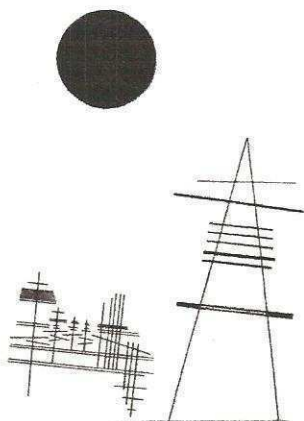




**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**



***METODOLOGIAS GEOESTATÍSTICAS PARA A CARACTERIZAÇÃO E  
AVALIAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS***

**Maria Teresa Durães Albuquerque  
(Mestre)**

**Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas**

***Orientador científico***

**Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa**

***Júri***

***Presidente:* Reitor da Universidade Técnica de Lisboa**

***Vogais:* Doutor Javier Taboada Castro  
Engenheiro Luís António Aires de Barros  
Doutor Henrique José Figueiredo Garcia Pereira  
Doutor Carlos Altino Jansen Verdades Dinis da Gama  
Doutor Fernando Humberto Dias de Oliveira Muge  
Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa  
Doutor Carlos Manuel de Sousa Nunes da Costa**

**Lisboa, Dezembro de 1998**

"As linhas finas resistem ao ponto pesado"

(Wassily Kandinsky)

*À memória da Rita, do Tiago e da Joana*

## Resumo

O trabalho de investigação proposto pretende desenvolver um corpo metodológico que, baseado em índices de qualidade e/ou recuperação, sintetize as diversas características que condicionam o valor *in situ* das rochas ornamentais (e industriais), permitindo, local e regionalmente, definir zonas de elevada favorabilidade para a produção daqueles materiais.

A colheita e o registo da informação em diferentes suportes e a diferentes escalas resultou de um trabalho de campo efectuado em diferentes pedreiras de mármore, xistos e ardósias. Procedeu-se numa primeira fase, à observação, quantificação e codificação das características condicionantes da qualidade da pedra como material de construção e/ou como material ornamental, com particular relevo para a caracterização da fracturação.

O desenvolvimento da metodologia para construção de variáveis de síntese (índices) foi, numa segunda fase, implementado recorrendo a métodos da Estatística Multivariada e da Geoestatística. A flexibilidade do método permite o ajuste interactivo de pesos a afectar cada atributo, de acordo com os objectivos de validação perante as oscilações constantes que se verificam no mercado.

O mapeamento regional do índice de recuperação para as pedreiras de mármore da região de Vila-Viçosa, integrando informação regional, foi, na última fase, implementado recorrendo à aplicação de metodologias Geoestatísticas como a Krigagem com Deriva Externa e Soft Kriging.

### *Palavras Chave*

Índice de Recuperação/Qualidade; Estatística Multivariada; Geoestatística; Deriva Externa; Soft Kriging; Favorabilidade

## **Abstract**

This work of investigation intends to develop a methodological body which is based on Indexes of Quality and/or Recovery. It sums up the varied characteristics with condition the value in situ of the ornamental (and industrial) rocks, permitting, locally and regionally, to determine areas of high favourability for the production of those materials.

The gathering and the record of some information in different supports and with different scales was the result of a field work realized in different marble, schists and slates quarries. Firstly we observed, quantified and codified the conditioning characteristics of the stone quality as a material for building and/or as decorative material with a particular importance on the characterization of fracture geometry.

The development of the methodology for the construction of variables of synthesis (indexes) was implemented, on a second phase, by turning for aid to the methods of the Multivariate Statistics and of the Geostatistics. The flexibility of the method permits the interactive adjustment of weights which affects each attribute according to the validation aims before the steady fluctuations found in the market.

The regional map of the recovery index for the marble quarries in Vila-Viçosa region has got regional information and it was implemented on the last phase by turning for aid to the geostatistics methodologies such as Kriging with External Drift and Soft Kriging.

### **Key - Words**

Index of Quality / Recovery; Multivariate Statistics; Geostatistics; External Drift; Soft Kriging; Favourability

## **Agradecimentos**

O presente trabalho reflecte o conjunto de conhecimentos adquiridos e as actividades de investigação desenvolvidas no C.V.R.M - Centro de Valorização de Recursos Minerais, da Universidade Técnica de Lisboa

Ao meu orientador científico, Prof. Jorge de Sousa, pelos ensinamentos, rigor científicos, disponibilidade, críticas construtivas e simpatia constantes imprescindíveis à elaboração deste trabalho.

Ao Prof Henrique Garcia Pereira pela disponibilidade manifestada, bem como pelas sugestões e amizade.

A todos os docentes e investigadores do C.V.M.R, pelo apoio e horas de trabalho em conjunto, bem como pela amizade e solidariedade demonstradas. Um agradecimento especial à Teresa Barata e ao Pedro Pina essenciais à necessária paz de espírito.

Ao Prof. José Brandão pela ajuda, sugestões e disponibilidade demonstrada, um agradecimento especial.

Ao Victor pelas sugestões, amizade e troca de ideias.

Aos meus colegas de E.S.T / I.P.C.B (Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco) que contribuíram, com o seu apoio, para a realização deste trabalho. Um agradecimento especial à Aline, ao Armando e ao Jorge pelo apoio, ajuda e amizade.

Às empresas Calemar, Solubema, Xistos do Mourão e CUPA (Valdeorras) pelas facilidades concedidas na aquisição de dados e concessão de informação complementar.

À JNICT (Junta de Investigação Científica e tecnológica) pelo apoio concedido no âmbito do Programa Ciência

À minha família agradeço a paciência e carinho sem os quais não teria sido possível concretizar o presente trabalho.

À Paula e à Susana pelo verão.

## Índice Geral

DEDICATÓRIA	III
RESUMO	IV
PALAVRAS CHAVE	IV
ABSTRACT	V
KEY - WORDS	V
AGRADECIMENTOS	VI
ÍNDICE GERAL	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS	X

<b>I - Introdução</b>	<b>I</b>
<b>I.1- O Estado da arte, metodologia genérica e plano de trabalhos.</b>	<b>2</b>
<b>I.2 - Apresentação e enquadramento metodológico da investigação proposta.</b>	<b>7</b>
<b>II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária</b>	<b>14</b>
<b>II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo</b>	<b>15</b>
<b>II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento da informação</b>	<b>28</b>
<i>II.2.1 - Índice de recuperação versus índice de qualidade</i>	<i>33</i>
<i>II.2.2 - Abordagem local</i>	<i>40</i>
<i>II.2.3 - Abordagem Regional - Referenciais e coordenadas</i>	<i>43</i>
<b>II.3 - Construção de uma variável de síntese - Índice. Aplicação da Análise factorial de Correspondências</b>	<b>45</b>
<b>II.4 - Análise estrutural</b>	<b>48</b>
<i>II.4.1 - Variogramas experimentais</i>	<i>49</i>
<i>II.4.1.1 - Variogramas locais</i>	<i>49</i>
<i>II.4.1.2 - Variogramas regionais. Definição de anisotropia</i>	<i>58</i>
<i>II.4.2 - Interpretação do modelo proposto face à estrutura geológica da região</i>	<i>61</i>

---

<b>II.5 - Estimação de índices de recuperação/qualidade</b>	65
<i>II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais:</i>	
<i>A - A pedreira de mármore de Mouro (Calemar);</i>	66
<i>B - A pedreira de xisto de Mourão;</i>	70
<i>C - A pedreira de ardósia de Valdeorras</i>	85
<i>II.5.2 - Apresentação e validação de um exemplo regional a partir de informação local: as pedreiras do Monte da Vigária (Solubema)</i>	95
<b>II.6 - Incorporação de informação regional</b>	104
<i>II.6.1 - Determinação de uma função deriva: os acidentes regionais</i>	104
<i>II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes: utilização de um Sistema de informação Geográfica (IDRISI)</i>	107
<b>II.7 - Krigagem com deriva externa</b>	121
<i>II.7.1 - Utilização de distâncias aos acidentes regionais</i>	121
<i>II.7.1.1 - Determinação de distâncias a acidentes</i>	124
<i>II.7.1.2 - A menor distância euclidiana</i>	134
<i>II.7.2 - Utilização de informação "Soft" - cálculo e incorporação de resíduos</i>	148
<b>Conclusões</b>	157
<b>Bibliografia</b>	160

## Índice de Figuras e Tabelas

<i>Fig.I.2.1 - Representação de suportes numa frente de trabalho (rectangulares). Recolha fotográfica.</i>	10
<i>Fig.I.2.2 - Representação de suportes recolhidos em sondagens (lineares). Recolha pericial.</i>	10
<i>Fig.I.2.3 - Representação de suportes pontuais (placas de observação). Recolha pericial. Representação de aspectos texturais - placa de xisto de Mourão.</i>	10
<i>Fig.I.2.4 - Carta geológica. Informação regional.</i>	10
<i>Fig.I.2.5 - Metodologia aplicada na definição das variáveis índice (adaptado de Pereira et al, 1992).</i>	13
<i>Fig.II.1.1 - Localização geográfica da jazida de mármore de Estremoz-Borba-Vila-Viçosa (adaptado de Reynaud &amp; Vintém, 1992).</i>	17
<i>Fig.II.1.2 - Mapa geológico do anticlinal de Estremoz (adaptado de Reynaud &amp; Vintém, 1992).</i>	18
<i>Fig.II.1.3 - Coluna litoestratigráfica do anticlinal de Estremoz (Oliveira et al., 1991).</i>	19
<i>Fig.II.1.4 - Brecha vulcânica. Pedreira de cabanas.</i>	21
<i>Fig.II.1.5 - Pedreira de cabanas. Aspecto de dobras.</i>	22
<i>Fig.II.1.6 - Lineação de estiramento. Pedreira de cabanas.</i>	23
<i>Fig.II.1.7 - Bolsadas de brecha vulcânica isoladas - pedreira de cabanas.</i>	23
<i>Fig.II.1.8. - Boudinagem - comportamento dúctil do mármore em oposição às inclusões de xisto - pedreira do Rosal.</i>	24
<i>Fig.II.1.9 - Duas fases de dobramento - pedreira do Rosal.</i>	24
<i>Fig.II.1.10 - Dolomitos primários sobre os mármore - pedreira de Encostinha.</i>	25
<i>Fig.II.1.11 - Idem II.1.10.</i>	25
<i>Fig.II.1.12 - Figuras de interferência - pedreira de Encostinha.</i>	26
<i>Fig.II.1.13 - Idem II.1.12.</i>	26
<i>Fig.II.1.14 - Representação esquemática de inclusões de alinhamento paralelo à estratificação (recife?) acima do acidente (a) e de vergada dobrada abaixo do acidente (b).</i>	27
<i>Fig.II.2.1 - Codificação de atributos.</i>	30
<i>Fig.II.2.2 - Representação gráfica dos atributos e respectivas classes.</i>	33
<i>Fig.II.2.3 - Representação do output resultante da digitalização de descontinuidades num</i>	34

suporte $n$ .	
<i>Fig.II.2.2.1 – Projecção de coordenadas num referencial único para uma pedreira.</i>	41
<i>Fig.II.2.3.1 – Matriz ortogonal de rotação.</i>	44
<i>Fig.II.2.3.2 – Transformação de coordenadas para um único referencial regional.</i>	45
<i>Fig.II.4.1.1 – Semi-Variograma experimental da pedreira de Mouro - Omnidireccional.</i>	50
<i>Fig.II.4.1.2 – Semi-Variograma experimental da pedreira VA. Omnidireccional.</i>	51
<i>Fig.II.4.1.3 – Semi-Variograma experimental da pedreira VB. Omnidireccional.</i>	51
<i>Fig.II.4.1.4 – Semi-Variograma experimental da pedreira VE. Omnidireccional.</i>	52
<i>Fig.II.4.1.5 – Semi-Variograma experimental da pedreira VG. Omnidireccional.</i>	52
<i>Fig.II.4.1.6 – Semi-Variograma experimental da pedreira VI. Omnidireccional.</i>	53
<i>Fig.II.4.1.7 – Semi-Variograma experimental da pedreira VK. Omnidireccional.</i>	53
<i>Fig.II.4.1.8 – Semi-Variograma experimental da pedreira VO. Omnidireccional.</i>	54
<i>Fig.II.4.1.9 – Semi-Variograma experimental da pedreira VOG. Omnidireccional.</i>	54
<i>Fig.II.4.1.10 - Semi-Variograma experimental da pedreira VS. Omnidireccional.</i>	55
<i>Fig.II.4.1.11 - Semi-Variograma experimental da pedreira VX. Omnidireccional.</i>	55
<i>Fig.II.4.1.12 - Semi-Variograma experimental da pedreira VZ. Omnidireccional.</i>	56
<i>Fig.II.4.1.13 - Semi-Variograma experimental da pedreira VN. Omnidireccional.</i>	56
<i>Fig.II.4.1.14 - Semi-Variograma experimental da pedreira VC. Omnidireccional.</i>	57
<i>Fig.II.4.1.15 - Semi-Variograma experimental segundo a direcção SE-NW (b).</i>	59
<i>Fig.II.4.1.16 - Semi-Variograma experimental segundo a direcção NE-SW (a).</i>	59
<i>Fig.II.4.1.17 - Elipse de anisotropia. Verifica-se a coincidência espacial com os eixos maiores do anticlinal.</i>	60
<i>Fig.II.4.2.1 - Semi-Variograma omnidireccional - passo 1m.</i>	63
<i>Fig.II.4.2.2 - Semi-Variograma teórico - direcção NE-SW.</i>	64
<i>Fig.II.4.2.3 - Semi-Variograma teórico - direcção NW-SE.</i>	64
<i>Fig.II.5.1.1 - Histograma para os valores experimentais da variável índice na pedreira de Mouro.</i>	67
<i>Fig.II.5.1.2 - Semi-Variograma omnidireccional para a pedreira de Mouro.</i>	68
<i>Fig.II.5.1.3 - Mapa dos blocos Krigados para a pedreira de Mouro.</i>	69

<i>Fig.II.5.1.4 - Divisões tectono-estratigráficas da zona de Ossa - Morena em Portugal (segundo Oliveira et al., 1991).</i>	71
<i>Fig.II.5.1.5 - Xisto de Mourão.</i>	72
<i>Fig.II.5.1.6 - Localização geográfica da pedreira dos xistos de Mourão.</i>	73
<i>Fig.II.5.1.7 - Excerto da folha nº41 - c (Mourão).</i>	74
<i>Fig.II.5.1.8 - Planta da pedreira com a localização das frentes estudadas (J. Rico, 1996).</i>	76
<i>Fig.II.5.1.9 - Frente nº 7 e suportes de observação (1 x 0.5 m).</i>	77
<i>Fig.II.5.1.10 - Semi-Variograma índice, direcção horizontal, X (0-0).</i>	78
<i>Fig.II.5.1.11 - Semi-Variograma índice, direcção horizontal Y (90-0).</i>	79
<i>Fig.II.5.1.12 - semi-Variograma índice, direcção vertical, Z (0-90).</i>	79
<i>Fig.II.5.1.13 - Índice estimado por Krigagem Ordinária nos diferentes pisos.</i>	81
<i>Fig.II.5.1.14 - Zonamento da pedreira.</i>	82
<i>Fig.II.5.1.15 - Percentagem relativa do valor do índice por zona.</i>	83
<i>Fig.II.5.1.16 - Mapa Geológico de Espanha (in Lorenzo, Barros, 1994).</i>	86
<i>Fig.II.5.1.17 - Aspecto de frentes em pisos diferentes cotas.</i>	87
<i>Fig.II.5.1.18 - Frente de desmonte.</i>	87
<i>Fig.II.5.1.19 - Semi-Variograma, omnidireccional, para o índice de qualidade.</i>	91
<i>Fig.II.5.1.20 - Valores estimados por Krigagem Ordinária para o piso a 1360m.</i>	92
<i>Fig.II.5.1.21 - Valores estimados por Krigagem Ordinária para o piso a 1365m.</i>	92
<i>Fig.II.5.1.22 - Valores estimados por Krigagem Ordinária para o piso a 1370m.</i>	93
<i>Fig.II.5.1.23 - Valores estimados por Krigagem Ordinária para o piso a 1375m.</i>	93
<i>Fig.II.5.2.1 - Resultados dos valores estimados pelo teste do ponto fictício por krigagem ordinária versus dados reais.</i>	98
<i>Fig.II.5.2.2 - Histograma dos valores experimentais do índice.</i>	99
<i>Fig.II.5.2.3 - Primeiro piso estimado por krigagem ordinária.</i>	100
<i>Fig.II.5.2.4 - Segundo piso estimado por krigagem ordinária.</i>	101
<i>Fig.II.5.2.5 - Terceiro piso estimado por krigagem ordinária.</i>	102
<i>Fig.II.5.2.6 - Quarto piso estimado por krigagem ordinária.</i>	103
<i>Fig.II.6.2.1 - Carta geral das pedreiras e acidentes do Monte da Vigária.</i>	109

<i>Fig.II.6.2.2 - Representação da globalidade dos acidentes.</i>	111
<i>Fig.II.6.2.3 - Representação do Monte da Vigária em modo raster.</i>	112
<i>Fig.II.6.2.4 - Representação da fracturação.</i>	113
<i>Fig.II.6.2.5. - Representação dos Metavulcanitos.</i>	114
<i>Fig.II.6.2.6 - Representação dos filões doleríticos.</i>	115
<i>Fig.II.6.2.7 - Representação do zonamento resultante do cálculo de distâncias à globalidade dos acidentes.</i>	117
<i>Fig.II.6.2.8 - Representação do zonamento resultante do cálculo de distâncias a falhas.</i>	118
<i>Fig.II.6.2.9 - Representação do zonamento resultante do cálculo de distâncias a filões.</i>	119
<i>Fig.II.6.2.10 - Representação do zonamento resultante do cálculo de distâncias a metavulcanitos.</i>	120
<i>Fig.II.7.1.1 - Diagrama de dispersão entre a variável índice e as distâncias aos filões ultrabásicos.</i>	127
<i>Fig.II.7.1.2 - Diagrama de dispersão entre a variável índice e as distâncias aos metavulcanitos.</i>	127
<i>Fig.II.7.1.3 - Diagrama de dispersão entre a variável índice e as distâncias às falhas.</i>	128
<i>Fig.II.7.1.4 - Diagrama de dispersão entre os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo linear.</i>	128
<i>Fig.II.7.1.5 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo linear.</i>	129
<i>Fig.II.7.1.6 - Diagrama de dispersão entre os valores reais os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo linear.</i>	129
<i>Fig.II.7.1.7 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo linear para distâncias com atrito.</i>	130
<i>Fig.II.7.1.8 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo linear para distâncias com atrito.</i>	130
<i>Fig.II.7.1.9 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltipla linear para distâncias com atrito.</i>	131
<i>Fig.II.7.1.10 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo polinomial para distâncias com atrito.</i>	131
<i>Fig.II.7.1.11 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo polinomial para distâncias com atrito.</i>	132

<i>Fig.II.7.1.12 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo polinomial para distâncias com atrito.</i>	132
<i>Fig.II.7.1.13 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo logarítmico para distâncias com atrito.</i>	133
<i>Fig.II.7.1.14 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltipla logarítmico para distâncias com atrito.</i>	133
<i>Fig.II.7.1.15 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltipla logarítmico para distâncias com atrito.</i>	134
<i>Fig.II.7.1.16 - Histograma para as classes de distância a acidentes regionais.</i>	135
<i>Fig.II.7.1.17 - Curva de correlação entre os valores do índice e as distâncias a acidentes.</i>	135
<i>Fig.II.7.1.18 - Histograma para os valores do índice de acordo com a função ajustada.</i>	136
<i>Fig.II.7.1.19 - Scatterplot dos valores obtidos no teste do ponto fictício utilizando as distâncias como função deriva.</i>	137
<i>Fig.II.7.1.20 - Scatterplot dos valores obtidos no teste do ponto fictício utilizando os valores do índice recalculado com a função ajustada</i>	137
<i>Fig.II.7.1.21 - Primeiro piso estimado por krigagem com deriva externa, utilizando as distâncias ao acidente mais próximo.</i>	139
<i>Fig.II.7.1.22 - Segundo piso estimado por krigagem com deriva externa, utilizando as distâncias ao acidente mais próximo.</i>	140
<i>Fig.II.7.1.23 - Terceiro piso estimado por krigagem com deriva externa, utilizando as distâncias ao acidente mais próximo.</i>	141
<i>Fig.II.7.1.24 - Quarto piso estimado por krigagem com deriva externa, utilizando as distâncias ao acidente mais próximo.</i>	142
<i>Fig.II.7.1.25 - Primeiro piso estimado por krigagem com deriva externa utilizando a função de correlação máxima.</i>	143
<i>Fig.II.7.1.26 - Segundo piso estimado por krigagem com deriva externa utilizando a função de correlação máxima.</i>	144
<i>Fig.II.7.1.27 - Terceiro piso estimado por krigagem com deriva externa utilizando a função de correlação máxima.</i>	145
<i>Fig.II.7.1.28 - Quarto piso estimado por krigagem com deriva externa utilizando a função de correlação máxima.</i>	146
<i>Fig.II.7.2.1 - Scatterplot dos valores obtidos no teste do ponto fictício para a informação residual.</i>	151
<i>Fig.II.7.2.2. - Primeiro piso estimado por krigagem com informação residual soft (residual Soft Kriging)</i>	152

<i>Fig.II.7.2.3. - Segundo piso estimado por krigagem com informação residual soft (residual Soft Kriging).</i>	153
<i>Fig.II.7.2.4. - Terceiro piso estimado por krigagem com informação residual soft (residual Soft Kriging).</i>	154
<i>Fig.II.7.2.5. - Quarto piso estimado por krigagem com informação residual soft (residual Soft Kriging).</i>	155
<i>Tabela II.4.2.1 - Parâmetros do modelo teórico adaptado às principais direcções da elipse de anisotropia.</i>	63
<i>Tabela II.5.1.1 - Variáveis e respectivas classes para a construção da variável índice.</i>	67
<i>Tabela II.5.1.2 - Arquétipos definidores do eixo discriminante (J.Rico, 1996.)</i>	77
<i>Tabela II.5.1.3 - Número total do tipo de blocos/piso.</i>	80
<i>Tabela II.5.1.4 - Arquétipos definidores do eixo discriminante.</i>	90
<i>Tabela II.5.2.1 - Resultados do teste do ponto fictício calculado para a totalidade de suportes.</i>	98
<i>Tabela II.7.1.1 - Resultados do teste do ponto fictício calculado por krigagem e utilizando como função de deriva externa as distâncias aos acidentes, para a totalidade de suportes.</i>	138
<i>Tabela II.7.1.2 - Resultados do teste do ponto fictício calculado por krigagem e utilizando como função deriva externa os valores do índice recalculado, para a totalidade de suportes.</i>	138



**I - Introdução***I.1- Estado da arte, metodologia genérica e plano de trabalhos*

Deste tempos remotos que as rochas ornamentais desempenharam um papel importante nas civilizações. A grande versatilidade, durabilidade, beleza e fácil conservação tornaram as rochas ornamentais atractivas tanto para a indústria de construção, pavimentação e revestimento de fachadas, como para matéria prima da arte escultórica. Por se tratar de um material natural, necessita, para a sua utilização, de ser extraído e transformado em elementos de dimensão e forma adequada para o fim pretendido, desde que reünam uma série de propriedades físicas, químicas e mecânicas que garantam a sua aptidão para a utilização pretendida.

A exploração destes recursos naturais tem evoluído ao longo dos tempos, verificando-se uma busca incessante de tecnologia capaz de melhorar e facilitar a actividade extractiva. Tratando-se, no entanto, de um recurso mineral não renovável, impõe-se, cada vez mais, investir, de igual modo, no racional e cuidadoso planeamento da sua exploração. A redução de material rejeitado (estéreis que implicam custos de produção e impactes negativos no ambiente), bem como a possibilidade de prever, *ex ante*, a obtenção de blocos de dimensões adequadas e elevada qualidade mecânica e estética, são, sumariamente, os objectivos mais urgentes do planeamento.

Torna-se, deste modo, prioritário definir cuidadosamente quais os atributos que de uma forma inequívoca condicionam a recuperação e os que são determinantes na definição da qualidade da rocha ornamental em estudo (na sua vertente físico/mecânica e na perspectiva estética).

As metodologias clássicas assentam prioritariamente no estudo do sistema de fracturação. O levantamento e consequente estudo das principais famílias de falhas e/ou

diaclasses permite a definição de um sistema de fracturação cuja caracterização quanto à atitude, espaçamento, abertura e volume (Grossmann, 1977; Silva, 1989, Casal Mouro, 1991, Chilés, 1989), permite elaborar, numa abordagem estritamente geométrica, uma previsão da blocometria média para cada pedreira (Silva, 1989; Taboada, 1993), ignorando, no entanto, a variabilidade sempre presente.

Embora de grande interesse, do ponto de vista da exploração de “dimensional stones”, a abordagem clássica mostra-se redutora, se o objectivo é atender a outras características que não a dimensão dos blocos. Nos últimos anos foram desenvolvidos trabalhos de investigação que pretendem desenvolver metodologias que permitam fazer a ponte entre as metodologias geológicas descritivas e os métodos analíticos da engenharia.

Verifica-se, por exemplo, que as abordagens puramente geométricas evoluem tendencialmente para a incorporação de parâmetros geométricos fractais, suportados por uma lógica fuzzy. A aplicação torna-se, deste modo muito mais completa e integradora, incorporando elementos recolhidos a diferentes escalas que se estendem desde a observação de dimensão milimétrica (observada na frente de trabalho) à caracterização regional, atingindo volumes consideráveis. O planeamento local (de uma pedreira, por exemplo) ou regional (área de implante de futuras pedreiras, por exemplo), ainda que assente em características meramente geométricas torna-se, deste modo, mais coerente, pela possibilidade de cruzar informação a diferentes escalas.

A aplicação da análise geoestatística da fracturação (Miller, 1979; Razak, 1979; La Pointe, 1980; Baecher, 1983; Blanchin *et al*, 1984) permitiu verificar que alguns dos atributos considerados (densidade da fracturação, por exemplo) tinham características espacialmente estruturadas. A aplicação da Teoria das Variáveis Regionalizadas torna-se, deste modo, possível, permitindo uma análise variográfica e a estimação por Krigagem (Almeida, 1992).

A incorporação de atributos não geométricos é especialmente requerida quando se pretende fazer o planeamento da exploração com base na “qualidade” da rocha. Nesta

abordagem, a geometria das descontinuidades, essencial na caracterização da recuperação do maciço, torna-se visivelmente insuficiente, não permitindo caracterizar, por exemplo, a vertente simbólica-estética, intimamente dependente de atributos qualitativos e oscilantes no tempo (moda!).

A construção de uma variável “índice”, capaz de quantificar a recuperação de pedreiras de mármore, para a optimização do planeamento da exploração, utiliza a Análise Factorial de Correspondências como algoritmo discriminante, capaz de sintetizar uma série de atributos, observados nas frentes da pedreira e/ou no maciço. Esses atributos (quantitativos e qualitativos) são combinados numa única variável, que tem um carácter regionalizado. O estudo estrutural desta variável transformada permite depois a estimação, por Krigagem, em zonas desconhecidas (Pereira *et al*, 1992; Albuquerque, 1993; Ribeiro, J, 1994).

Como seria de esperar no estabelecimento de uma nova metodologia em que a componente prática tem importância relevante, reveste-se de particular importância a amostragem dos atributos. A recolha de dados é um processo moroso que levanta problemas práticos que têm de ser ultrapassados através de aproximações razoáveis. A abordagem local (Pereira *et al*, 1992) implica a colheita de informação directamente nas frentes de trabalho ou nos tarolos de sondagens (Pereira *et al*, 1996).

No presente trabalho pretende-se abordar a necessidade da incorporação de dados relativos ao sistema de fracturação regional, mesmo quando se pretende elaborar o planeamento local de uma pedreira específica. Dito de outro modo, pretende-se combinar a variável “índice”, construída a partir das observações locais nas frentes de trabalho e/ou sondagens, com a tendência regional do maciço em termos dos grandes acidentes que, por questões de escala, não são observáveis localmente, mas que se repercutem a esse nível, como será ilustrado em casos concretos.

No primeiro capítulo, introdutório, apresentam-se o enquadramento metodológico e objectivos da metodologia proposta.

Seguidamente é exposto o primeiro caso, os mármore do Anticlinal de Estremoz - Monte da Vigária - focando o seu enquadramento geológico. A determinação de atributos relevantes, bem como a colheita e tratamento da informação recolhida, são abordados, avaliando a perspectiva da *recuperação*. Ainda no mesmo capítulo são apresentados exemplos de abordagem local e de uma abordagem regional.

A construção das variáveis de síntese - *Índices* - e subsequente Análise Estrutural - Variografia local e regional - é abordada no capítulo seguinte. A interpretação dos Modelos Teóricos propostos dos variogramas é feita com base no enquadramento geológico da região.

A estimação de um *Índice de Recuperação* é apresentado e validado com exemplos locais de mármore (pedreira de Mouro - Calemar) e de xisto (pedreira de Mourão) focando a especificidade dos dois casos, nomeadamente no que diz respeito aos atributos seleccionados.

A estimação de um *Índice de Qualidade* é apresentado e validado com um exemplo, também local, de ardósia (pedreira de Valdeorras). Neste caso, de salientar a recolha de dados a partir da observação e classificação de carotes de sondagens e a especificidade dos atributos seleccionados, neste caso ligados a uma avaliação do valor ornamental da rocha e não a aptidão para desmonte do maciço.

No mesmo capítulo apresenta-se e valida-se o exemplo do Monte da Vigária (Solubema). Neste caso, a colheita de informação é feita localmente (em cada pedreira) mas como é tratada em conjunto, as características regionais acabam por emergir.

A incorporação de informação regional, materializada pela construção de funções tendência, constitui o passo seguinte do corpo metodológico proposto. As funções tendência construíram-se tendo em conta distâncias a acidentes regionais ( falhas, filões ultra-básicos, metavulcanitos) (Cruz, 1998). O cálculo e incorporação destas distâncias implicou a digitalização e processamento dos mapas regionais do Monte da Vigária utilizando um Sistema de Informação Geográfica (IDRISI).

A estimação, na área proposta, é efectuada utilizando a Krigagem Ordinária bem como a Krigagem com Deriva Externa (utilizando as distâncias aos acidentes e alternativamente as funções de tendência como deriva externa) e ainda a Krigagem Soft (Soft Kriging), em que a informação Soft é dada pela função de tendência.

A Krigagem com Deriva Externa e da Krigagem Soft consiste na possibilidade de estimar uma variável dominante fazendo-a depender, linearmente, de uma ou mais variáveis secundárias cujos valores são conhecidos para a totalidade da área que se pretende estimar.

A originalidade desta metodologia, ainda restritamente aplicada (Wackernagel, 1995; Figueira, 1996; Goovaerts, 1997) reside no facto de permitir evidenciar características regionais em avaliações que partem de colheitas a escalas locais. No presente trabalho a aplicação destes algoritmos permitiu evidenciar características geológicas do maciço à escala da pedreira.

A análise e validação das cartas obtidas pelos diferentes métodos de estimação é feita por avaliação pericial dos técnicos responsáveis pela exploração, pela consistência da interpretação geológica dos resultados obtidos e pela discussão teórica da robustez dos algoritmos aplicados.



## I - Introdução

### I.2 - Apresentação e enquadramento metodológico da investigação proposta

A construção de uma variável “Índice”, capaz de quantificar a recuperação de pedreiras de rochas ornamentais, ou industriais, através de uma síntese das características geológicas do maciço e da pedra em causa e que possa servir de base para a optimização do planeamento da exploração, é um objectivo de interesse inegável para uma indústria que, cada vez mais, ocupa um lugar importante na economia nacional.

