1, ...,q)  
 $j$  - colunas (1, ...,p)  
 $h$  - categorias (1, ...,nc(k))

$$\sum_{h=1}^{nc(K)} X(i,h)=1$$

$$\sum_{j=1}^q X(i,j)=q$$

$$\sum_{i,j} X(i,j)=nq$$

a)

Atributos	comp	curv	inter.	veios	incl.	dens.
Pesos	0.15	0.03	0.2	0.025	0.175	0.42

b)

Fig.3.2 - a)Matriz experimental dos suportes em codificação fuzzy

b)Quadro representando os pesos dos atributos no ensaio mais favorável.

Fazendo o suporte S percorrer, sequencialmente e sem sobreposição cada uma das frentes, regista-se para cada suporte a ocorrência de cada um dos atributos q (só são contadas as descontinuidades cujo ponto médio se encontrar no interior do suporte).

Obtém-se, deste modo, um novo quadro, onde se apresentam, em colunas, os atributos e em linhas, os suportes: a matriz experimental X contém, portanto, os valores  $X(i,j)$ , calculados como a fracção do total de observações num dado suporte S, para a classe h do atributo k, ou seja, o grau de pertença do suporte S à modalidade de ordem j de todos os atributos (fig.3.2). Todos os valores  $X(i,j)$  pertencem ao intervalo [0,1], podendo ser interpretados como fazendo

parte de um esquema de codificação fuzzy (Zadeh, 1965 e Pereira *et al*, 1980).

Sendo os atributos variáveis de diferentes tipos (numéricas, alfanuméricas e booleanas), para cada atributo numérico definiu-se um conjunto de classes de frequência e classificaram-se os valores dessa variável, de acordo com os limites de classes de igual frequência (Nanache, 1973).

Noutros casos (variáveis alfanuméricas e booleanas), tornou-se mais útil definir as classes, através de categorias de intensidade de ocorrência, tendo em consideração a importância mais ou menos relevante desse atributo.

O esquema de codificação utilizado, permite incluir todos os tipos de variável num formato homogêneo, visto que as classes das variáveis numéricas, podem ser consideradas categorias de um atributo qualitativo.

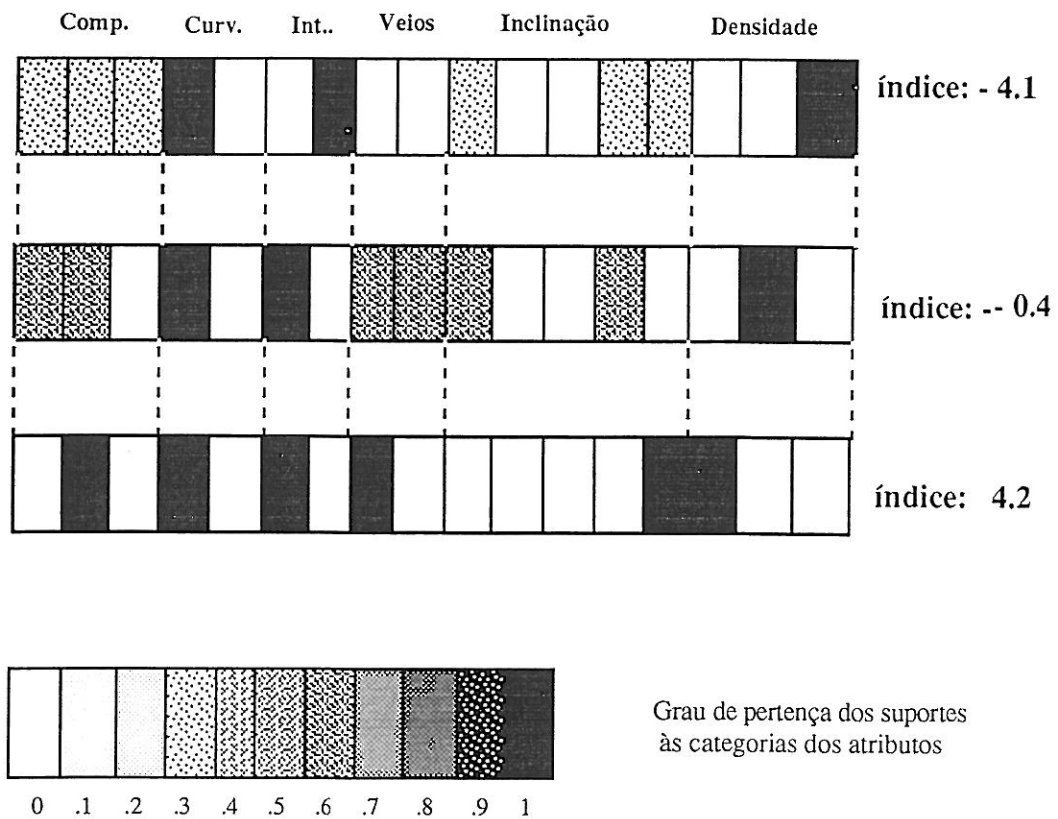


Fig.3.3 - Suportes experimentais. Exemplo da frente de trabalho nº 10 - pedreira do Rosal.

Apresenta-se na Fig.3.3 um exemplo da representação simbólica de 3 suportes experimentais no espaço das modalidades dos atributos.