A definição de uma metodologia adequada foi abordada e desenvolvida em trabalhos anteriores (Albuquerque, 1993; Ribeiro, 1994). A recolha e pré-processamento da informação no campo, constitui a primeira etapa. A incorporação de informação o mais exhaustiva possível tornou-se o objecto de maior preocupação nesta primeira e decisiva etapa. Na realidade, os diferentes exemplos nem sempre nos proporcionam recolha de informação de igual “*densidade*”, “*forma*” ou “*escala*”, o que tem o significado seguinte:

a) No caso dos maciços marmóreos (e em alguns casos de ardósia e xisto como a pedreira de Mourão), o desmonte efectuado por corte com fio diamantado, disponibiliza frentes de trabalho verticais que correspondem a planos de intersecção com os principais planos de descontinuidade do maciço em estudo. fotografia, à mesma escala, de todas as frentes de trabalho, permite digitalizar, em gabinete, imagens interpretadas onde as lineações de intersecção, das principais descontinuidades do maciço (falhas e diaclases) com o plano da frente, são classificadas de acordo com um conjunto de variáveis que predominantemente condicionam o desmonte dos blocos e, conseqüentemente, a rentabilidade da exploração. A digitalização, permite registar, de uma forma adequada ao tratamento informático, as características individuais de cada unidade estatística (suporte) interpretadas, ainda, pelo confronto com as observações de campo e constituindo, deste modo, a informação “*local*” recolhida directamente na pedreira.

b) A informação recolhida em campanhas de sondagens é uma mais valia, em termos de informação, que de forma alguma poderá ser desprezada. Torna possível, ainda que numa dada direcção, obter uma informação contínua no sentido vertical, permitindo um conhecimento do maciço, em profundidade, que dificilmente se obtém se nos cingirmos à informação de superfície recolhida nas frentes de exploração, mesmo quando existem, em alguns casos, vários pisos a cota diferente. A unidade estatística (suporte) de registo de ocorrências individuais é substancialmente diferente do caso anterior. Enquanto no primeiro caso temos uma janela rectangular de observação (*Fig.I.2.1*), neste outro as observações são obtidas em suportes lineares (*Fig.I.2.2*). A avaliação estrutural (variografia) subsequente, passará pela uniformização de todos os suportes de recolha, de modo a que a informação possa ser processada globalmente. Resta acrescentar que, por vezes, se torna importante a incorporação de informação pontual (*Fig.I.2.3*) o que constitui um terceiro tipo de registo. De facto a observação de características intimamente ligadas à qualidade da pedra, como a granulometria ou a textura, fazem sentido a uma escala macroscópica ou mesmo microscópica, em oposição às características essencialmente ligadas à definição da recuperação, mais próximas de uma caracterização do maciço e deste modo observáveis a escalas, predominantemente, megascópicas.

c) Finalmente, no seguimento do exposto no ponto anterior, resta referir a necessidade de incorporação de informação regional. Este tipo de informação, que localmente pode perder o seu impacto, é importante na definição de manchas regionais de favorabilidade e será abordada em capítulo seguinte (*Fig.I.2.4*).

O último aspecto a referir, no contexto das técnicas de amostragem, está relacionado com a densidade de amostragem. Por outras palavras, este problema prende-se com o facto de que nos deparamos, frequentemente, com a impossibilidade de uma recolha que possa ser considerada homogeneamente densa. As limitações surgem, deste modo, de duas formas diferentes: limitando o número e continuidade espacial dos pontos experimentais; limitando a observação de atributos.

Deste modo, se se considerar, por exemplo, a construção de dois índices (**índice de qualidade/índice de recuperação**) à custa de atributos específicos, muitas vezes observados e registados e codificados a partir de suportes e escalas diferentes, facilmente se percebe que, em muitos dos casos, apresentarão uma densidade de amostragem diferente.

A construção das variáveis de síntese quantitativas, **índices**, constitui o passo seguinte. Adopta-se, neste trabalho, a metodologia interactiva já apresentada em trabalhos anteriores (Pereira *et al.*, 1992; Albuquerque, T., 1993; Ribeiro, J., 1994), que sumariamente consiste na definição de uma escala cujos extremos correspondem à melhor e pior recuperação/qualidade previsível, para os atributos considerados. Os, então construídos, vectores “BOM” e “MAU”, que caracterizam os pólos extremos, incorporam as “melhores” e as “piores” classes dos atributos considerados, do ponto de vista da explorabilidade ou qualidade do material. A Análise Factorial de Correspondências é aplicada, seguidamente, como algoritmo discriminante, baseado nos dois extremos anteriormente definidos e originando o “índice” como a projecção de cada observação experimental no eixo discriminante que resulta da Análise Factorial de Correspondências (*cf p.39*).

Uma vez que se pretende estimar as variáveis construídas, torna-se necessário encontrar um modelo que tome em conta a sua distribuição espacial, tomando os “**Índices**” como **Variáveis Regionalizadas** e procedendo ao seu estudo estrutural, por variografia e subsequente estimação, recorrendo, nas diferentes abordagens, à Krigagem Ordinária, Krigagem com Deriva Externa e a Soft Kriging.

A validação é o passo seguinte e processa-se, com base no conhecimento pericial dos técnicos e na informação geológica, na *abordagem regional*. Na *abordagem local*, é possível ter um critério mais “objectivo”, pelo confronto entre valores reais e estimados nos blocos, a metodologia genérica aplicada neste trabalho é interactiva (*Fig.I.5*) (Pereira *et al*, 1992) permitindo a introdução de novos atributos ou a redefinição dos já considerados, de forma a que a variável (“índice”) final se aproxime cada vez mais da realidade que se pretende caracterizar, ou seja,; dado um conjunto de atributos, o mesmo é submetido à AFC, produzindo um índice que é considerado uma Variável Regionalizada (VR).

A determinação da continuidade espacial desta VR - variografia - é realizada de acordo com a escala de trabalho pretendida. Em trabalhos anteriores (Pereira *et al*, 1992) esta avaliação é feita à escala da exploração - pedreira. No trabalho proposto a avaliação estrutural foi feita à escala regional. Para uma correcta interpretação realizou-se inicialmente o estudo local e, tendo em conta as características geológicas do maciço, determinou-se a continuidade espacial, regional, para a variável. O ajuste de um Modelo Teórico permitiu a estimação da variável em volumes desconhecidos aplicando diferentes metodologias da Geoestatística e da Geoestatística Multivariada, nomeadamente a Krigagem Ordinária (Pereira *et al*, 1992; Albuquerque, 1993; Ribeiro, 1994); Krigagem com Deriva Externa e a Krigagem Soft.

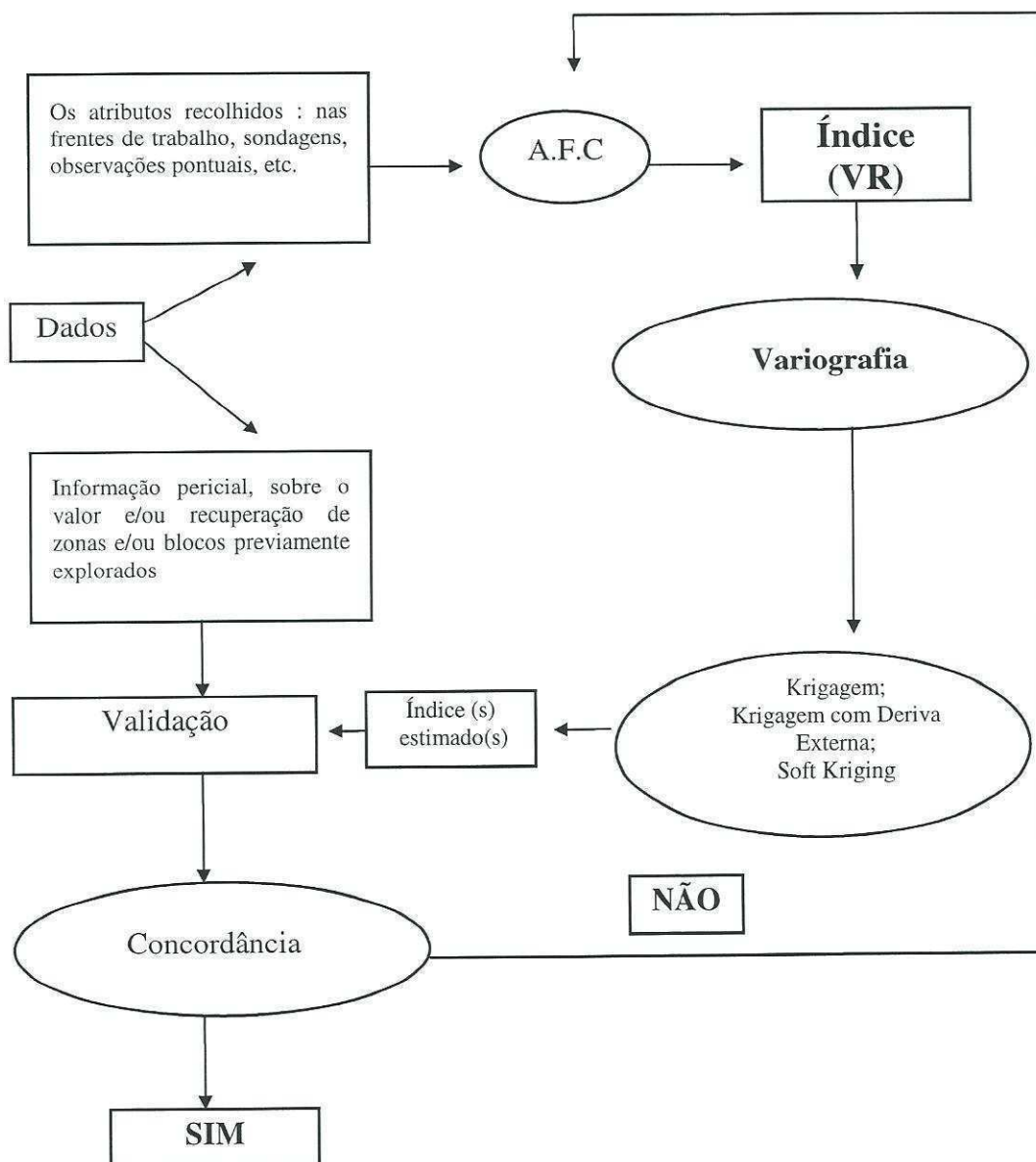


Fig. I.2.5 - Metodologia aplicada na definição das variáveis Índice (adaptado de Pereira et al, 1992)

**II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**  
*II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo*

## **II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**

### *II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo*

A exploração de rochas ornamentais, pela sua importância económica e também pelo importante impacto ambiental que impõe às zonas exploradas, não pode nem deve ser feita arbitrariamente, como tem acontecido, na grande maioria dos casos do passado. O estudo do anticlinal de Estremoz suscitou o interesse de várias gerações de investigadores. Tal como referido por Silva, 1997, Nery Delgado (1905) é o iniciador sendo o seu trabalho retomado por Carrington da Costa (1931) e Carlos Teixeira (1954, 1966), o qual afirma que a presente estrutura corresponderia ao prolongamento, para o nosso território, dos calcários da Serra de Alconera (Zafra, Espanha); Silva & Camarinhas (1957) elaboram o primeiro estudo global da área, com a execução de um levantamento da cartografia geológica da região e caracterização da composição química de algumas litologias aflorantes, e procedem a uma primeira abordagem económica da actividade extractiva existente. Na verdade, todas as questões relacionadas com a optimização/planeamento das explorações começaram a ter uma importância enorme, uma vez que o interesse económico aliado à problemática ambiental se tornaram na maior questão que se põe aos industriais da região.

As relações existentes entre a exploração, a problemática ambiental e a contribuição do planeamento para a minimização dos problemas criados pela actividade extractiva são abordados por Carlos Costa (Costa, 1992).

Os estudos executados por Francisco Gonçalves (1970 a 1974) contribuem, de maneira fundamental, para o conhecimento geológico e económico pormenorizado da região, nomeadamente com a execução da “Carta das Rochas Carbonatadas de Estremoz” (1972).

Gomes da Silva (1989) procede à caracterização minero-petrográfica, geomecânica e geoquímica de algumas das variedades comerciais de mármoreos, estuda a sua alterabilidade

## II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária

### II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo

---

e efectua o estudo da fracturação do maciço na zona da herdade da Vigária (Vila Viçosa).

Outros trabalhos que abordam igualmente o anticlinal de Estremoz são os elaborados por Carvalho *et al.* (1970), Gonçalves & Coelho (1974), Ribeiro *et al.* (1979), Oliveira (1984), Carvalhosa *et al.* (1987), Martins (1989), Almeida (1992), Reynaud e Vintém (1992), Albuquerque (1993), Ribeiro (1994), Lopes (1995), Luís (1995), Silva (1997).

Os trabalhos referidos anteriormente partem de pontos de vista e de metodologias diversas. Abordando aspectos especificamente geológicos, Carvalho *et al.* (1970), Gonçalves & Coelho (1974), Ribeiro *et al.* (1979); referindo aspectos geotécnicos/ambientais e hidrogeológicos Oliveira (1984), Carvalhosa *et al.* (1987). Numa vertente de planeamento e optimização das explorações Almeida (1992) Albuquerque (1993) Luís (1995) e Silva (1997) e com um caracter economicista Ribeiro (1994).

O objecto deste estudo localiza-se no Alto Alentejo, nos distritos de Évora e Portalegre e consiste numa extensa faixa com cerca de 40 Km de desenvolvimento segundo o eixo longitudinal, orientado sensivelmente na direcção NW-SE, estendendo-se entre as Vilas de Sousel ( a NW) e do Alandroal (a SE) , e passando por Estremoz, Borba e Vila Viçosa, e com aproximadamente 5 a 7 Km de desenvolvimento segundo o eixo transversal (*Fig. II.1.1*).

## II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária

### II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo



Fig.II.1.1 -Localização geográfica da jazida de mármore de Estremoz-Borba- Vila Viçosa (adap. de Reynaud & Vintém, 1992)

O conjunto de afloramentos designado por “Mármoreos de Estremoz” consiste numa extensa faixa de rochas carbonatadas, de idade paleozóica, dobrada em anticlinal assimétrico, com vergência para NE e fechos periclinais nas extremidades NW (Sousel) e SE (Alandroal) (Fig.II.1.2).

ANTICLINAL DE ESTREMOZ-BORBA-VILA VIÇOSA

MAPA GEOLÓGICO DIGITALIZADO

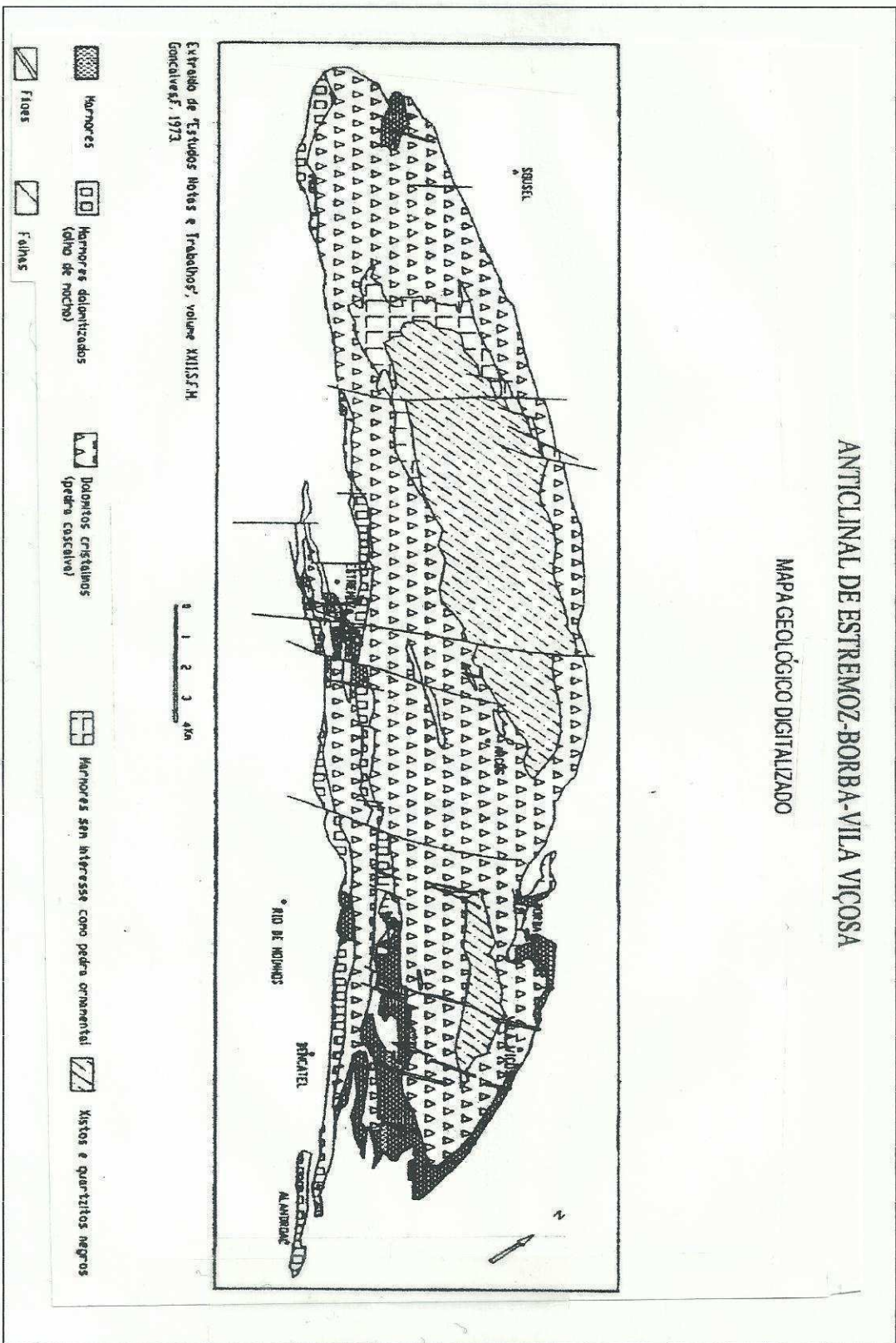


Fig. II.1.2 - Mapa Geológico do Anticlinal de Estremoz (adap. de Reynaud & Vintém, 1992)

## II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária

### II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo

Do ponto de vista da indústria extractiva dos mármoreos, a zona produtiva - as formações geológicas com interesse para a indústria das rochas ornamentais - é limitada inferiormente (a muro) por rochas dolomíticas cristalinas (calcários dolomíticos cristalinos ou dolomitos primários, localmente conhecidos como "pedra cascalva"), calcários calcíticos cristalinos (vulgo mármoreos) muito xistificados e metavulcanitos ácidos e básicos, e superiormente (a tecto) por metavulcanitos e xistos negros com líditos; em alguns locais, os mármoreos apresentam-se cobertos por pequenas manchas de calcários lacustres (Fig.II.1.3).

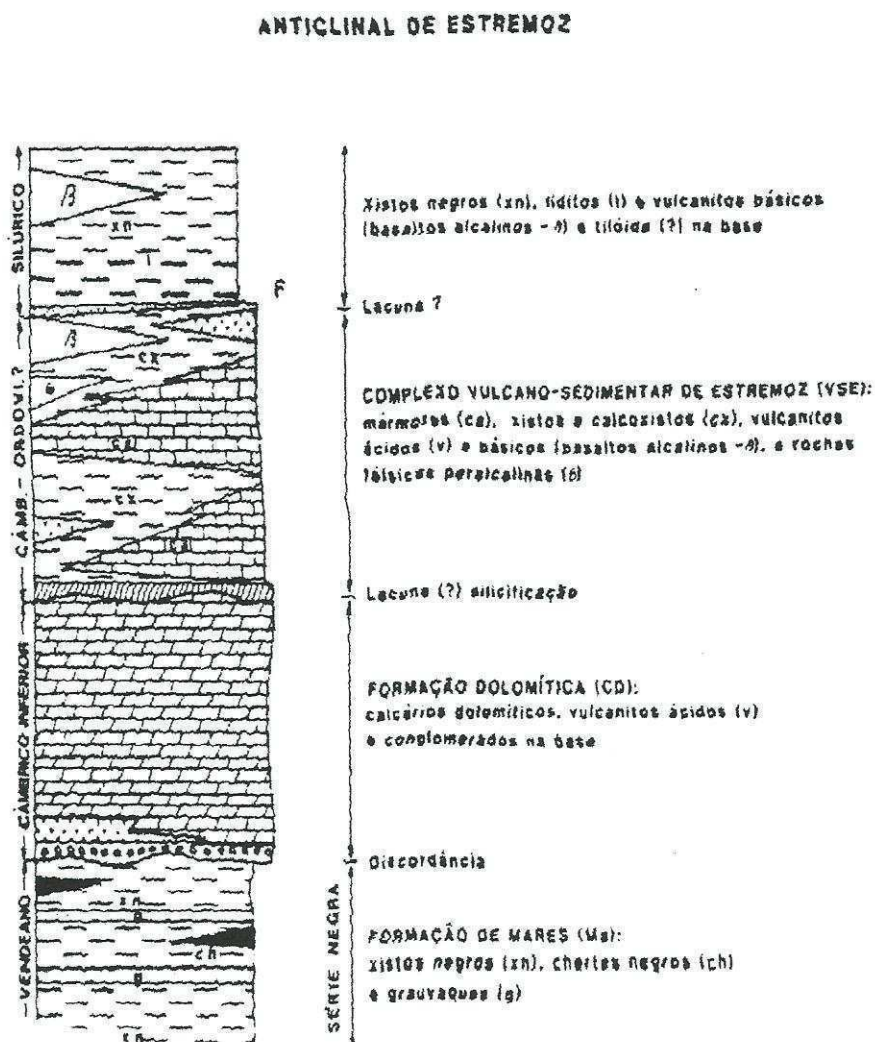


Fig.II.1.3 - Coluna litoestratigráfica do anticlinal de Estremoz (Oliveira et al., 1991).

## II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária

### II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo

---

O contacto inferior da zona produtiva é marcado frequentemente pelo aparecimento de intercalações pouco espessas de dolomito primário e mármore ou de um nível silicioso descontínuo, enquanto o contacto superior é geralmente marcado pelo aparecimento de mármoreos cinzentos (por vezes cobertos por mármore branco) e de materiais “xistentos” (metavulcanitos e xistos).

O conjunto carbonatado com interesse económico é constituído por calcários calcíticos cristalinos (mármoreos), de coloração variável (branco, creme, rosa e azul-cinzento), e grão fino a médio recristalizado, mais ou menos venados (“vergada”, resultante da presença de intercalações xistentas, geralmente decimétricas ou centimétricas), por vezes xistificados, sobretudo na sua base, com intercalações de metavulcanitos ácidos e básicos e calcoxistos, apresentando-se dobrados e fracturados.

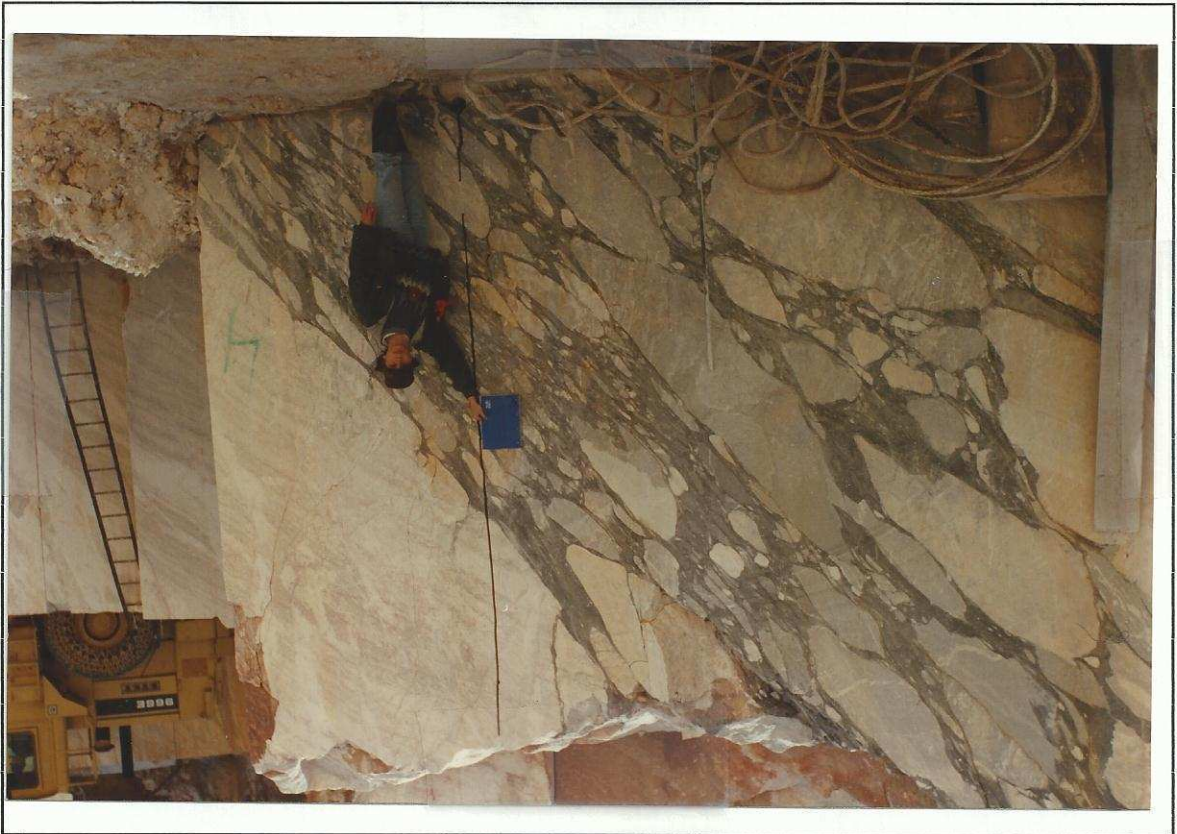
Outro aspecto de importância relevante no planeamento da exploração, uma vez que é determinante na qualidade da pedra a extrair, é o problema da carsificação (objecto de estudo específico em desenvolvimento). Surgem frequentemente “campos de lapiás”, grutas e descontinuidades “abertas”, localmente designadas por “croca”, fazendo-se a circulação de água no maciço essencialmente ao longo de fracturas e outros planos de fraqueza, e sob o controle de corpos filonianos presentes (Silva, 1997).

Dentro do anticlinal de Estremoz existe assimetria estratigráfica entre o N e o S. Os xistos conservam a história da deformação (xistosidades) - tem um comportamento menos fluido que o mármore. Os mármoreos comportam-se de uma forma fluida - metamorfismo - não conservando a deformação. O material não calcítico deposita-se, por migração, nos planos resultantes da solução por pressão (“pressure solution” - Ramsay).

Os padrões de interferência são visíveis em algumas pedreiras (*Fig.II.1.4 a II.1.13*) testemunhando dois episódios de deformação (intersecção de várias fases).

**II - Os Mármorez do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**  
*II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo*

Na pedreira de cabanas, observam-se formações brechoides de características vulcânicas. O registo da deformação é por vezes bastante notório neste tipo de formações (Fig. II.1.4 e II.1.5)



*Fig. II.1.4 - Brecha vulcânica. Pedreira de Cabanas.*

A estratificação identifica-se nos xistos com uma atitude média próxima de  $N30^{\circ}W$  e inclinação variável (a estrutura está dobrada). A deformação é contemporânea do metamorfismo - são visíveis as dobras nos xistos - que tem um comportamento plástico - e não nos mármorees que tiveram um comportamento fluido.

*Fig. II.1.5 - Pedreira de Cabanas. Aspecto de dobras*



**II - Os Mármorez do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**

*II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo*



*Fig. II.1.6 - Lineação de estiramento - Pedreira de Cabanas.*



*Fig. II.1.7 - Bolsadas de Brecha Vulcânica isoladas - Pedreira de Cabanas.*

II - Os Mármorez do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária  
II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo

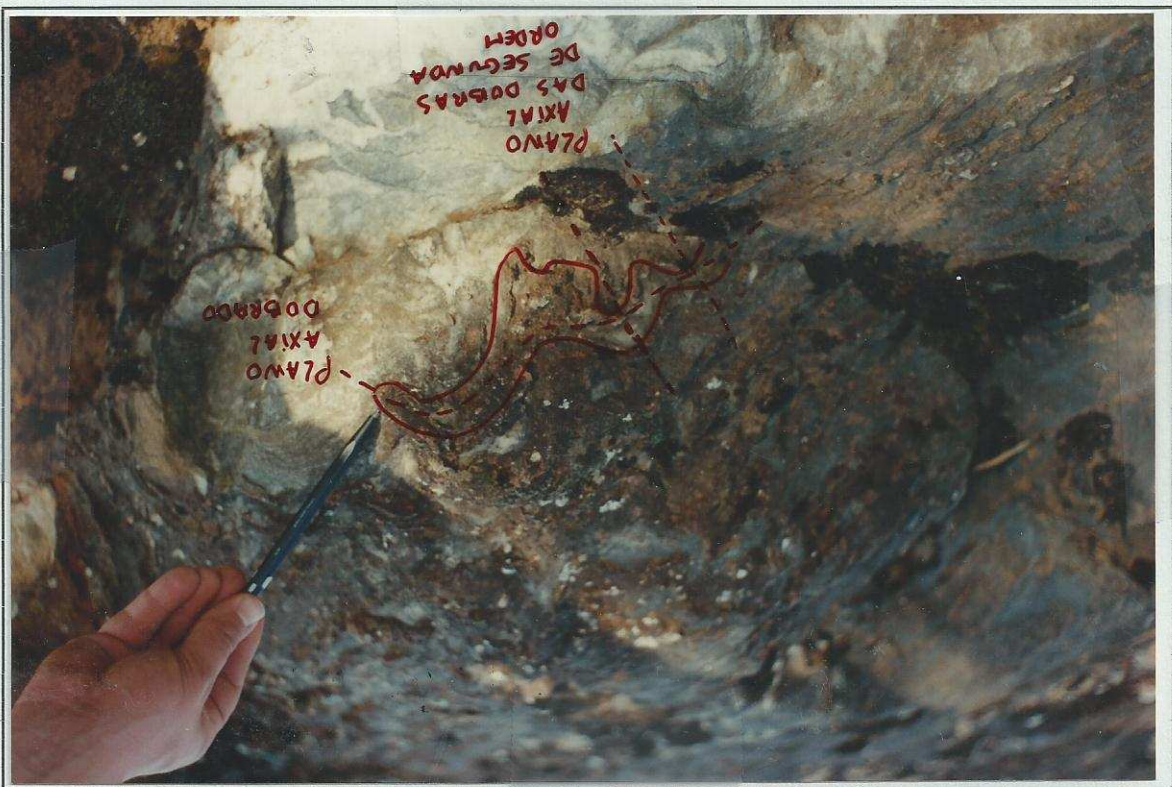
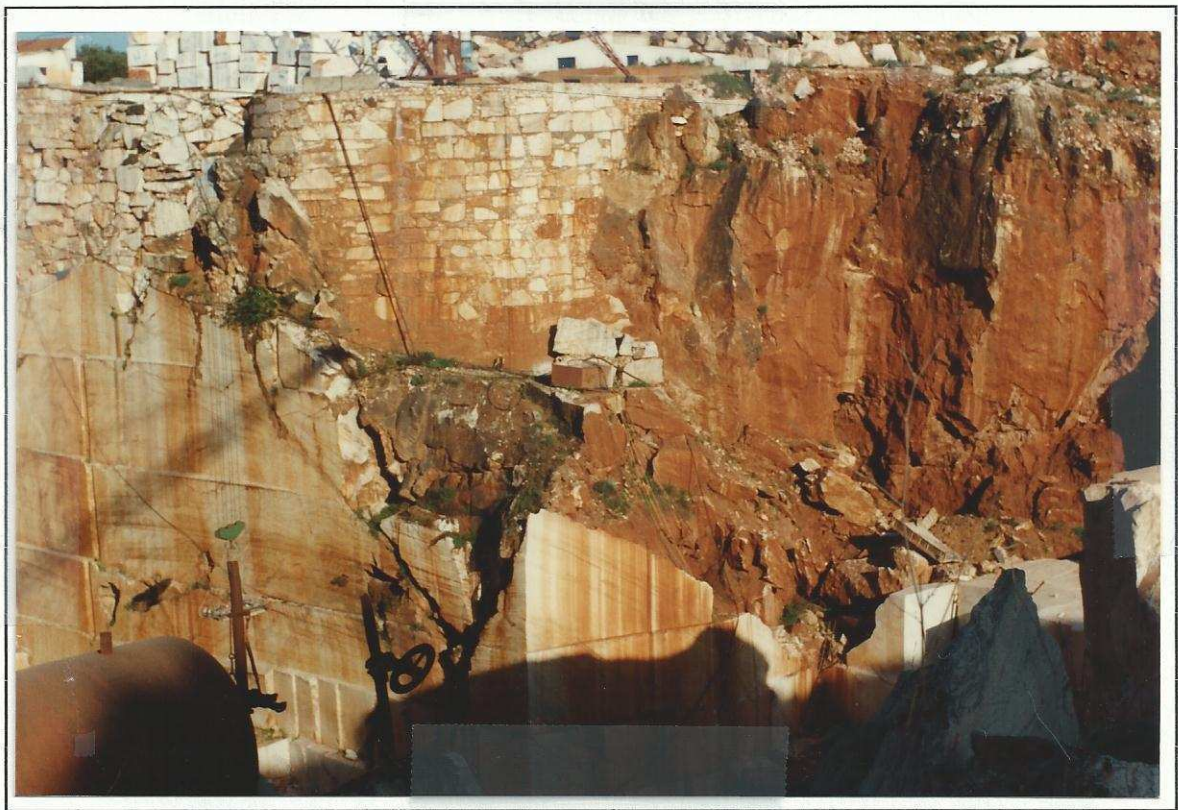


Fig. II.1.8 - Boudinagem - comportamento dúctil do mármore em oposição às inclusões de xisto - Pedreira do Rosal



Fig. II.1.9 - Duas fases de dobramento - Pedreira do Rosal.

**II - Os Mármorez do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**  
II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo



*Fig. II.1.10 - Dolomitos primários sobre os mármorez - Pedreira de Encostinha.*



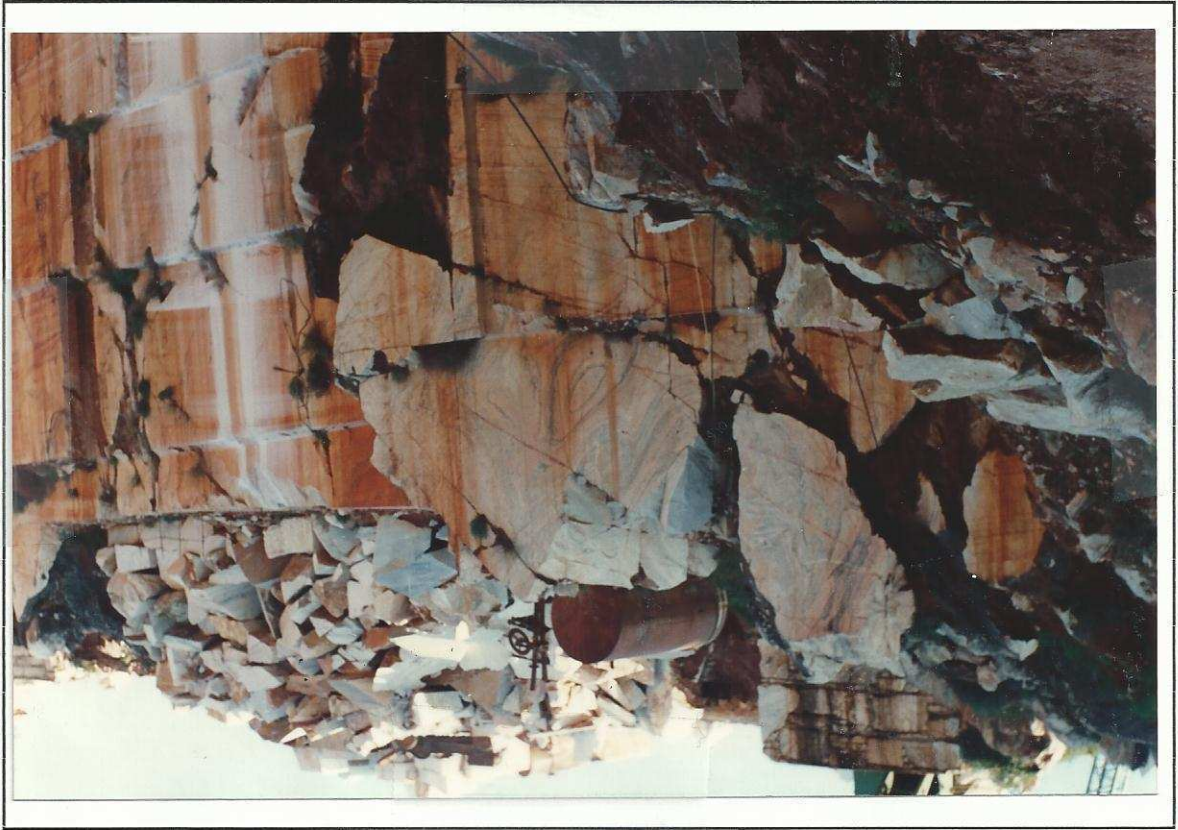
*Fig. II.1.11 - Idem II.1.10*

**II - Os Mármorez do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**

*II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo*



*Fig. II.1.12 - Figuras de interferência - Pedreira da Encostinha.*



*Fig. II.1.13 - Idem II.1.12*

## II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária

### II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo

As heterogeneidades de atitude da “vergada” (inclusões doleríticas e metavulcaníticas) indiciam também a presença de pelo menos duas fases de deformação uma vez que na mesma frente encontramos um limite acima do qual a vergada é linear e abaixo da qual é dobrada (Fig.II.1.14).

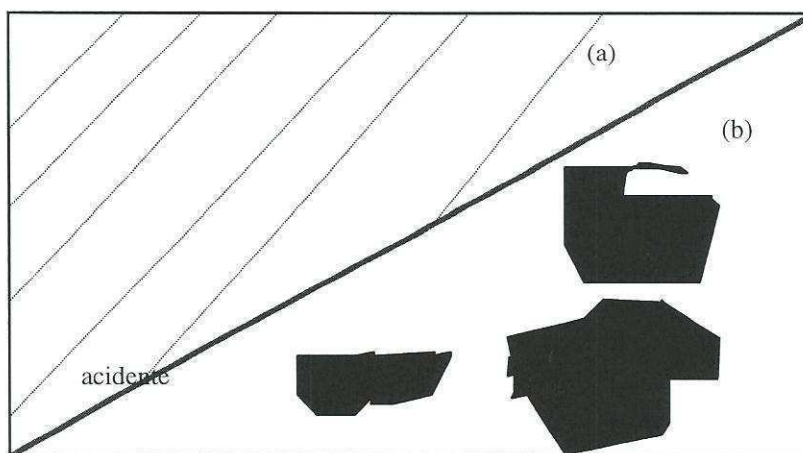


Fig.II.1.14- Representação esquemática de inclusões de alinhamento paralelo à estratificação (recife?) acima do acidente (a) e de vergada dobrada abaixo do acidente (b)

Em termos tectónicos, a jazida de mármoreos apresenta-se como uma estrutura em anticlinal complexo, redobrado, mostrando vergência para NE, responsável pelas seguintes particularidades (Carvalhosa *et al.*, 1987):

- no flanco NE, as bancadas apresentam-se verticalizadas e com espessuras da ordem dos 150m;
- no flanco SW, as bancadas apresentam-se bastante dobradas, com existência de vários sinclinais e anticlinais, com inclinações variáveis (predominando as compreendidas entre 35 a 50 SW) e largura de afloramento superior a 1500 m. devida aos dobramentos existentes.

As dobras mostram frequentemente um mergulho nos seus eixos, acentuado nos extremos NW e SE da estrutura, junto a Sousel e a Pardais, respectivamente, e em algumas zonas particulares, como sucede em Borba, nomeadamente na Encostinha.

## II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária

### II.1 - Enquadramento geológico da região em estudo

---

Todo o conjunto foi igualmente sujeito a fracturação, materializada frequentemente pela presença de filões doleríticos sensivelmente perpendiculares à estrutura e instalados em acidentes geralmente esquerdos, com abatimento do bloco situado a SE - este fenómeno origina um andamento descontínuo da jazida, bem conhecido dos industriais da região - e pela instalação de acidentes sensivelmente longitudinais, marcados no maciço pela presença de faixas relativamente extensas de mármore com aspecto brechoide ou de metavulcanitos (Silva, 1997).

Somente a fracturação ocorrida durante a 2ª fase se encontra aberta. Dai que constitua o maior “índice” de fragilidade do mármore. A fracturação ocorrida durante a 1ª fase encontra-se soldada (“fio branco”). Embora constituam a ser direcções preferenciais para o avanço da carsificação, por exemplo, não representam o “perigo” das discontinuidades abertas.

O esclarecimento da fracturação em termos da cronologia dos episódios deformantes é importante para o esclarecimento da geometria do maciço

**II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**  
*II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento de informação*

---

**II - Os Mármoreos do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**  
*II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento de informação*

## **II - Os Mármorez do Anticlinal de Estremoz - O Monte da Vigária**

### *II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento de informação*

#### *Definição dos Arquétipos BOM e MAU*

Pretende-se atribuir um valor numérico a cada posição tomada pelo suporte, de modo a sintetizar, quantitativamente, a qualidade do material correspondente a essas posições do suporte.

Os valores obtidos - “índice” - deverão reflectir uma maior ou menor aptidão ao desmonte do material considerado, de acordo com as características intrínsecas do maciço na direcção de desmonte considerada.

Na realidade, o “valor” de cada “massa” extraída será dependente não só de um conjunto de variáveis, quantitativas e qualitativas, que resumem as principais características intrínsecas da pedra mas é também dependente da direcção em que as mesmas são “medidas” (relação entre frente e direcção de desmonte). O índice é considerado como uma variável vectorial.

Uma vez que os pólos da escala, onde se pretende projectar os valores do índice, deverão ser definidos *à priori*, ter-se-á que definir o conjunto de características considerado “BOM” e aquele que origina o conjunto considerado “MAU”.

A construção dos dois vectores extremos estabelece-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”.

Definiram-se ainda os principais planos de anisotropia, responsáveis pela definição da “qualidade” dos blocos desmontados:

classe 3 - a intersecção com a frente é uma lineação paralela à fractura que está a ser digitalizada

classe 4 - a intersecção com a frente é uma lineação obliqua à fractura que está a ser digitalizada

classe 5 - a intersecção com a frente é uma lineação perpendicular à frente que está a ser digitalizada.

***CORRUME:***

Classe1 - ausente na frente de trabalho

classe2 - A fractura que está a ser digitalizada é paralela ao corrume

classe3 - a fractura que está a ser digitalizada é obliqua ao corrume

classe4 - a fractura que está a ser digitalizada é perpendicular ao corrume

***CURVATURA:***

classe1 - fractura linear

classe2 - fractura curva

***Nº DE INTERSECÇÕES:***

classe1 - de 0 a 2 intersecções com outras fracturas

classe2 - mais de 2 intersecções entre fracturas

***DENSIDADE (variável relativa ao suporte):***

classe1 - de 0 a 10% de todas as fracturas da frente de trabalho considerada

classe2 - de 10 a 30% de todas as fracturas da frente de trabalho considerada

classe3 - mais de 30% de todas as fracturas da frente de trabalho considerada

**COMPRIMENTO:**

classe1 - fracturas de comprimento compreendido entre 0 e 50mm

classe2 - fracturas de comprimento compreendido entre 50 e 300mm

classe3 - fracturas de comprimento superior a 300mm

Os atributos “veios” e “inclinação” não foram considerados nesta aplicação. No primeiro caso, as intersecções entre fracturas e veios deixa de ter significado uma vez que se passa a considerar a variável “vergada”, permitindo, deste modo, considerar todas as relações planares possíveis entre os três planos de descontinuidade presentes no maciço: fracturação (em que, tal como abordado anteriormente não se faz uma classificação genética); corrume (lineação de xistosidade de origem metamórfica presente em todo o maciço com atitude praticamente constante); vergada - os veios que se podem apresentar como planos - intersectando os planos das frentes de trabalho como lineações podendo condicionar consideravelmente o desmonte dos blocos dependendo das relações geométricas estabelecidas com a fracturação e o corrume - ou ainda apresentando uma distribuição homogénea somente penalizante por condicionar a cor.

A inclinação provou-se, na anterior aplicação da metodologia, ser uma variável de características aleatórias. Do ponto de vista genético não faz muito sentido considerar inclinações aparentes, uma vez que só é possível medir a inclinação da intersecção da fractura com a frente de trabalho.

Deste modo obtemos a seguinte representação gráfica dos atributos e respectivas classes:

A digitalização conta todas as fracturas captadas dentro do “suporte” pré definido classificando-as de acordo com os atributos seleccionados e não somente as fracturas cujo centro de gravidade está contido dentro do suporte.

### **Processamento de dados**

#### 1º FASE

As fotografias são introduzidas no computador e utilizando o software DIGIT digitalizam-se todas as descontinuidades (diaclasses e ou fracturas), classificadas simultaneamente de acordo com o conjunto de atributos seleccionados (BASE DE DADOS: FRAC). A variável DENSIDADE, respeitante ao suporte de captura (densidade de fracturação, dentro suporte x, relativamente à totalidade de fracturas da frente), não se integra nesta 1ª fase. O comprimento é igualmente calculado na 2ª fase.

O output deste programa dá-nos um ficheiro onde em linha se encontram as fracturas (1.....n) e em colunas as classes dos atributos escolhidos (vergada, corrume, curvatura, intersecções).

#### EXEMPLO:

	VERGADA	CORRUME	CURVATUR	NºDE INTER.
<b>1.</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>n</b>				

*Fig.II.2.3 - Representação do output resultante da digitalização de descontinuidades num suporte n*

2ª FASE

Numa segunda fase sobrepõe-se sobre a imagem digitalizada uma “rede” cuja malha é a dimensão da “janela” - suporte - de observação. Dentro do suporte serão contabilizadas as frequências e comprimento de fracturas de cada classe de cada atributo, bem como o cálculo da densidade de fracturação dentro de cada suporte. São ainda calculadas as coordenadas (x,y,z) do baricentro de cada suporte.

**II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento de informação**

*II.2.1 - Índice de Recuperação/Índice de Qualidade*

#### II.2.1 - Índice de Recuperação/Índice de Qualidade

Tal como apresentado anteriormente e no seguimento de trabalhos já citados (Pereira *et al* , 1992, Albuquerque, 1993, Ribeiro, 1994) a construção de variáveis de síntese revelam-se de extrema importância como metodologia globalizante das características que mais condicionam a exploração e comercialização de rochas ornamentais e industriais. Na verdade, desde que salvaguardada a aditividade da variável, uma Variável Regionalizada que permita a cartografia de uma sùmula de atributos, considerados relevantes, torna-se indispensável no planeamento da exploração e ainda para o estudo de mercado, necessário à sua divulgação e comercialização.

O problema reveste-se, assim, de alguma complexidade permitindo uma vasta discussão em torno de quais os atributos e respectivas classes a considerar. Ou seja, dependendo do objectivo - qualidade ou recuperação - as variáveis relevantes também sofrerão variações. A título de exemplo, nos mármore em termos de recuperação enfatiza-se a caracterização geométrica da fracturação, em termos de qualidade variáveis como a cor, a granulometria e ainda características físicas da rocha como porosidade, resistência, etc.

A flexibilidade da metodologia proposta, no presente trabalho, permite “construir” variáveis “índice” com um potencial intrínseco que permite responder às diferentes solicitações do planeamento e marketing das rochas ornamentais e industriais.

Todos os casos abordados - no presente trabalho, mármore, xistos e ardósias - revelam especificidades que exigem: 1) um trabalho a montante de reflexão, seguido da sistematização e hierarquização dos atributos a considerar. O método é interactivo permitindo voltar a trás e “repesar” variáveis ou modificar e implementar outras classes dos mesmos.

Deste modo o objectivo traçado define a construção de uma variável vocacionada para o mapeamento de zonas de maior favorabilidade para a recuperação ou para a

## II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento de informação

### II.2.1 - Índice de Recuperação/Índice de Qualidade

---

definição do desmonte de blocos de grande qualidade (“índice de recuperação” vs “índice de qualidade”); 2) ulteriormente a definição do suporte de observação. Entende-se por suporte de observação a amostragem. Neste segundo ponto há a considerar o tipo de suporte - informação recolhida nas frentes de trabalho (fotografia); informação recolhida a partir de sondagens; informação pontual relevante - nomeadamente a sua forma e dimensão. Convém referir que a amostragem pode ser recolhida localmente (directamente da pedreira) ou regionalmente (grandes acidentes geológicos, por exemplo).

Apresenta-se no desenvolvimento do trabalho, várias abordagens possíveis - 1) a abordagem local, a cartografia da favorabilidade para a recuperação restringe-se a uma pedreira e os dados utilizados são recolhidos na própria pedreira. Ou seja, uma cartografia local e uma recolha de informação local; 2) a abordagem local, em que o objectivo é a caracterização, tal como no caso exposto anteriormente, de zonas de maior ou menor favorabilidade para o desmonte mas em que se inclui no algoritmo de estimação informação regional (Krigagem com Deriva Externa; Soft Kriging), ou seja, cartografia local e uma recolha de informação local e regional; 3) a abordagem regional em que se pretende caracterizar áreas regionais de maior ou menor aptidão para a recuperação e com objectivos que poderão passar mais pela decisão de abertura de uma nova pedreira, do que da abordagem anterior em que basicamente se pretende determinar a direcção óptima de desmonte - em que se tem como output uma cartografia regional que partiu de informação recolhida localmente (várias pedreiras avaliadas globalmente) mais a introdução de funções de Deriva Externa que partem de informação regional (por exemplo distâncias a acidentes maiores); 4) finalmente, e não foi abordado neste trabalho, a cartografia regional partindo de informação regional exclusivamente.

As variáveis índice assumem, assim, uma construção de largo espectro em que as variáveis são mutáveis e interactivamente ajustadas, os suportes de observação e recolha de informação são variáveis na dimensão (escala de observação) e na forma ( área de observação; segmentos de observação; pontos de observação).

## II.2 - Determinação de atributos relevantes, recolha e tratamento de informação

### II.2.1 - Índice de Recuperação/Índice de Qualidade

---

Em trabalhos futuros, em que a recolha de informação implique heterogeneidades de suporte de observação (por exemplo: observações em frentes de desmonte - área de observação; campanha de sondagens - segmento de observação), o estudo estrutural - variográfico - destas variáveis “inventadas” implica uma normalização do suporte, ou seja, da amostragem. De facto, excepto em certas zonas limite (Pereira, 1988) em que as questões da variação do suporte não introduzem grandes desvios, em todos os outros casos, em que se pretende de uma forma global tratar dados recolhidos em suportes a escalas e dimensões diferentes, se deverá recalcular os variogramas pontuais (desconvolução) e só depois avançar para o tratamento geoestatístico subsequente.

Finalmente, resta acrescentar, a urgência de se considerar, no futuro, a dimensão fractal destas novas variáveis e implementar o seu tratamento espacial tendo em conta a sua geometria específica.



Nos casos em que a pedreira apresenta vários pisos de exploração (mármore - Vila - Viçosa) ou uma topografia acentuada (ardósia - Espanha) os suportes virão afectados da coordenada referente ao eixo dos Z.

Os dados depois de devidamente codificados permitem a construção da variável - índice - que nos permitirá proceder à cartografia da recuperação/qualidade, para as áreas não exploradas.

Nesta abordagem o objectivo primeiro é, por um lado, a definição e validação das áreas que agrupem maior número de blocos de recuperação máxima e, se possível, de maior valor económico e definir em consequência as direcções preferenciais de desmonte. Pretende-se assim resolver problemas online, surgindo como ferramenta para o planeamento, optimização e controle, a curto prazo, de uma pedreira.





**II.3 - Construção de uma variável de síntese - Índice. Aplicação da Análise Factorial de Correspondências**

### II.3 - Construção de uma variável de síntese - Índice. Aplicação da Análise Factorial de Correspondências

Uma vez criados os dois pólos extremos sintetizando todas as classes melhores e piores da escala, a construir utiliza-se a Análise Factorial de Correspondências como algoritmo discriminante (Nanache, 1973, Benzécri, 1980, Pereira, 1988, Pereira *et al*, 1992) em que os indivíduos da matriz de partida são projectados em suplementar sobre o vector próprio da matriz de inércia, construído com base nos dois pólos discriminantes.

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

$$f(i) = \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot q}} \cdot \sum_{k=1}^q w(K) \cdot \sum_{j=nc(k-1)+1}^{nc(k)} x(i, j) \cdot p(j) \quad (2)$$

onde:

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

$\lambda$  - 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  $j$  no eixo discriminante

A variável índice depende de três parâmetros ajustáveis de acordo com os dados reais utilizados na validação:

Número e limites das classes utilizadas em cada atributo;

Dimensão do suporte de observação ;

### II.3 - Construção de uma variável de síntese - Índice. Aplicação da Análise Factorial de Correspondências

---

Valores dos pesos  $W(k)$  utilizados na equação (2).

A Análise Factorial de Correspondências foi utilizada não como instrumento de descrição, como é habitual, mas 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, Sousa, 1991). É, deste modo, possível definir o grau de pertença de cada um dos indivíduos projectados em suplementar ao eixo de projecção definido pelos pólos discriminantes, projectados em principal.

A Análise Factorial de Correspondências é vantajosa em relação a outros algoritmos de análise e interpretação de dados, quando a matriz de partida é de natureza qualitativa, como é o caso presente, depois da codificação efectuada.

Uma questão básica e já amplamente discutida em trabalhos anteriores (Pereira *et al*, 1992) é a da aditividade da nova variável construída - Índice. A garantia da aditividade é essencial antes de se efectuar a avaliação estrutural da variável - variografia - e subsequente estimação por krigagem.

A propriedade de equivalência distribucional (Pereira, 1981,p.437), é deduzida directamente da distância do  $\chi^2$  utilizada na AFC e permite substituir dois indivíduos (ou propriedades) com perfis semelhantes, mas pesos diferentes, por outro indivíduo (ou propriedade) de peso igual à soma dos pesos, sem alterar o sistema de distâncias que está na base da construção dos eixos factoriais. Deste modo as novas variáveis podem ser tomadas com VR aditivas, visto que o suporte que é a união dos dois suportes elementares se projecta no baricentro das projecções desses suportes elementares.



## **II.4 - Análise Estrutural**

### *II.4.1 - Variogramas experimentais*

A Análise Estrutural das Pedreiras do Monte da Vigária pretende representar a variabilidade das características das descontinuidades, presentes no maciço rochoso marmóreo, com a distância. A determinação da variabilidade espacial é particularmente importante em situações em que a zona de interesse seja grande, ou desde que a taxa de variação das características seja tão elevada que crie mudanças significativas nas propriedades (Priest,1993, Ribeiro,1994).

No exemplo presente, pretende-se fazer uma abordagem local, em que se assumem as condições de partida estabelecidas anteriormente (Pereira *et al*, 1992, Albuquerque,1993, Ribeiro, 1994), e uma abordagem regional em que como adiante se desenvolverá, se evidência o imbricamento de duas estruturas apresentando a segunda uma anisotropia geométrica notória.

Nas anteriores abordagens locais assumia-se a isotropia do maciço basicamente porque:

(i)- A escala de observação das pedreiras (tratadas individualmente) não evidenciavam anisotropias);

(ii)- A análise dos variogramas ,efectuados em diferentes direcções, não permitiu a identificação de anisotropias, podendo este facto justificar-se parcialmente pela escassez de dados;

(iii)- Não foi possível obter variograma na direcção vertical.

Na abordagem regional, o facto de a informação recolhida ser substancialmente mais numerosa e distribuída espacialmente, permitiu fazer uma análise estrutural a diferentes escalas (apresentam-se os Semi-Variogramas calculados para passo igual a 1m) assumindo,

no entanto, a dimensão do suporte de observação (0.5 x 5m) por ter sido, unanimemente, o que conduziu a melhores resultados (Pereira *et al*, 1992, Albuquerque,1993, Ribeiro, 1994). À semelhança da abordagem local, também não foi possível estabelecer um carácter estruturado do índice de recuperação na direcção vertical, por ser reduzida a informação recolhida nessa direcção.

#### II.4.1.1 - Variogramas Locais

O estudo estrutural (Journel, Huijbregts, 1978), iniciou-se por uma abordagem local. Deste modo determinaram-se variogramas - omnidireccionais - para cada uma das pedreiras de forma a permitir uma “visualização” das que apresentam um “índice” predominantemente aleatório - contribuindo deste modo para o efeito de pepita regional que resultará da análise global.

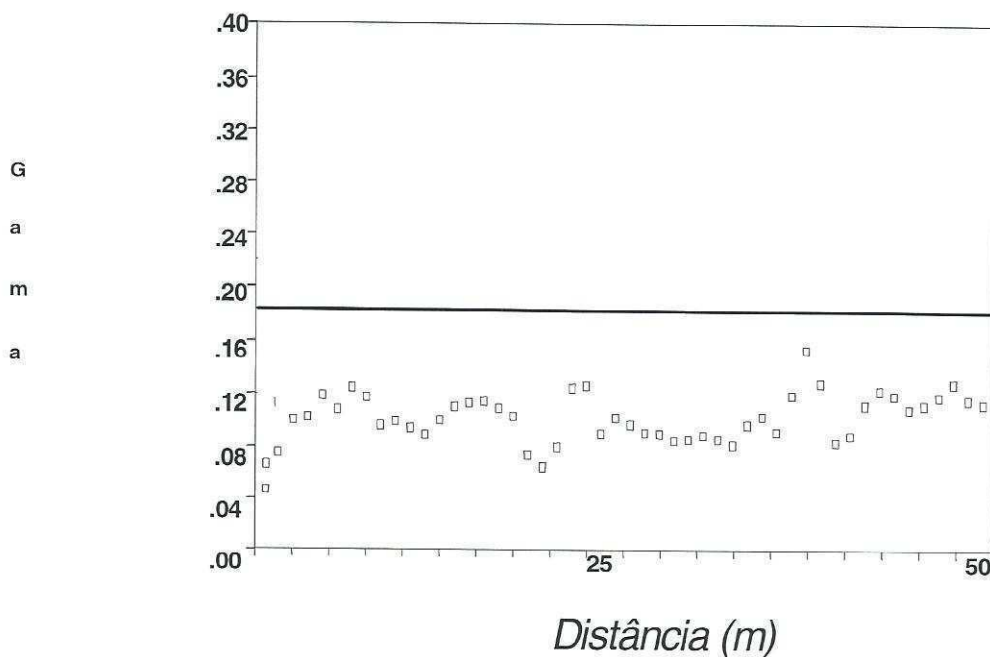


Fig.II.4.1.1 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira de Mouro

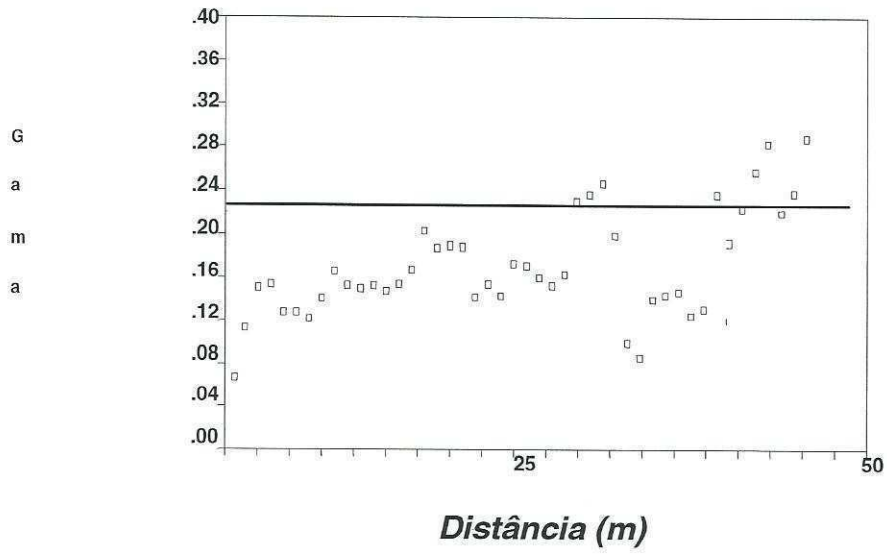


Fig.II.4.1.2-Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VA

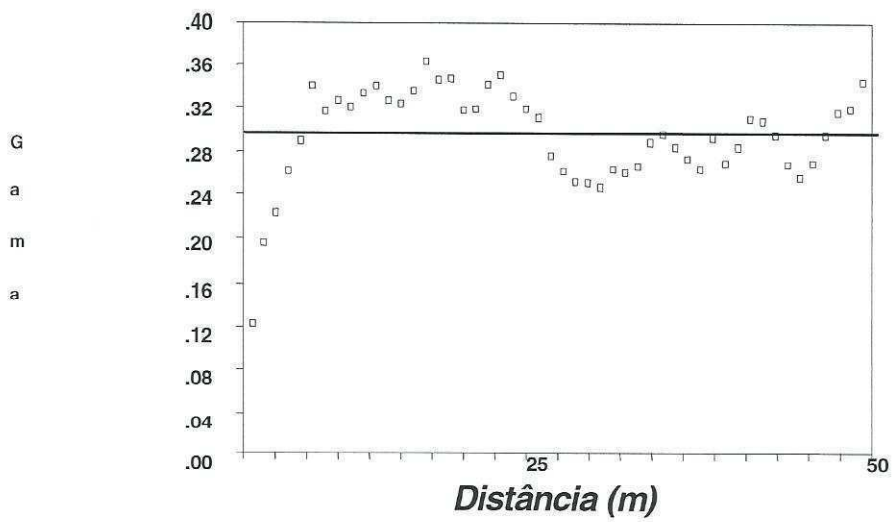


Fig.II.4.1.3 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VB

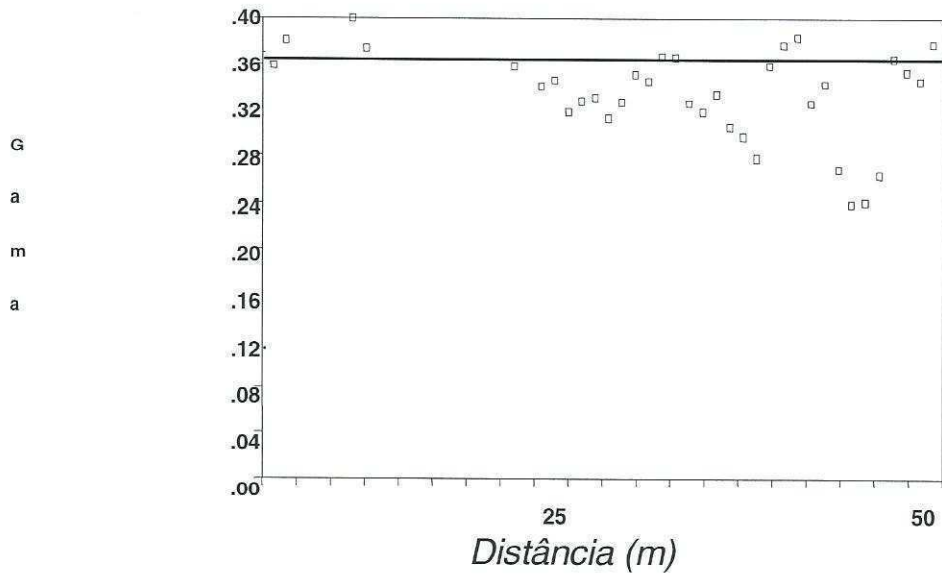


Fig.II.4.1.4 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VE

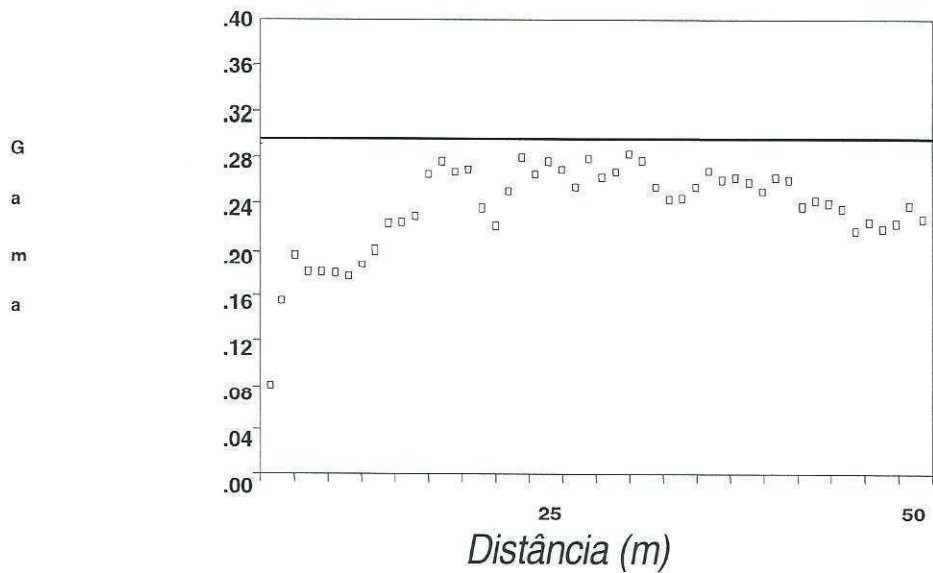


Fig.II.4.1.5 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VG

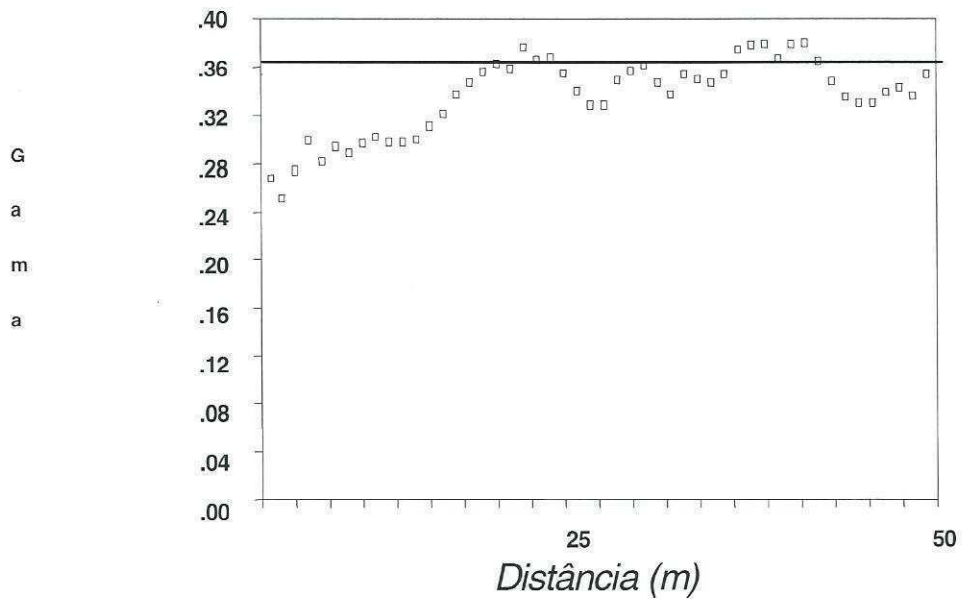


Fig.II.4.1.6 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VI.