### 3.2 - Definição dos Arquétipos BOM e MAU

Numa segunda etapa pretende-se atribuir um valor, numérico, a cada posição tomada pelo suporte, de modo a sintetizar, classificando quantitativamente, todas as unidades da matriz experimental. Os valores obtidos - "ÍNDICE" - deverão reflectir a maior ou menor aptidão ao desmonte do material considerado, numa escala pré-definida, cujos extremos corresponderão à melhor ou pior recuperação de mármore para essa pedreira.

Os polos da escala, onde se pretende projectar os valores do índice, deverão ser definidos à priori. Sendo, assim, possível obter a discriminação dos valores experimentais relativamente a dois vectores: aquele que define o conjunto de características considerado "BOM" e aquele que dá o conjunto considerado como "MAU".

A construção dos dois vectores extremos estabeleceu-se com base na opinião pericial: as melhores classes de todas as variáveis definem o polo "BOM" e as piores classes de todas as variáveis definem o polo "MAU" (fig. 3.4).

#### Arquétipos

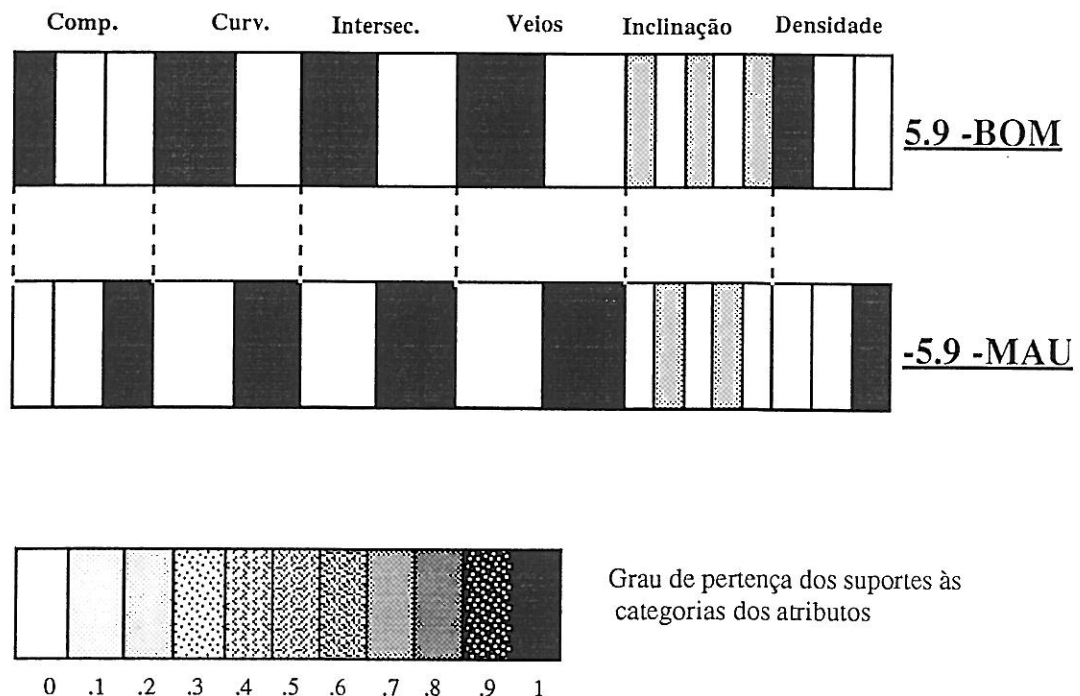


Fig.3.4 - Arquétipos "BOM" e "MAU" para a construção de I1.

### 3.3 - Aplicação da Análise Factorial de Correspondências

Uma vez criados os dois polos "BOM" e "MAU" da escala, utiliza-se a Análise Factorial de Correspondências como algoritmo discriminante (Benzécri, 1980 e Pereira, 1988), em que os indivíduos da matriz de partida X (vectores dos suportes), são projectados em suplementar sobre o vector próprio da matriz de inércia, construído com base nos dois polos discriminantes ("BOM" e "MAU").

A projecção em suplementar de cada suporte no eixo discriminante é dada por (Pereira *et al*, 1992):

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{\lambda} \cdot q} \cdot \sum_{k=1}^q w(k) \cdot \sum_{j=nc(k-1)+1}^{nc(k)} x(i,j) \cdot p(j) \quad (1)$$

onde:

$f(i)$  - é o índice de recuperação do suporte  $i$  na escala definida pelos dois polos.

$\lambda$  - é o valor próprio associado ao eixo discriminante.

$q$  - é o nº de atributos.

$W(k)$  - é o peso dado ao atributo  $K$ .

$nc(k)$  - é o nº de classes do atributo  $K$ .

$x(i,j)$  - são os elementos da matriz experimental  $X$ .

$p(j)$  - é a projecção da classe  $i$  no eixo discriminante.

Note-se que este "ÍNDICE" depende de três parâmetros ajustáveis, de acordo com os dados reais utilizados na validação:

- 1 - nº e limites das classes utilizadas para cada atributo;
- 2 - Dimensão do suporte e
- 3 - valores dos pesos  $W(k)$  utilizados na equação (1)

A Análise de Correspondências foi utilizada não só como descritor estrutural do quadro de partida, mas também como instrumento discriminante. De facto, esta técnica de Análise de Dados, confere um estatuto simétrico às linhas e colunas do quadro de partida, permitindo a projecção simultânea das mesmas, num espaço de dimensão reduzida (Pereira, G. H., Sousa,