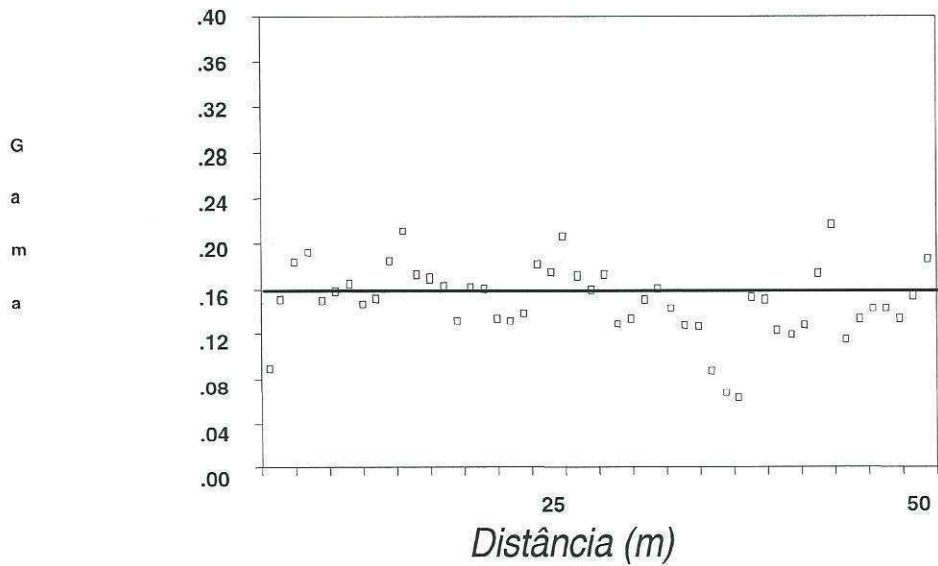


Fig.II.4.1.7 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VK.

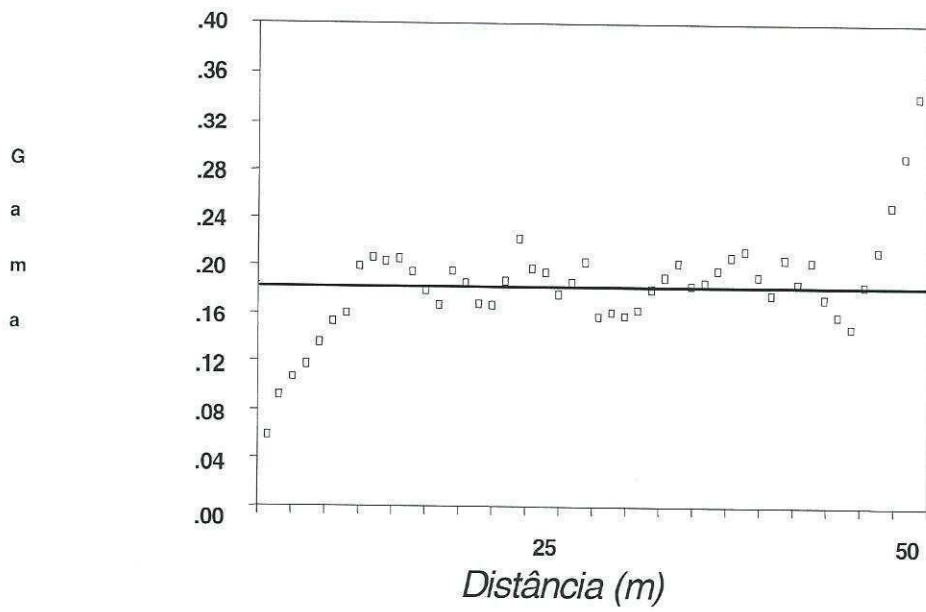


Fig.II.4.1.8 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VO.

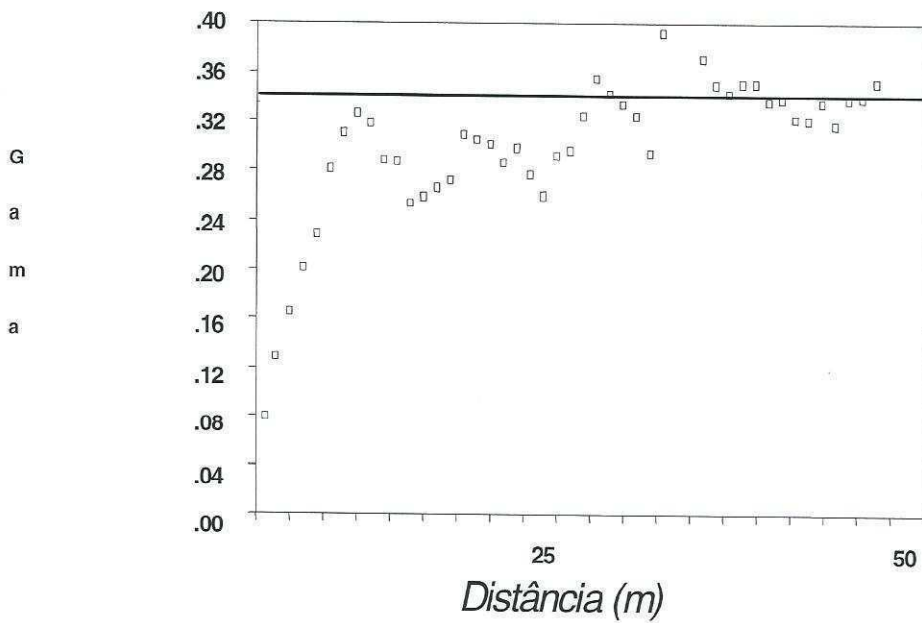


Fig.II.4.1.9 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VOG.

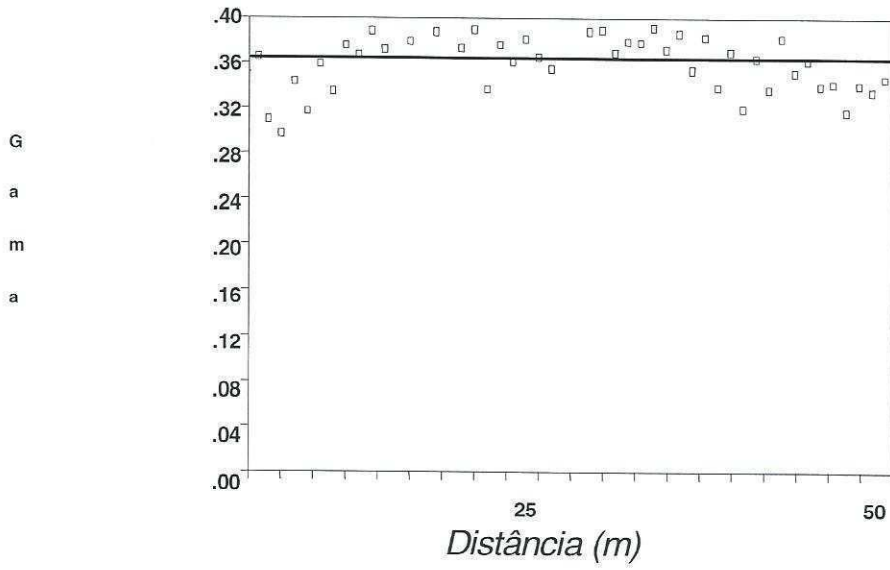


Fig.II.4.1.10 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VS.

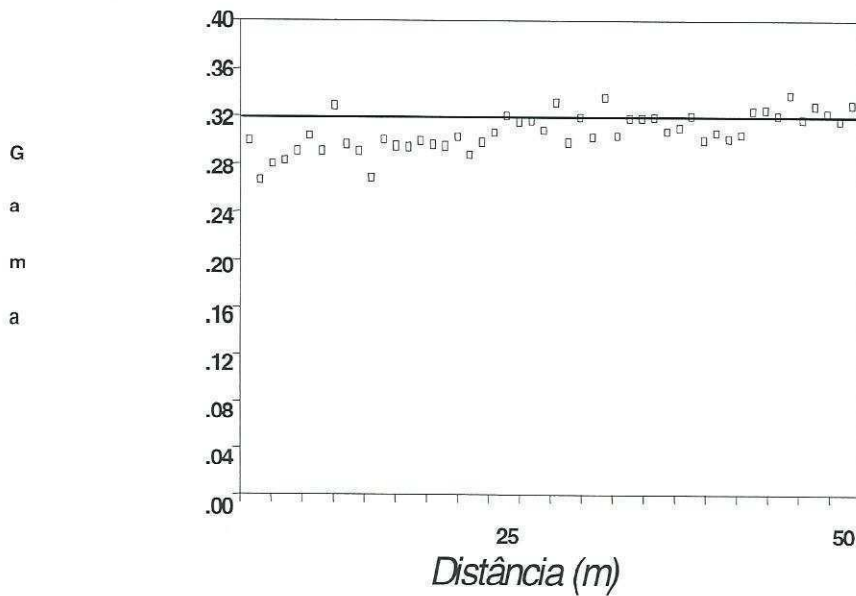


Fig.II.4.1.11 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VX.

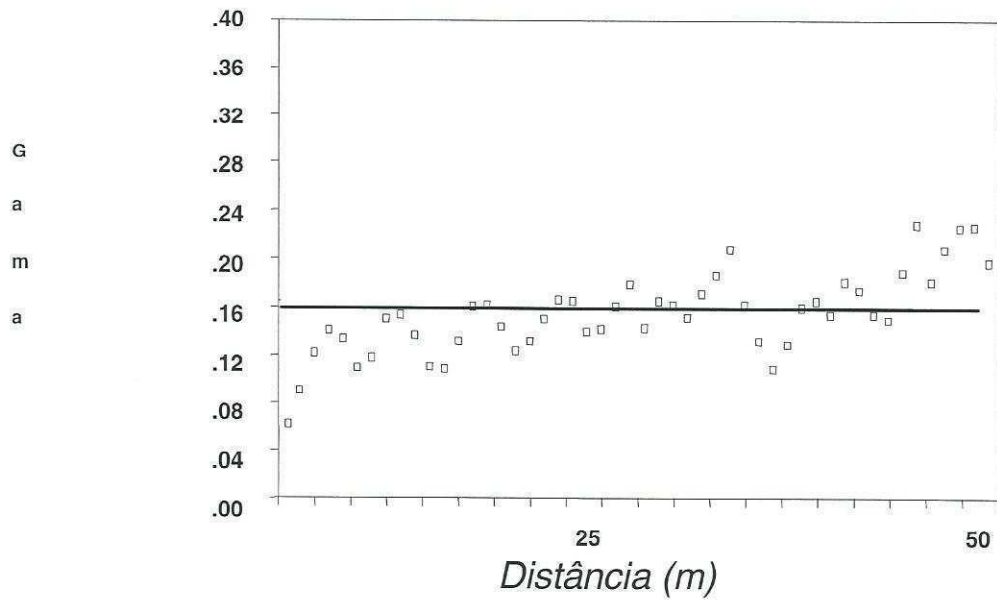


Fig.II.4.1.12 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VZ

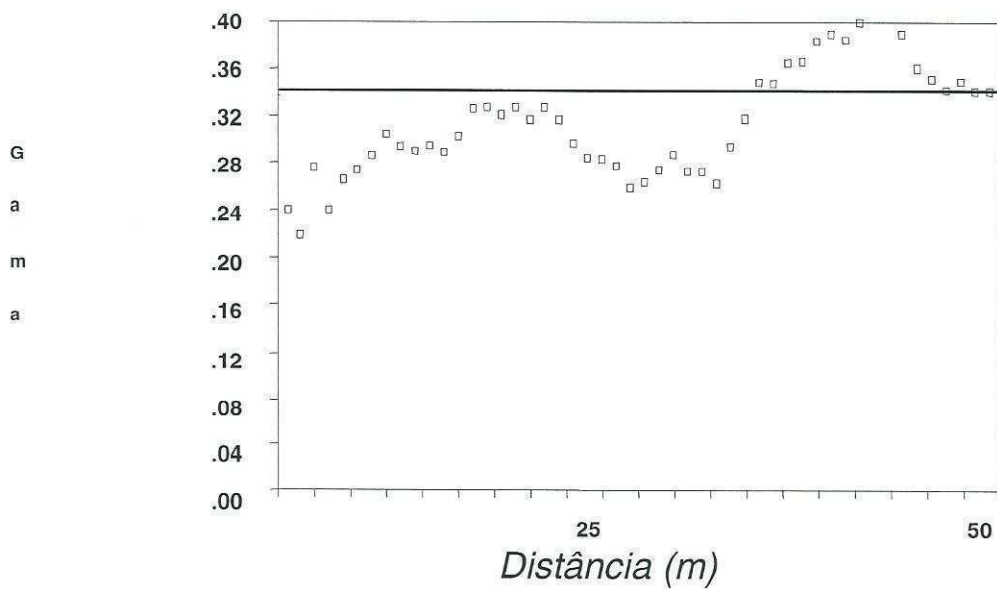


Fig.II.4.1.13- Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VN.

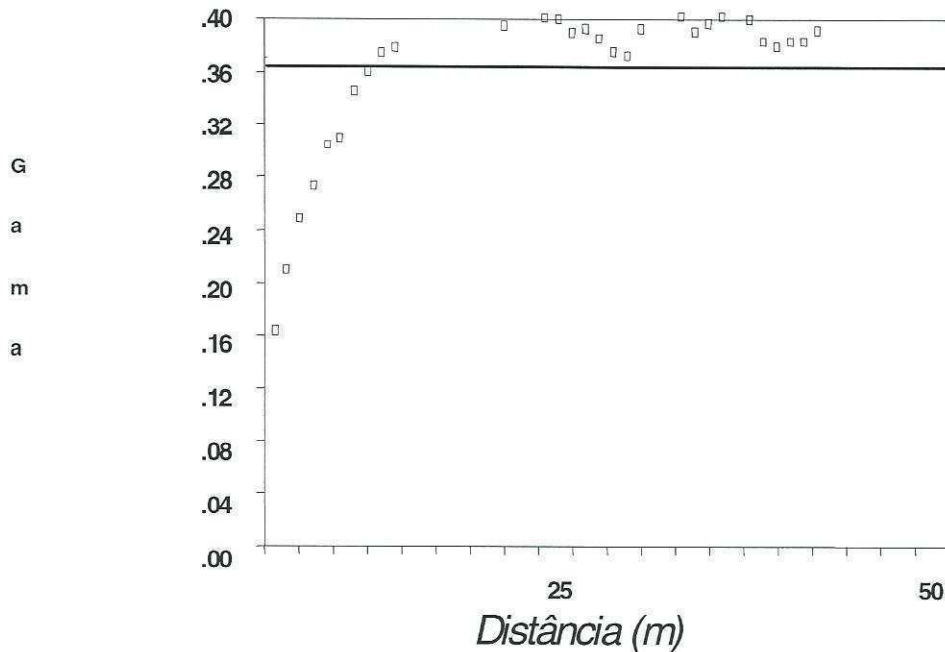


Fig.II.4.1.14 - Semi-Variograma experimental, omnidireccional, da Pedreira VC.

A observação dos semi-variogramas experimentais locais, permite-nos concluir o seguinte:

1 - Os semi-variogramas das pedreiras de Mouro, Va, Vb, Vg, Vo, Vog, Vz, Vn e Vc, apresentam um comportamento junto da origem (para valores de distância pequenos), revelador de um considerável grau de continuidade espacial. Pode considerar que entre 15% e 25% da variabilidade total é consumida no interior do próprio suporte e que entre 75% e 85% será utilizada para os processos de estimação ulteriores;

2 - As restantes 5 pedreiras, Ve, Vi, Vk, Vs e Vx apresentam um comportamento, na origem, revelador de maior aleatoriedade da variável. Pode considerar que entre 60% e 90% da variabilidade total é consumida no interior do próprio suporte e que, somente entre 10% e 30% será utilizada para os processos de estimação ulteriores;

Em termos regionais, serão as primeiras pedreiras as que mais contribuem para a continuidade espacial, regional, da variável índice.

#### *II.4.1.2 - Variogramas Regionais. Definição dos eixos de anisotropia.*

O objectivo de estabelecer os principais eixos de anisotropia, a uma escala regional, implicou a determinação do semi-variograma em várias direcções (foram determinados semi-variogramas com intervalos de 20° e uma regularização de 10°) bem como a diferentes intervalos de distância (“passo”) - determinaram-se os semi-variogramas para as direcções mencionadas, a passo 5,10,20,30,40,50,60,70,80,90 e 100m. Desta forma foi possível “colar” as estruturas que se evidenciam nas diferentes escalas. A distâncias entre 10 e 40 m os variogramas mais evidentes são os de azimute NE - SW (+ ou - 20°), de 40 a 80 os de azimute NW - SE (+ ou - 20°).

Apresentam-se nas *Fig.II.4.1.15* e *Fig.II.4.1.2* os Semi-Variogramas experimentais correspondentes às direcções principais de variabilidade. Na *Fig.II.4.1.17* sobrepõem-se os azimutes seleccionados à representação do anticlinal de Estremoz. Como se pode observar existe uma coincidência entre os eixos do elipsoide e os eixos da dobra, coincidindo o eixo maior do elipsoide (maior continuidade espacial da variável) com o eixo menor do dobramento e o eixo menor do elipsoide (maior aleatoriedade da variável) com o eixo maior do mesmo. É ainda de salientar a coincidência da direcção de maior continuidade espacial com algumas das principais famílias de fracturação regional (*Fig.II.4.1.17*).

Monte da Vigária localiza-se no flanco NW-SE da dobra maior e é dobrada uma uma dobra secundária em anticlinal - sinclinal (*Fig.II.4.1.17*). A continuidade espacial da variável índice nas pedreiras estudadas parece ser controlada não pelos alinhamentos secundários (*Fig.II.4.1.17*) mas pelos alinhamentos regionais (eixos do anticlinal e fracturação).

Semi-variograma índice

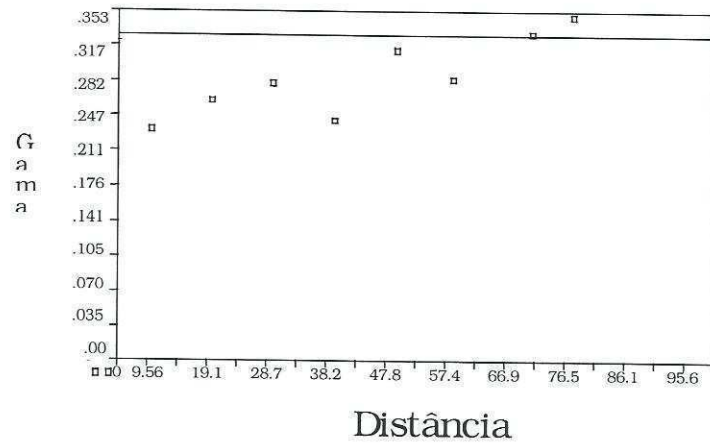


Fig II.4.1.15 - Variograma experimental segundo a direção SE-NW (b)

Passo=10m

Variância à priori=0.3205

Semi-variograma índice

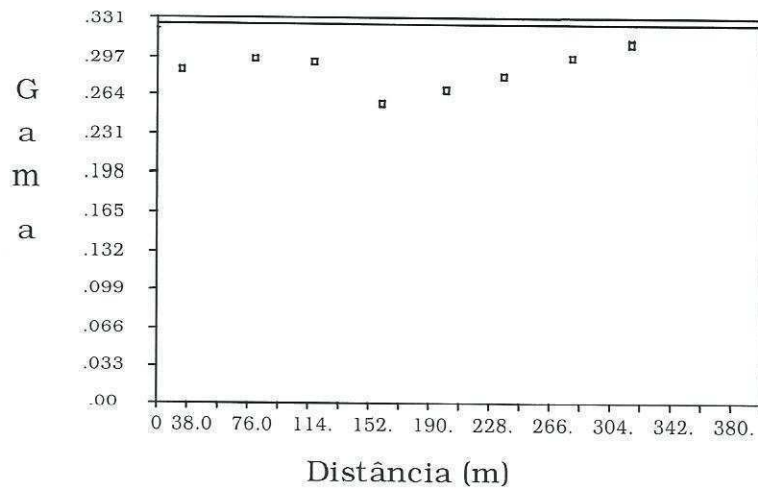


Fig II.4.1.16 - Variograma experimental segundo a direção NE-SW (a)

Passo=40m

Variância à priori=0.3205



### II.4.2 - Modelo Teórico proposto e sua interpretação face à estrutura geológica da região

O ajustamento de um modelo teórico é um ponto fundamental da variografia, uma vez que a expressão matemática adoptada resume toda a informação estrutural da VR, é a base das etapas seguintes (estimação).

A interpretação das estruturas espaciais evidenciadas, permite-nos ajustar a cada um dos Semi-Variogramas experimentais um modelo teórico de tipo esférico o qual se mostrou, em trabalhos anteriores, o mais adequado. A fórmula analítica deste tipo de variograma é a seguinte:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \gamma(h) = c \left[ 1.5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0.5 \left( \frac{h^3}{a^3} \right) \right] & h < a \\ \gamma(h) = c & h \geq a \end{array} \right.$$

em que  $a$  é a amplitude e  $c$  o patamar do variograma (variância *à priori*).

O primeiro passo para a modelização do Modelo Teórico foi a determinação do semi-variograma omnidireccional a passo 0.5m e 1m de forma a “apanhar” o efeito de pepita. O semi-variograma mais contínuo foi o determinado a passo 1m (Fig.II.4.2.1). Modelizou-se um efeito de pepita de 0.15 (46.8% da variabilidade é consumida no interior do próprio suporte), utilizando-se no processo ulterior de estimação geoestatística 53.2% da variabilidade.

**Semi-variograma índice  
Omnidireccional**

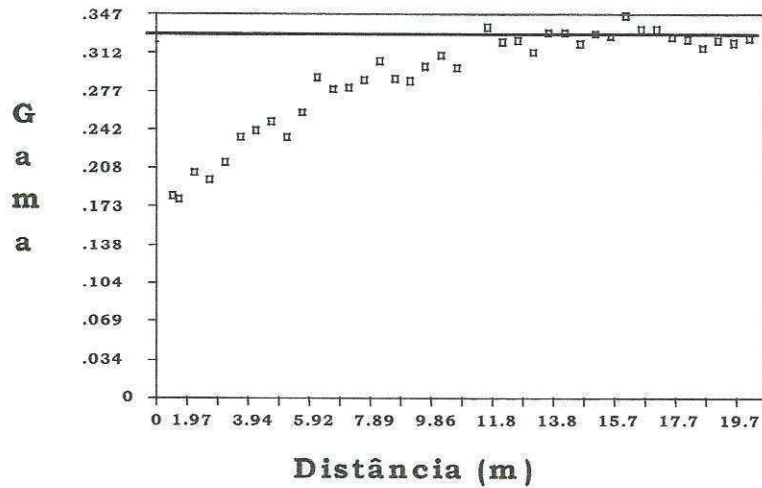


Fig.II.4.2.1- Semi-variograma omnidireccional -passo 1m

Modelizaram-se, então, duas estruturas imbricadas de tipo esférico, a primeira isotrópica e a segunda com uma anisotropia geométrica evidente. Os resultados apresentam-se na *tabela II.4.2.1*. Os Modelos Teóricos ajustados às direcções principais de anisotropia, estão representados nas *Fig.II.4.2.2* e *Fig.II.4.2.3*

NE - SW	$C_0=0.15$	$C_1=0.12$	$C_2=0.505$	$a_1=30m$	$a_2=350m$
NW - SE	$C_0=0.15$	$C_1=0.12$	$C_2=0.505$	$a_1=30m$	$a_2=85m$

Tabela II.4.2.1 - Parâmetros do Modelo Teórico adaptado às principais direcções da elipse de anisotropia.

Semi-variograma índice

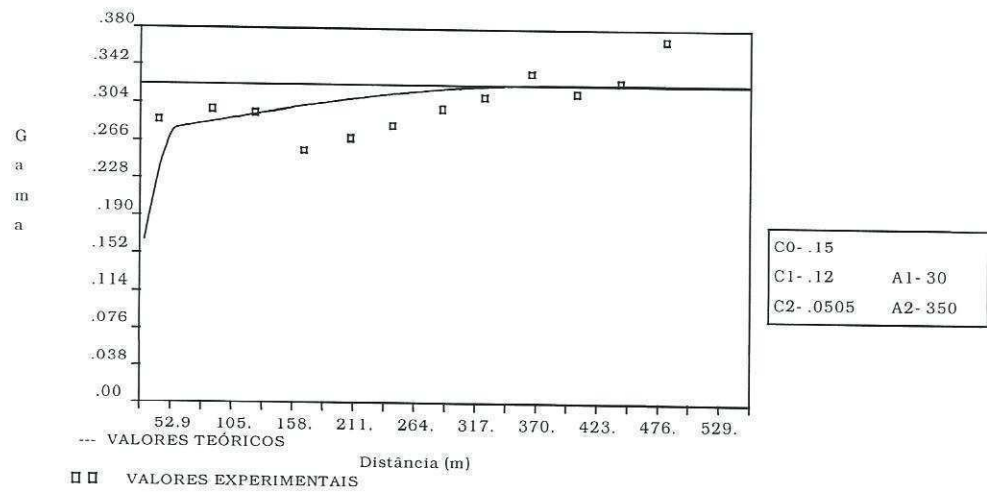


Fig.II.4.2.2 - Semi-variograma Teórico - direcção NE-SW

Semi-variograma índice

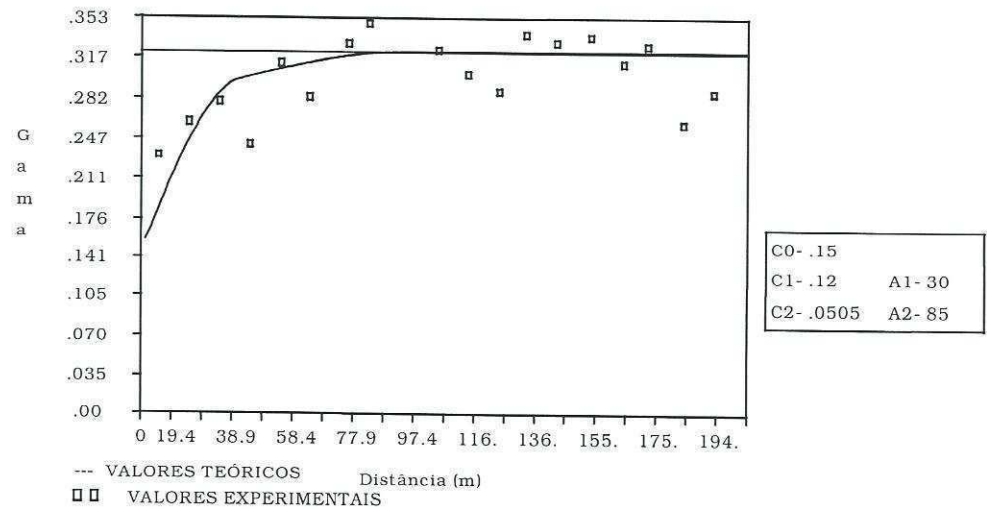


Fig.II.4.2.3 - Semi-Variograma Teórico - direcção NW-SE



## **II.5 - Estimação do Índice de Recuperação**

### II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais

#### ***A - A Pedreira de mármore de Mouro***

A pedreira de Mouro situa-se na freguesia de Santiago de Rio Moinhos, concelho de Borba.

Esta pedreira caracteriza-se por apresentar variedades de mármore de grande beleza, predominando a cor creme e o rosado suave, não afectando o valor estético da rocha a presença de vergada de cor acastanhada e acinzentada.

Os aspectos de carsificação e de alteração do maciço rochoso, como a dolomitização, são neste caso pouco relevantes. A exploração é, no entanto, condicionada pela intensa fracturação.

As formações do substrato são compostas por calcários cristalinos (mármore) parcialmente cobertos por dolomitos secundários; xistos e metavulcanitos; e rochas filonianas de composição básica. A regularidade geológico-estrutural é perturbada pela ocorrência de acidentes tectónicos com movimento esquerdo, onde se instalaram filões básicos (*cf.* Costa, 1992).

As variáveis seleccionadas para caracterizar o valor de recuperação do mármore foram as que se encontram sintetizadas na tabela seguinte:

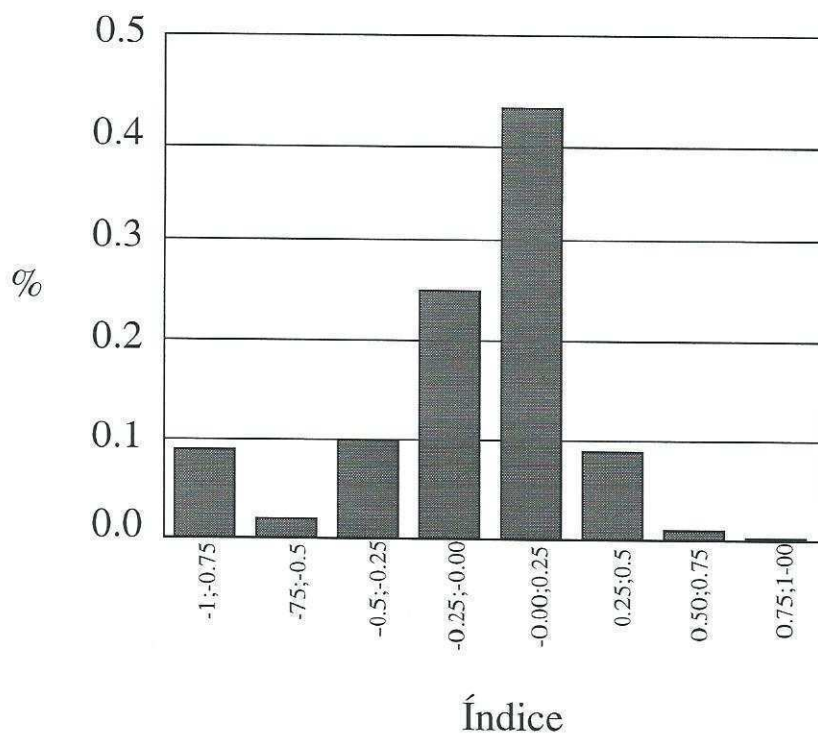
## II.5 - Estimação do Índice de Recuperação

### II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais

<i>Variáveis</i>	<i>Classes</i>
Comprimento	<300 / 300 - 800 / >800 cm
Curvatura	ausência / presença
Intersecções	<2 - >2
Densidade	<5 / 5-15 / > 15%
Corrume (“xistosidade”)	ausente / perpendicular / oblíquo/ paralelo
Vergada	ausente / homogénea / planar perpendicular / planar oblíquo / planar perpendicular

*Tabela II.5.1.1 - Variáveis e respectivas classes para a construção da variável índice*

As quatro primeiras variáveis estão relacionadas com a fracturação; a quinta variável (“corrume”) é um indicador importante na definição das direcções preferenciais de corte e a sexta variável (“vergada”) representa o tipo de veios observáveis no mármore nas frentes de desmorte. Com base nestas variáveis a variável de síntese ( índice) foi calculada para 364 suportes experimentais de que se apresenta na figura seguinte o histograma respectivo



*Fig.II.5.1.1. - Histograma experimental para a pedra de Mouro.*

O estudo estrutural não permitiu determinar direcções de anisotropia, eventualmente pela escassez de dados, mas foi possível determinar o Semi-Variograma omnidireccional que se apresenta na figura seguinte.

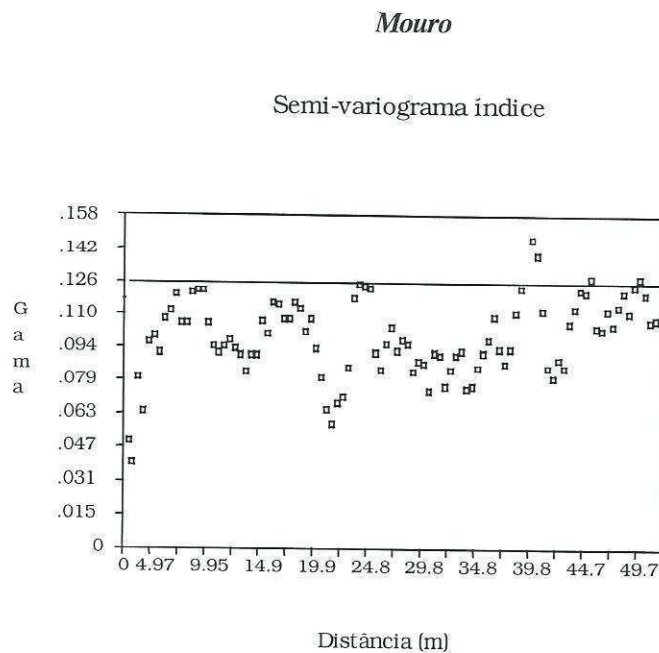


Fig.II.5.1.2 -Semi- Variograma omnidireccional para a Pedreira de Mouro.

Procedeu-se finalmente à estimação extrapolando lateralmente no plano da pedreira, aplicando a Krigagem ordinária. A cartografia obtida está representada na Fig.II.5.1.3 representando os blocos divididos em três classes, respeitando o procedimento de validação ulterior com os peritos responsáveis pela exploração da pedreira.

## ***B - A Pedreira de xisto de Mourão***

### *B.1 - Enquadramento*

A apresentação da aplicação da metodologia proposta e analisada no caso anterior, a uma pedreira de xistos, permite-nos testar a flexibilidade do método. Na verdade os xistos possuem características próprias que os distinguem de outras litologias, nomeadamente os casos já estudados em mármore.

Os xistos e ardósias representam 10% do comércio mundial de Pedra Natural (J. Rico, 1996). Apesar de bastante abundantes no nosso território raramente oferecem afloramentos com a qualidade e volume que justifique a sua exploração. Em 1990 existiam somente 11 Pedreiras em laboração satisfazendo, no entanto, as exigências do mercado nacional. A aposta na exportação parece ser uma decisão sensata.

As pedreiras existentes situam-se em duas zonas geotectónicas distintas. Na zona Centro Ibérica, sobrepondo-se aos quartzitos da base do Ordovícico encontram-se os xistos e as ardósias de Valongo. Na zona de Ossa-Morena as rochas xistentas de idade Ordovícica-Silúrica de Barrancos/Mourão (*Fig.II.5.1.4*).

Os produtos destinados ao mercado são: ardósia em blocos ou serrada, tampos para mesas de bilhar e de laboratório, pedras para quadros e lousas escolares, trabalhos artísticos e decorativos diversos, telhas, peças para construção civil, revestimentos interiores ou exteriores, canterias e ainda sob a forma de esteios para vinha (J. Rico, 1996).

II.5 - Estimação do Índice de Recuperação  
 II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais

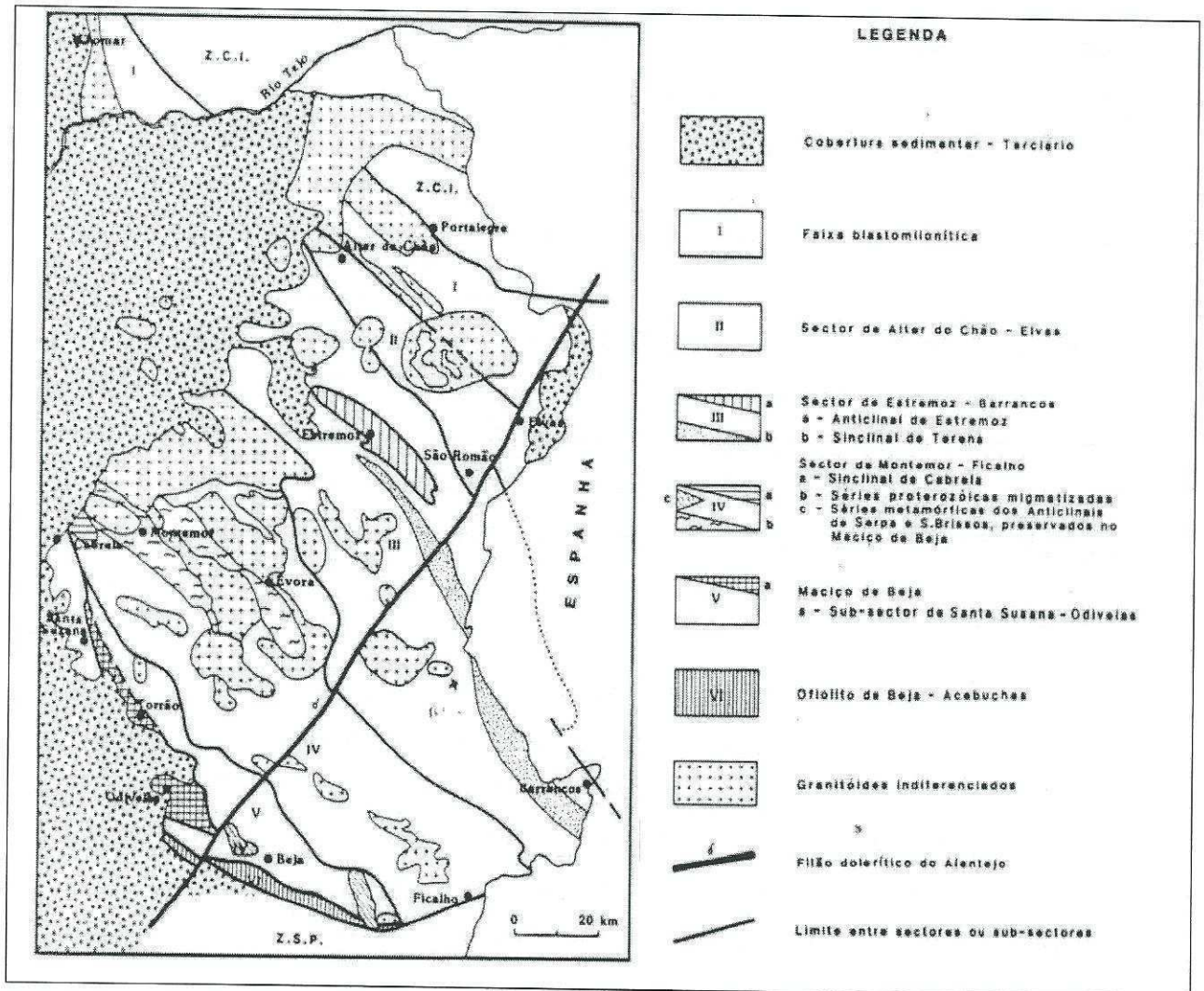


Fig. II.5.1.4 - Divisões tectono-estratigráficas da Zona de Ossa-Morena, em Portugal  
 (segundo Oliveira, et al, 1991)

A pedreira estudada situa-se no distrito de Évora, na margem esquerda do Guadiana. A cota aproximada da zona varia apenas entre os 180m e os 200m. Sendo toda a área muito pouco acidentada e de grande densidade de pinheiros o impacto paisagístico é reduzido.

Apresentam-se nas Fig. II.5.1.6 e Fig. II.5.1.7 o enquadramento geográfico e geológico da pedreira em estudo.

Fig. II.5.1.5 - Xisto de Mourão: tonalidade acinzentada a cinzenta-azulada, mais raramente cor de rosa, com manchas cinzento-esverdeadas e rosadas e pontuações cinzento escuras (in Catálogo/Cevalor, 1995)

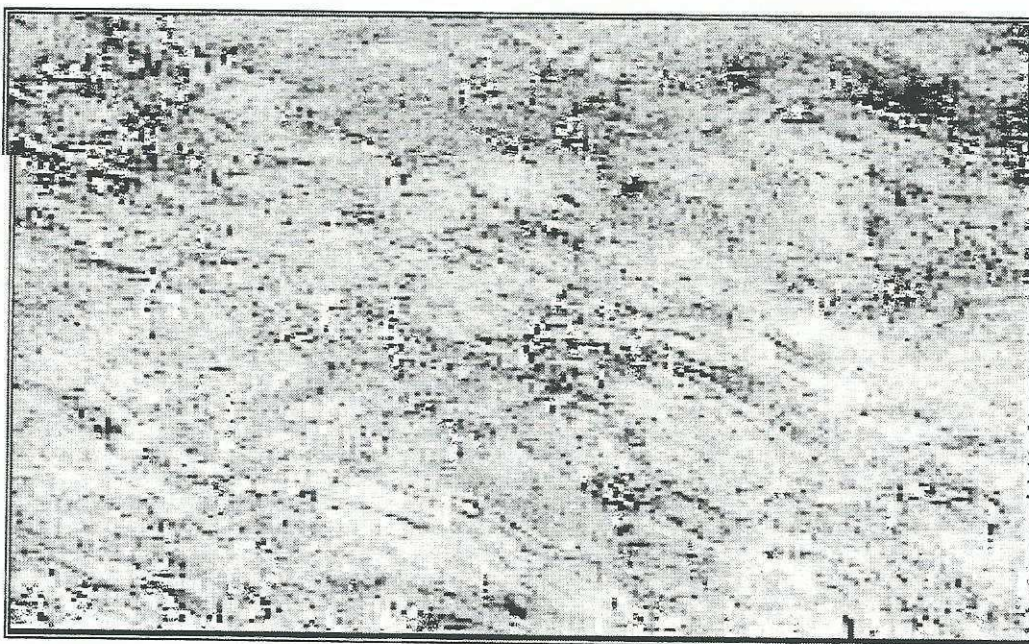
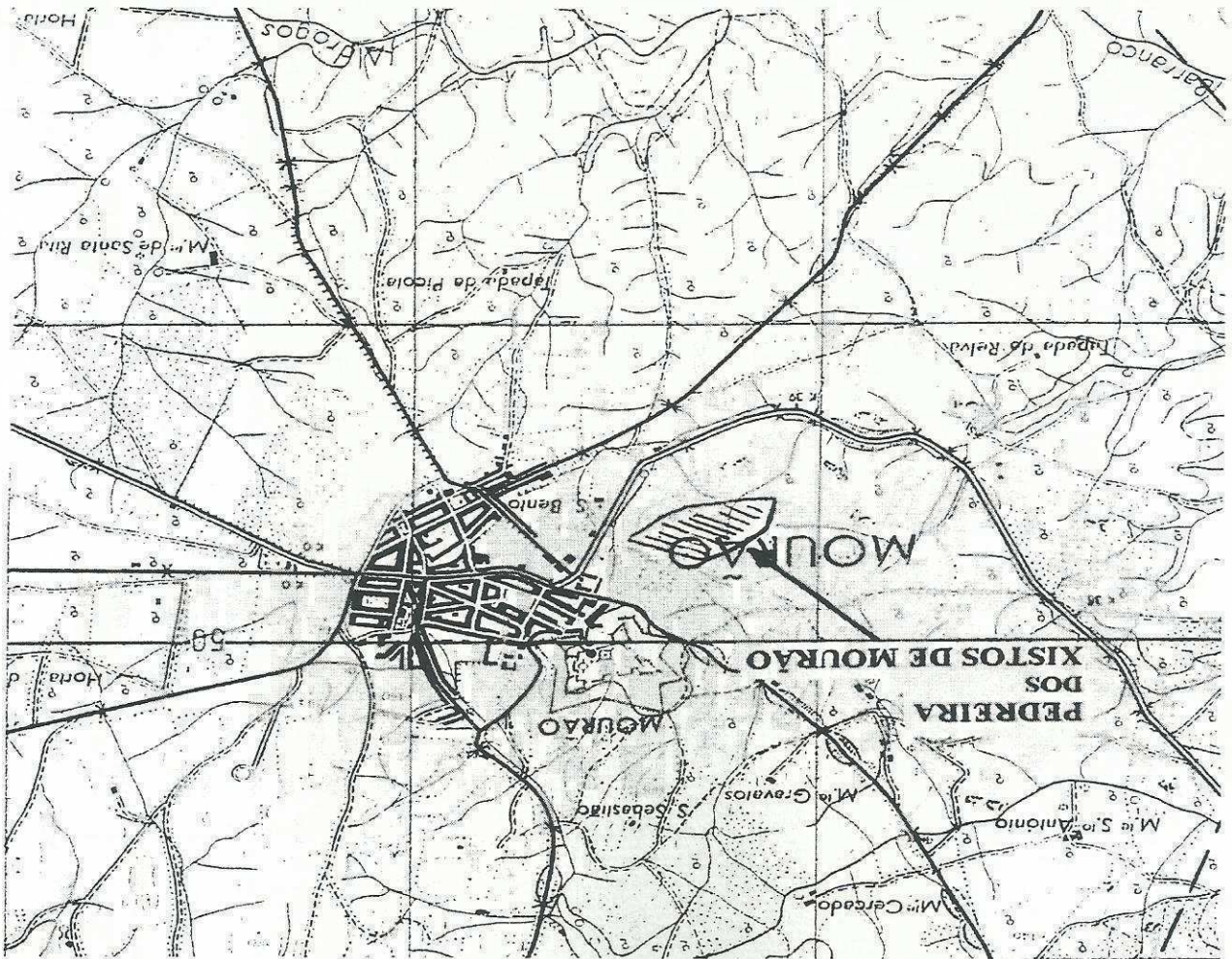


Fig. II.5.1.6 - Localização Geográfica da Pedreira dos xistos do Mourão (excerto da folha nº483 da Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000)





## II.5 - Estimação do Índice de Recuperação

### II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais

---

Tal como no caso dos mármoreos também nos xistos é a fracturação do maciço o principal elemento geológico /geotécnico condicionante da exploração. O levantamento e estudo geológico das principais famílias de diaclases foi realizado em 1996 pelo Eng<sup>o</sup> Toscano Rico mostrando atitudes médias de (N87°W,V); (N7°W, 86°SWW) e (N30°E,88°SE), e espaçamentos respectivos de 96cm, 120cm, 165cm. Distinguem-se ainda, numa percentagem elevada, fracturas de distribuição espacial aleatória que muito contribuem para a definição da anisotropia do maciço sendo determinantes para uma correcta avaliação da recuperação dos blocos a extrair.

Ainda segundo Toscano Rico (1996) , os planos de xistosidade (N7°E, 20°E) transpõem a estratificação, tratando-se de descontinuidades planares penetrativas, que constituindo zonas de fraqueza mais físseis, são tomadas como direcção preferencial de ataque na extracção do xisto. Deste modo, é possível diminuir os desperdícios ao mesmo tempo que se obtêm superfícies regulares, que formam bancadas naturais.

É ainda importante referir a importância marcante, para a extracção, da presença de veios de quartzo, particularmente abundantes nas zonas onde a alteração e a fracturação são mais intensas (normalmente zonas mais superficiais). Os problemas associados à presença dos veios de quartzo, que se apresentam com uma possança de alguns centímetros e de atitude subhorizontal (por vezes encontram-se muito próximos), estão associados à irregularidade que impõem ao blocos, ao maior desgaste das máquinas de corte e ainda à não comercialização de blocos que contenham veios de quartzo.

A alteração do maciço é notada sobretudo junto à superfície, formando uma zona amarelada menos competente. Característica particular da meteorização, são os chamados “fios vermelhos”, acompanhando prováveis fracturas de descompressão, normalmente subverticais, que inutilizam a rocha circundante. Esta alteração não deve ser confundida com o bandado também vermelho (característico) dos próprios xistos de Mourão.

B.2 - Aplicação da metodologia geoestatística proposta

Do breve enquadramento apresentado nas páginas anteriores, sobressai a necessidade de englobar, no planeamento da exploração, as descontinuidades de distribuição geográfica aleatória, que pela frequente incidência são de importância maior na contabilização das variáveis que mais contribuem para a penalização da recuperação da pedra em causa.

Os dados foram recolhidos em registo contínuo por captura fotográfica, digital, das imagens das frentes de trabalho. Foram anotadas, simultaneamente, as características geológicas mais relevantes observadas em cada uma das frentes, de forma a ajudar no ulterior processamento e classificação das imagens.

O desenho da planta da pedra permitiu projectar todos os suportes no mesmo referencial (Fig.II.5.1.8, Fig.II.5.1.9). No levantamento dos atributos que mais condicionam a exploração e, deste modo, a recuperação da pedra, foi dada particular atenção ao tipo de fracturas e xistosidade do maciço, à alteração e aos veios de quartzo.

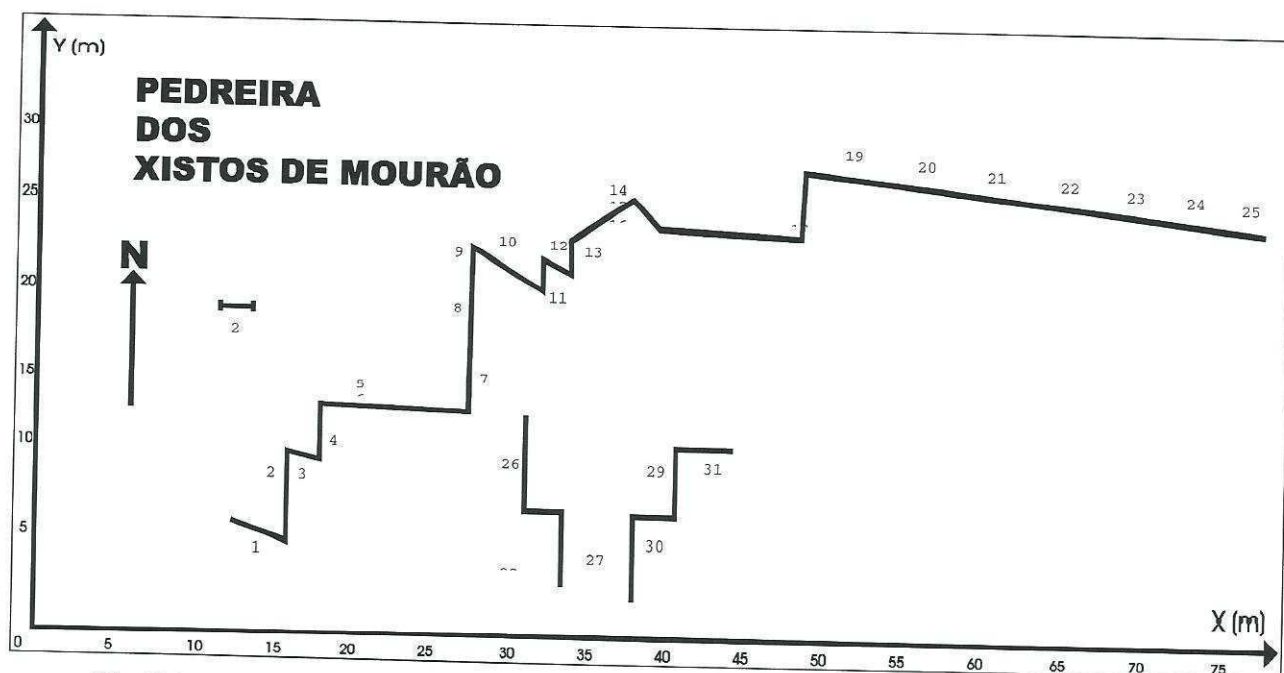


Fig.II.5.1.8 - Planta da Pedreira com a localização das frentes estudadas (J.Rico, 1996)

Depois de construído o índice, pela aplicação da Análise Factorial de Correspondências, procedeu-se ao estudo estrutural com o cálculo variográfico em diferentes direcções e passos de formas a encontrar possíveis anisotropias.

Os Semi-Variogramas obtidos mostram uma constância de estruturas (Fig.II.5.1.10, Fig.II.5.1.11, Fig.II.5.1.12) com variação de amplitude para as mesmas, parecendo indiciar uma anisotropia do tipo geométrico.

A interpretação geológica do elipsoide mostra os variogramas horizontais, segundo as direcções x e y, perpendiculares às direcções das famílias de diaclases N87°W, V e N7°W, 86°W respectivamente. O Semi-Variograma ao longo do eixo dos Z (vertical) aproxima-se da normal à xistosidade.

Verifica-se uma coincidência dos eixos principais do elipsoide com as direcções principais de fracturação. O conhecimento das mesmas famílias foi determinante na procura dos eixos do elipsoide (J.Rico,1996).

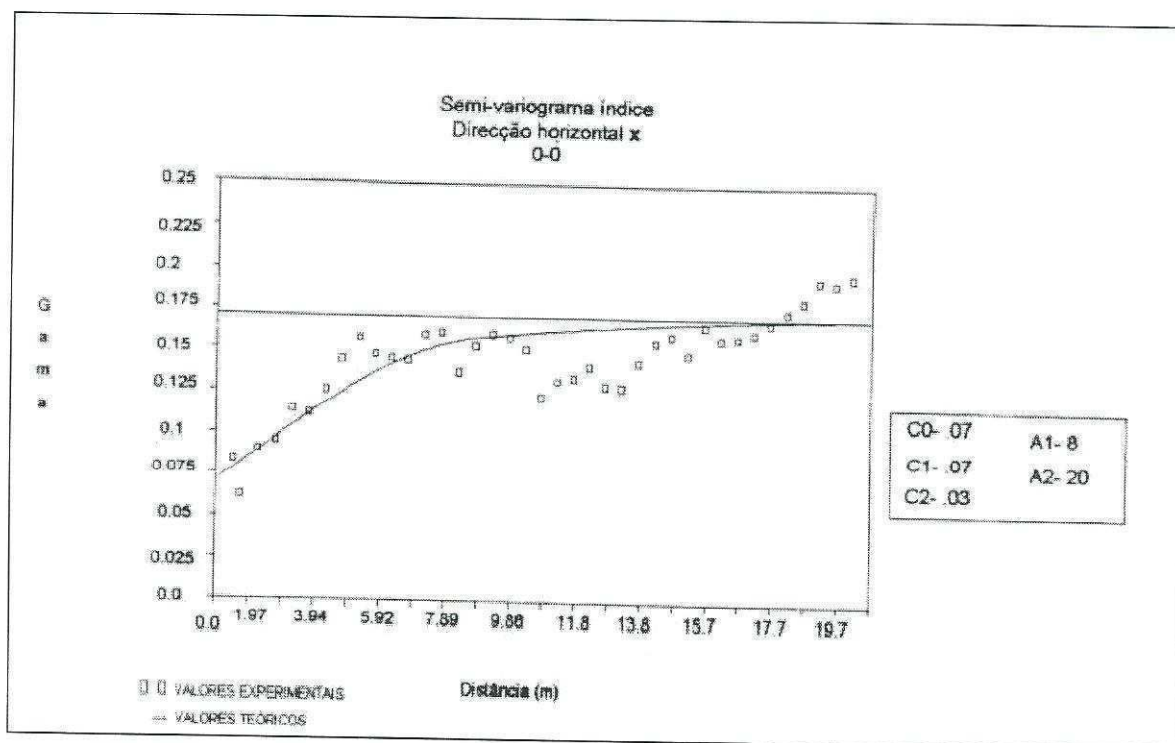


Fig. II.5.1.10 - Semi-Variograma índice, direcção horizontal x (0-0)

**II.5 - Estimação do Índice de Recuperação**  
 II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais

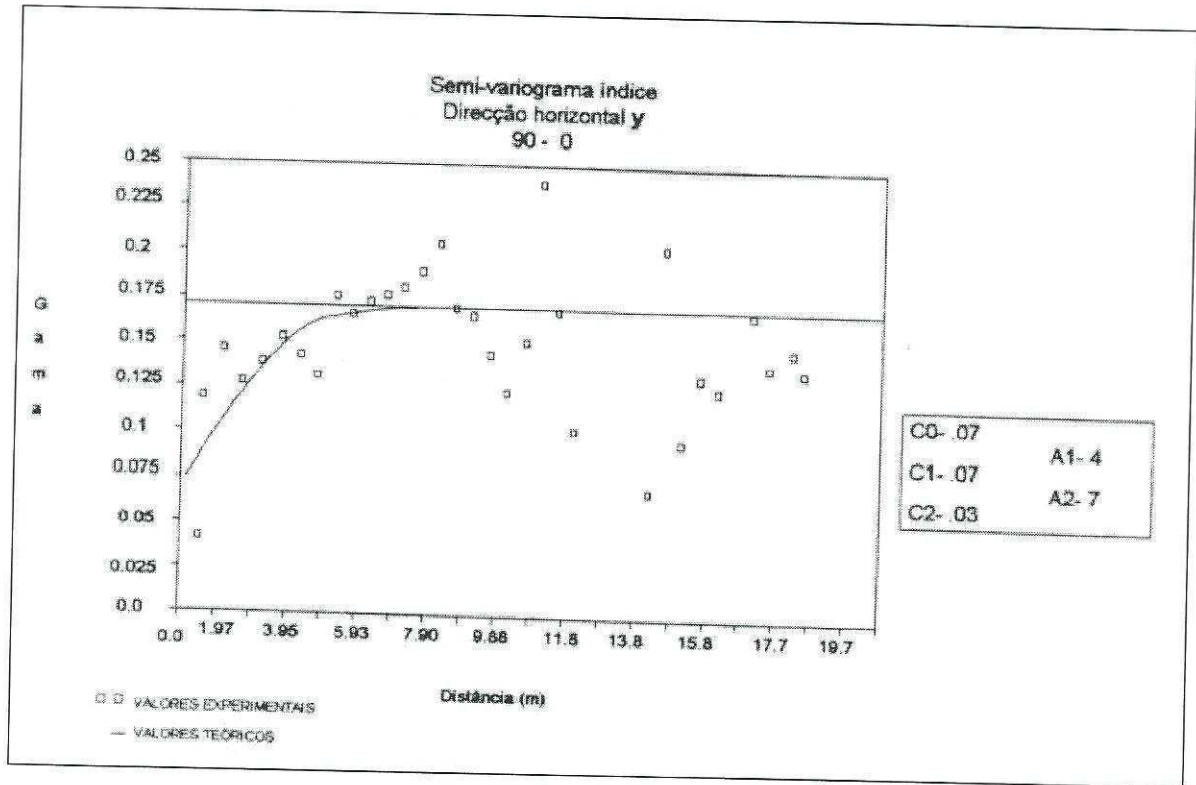


Fig. II.5.1.11 - Semi-Variograma índice, direcção horizontal y(90-0)

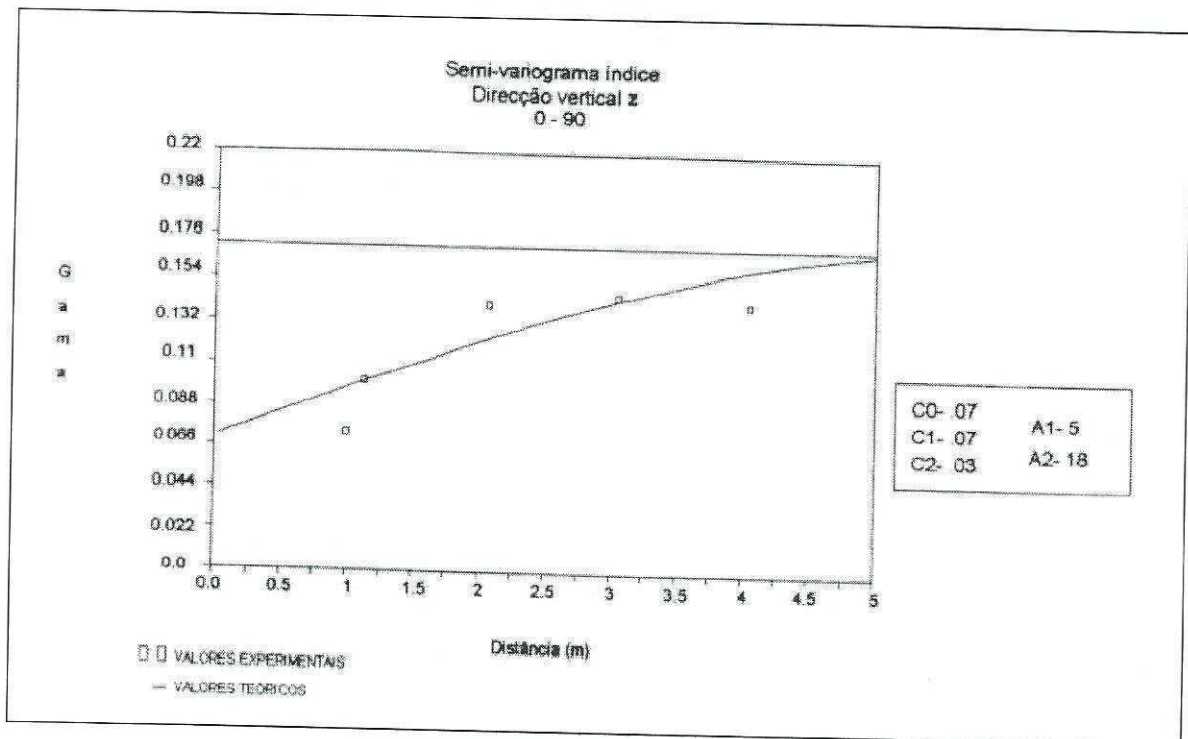


Fig. II.5.1.12- Semi-Variograma índice, direcção vertical z(0-90)

## II.5 - Estimação do Índice de Recuperação

### II.5.1 - Apresentação e validação de exemplos locais

---

A estimação efectuou-se por Krigagem Ordinária em cinco pisos de cota diferente. A ausência de uma planta da pedreira com o levantamento topográfico do local, não permitiu situar os pisos a cotas precisas.

Os resultados globais obtidos apresentam-se na *tabela II.5.1.3.*, assumindo 3 classes limitadas pelo intervalo representado.

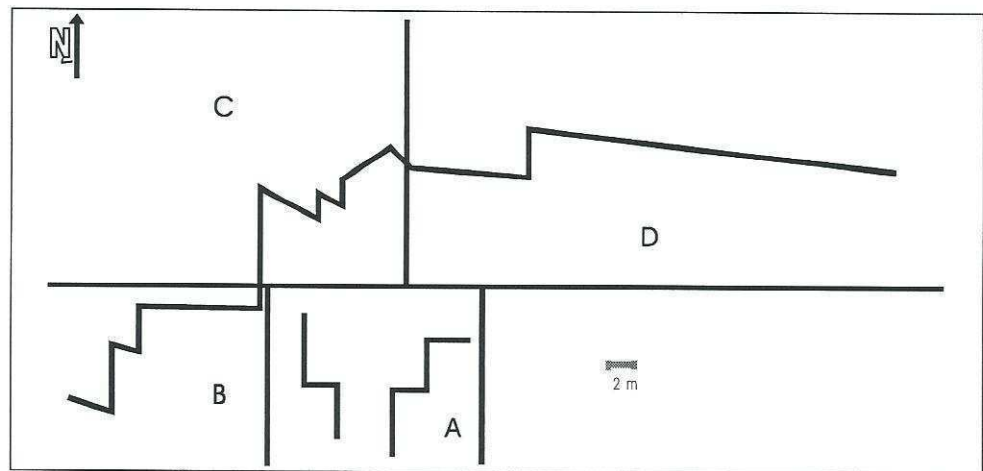
Totais por piso	piso-2	piso-1	piso0	piso1	piso2
BOM	180	187	206	213	234
Intermédio	136	123	96	107	85
Mau	47	53	61	43	44

*Tabela II.5.1.3 - Número total do tipo de Blocos / Piso*

A representação em planta para os cinco pisos pode ser analisada na *Fig.II.5.1.13*

Numa apreciação geral verifica-se que mais de 85% dos índices se situam nas classes intermédia e boa, onde mais de 50% estão nesta última. Se a recuperação se situar nos 25% para os blocos intermédios e nos 60% para os blocos bons obtém-se um volume total próximo dos 750m<sup>3</sup> de rocha aproveitável. Observa-se ainda uma tendência geral para a recuperação dos blocos aumentar de baixo para cima.

Como consequência da elevada variabilidade espacial observada, consideraram-se quatro zonas de domínio menor dentro das quais existe uma maior homogeneidade intrínseca dos atributos e da cor da rocha (*Fig.II.5.1.14*)



*Fig.II.5.2.14 - Zonamento da pedreira*

As zonas A e D são as mais favoráveis à exploração pois são as que possuem percentagem mais elevada de blocos bons (86%). A zona mais desfavorável é a zona B o que está coerente com as observações de como. A zona C é a mais heterogénea, aproximando-se da zona B em termos de percentagem relativa do valor do Índice mas distanciando-se no superior número de blocos médios e bons que é muito superior(*Fig.II.5.1.15*).

Como conclusão deste estudo local, aplicado a uma pedreira de xisto, pode-se considerar a avaliação global como positiva. No entanto é importante frisar que a escassez e a deficiente interpretação da informação disponível foram as principais causas para uma fraca validação dos resultados em algumas zonas.

## C - A pedra de ardósia de Valdeorras

### C-1 - Enquadramento

Nos exemplos anteriores construíram-se, para um exemplo de mármore e outro de xisto, variáveis índice, sintetizadores dos atributos que mais contribuem para a caracterização do maciço do ponto de vista da sua aptidão para a recuperação - *índice de recuperação*.

No estudo que se apresenta em seguida construiu-se uma variável índice sintetizadora dos atributos que mais contribuem para a caracterização da qualidade - *índice de qualidade* - da ardósia do ponto de vista do seu valor ornamental.

A pedra de ardósia estudada situa-se na região de Valdeorras, Norte de Espanha. Em Espanha o maior número de explorações de ardósia concentra-se em maciços de idade Ordovícica Média e Superior. As explorações mais importantes localizam-se nas megaestruturas geológicas conhecidas como os sinclínorios de Truchas (Orense-leão) e o de Caurel (Lugo-Leão), (*Fig.II.5.1.16*)

A principal aplicação das ardósias espanholas é cobertura de edifícios. Um telhado de ardósia de boa qualidade é uma cobertura impermeável, incombustível e muito resistente (Barros Lorenzo, 1994).

II.5 - Estimación de Índices de recuperación/calidade  
 II.5.1 - Apresentação e validación de exemplos locais

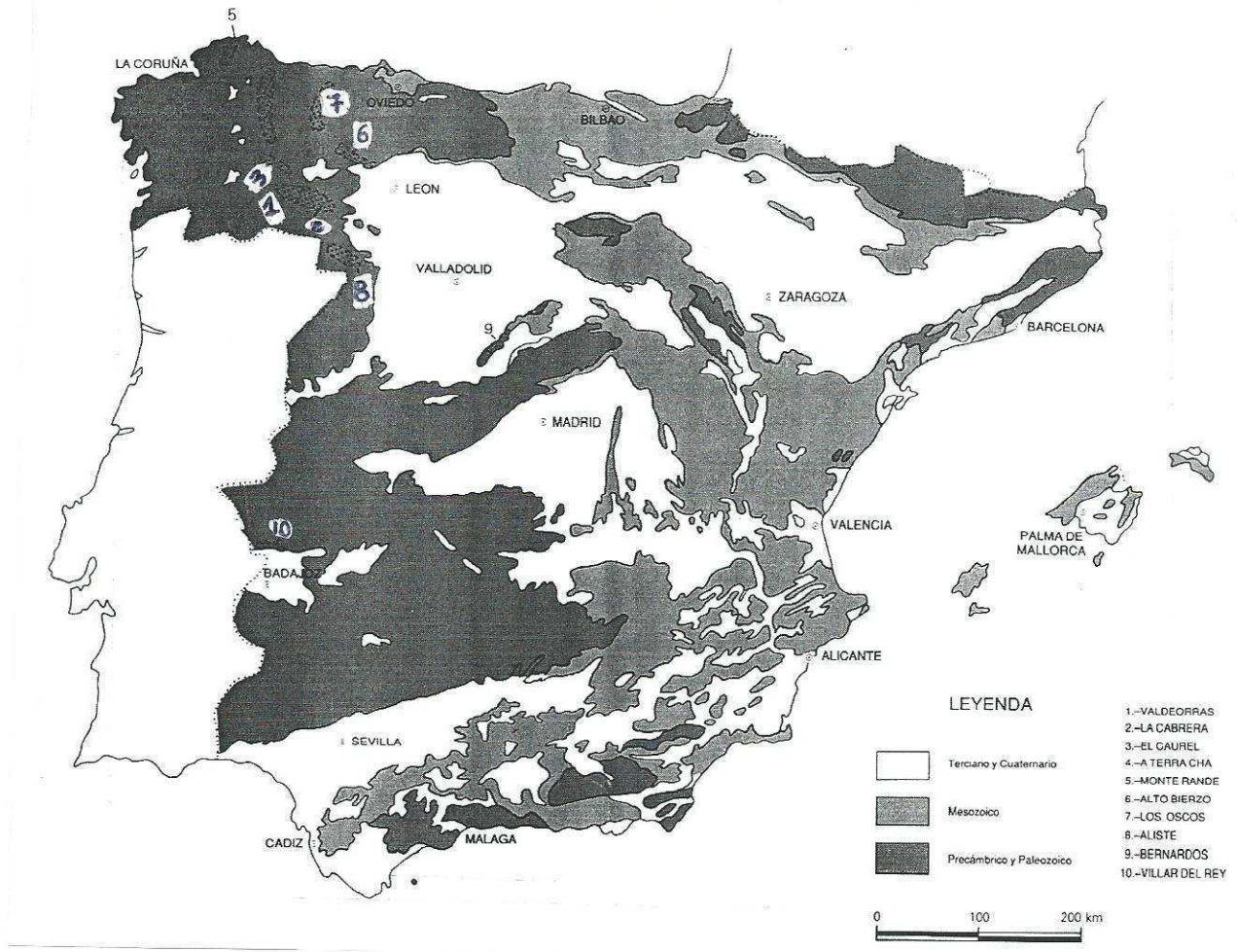


Fig.II.5.1.16. - Mapa Geológico de Espanha (in Lorenzo, Barros, 1994)

Nas *Fig.II.5.1.17* e *Fig.II.5.1.18*, apresentam-se duas fotografias da pedreira em estudo.



*Fig.II.5.1.17 - Aspecto de frentes em pisos de diferentes cotas*



*Fig.II.5.1.18 - Frente de desmonte*

A investigação de jazidas de ardósia ornamental requer o apoio de sondagens de amostragem contínua para a prospecção profunda, uma vez que os métodos indirectos não mostram contraste suficiente para este tipo de rochas (Taboada, 1993).

A uma escala macroscópica são os factores geológicos que mais influenciam a qualidade de um maciço de ardósia: factores estratigráficos; factores estruturais e factores metamórficos (Taboada, 1993). Assumindo a "qualidade" sentido duplo, pois agrega o conceito de *aptidão para a recuperação do maciço*, e o do *valor*, como rocha ornamental, *da placa extraída*.

A existência de metamorfismo de contacto, ulterior ao metamorfismo regional de baixo grau, é outro factor que influi negativamente a qualidade da rocha. A recristalização metamórfica "solda" os planos de xistosidade impedindo a esfoliação da rocha.

Os diques de quartzo, "Kink-Bands" e mais descontinuidades mais ou menos planas, diferentes da xistosidade e da estratificação condicionam, do mesmo modo, a explorabilidade do maciço (Taboada, 1993).

Os aspectos microscópicos são igualmente condicionantes sendo a composição mineralógica e a dimensão do grão os primeiros factores a ter em conta, uma vez que ambos influenciam os possíveis usos da ardósia.

Não são desejáveis os sulfuretos de ferro na rocha: pirite, pirrotite e marcassite uma vez oxidadas produzem manchas de óxido de ferro muito pouco estéticas.

A forma como se apresentam estes minerais também influencia: os agregados microcristalinos lenticulares de pirrotite nos planos de xistosidade, são muito mais oxidáveis que os cristais cúbicos de pirite.

Os carbonatos são, do mesmo modo, prejudiciais, pois ao dissolverem-se e meteorizarem-se produzem manchas esbranquiçadas na superfície da ardósia.

Com base no processo metamórfico sofrido pela rocha, outra condicionante das suas características é a sua homogeneidade microscópica. As ardósias com uma distribuição homogénea dos grãos de quartzo e filossilicatos são em geral mais físseis que aquelas cuja variação no tamanho do grão desses minerais permanece o da estratificação do sedimento argiloso que deu origem à ardósia.

A microtextura é o seguinte factor a ter em conta. A microtextura mais desejável é a lepidoblástica.

O último factor importante a ter em conta na rocha, talvez o menos conhecido, é a existência em muitas ardósias de uma certa orientação preferencial dos minerais aciculares sobre o plano de xistosidade. É o que se denomina grão grosseiro e tem sido interpretado como a direcção do eixo intermédio do elipsoide de deformação da rocha. Tem bastante importância pois constitui a segunda direcção preferencial de rotura da rocha. Por vezes é observável no campo ou em amostra de mão, com lupa, mas por vezes só é possível determiná-la sobre lâmina delgada cortada segundo os planos S1. O grão grosseiro deverá ser utilizado como direcção de corte no corte de blocos de ardósia, durante a laboração (Taboada, 1993).

### *C.2 - índice de qualidade - recolha de dados e aplicação da metodologia geoestatística proposta*

Neste exemplo apresenta-se uma variável índice construída a partir da síntese de atributos, codificados como representado na *tabela II.5.1.4* e tendo em conta os aspectos macro e microscópicos apresentados no ponto anterior, que reflectem características do valor da ardósia como rocha ornamental - *índice de qualidade*. A informação foi recolhida a partir da observação das carotes da campanha de sondagens assinalada na *Fig.II.5.1.20*, assumindo como suporte de observação um segmento contínuo de 5m.

Apresenta-se de seguida a tabela com os atributos e respectivas classes, com a codificação utilizada na construção dos pólos ( BOM e MAU)

ATRIBUTOS	CLASSES	POLO Mau	POLO Bom
<i>"Ardósia queimada"</i>	Ausente	0.000	0.800
	1 - 30%	0.200	0.200
	+ de 30%E	0.800	0.000
<i>Kink Bands</i>	Ausente	0.000	0.810
	1-2	0.190	0.190
	+ 2	0.810	0.000
<i>Veios de quartzo</i>	Ausente	0.000	0.790
	1-2	0.210	0.210
	+2	0.790	0.000
<i>Laminações arenosas</i>	Ausente	0.010	0.990
	Presente	0.990	0.010
<i>Oxidações</i>	Ausente	0.000	1.000
	Presente	1.000	0.000
<i>"Lunas"</i>	Ausente	0.020	0.980
	Presente	0.980	0.020
<i>"ardósia torcida"</i>	Ausente	0.005	0.995
	Presente	0.995	0.005
<i>Crenulações</i>	Ausente	0.015	0.985
	Presente	0.985	0.015
	<b>Índice</b>	<b>3</b>	<b>-3</b>

Tabela II.5.1.2.4 -Arquétipos definidores do eixo discriminante

Com base neste atributos construiu-se a variável de síntese - índice de qualidade - para 14300 suportes experimentais - segmentos de 5m de comprimento. O estudo estrutural permitiu verificar que a componente vertical é determinante. O Semi-Variograma omnidireccional apresentado na Fig.II.5.1.19 é idêntico ao Semi-Variograma vertical. Não foi possível identificar direcções de anisotropia ( uma malha de sondagens mais densa poderia eventualmente permitir identificar a continuidade espacial da variável noutras direcções).

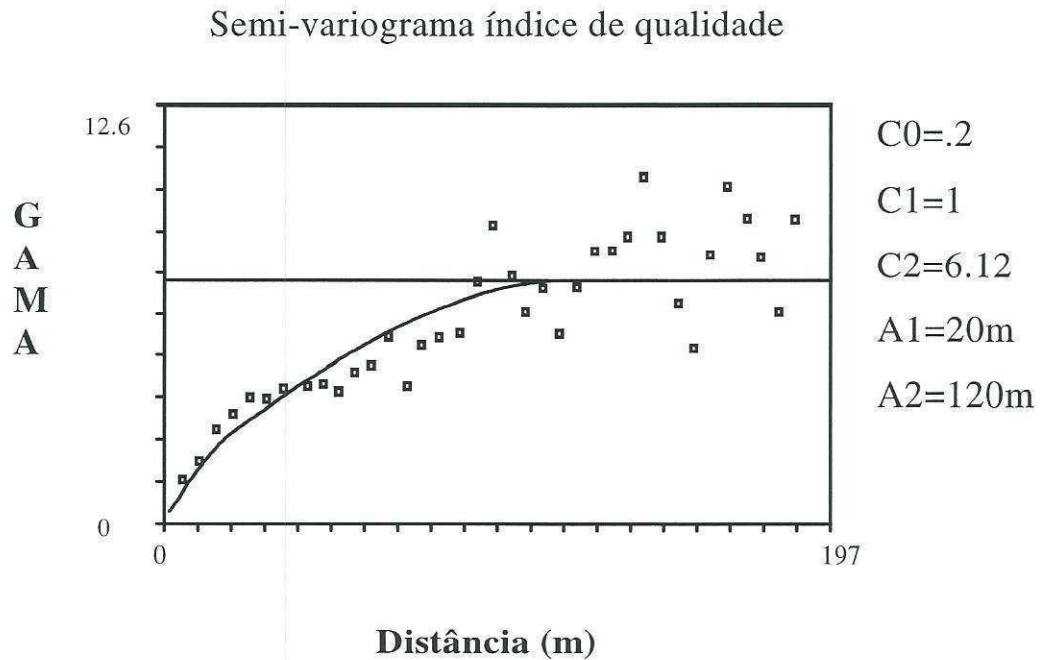


Fig.II.5.1.19--Semi-Variograma, omnidireccional, para o índice de qualidade

A estimação foi feita por interpolação a partir dos valores experimentais recolhidos ao longo das sondagens estudadas, permitindo uma cartografia, em profundidade, para quatro pisos separados de 5m, que se apresenta nas figuras seguintes.

A observação dos diferentes pisos mostra uma evolução favorável, em profundidade, dos núcleos de maior qualidade o que é coerente, segundo a opinião pericial feita pelos técnicos responsáveis pela exploração, com a realidade.



## **II.5. - Estimação do Índice de Recuperação**

### *II.5.2 - Apresentação e validação de um exemplo regional*

Depois de realizado o estudo variográfico para o conjunto das pedreiras de mármore do Monte da Vigária passou-se à primeira abordagem de estimar não blocos de desmonte à escala industrial da pedreira mas a tentativa de, utilizando a Krigagem ordinária, cartografar áreas de maior favorabilidade para a recuperação.

O modelo utilizado foi o apresentado no capítulo II.4.2:

<b>NE - SW</b>	<b>Co=0.15</b>	<b>C1=0.12</b>	<b>C2=0.505</b>	<b>a1=30m</b>	<b>a2=35</b> <b>0m</b>
<b>NW - SE</b>	<b>Co=0.15</b>	<b>C1=0.12</b>	<b>C2=0.505</b>	<b>a1=30m</b>	<b>a2=85</b>

Esta abordagem serve ainda como ponto de partida para a validação ulterior, com os peritos da exploração, das diferentes metodologias de estimação testadas (cap.II.7).

Começou por se realizar o teste do ponto fictício. Este teste consiste na selecção de amostras que depois de retiradas do conjunto de amostras existentes o seu valor é estimado por Krigagem, a partir da restante informação (Sousa e Muge, 1990). Deste modo é possível quantificar os erros associados à estimação permitindo uma comparação directa com os respectivos valores teóricos, previstos pelo procedimento de estimação cujos resultados dependem, entre outros factores, do Modelo Teórico ajustado ao Semi-Variograma experimental.

Os parâmetros de teste calculados são:

*erro médio (e.m),*

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z^*(x_i)] \quad (\text{II.5.2.1})$$

que deve ter um valor próximo de zero (ausência de enviezamento sistemático);

*erro relativo quadrático médio (e.r.q.m),*

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{([z(x_i) - Z^*(x_i)])^2}{\sigma^2} \quad (\text{II.5.2.2})$$

que deve ser próximo de 1. Um valor superior à unidade indica uma sub-estimação da variância de krigagem e inferior uma sobre-estimação da mesma.

Na definição das amostras vizinhas a incluir no algoritmo de estimação definiu-se que cada amostra fosse estimada com base num máximo de 12 e um mínimo de 4 suportes

Na *Fig.II.5.2.1* apresenta-se a representação gráfica dos valores reais *versus* valores estimados, que permite visualizar o afastamento da nuvem de pontos em relação à recta bissectriz que corresponde à estimação “ideal”.

## II.5. - Estimação do Índice de Recuperação

### II.5.2 - Apresentação e validação de um exemplo regional

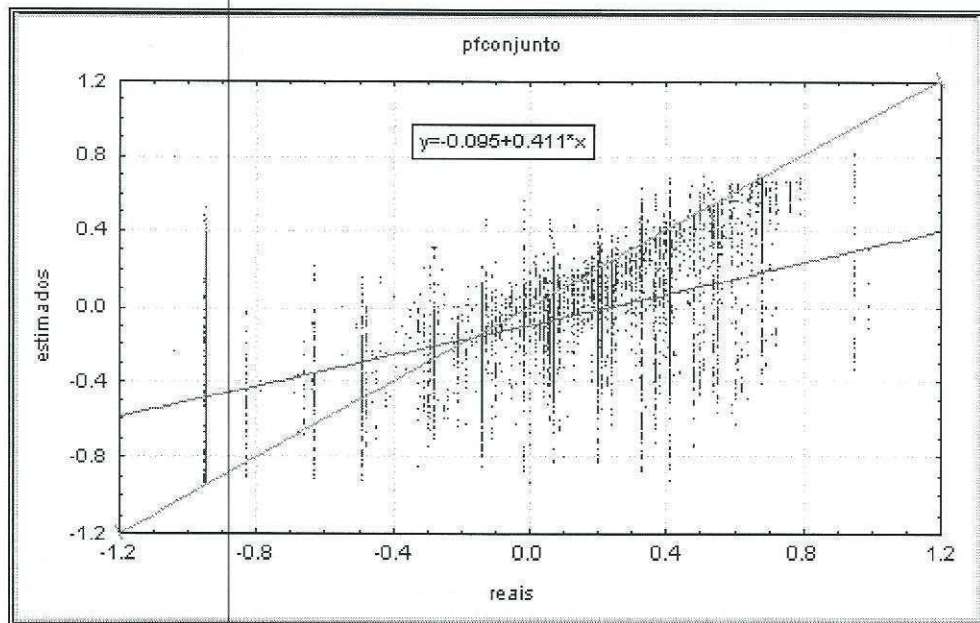


Fig. II.5.2.1 - Resultados dos valores estimados pelo teste do ponto fictício, por krigagem ordinária versus dados reais.

Os valores obtidos foram:

<i>valor médio estimado</i>	<b>-0.162</b>
<i>variância de dispersão</i>	<b>0.138</b>
<i>erro médio</i>	<b>0.190</b>
<i>variância do erro</i>	<b>0.0003</b>

Tabela II.5.2.1 - Resultados do teste do ponto fictício calculado para a totalidade de suportes.

Tal como referido em (Sousa e Muge, 1990) no caso da Krigagem ordinária, devido ao efeito atenuador introduzido pelos ponderadores, a dispersão dos valores estimados é menor do que a dos valores reais, pelo que se deve verificar, em média uma subida dos valores menores e uma descida nos valores mais elevados.

## II.5. - Estimação do Índice de Recuperação

### II.5.2 - Apresentação e validação de um exemplo regional

Apresenta-se na Fig.II.5.2.2. o histograma para as principais classes da variável (valores reais).

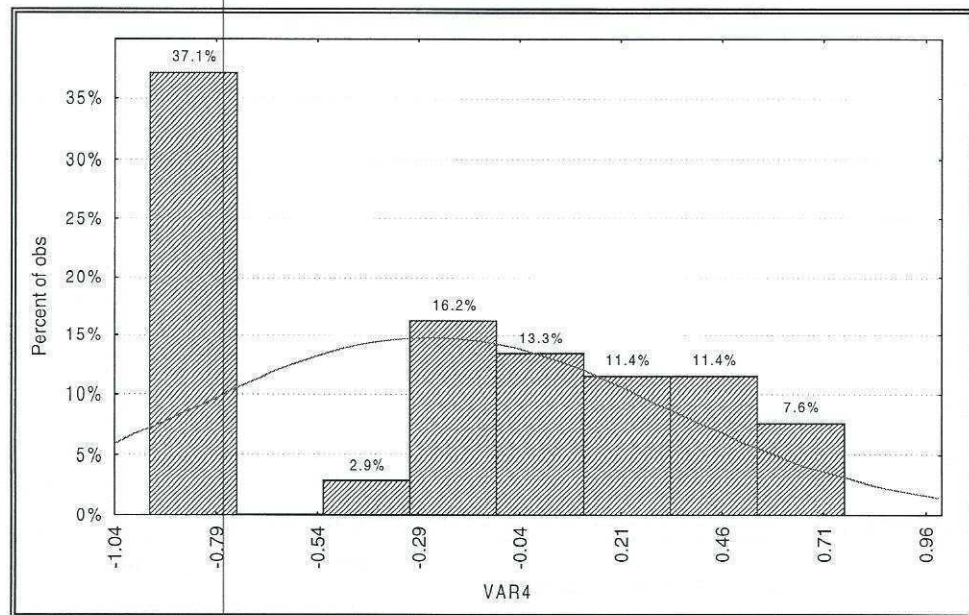


Fig.II.5.2.2 - Histograma dos valores experimentais do índice

Procedeu-se de seguida à estimação áreas de 50x50m em quatro pisos, de altura média igual a 5m, em que se atribuiu cota negativas (-2.5m;-7.5m;-12.5m;-17.5m) correspondentes ao ponto central dos suportes para cada piso respectivo.

Em termos de validação a krigagem ordinária oferece um quadro atenuado, tal como seria de esperar, dos extremos.

## **II.6 - Incorporação de Informação Regional**

*II.6.1 - Determinação de uma função de deriva externa: os acidentes regionais*

---

## **II.6 - Incorporação de Informação Regional**

*II.6.1 - Determinação de uma função de deriva externa: os acidentes regionais*

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.1 - Determinação de uma função de deriva externa: os acidentes regionais

Tal como já referido na introdução, a produção de rocha ornamental tem como objectivo essencial a obtenção de rocha com características estéticas e mecânicas boas, mas também que apresente, para transformação em bloco, “dimensões comerciais” adequadas.

Torna-se, deste modo, evidente que todas as discontinuidades presentes (filões, intercalações xistosas, diaclases, falhas, etc), a menos que contribuam para uma maior valia estética, condicionam fortemente a determinação da blocometria comercial, determinando, frequentemente, o êxito da exploração ou o seu abandono.

Verifica-se que é a fracturação do maciço o maior responsável pelos insucessos verificados. A redução da “ dimensão comercial” dos blocos, pode conduzir a uma diminuição da recuperação o que compromete a própria rentabilidade da exploração (Costa, 1992).

Daí que, para o planeamento da exploração, se tenham seleccionado os atributos que melhor permitem caracterizar a fracturação, incluindo nesta denominação tanto falhas como diaclases.

Ao abordar pela primeira vez, a problemática da exploração de mármore de um ponto de vista regional, surge a questão essencial da multiplicidade de escalas de observação. Por um lado temos a fracturação observada na frente de trabalho, recolhida a escalas aproximadas de 1/10 por fotografia e por outro a fracturação regional cartografada a escalas de 1/5000 ou 1/10000.

Na verdade a aplicação da metodologia adoptada (Pereira *et al*, 1992) implica a recolha de dados a nível local.

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.1 - Determinação de uma função de deriva externa: os acidentes regionais

---

Nesta avaliação local, não é possível englobar a informação dos grandes acidentes regionais. Em muitos dos casos porque não chegam a intersectar as pedreiras, logo não são visíveis, noutros porque seriam interpretados como mais um acidente local. Na verdade os acidentes regionais deverão ser interpretados de uma outra forma, isto porque condicionam estruturalmente o anticlinal. Na verdade o Monte da Vigária encontra-se afectado por duas dobras secundárias, em anticlinal/sinclinal, impondo um regime de fracturação convergente no fecho do sinclinal e divergente no fecho do anticlinal. Este primeiro aspecto é importante uma vez que será de esperar uma maior densidade de fracturação nas proximidades do fecho do sinclinal. Os outros acidentes cartografados regionalmente (filões e metavulcanitos) tem também uma “dimensão” regional na forma como afectam as explorações neste caso não só porque correspondem em muitos dos casos a preenchimentos de falhas mas também porque apresentam orientações preferenciais (famílias) daí esperar-se uma maior ocorrência nas áreas mais próximas dos mesmos.

Em conclusão pode dizer-se que se torna importante englobar a informação regional, neste caso “distância a acidentes”, na metodologia de estimação do índice de recuperação.

**II.6 - Incorporação de Informação Regional**  
*II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)*

---

**II.6 - Incorporação de Informação Regional**  
II.6.2 – Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

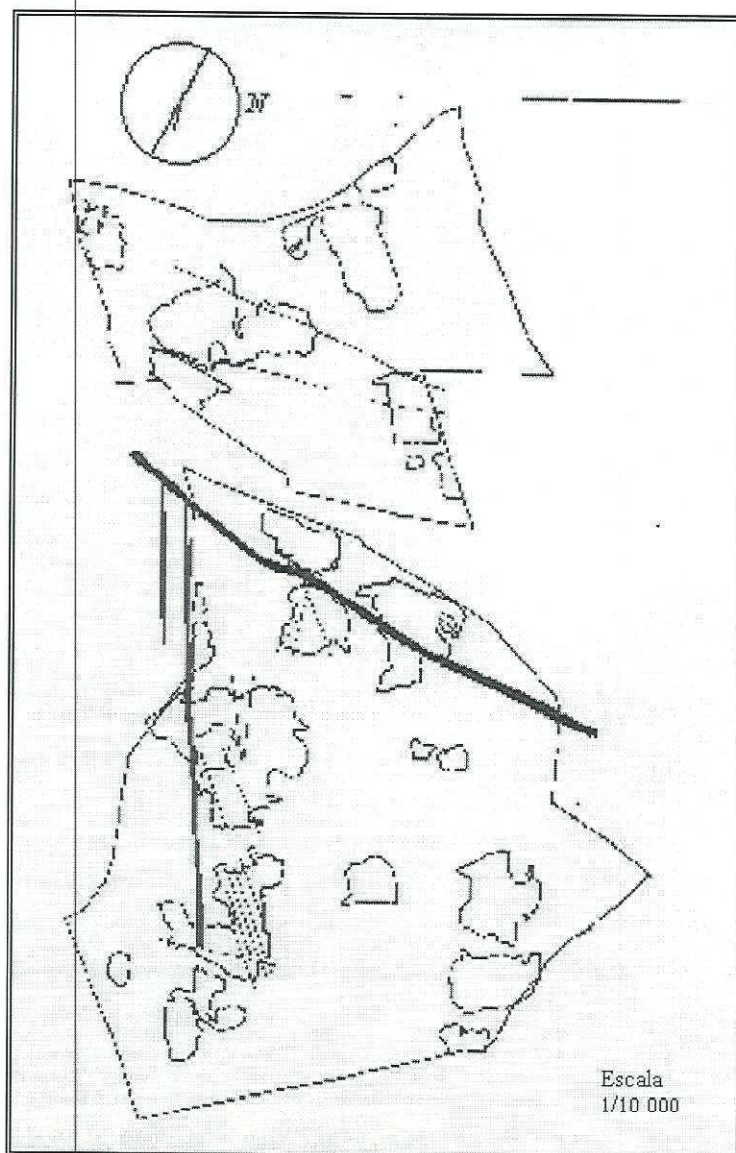
### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

#### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um Sistema de Informação Geográfica (IDRISI)

Utilizou-se um Sistema de Informação Geográfica (IDRISI) que permitiu efectuar os cálculos necessários para a execução da metodologia proposta. Trata-se de um software que permite realizar as funções de análise e cálculo em dados que se encontram em formato raster. Tal não invalida, no entanto, que se introduza informação vectorial.

A carta fonte de partida (*Fig.II.6.2.1*) representando à escala 1/10000 as pedreiras do Monte da Vigária, previamente importada em formato TIF e convertida a IDRISI permitiu a sobreposição de toda a informação considerada relevante. Nomeadamente: Falhas; Metavulcanitos; Filões Doleríticos; limite do mármore às formações dolomíticas subjacentes.

**II.6 - Incorporação de Informação Regional**  
*II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)*



*Fig.II.6.2.1 - Carta geral das pedreiras e acidentes do Monte da Vigária*

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

Criou-se uma carta com o conjunto de todos os “acidentes” (linhas) cartografados por digitalização directa na carta de partida (*Fig..II.6.2.2.*), bem como uma carta dos contornos das pedreiras (polígonos) (*Fig II.6.2.3*).

O algoritmo utilizado (DISTANCE) produz uma superfície contínua de valores de distância euclidiana a partir de conjunto de feições. Os valores produzidos são medidos em unidades tais como metros ou quilómetros. A distância com atrito calcula a distância em termos de uma medida qualquer de custo e os valores resultantes são conhecidos como distância de custo. Como no exemplo anterior requer uma imagem como entrada a partir da qual as distâncias são calculadas e ulteriormente ponderadas de acordo com o sistema de pesos afecto às variáveis escolhidas. Os valores de atrito são sempre calculados de acordo com um valor básico previamente fixado, geralmente igual a 1. É dado em números reais para permitir valores fraccionários, podendo assumir valores entre 0 e  $1 \times 10^{37}$ . Os atritos raramente são especificados com valores inferiores a 1 (valor básico).

O produto final é uma superfície similar aquela criada com o módulo DISTANCE. A diferença é que agora considera-se o atrito e as unidades são distâncias tais como metros ou quilómetros. Independentemente do esquema usado para representar o atrito, a imagem de distâncias de custo resultante irá incorporar tanto a distância efectiva percorrida como o efeito do atrito encontrado ao longo do caminho.

Considera-se, na presente discussão, o caso em que se considera o atrito isótropo uma vez que consideramos que o peso atribuído a um acidente é independente da direcção tomada para o atingir.

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

Para o cálculo das distâncias digitalizaram-se os diferentes tipos de acidentes separadamente dando origem a três cartas, (Fig.II.6.2.4; II.6.2.5; II.6.2.6) que permitirão o tratamento independente de cada grande tipo de descontinuidades do maciço marmóreo.

Foram depois convertidas para o modo raster, para se proceder ao cálculo das distâncias.

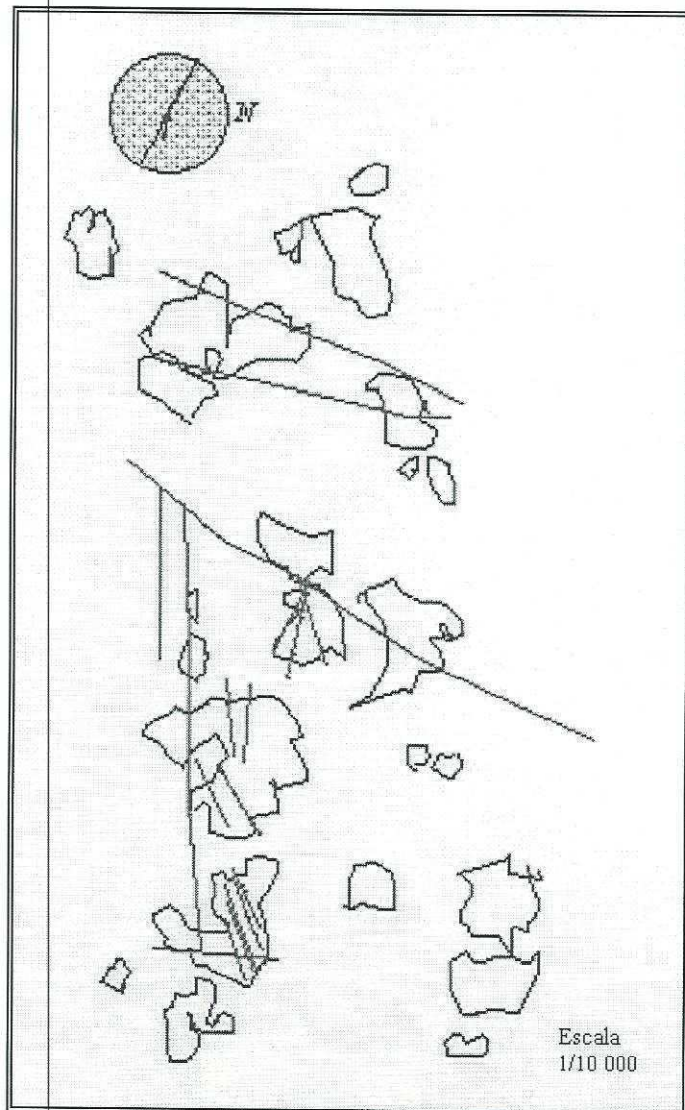
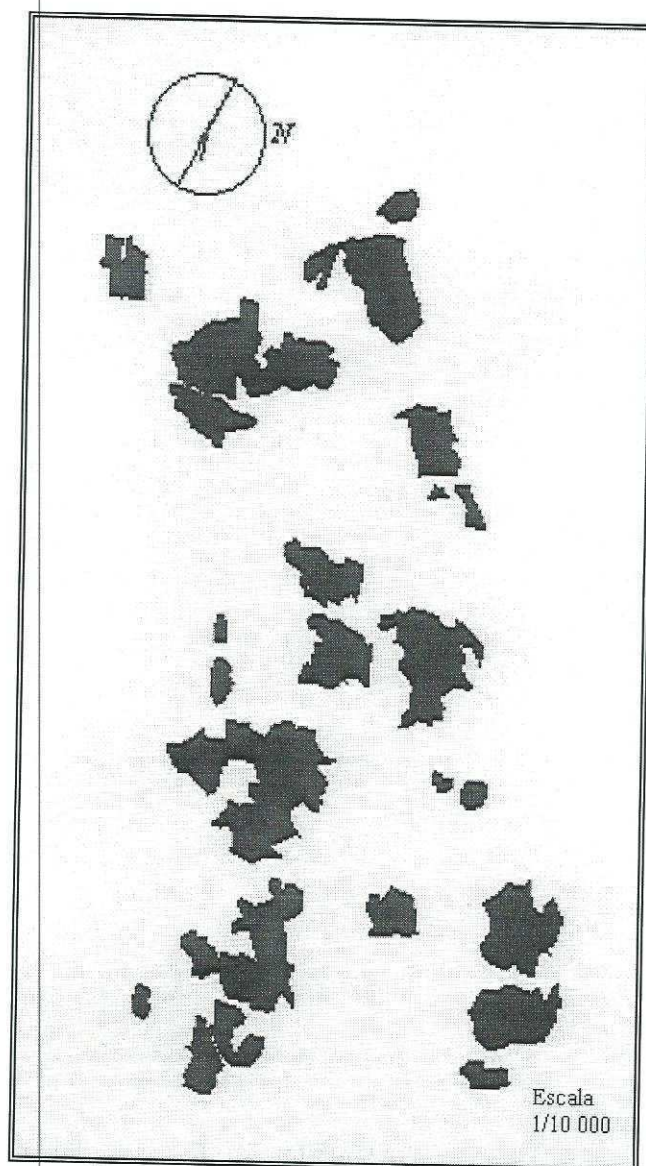


Fig.II.6.2.2 - Representação da globalidade dos acidentes.

**II.6 - Incorporação de Informação Regional**  
*II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)*



*Fig.II.6.2.3 - Representação das pedreiras do Monte da Vigária em modo raster*

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

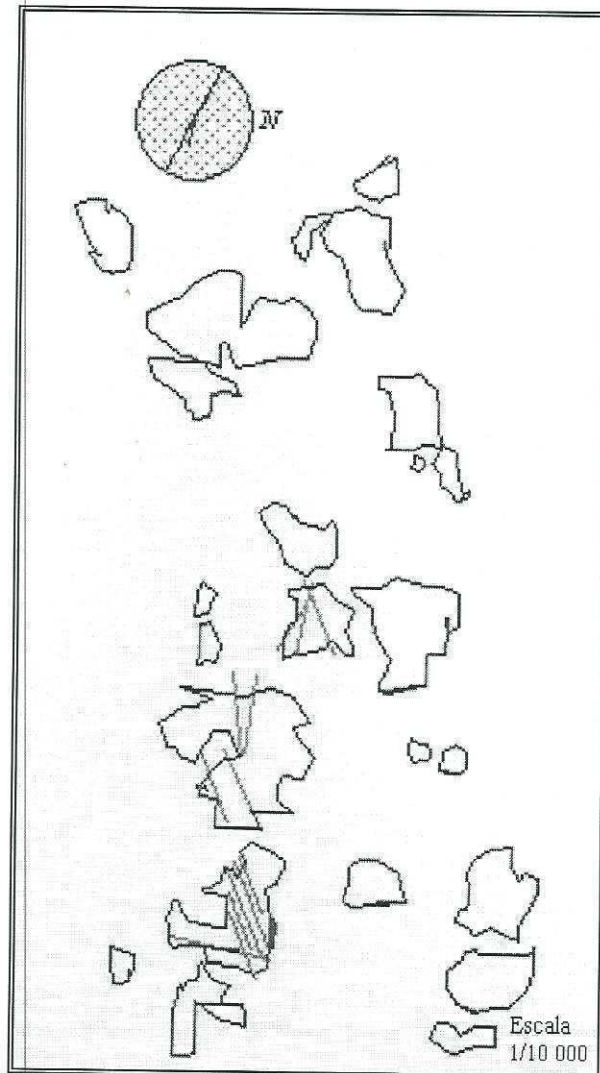


Fig.II.6.2.4 - Representação da fracturação

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

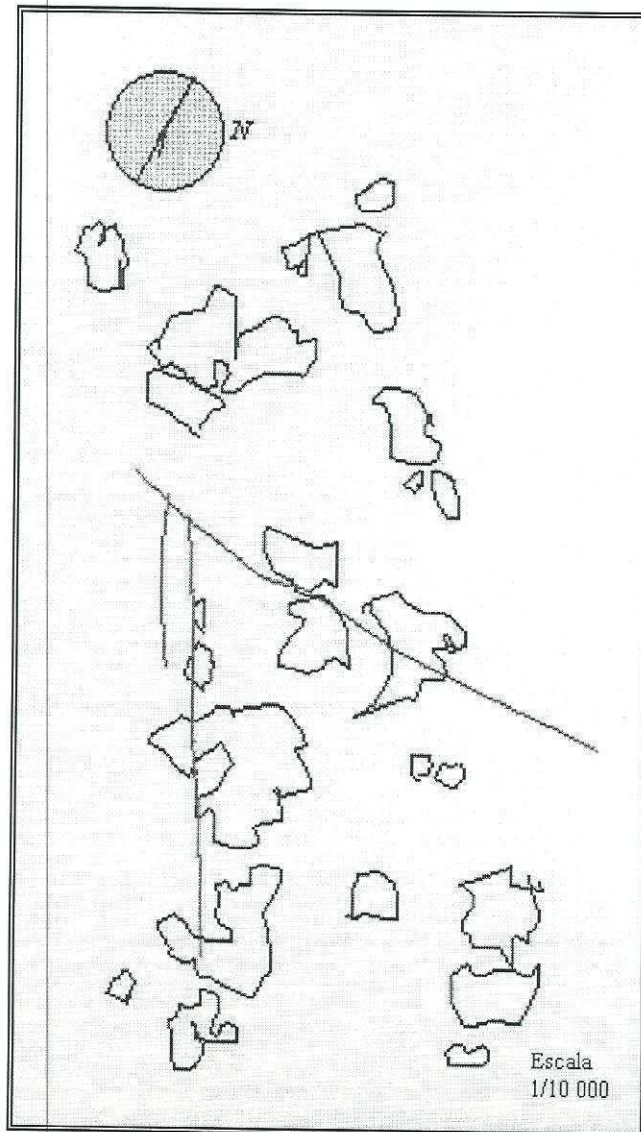
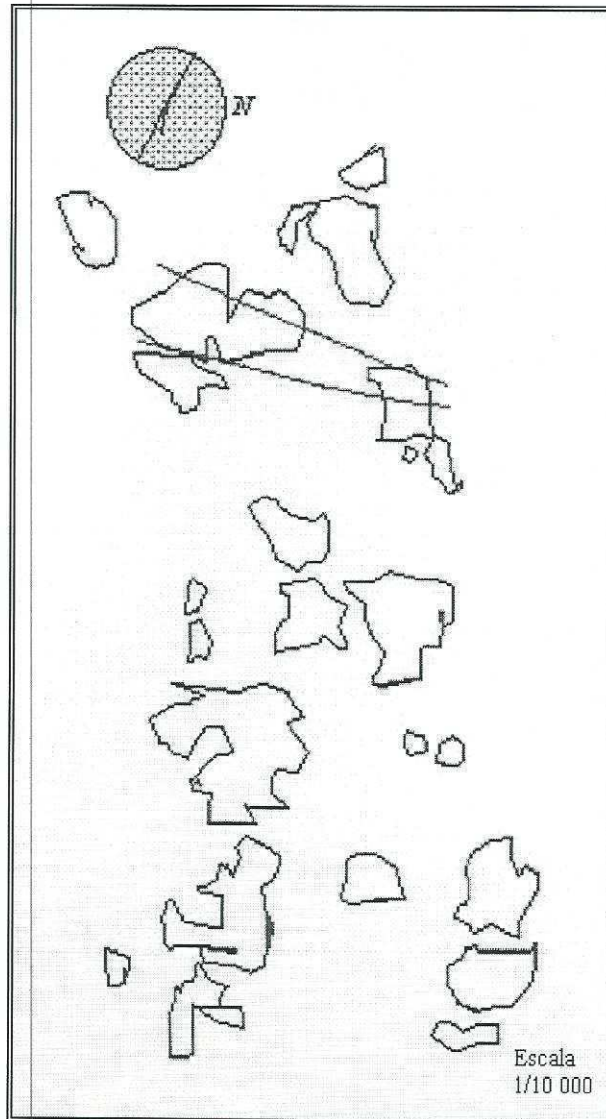


Fig.II.6.2.5 - Representação dos Metavulcanitos

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)



*Fig.II.6.2.6 - Representação dos Filões Doleríticos.*

## II.6 - Incorporação de Informação Regional

### II.6.2 - Cálculo de distâncias a acidentes utilizando um SIG (IDRISI)

---

Os operadores de distância permitem calcular distâncias a partir de uma feição única ou de um conjunto de feições. Neste caso calculou-se a distância ao conjunto de todos os acidentes em relação a toda a área coberta pela exploração, na nova carta obtida o valor armazenado de cada pixel é a menor distância entre o final e a feição mais próxima. O resultado é uma superfície de distâncias, ou seja uma representação continua dos valores obtidos (*Fig.II.6.2.7*).

Numa segunda abordagem consideram-se distâncias pesadas, ou seja em que se atribui um atrito específico à distância euclidiana calculada separadamente a cada tipo de acidente (filões ; metavulcanitos e falhas) (*Fig.II.6.2.8; II.6.2.9; II.6.2.10*).

Para isto torna-se necessário criar valores de atrito, que são expressos em termos de uma medida de custo específica a ser calculada, para este caso foram dos valores de atrito aos acidentes de acordo com o seu peso penalizante para a exploração (filões - 1000; falhas - 100; metavulcanitos - 500). Estes valores simbolizam o peso do custo de “deslocamento” na exploração e evidenciam uma hierarquia de “penalizações”. A interactividade do método permite-nos testar vários conjuntos de pesos de forma a que no final, depois da validação, se consiga perceber exactamente qual a hierarquia mais adequada. Partiu-se do conjunto de pesos indicados anteriormente, encontrados após discussão com o técnico da exploração.

O cálculo das distâncias para cada suporte experimental obteve-se criando uma carta vectorial com todos os suportes de todas as pedreiras que se sobrepõe às cartas de distâncias seleccionadas. Obtêm-se, deste modo, directamente o valor pontual (suporte) de cada distância para cada janela de observação local.

A necessidade do valor da função deriva nos pontos a estimar levou à necessidade de se construir uma grelha vectorial que, sobrepondo-se mais uma vez aos mapas de distâncias permitiu conhecer o valor da função para cada bloco a krigar.



## II.7 - Krigagem com Deriva Externa

A krigagem com deriva externa (Wackernagel, 1995; Goovaerts, 1997) consiste na estimação da variável principal condicionada linearmente pelos valores de uma ou mais variáveis auxiliares ou secundárias. Esta(s) variável(eis) terá, necessariamente que ser conhecida em todos os pontos experimentais a utilizar no processo bem como em toda a área que se pretende estimar.

Hudson (1993) utilizou a Krigagem com Deriva Externa para estimar temperatura na Escócia, utilizando a altitude como informação externa. Em Figueira (1996) a distância à costa foi utilizada para condicionar a estimação da concentração salina em líquenes numa região do litoral alentejano. Em Figueira *et al* (1998) a metodologia foi generalizada, de modo a incluir, na estimação espaço temporal da concentração salina em líquenes, como função de forma (Wackernagel, 1995), os resultados da modelação determinista.

A esperança matemática da variável principal  $Z(x)$  condicionada à variável secundária (auxiliar)  $Y(x)$  é descrita como uma função linear pela seguinte equação:

$$E\{Z(x_i)\} = aY(x_i) + b \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (II.7.1)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes e onde  $n$  é o número de amostras de  $Z(x_i)$ .

O estimador de krigagem é definido por

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (II.7.2)$$

A condição de não enviesamento exige que a diferença entre os valores reais e os estimados seja igual a zero, ou seja:

$$E\{Z^*(x_0) - Z(x_0)\} = 0 \quad (II.7.3)$$

ou utilizando II.7.2,

$$E\left\{\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)\right\} = 0 \quad (II.7.4)$$

a equação II.7.1 pode, então, ser re-escrita da seguinte forma

$$a \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) - Y(x_0) \right] + b \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] = 0 \quad (II.7.5)$$

A deriva externa dá assim origem a uma nova condição de universalidade por cada variável auxiliar, a acrescentar à que surge na da krigagem Ordinária.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (II.7.6)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) = Y(x_0)$$

A condição de optimalidade é conseguida através da minimização da variância de Krigagem:

$$E\left\{\left(Z^*(x_0) - Z(x_0)\right)^2\right\} - 2\mu_1 \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] - 2\mu_2 \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) - Y(x_0) \right] \min \quad (II.7.7)$$

tem-se, então, o Sistema de Krigagem definido da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_{ij} + \mu_1 + \mu_2 Y(x_i) = \gamma_{i0} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j Y(X_j) = Y(x_0) \end{array} \right. \quad \forall i=1, \dots, n \quad (II.7.8)$$

Sendo a variância de krigagem definida por

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{i0} + \mu_1 + \mu_2 Y(x_0) \quad (II.7.9)$$

Resta acrescentar que a variável secundária deve ter uma relação com a variável principal a estimar uma relação física bem definida ( Deutsch & Journel, 1992), o que neste caso faz sentido, uma vez que é de esperar uma maior densidade de fracturação próximo de acidentes maiores.

### II.7.1 - Utilização de Distâncias a Acidentes Regionais

#### II.7.1.1 - Determinação de distâncias a acidentes

Tal como referido no ponto anterior a "distância" a utilizar reveste-se de particular importância na determinação da função a utilizar como deriva externa, na estimação da variável índice.

A influência dos acidentes regionais na determinação da fracturação local do maciço é um problema em aberto neste estudo, que se pretende exaustivo, propõe-se determinar :

1 - A influência genérica dos acidentes regionais ( falhas; metavulcanitos; filões doleríticos) na fracturação local das pedreiras.

2 - Uma hierarquia de pesos para os três tipos de acidentes considerados. Ou seja, se de algum modo, é possível estabelecer uma tipologia específica de influência na densidade de fracturação local .

Para a exploração destes dois pontos, procedeu-se à decomposição da questão em duas abordagens distintas:

Na primeira abordagem:

**A - Cálculo da menor distância.** Ou seja, a distância ao acidente mais próximo.

Os resultados deste procedimento evidenciam uma clara correlação entre os valores encontrados para a variável - índice - e a distância a um qualquer acidente (*Fig.II.7.1.17*). Poder-se-á afirmar que a fracturação local se torna mais densa com a proximidade a um acidente regional independentemente do "tipo" do mesmo, ou seja, que existe um controle genérico da densidade de fracturação local pelos acidentes regionais.

Na segunda abordagem:

**B - Cálculo de distâncias considerando atrito.** Ou seja, atribuindo pesos diferentes às distâncias calculadas a cada tipo de acidente.

Neste caso pretende-se explorar a correlação entre os valores da variável a estimar - índice - e os diferentes tipos de acidentes. Não considerando atrito, (o que significa que todos os acidentes, regionais, tem um contributo idêntico para a densidade de facturação local), os diagramas de dispersão multivariados, assumindo um modelo de ajuste linear (*Fig.II.7.1.4; a Fig.II.7.1.6*), apresentam valores de correlação muito baixos, indicando variáveis independentes. Nos modelos logarítmico e polinomial (para distâncias com atrito) (*Fig.II.7.1.10 a II.7.15*) mantêm-se a mesma tendência.

Numa segunda fase estudaram-se várias combinações de atritos possíveis. Apresentam-se (Fig.II.7.1.7 a Fig. II.7.1.9) os resultados obtidos pela combinação de pesos que partiram de uma base pericial, ou seja tendo em conta a informação fornecida técnicos que trabalham no local. A partir desta informação conclui-se que os filões doleríticos são extremamente penalizantes, seguindo-se a presença de metavulcanitos e fracturação regional. Assim utilizou-se a seguinte combinação de pesos:

Filões doleríticos - 1000

Metavulcanitos - 500

Falhas - 100

Deste modo, procurou-se entender uma determinada tipologia regional se correlaciona preferencialmente com a variável considerada - índice. Tal como se pode observar, nos diagramas de dispersão referidos, a independência das variáveis estudadas parece evidente, não sofrendo alterações significativas quando se propõe um modelo de ajuste não linear (logarítmico ou polinomial).

Assim parece evidente uma influência genérica dos acidentes regionais na densidade e padrão (sintetizado no *índice*) de fracturação local, mas uma quase independência com as tipologias consideradas. Torna-se deste modo importante o conhecimento da densidade de acidentes regionais do que a sua tipologia, para o correcto planeamento local das explorações.

Apresentam-se nas figuras seguintes os diagramas de dispersão correspondentes às distâncias euclidianas aos diferentes tipos de acidentes, bem como a análise de resíduos para os esquemas multivariados propostos. A ausência de correlação entre as variáveis independentes (distâncias) e a variável dependente (índice) é evidente.

## II.7 - Krigagem com Deriva Externa

### II.7.1 - Utilização de Distâncias a Acidentes Regionais

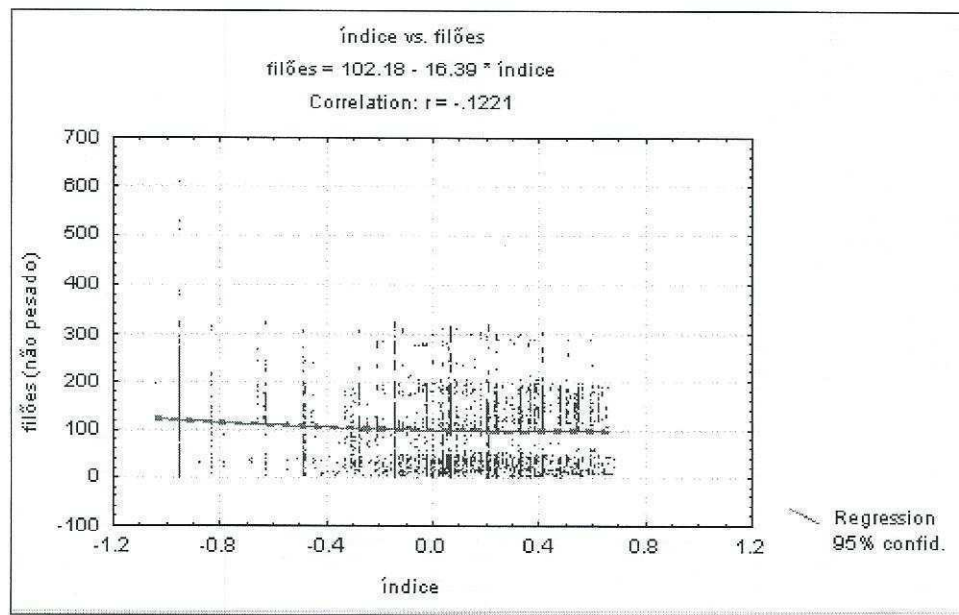


Fig.II.7.1.1 - Diagrama de dispersão entre a variável índice e as distâncias aos filões ultrabásicos

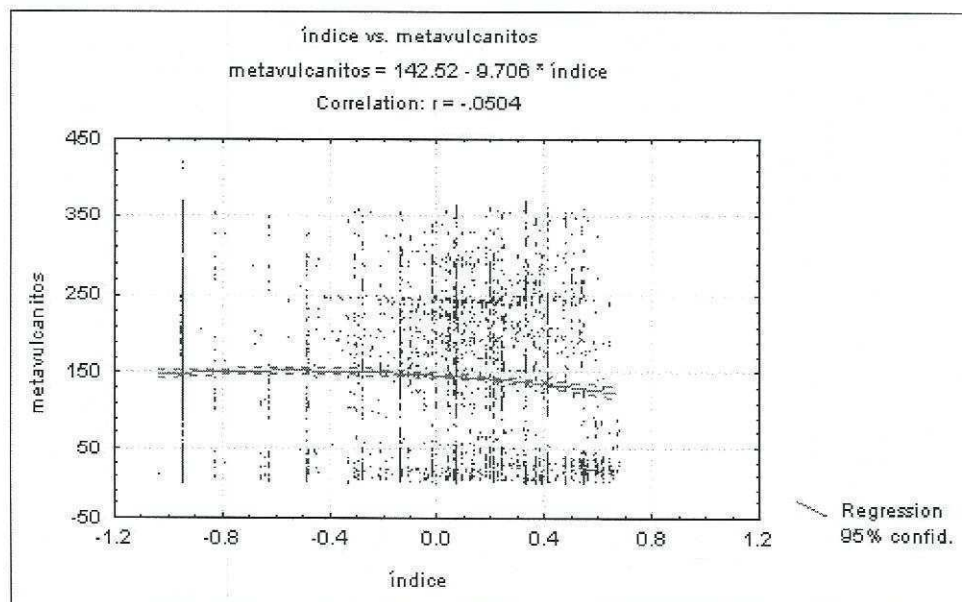


Fig.II.7.1.2 - Diagrama de dispersão entre a variável índice e as distâncias aos metavulcanitos

## II.7 - Krigagem com Deriva Externa

### II.7.1 - Utilização de Distâncias a Acidentes Regionais

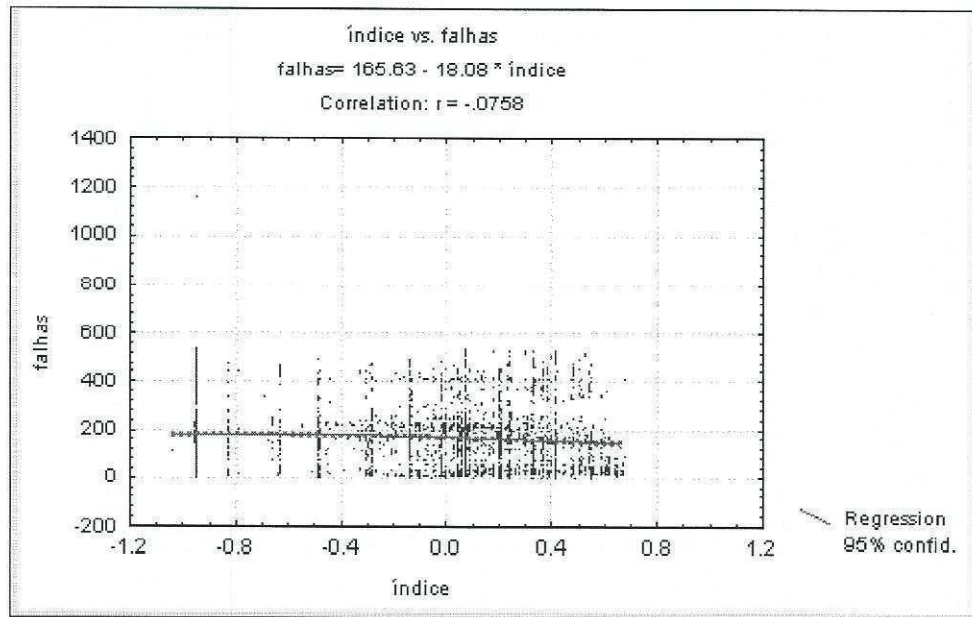


Fig.II.7.1.3 -Diagrama de dispersão entre a variável índice e as distâncias às falhas

Nas figuras II.7.1.4 a II.7.1.9 apresentam-se os resultados obtidos por regressão múltipla linear, para pesos iguais (sem atrito), dos valores das distâncias aos acidentes regionais ( $R_{\text{múltiplo}}=0.18$ )

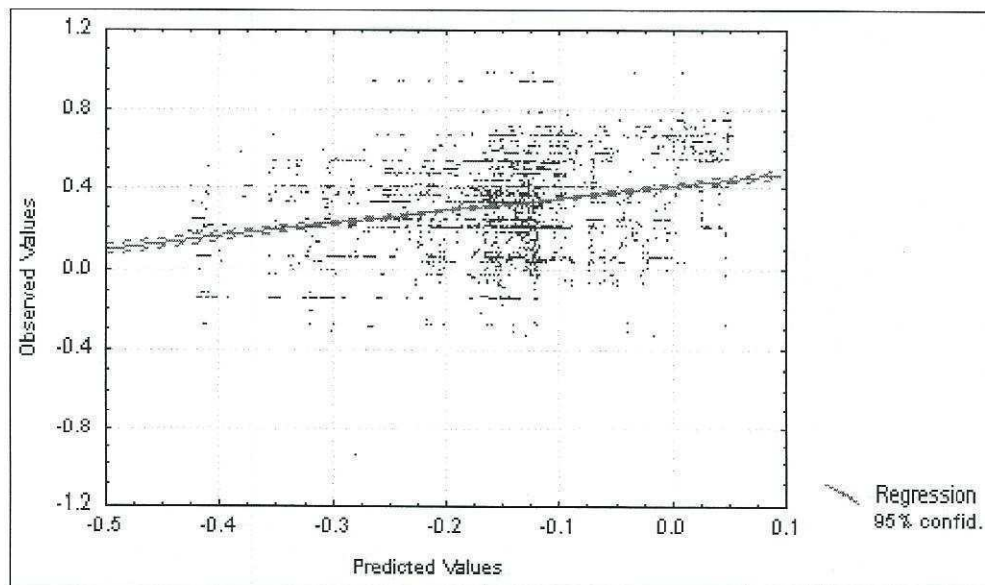


Fig.II.7.1.4 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo linear.

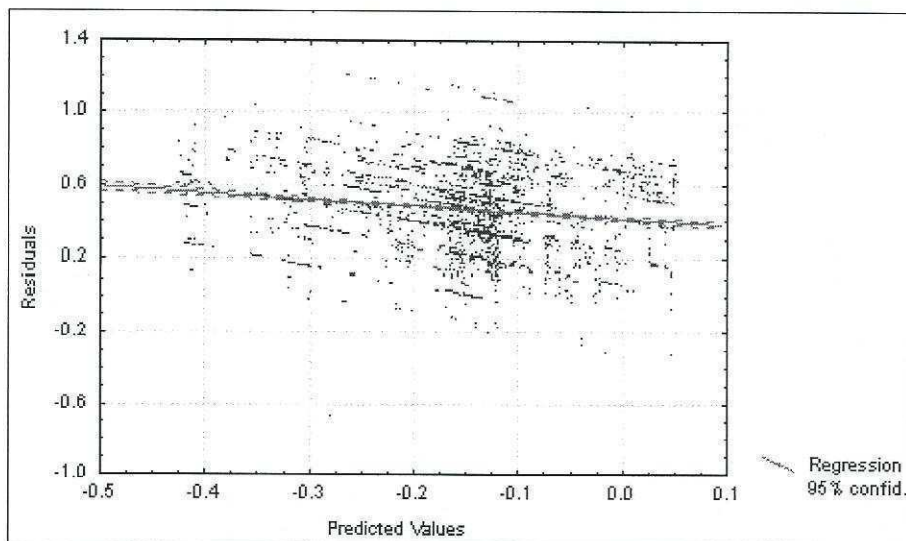


Fig.II.7.1.5 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo linear.

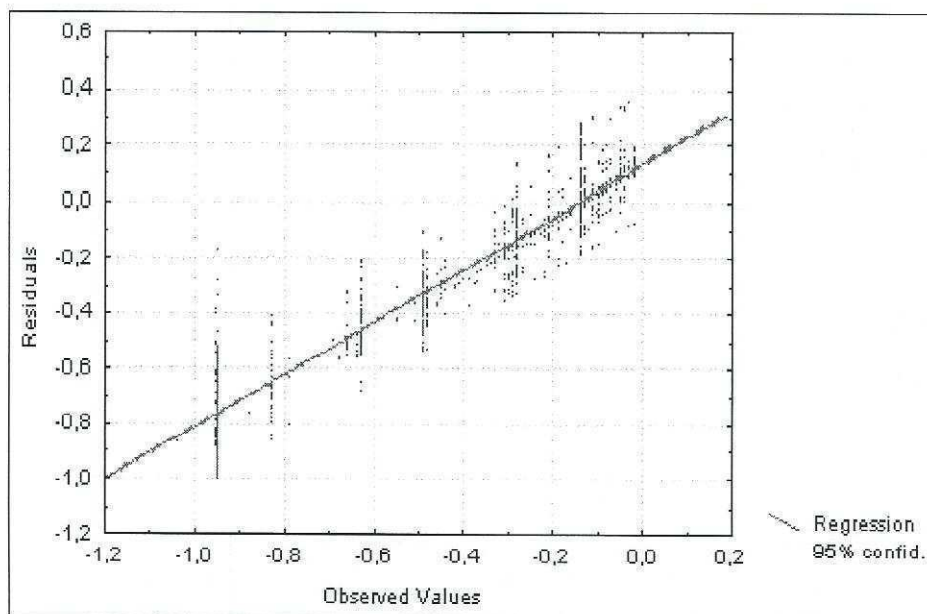


Fig.II.7.1.6 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo linear.

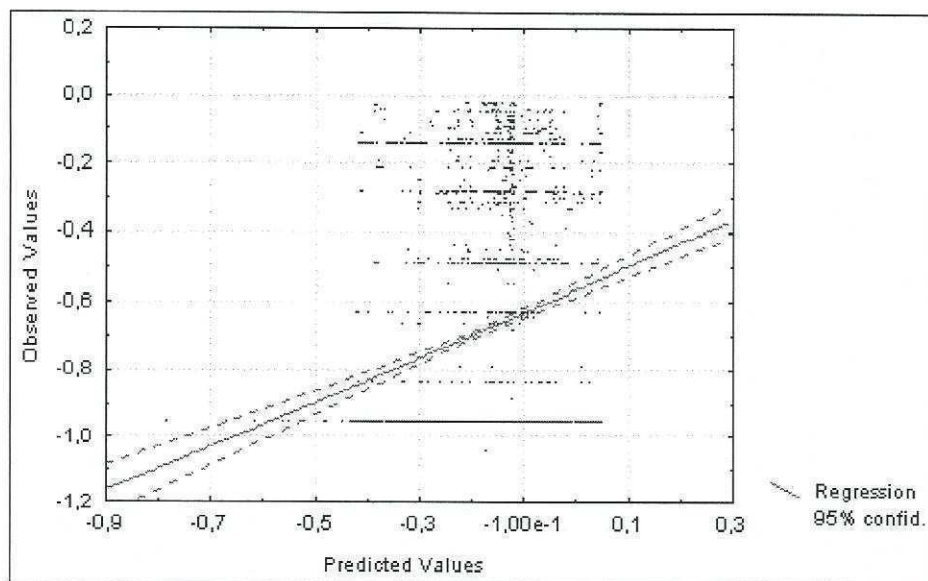


Fig.II.7.1.7 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo linear para distâncias com atrito

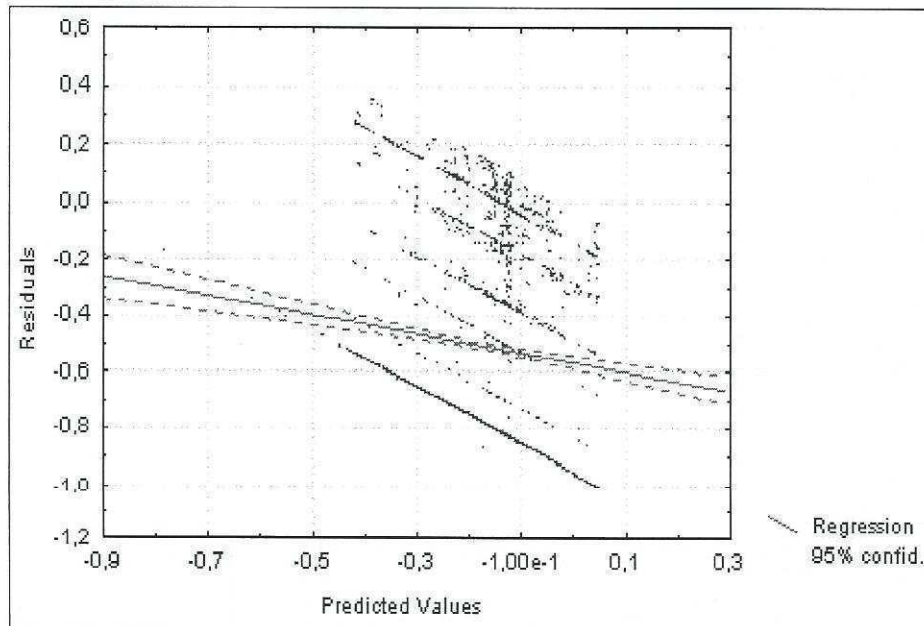


Fig.II.7.1.8 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo linear para distâncias com atrito

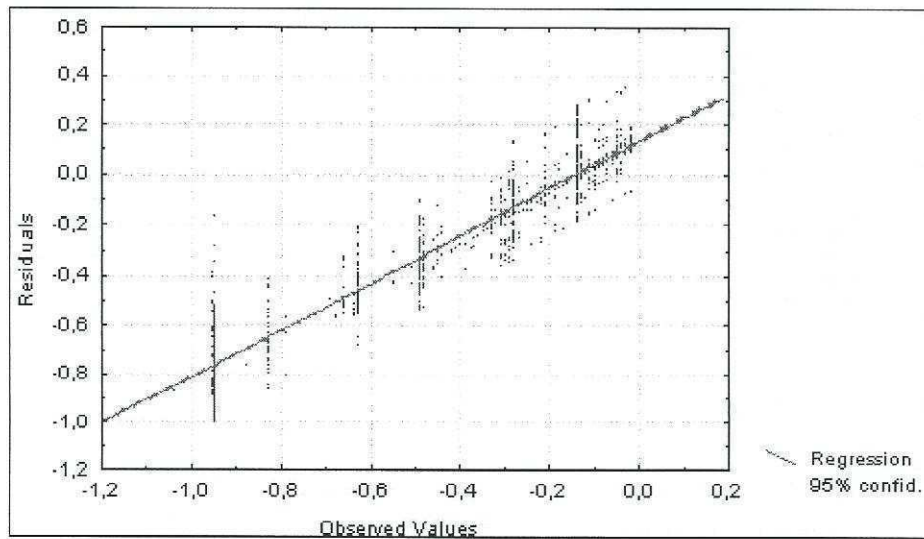


Fig.II.7.1.9 -Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltipla linear para distâncias com atrito

Nas figuras II.7.1.10 a II.7.1.12 apresentam-se os resultados obtidos por regressão múltipla não linear (polinomial), para distâncias com atrito aos acidentes regionais ( $R_{\text{múltiplo}} = 0.13$ )

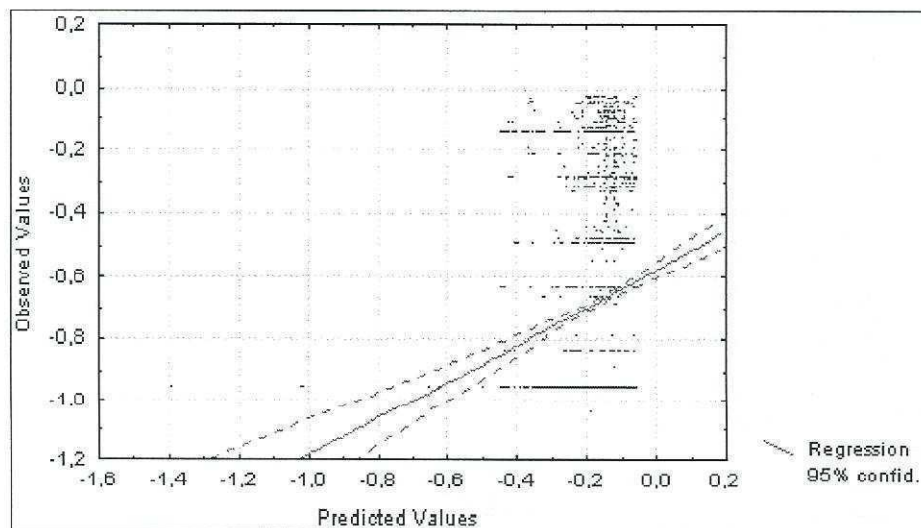


Fig.II.7.1.10 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo polinomial para distâncias com atrito

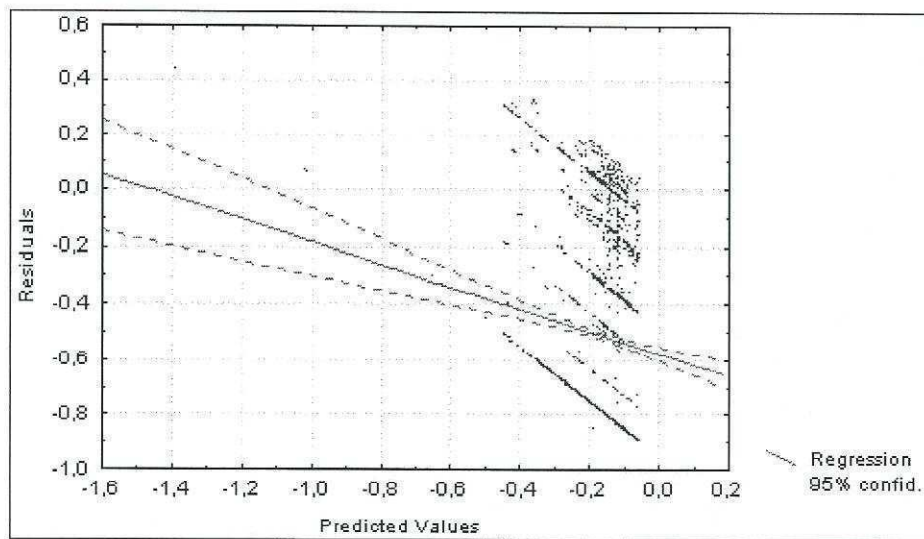


Fig.II.7.1.11 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo polinomial para distâncias com atrito

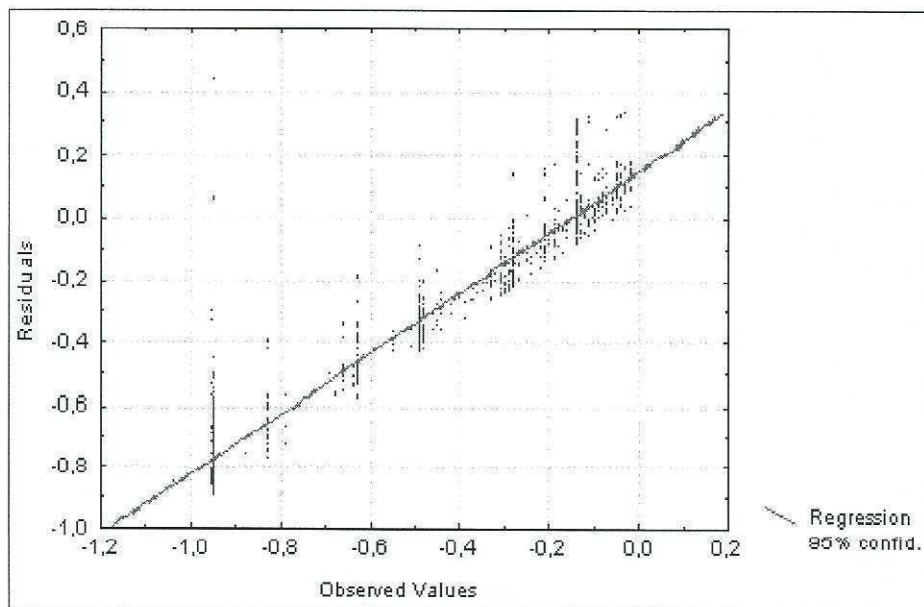


Fig.II.7.1.12 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo polinomial para distâncias com atrito

Nas figuras II.7.1.13 a II.7.1.15 apresentam-se os resultados obtidos por regressão múltipla não linear (logarítmica), para distâncias com atrito aos acidentes regionais ( $R_{\text{múltiplo}}=0.25$ )

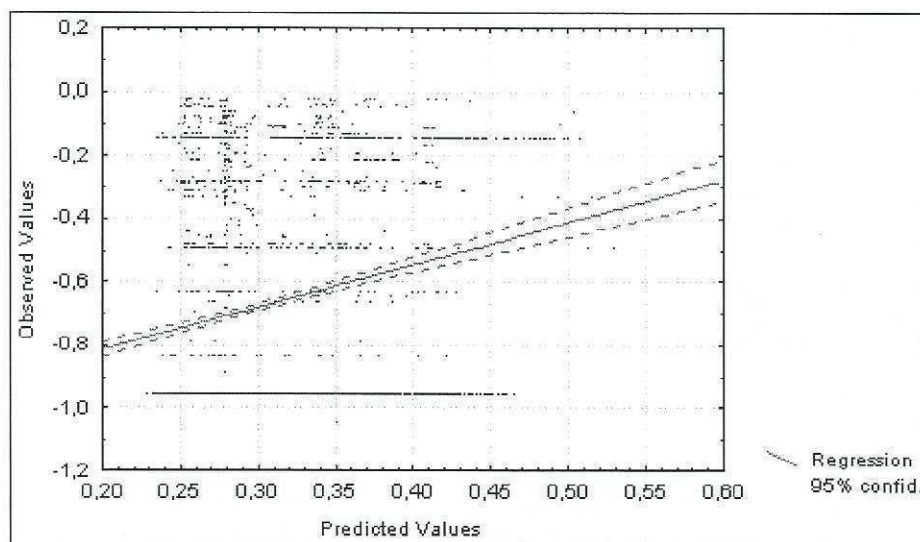


Fig.II.7.1.13 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os valores reais para a variável índice assumindo um modelo de regressão múltiplo logarítmico para distâncias com atrito

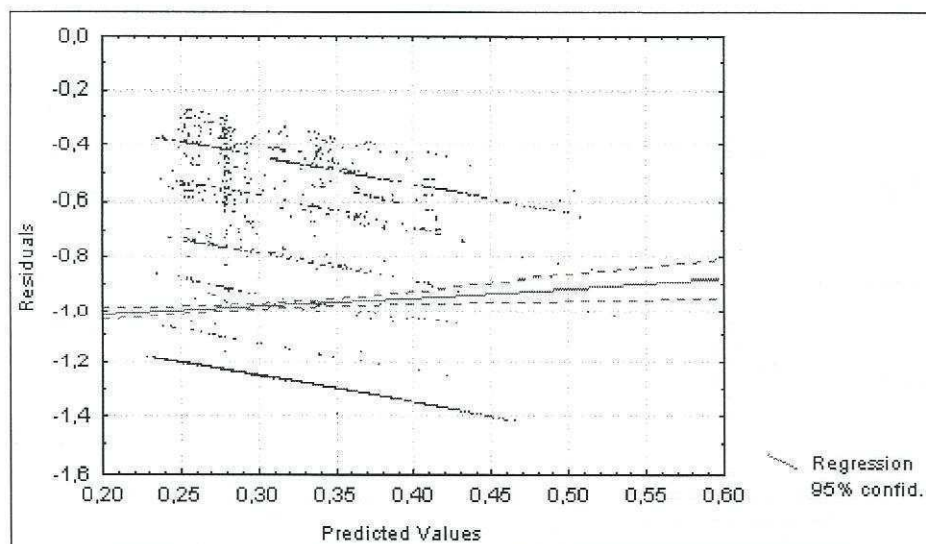


Fig.II.7.1.14 - Diagrama de dispersão entre os valores estimados e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltipla logarítmico para distâncias com atrito

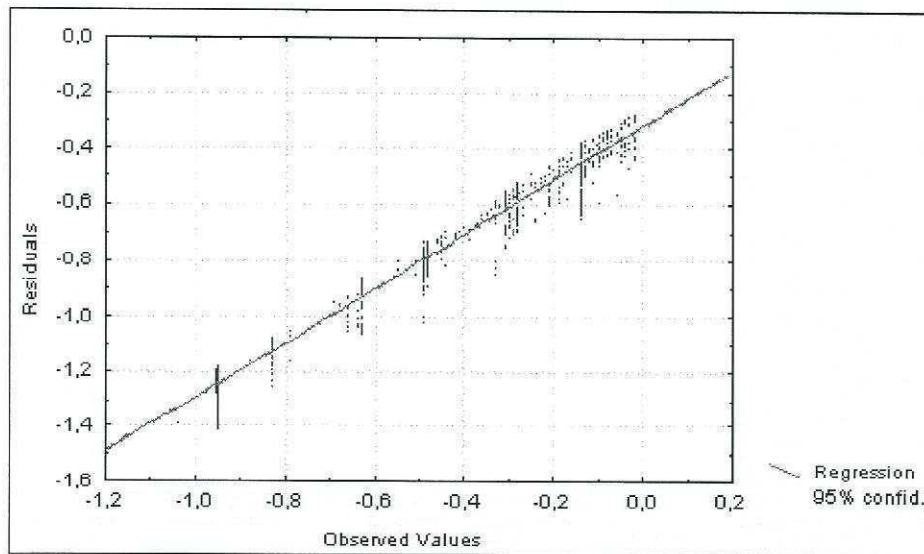


Fig.II.7.1.15 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os resíduos assumindo um modelo de regressão múltiplo logarítmico para distâncias com atrito

### II.7.1.2 - Menor distância euclidiana

Tal como descrito no ponto anterior, o valor da distância de cada suporte experimental ao acidente mais próximo revelou-se a distância com maior correlação com os valores da variável índice, calculada nos suportes experimentais. Os valores variam entre 0m, quando coincidem com o próprio acidente e 90m para os casos mais favoráveis, ou seja aqueles que se encontram mais longe de acidentes, qualquer que seja a sua natureza.

Determinou-se, ainda, o valor da menor distância euclidiana para os blocos a estimar (50x50m). Neste caso considera-se o mesmo valor para os quatro pisos, supondo que não existe variação vertical nas distâncias calculadas o que poderá não ser totalmente rigoroso, mas que é a única hipótese compatível com os dados que é possível utilizar.

\* Note-se que as duas últimas equações do sistema II.7.8 são linearmente dependentes quando os valores da variável  $\sum \lambda(\text{índice}) = 1$  o sistema de equações de Krigagem não tem solução, ou seja um sistema  $\sum f(x_{\text{índice}}) = f(x_0)$

A partir da função polinomial ajustada:

$$\text{distância} = 38.57 - 42.414 * \text{índice} - 5.157 * (\text{índice})^2$$

recalcularam-se os valores do índice obtendo-se o histograma representado na Fig.II.7.1.18

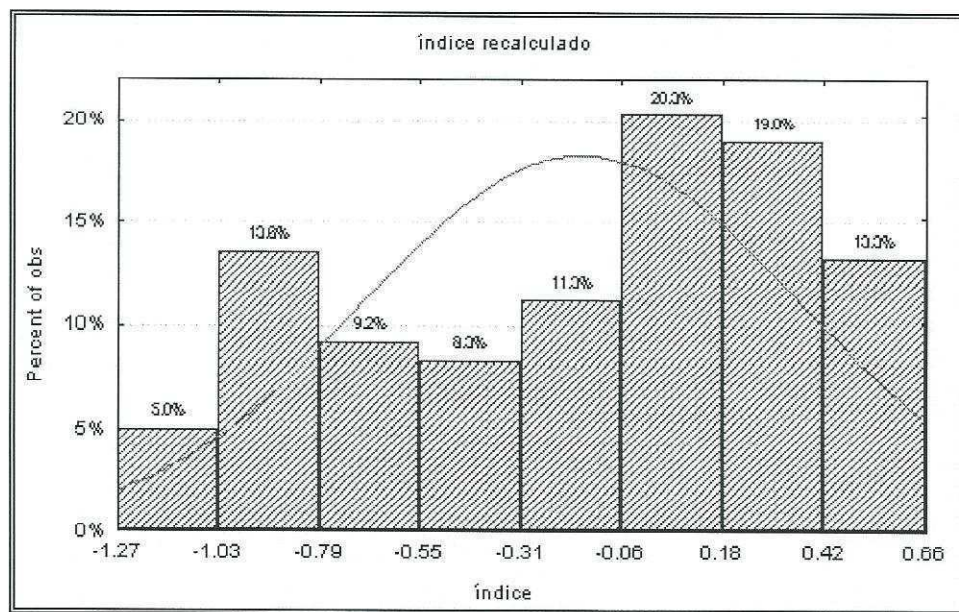


Fig.II.7.1.18 - histograma para os valores do índice de acordo com a função ajustada

Para avaliar os resultados da estimação utilizou-se o *Teste do Ponto Fictício* foi calculado utilizando a *krigagem com deriva externa*, partindo dos valores de distância e dos valores do índice recalculado de acordo com a a função ajustada anteriormente.

A representação gráfica os valores obtidos apresenta-se nas Fig.II.7:1.9 e Fig.II.7.1.20

II.7 - Krigagem com Deriva Externa  
II.7.1 - Utilização de Distâncias a Acidentes Regionais

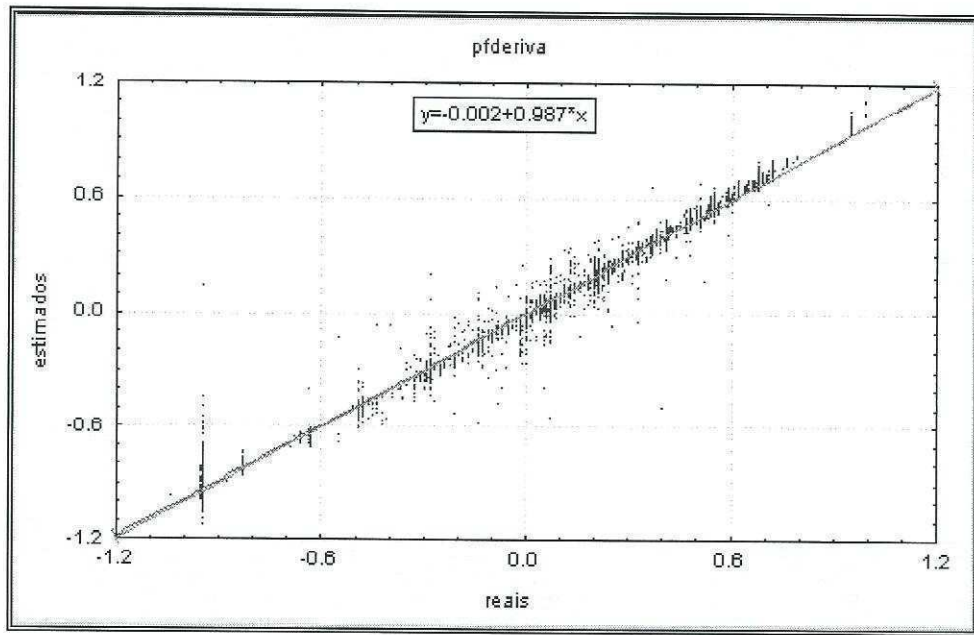


Fig.II.7.1.19 - Scatterplot para os valores obtidos no teste do ponto fictício utilizando as distâncias como função deriva

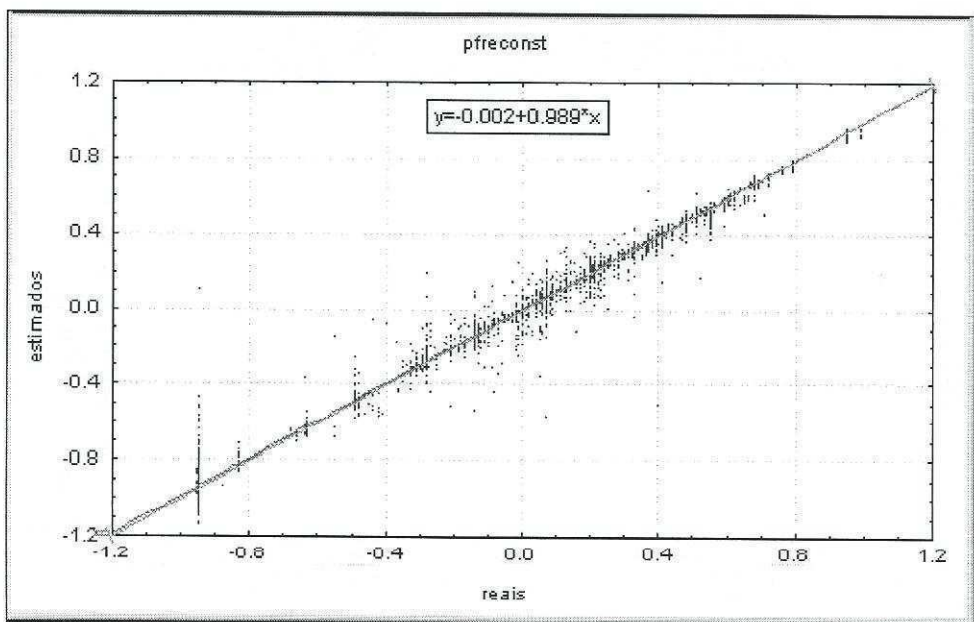


Fig.II.7.1.20 - Scatterplot dos valores obtidos no teste do ponto fictício utilizando os valores do índice recalculado com a função ajustada

## II.7 - Krigagem com Deriva Externa

### II.7.1 - Utilização de Distâncias a Acidentes Regionais

<i>valor médio estimado</i>	<b>-0.162</b>
<i>variância de dispersão</i>	<b>0.1348</b>
<i>erro médio</i>	<b>0.193</b>
<i>variância do erro</i>	<b>0.00045</b>

*Tabela II.7.1.1 - Resultados do teste do ponto fictício calculado por krigagem e utilizando como função deriva externa as distâncias a acidente, para a totalidade de suportes.*

<i>valor médio estimado</i>	<b>-0.162</b>
<i>variância de dispersão</i>	<b>0.131</b>
<i>erro médio</i>	<b>0.193</b>
<i>variância do erro</i>	<b>0.000450</b>

*Tabela II.7.1.2 - Resultados do teste do ponto fictício calculado por krigagem e utilizando como função deriva externa os valores do índice recalculado, para a totalidade de suportes.*

Os resultados do teste do ponto fictício, calculado por Krigagem com Deriva Externa, revelaram-se muito bons o que permite que o ulterior processo de estimação, para a malha de blocos seleccionada, seja robusto.

Apresentam-se de seguida os valores estimados com deriva externa, utilizando os valores medidos aos acidentes e os valores do índice recalculado de acordo com a função ajustada, para a mesma malha de blocos utilizada para a krigagem Ordinária.

Os dois modelos apresentam uma resposta idêntica. Comparativamente ao estudo apresentado anteriormente, em que se estimou aplicando a krigagem ordinária, nestes dois casos os extremos são muito mais evidenciados. A validação por parte do perito permite localizar estes valores num intervalo bastante aceitável. De facto os núcleos “melhores” coincidem com as pedreiras que têm melhor rendimento (VK e VO). Deste modo as evidências de um controle regional, para a aptidão para a recuperação, das pedreiras em estudo confirma-se.

## **II.7 - Krigagem com Deriva Externa**

### *II.7.2 - Utilização de informação "Soft" - Cálculo e incorporação de resíduos*

---

## **II.7 - Krigagem com Deriva Externa**

### *II.7.2 - Utilização de informação "Soft" - Cálculo e incorporação de resíduos*

## **II.7.2 - Utilização de informação "Soft" - Cálculo e incorporação de resíduos**

A incerteza ligada à informação *soft* é sempre superior à da informação contida no atributo principal. É, no entanto, geralmente mais abundante.

Há vários métodos de inclusão de informação secundária, no presente trabalho resumem-se os passos seguidos (Figueira, 1996, Serpa, 1998):

Utilizando a informação secundária  $Z_2(x)$  relacionada com atributo principal  $Z_1(x)$ , conhecido em toda a área a estudar, a cartografia estimada final  $Z_{sk}^*(x)$  é igual ao mapa Krigado, por Krigagem Ordinária,  $Z_1^*(x)$  mais um desvio  $e^*(x)$ :

$$Z_{sk}^*(x) = Z_1^*(x) + e^*(x) \quad (II.7.2.1)$$

em que

$e^*(x)$  são os valores dos desvios entre os valores reais da variável secundária ( $Z_2(x)$ ) e os valores krigados  $Z_{sk}^*(x)$  a partir da informação secundária

$$e^*(x) = [Z_2(x) - Z_{sk}^*(x)] \quad (II.7.2.2)$$

$Z_{sk}^*(x)$  é o valor krigado com os dados secundários (soft) no pontos onde foram recolhidos os dados referentes à informação principal  $x_a$

$$Z_2^*(x) = \sum_a \beta_a Z_2(x_a) \tag{II.7.2.3}$$

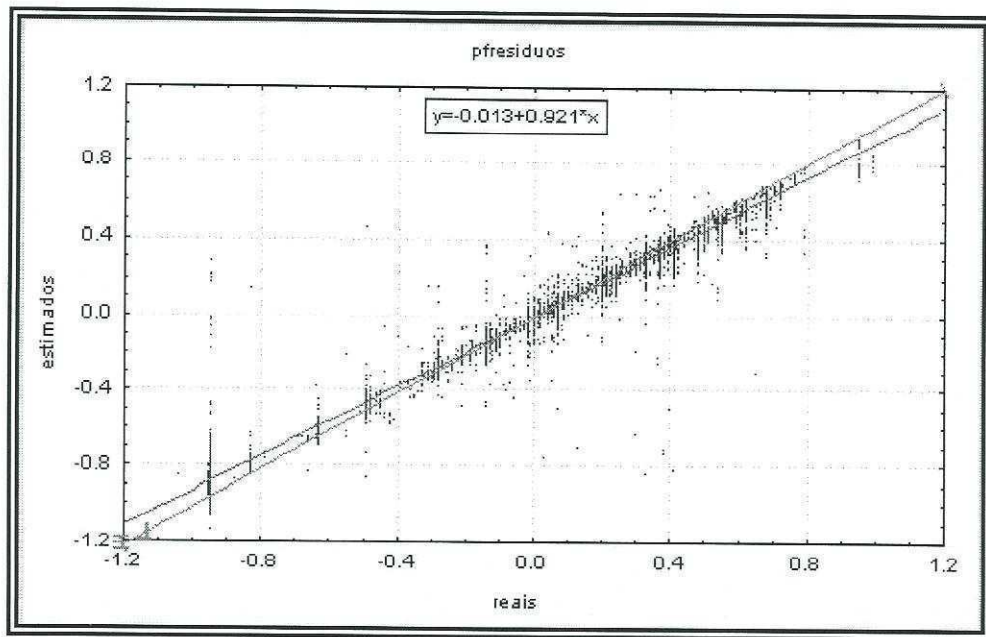
No mapa de valores estimados final  $Z_{sk}^*(x)$  (II.7.2.1), evidencia-se sempre, na localização dos suportes experimentais, a informação principal (índice). Inversamente, quando não existe informação principal prevalece a informação secundária.

No caso presente a informação residual obtêm-se a partir dos valores recalculados a partir da função de correlação previamente ajustada

x	y	z	valores estimados (OK1) recalculados nos suportes  (1)	valores reais estimados (OK1) nos suportes  (2)	valores recalculados nos blocos a estimar (área de estimação)  (3)	(3-1)  (4)	(4+2)  (5)
---	---	---	---	--	--	------------------	------------------

Tabela II.7.2.1 - Cálculo de informação secundária a partir de conhecimento regional

A representação gráfica dos valores obtidos pelo teste do ponto fictício apresentam-se na Fig.II.7.2.1



FigII.7.2.1.- Scatterplot dos valores obtidos no teste do ponto fictício para a informação residual

Os valores de controle obtidos são:

<i>valor médio estimado</i>	<i>-0.162</i>
<i>erro médio</i>	<i>0.009</i>
<i>variância do erro</i>	<i>0.001</i>

Os valores estimados apresentam-se nas cartas seguintes

Os resultados obtidos foram, segundo os peritos que trabalham na zona, os mais interessantes.. Comparativamente aos mapas obtidos nos processos anteriores de estimação com Deriva Externa, não acentua de uma forma tão extrema os valores limites, mas evidencia as coincidências já emergentes dos valores estimados por Krigagem Ordinária, nomeadamente a coincidência com o sistema principal de fracturação - NE-SW - e as suas conjugadas - NW-SE - que se manifestam por uma descontinuidade de áreas "boas", "intermédias" e "más" que parecem estar "desligadas" respeitando os movimentos principais do regime de fracturação regional conhecido.

Segundo Gomes da Silva (1989), a tectónica de ruptura está representada, na região, por um sistema de falhas inversas com significativa componente horizontal, de direcção NW-SE a WNW-ESE, traduzindo manifestações tardias de Segunda fase de dobramento e por um sistema de desligamento de direcção NE-SW a NNE-SSW, acompanhado pelo seu conjugado NNW-SSE, correspondente a fracturação tardi-hercínica.

**Conclusões**

## Conclusões

Com o presente trabalho efectuaram-se diferentes abordagens metodológicas para o estudo e respectiva avaliação de diferentes maciços de rochas ornamentais. Nomeadamente a jazida de mármore de Estremoz na localidade do monte da Vigária e Mouro; a pedreira de ardósia de Valdeorras (Espanha) e os xistos de Mourão.

Todos algoritmos aplicados partem do estudo de variáveis de síntese (índices), construídos a partir da aferição de atributos, quantitativos e qualitativos, visando a construção de novas variáveis representativas das principais características de aptidão do maciço para a recuperação ou para a qualidade (índice de recuperação/ índice de qualidade)

Com a aplicação da Análise de Dados Multivariada pretendeu-se por um lado resumir numa só variável todo o conjunto de dados relativos à recuperação e/ou qualidade dos blocos (**abordagem local**) ou volumes (**abordagem regional**) e por outro integrar, através da atribuição interactiva de pesos aqueles factores, opiniões periciais de ordem tecnológica.

O primeiro exemplo foi abordado de duas perspectivas diferentes: a primeira, **local**, permitiu-nos estudar a variabilidade de um índice de recuperação (construído à custa das principais características da fracturação) obtendo-se o zonamento, estimando por krigagem ordinária, em blocos comerciais (1mx1mx1m) e permitindo o planeamento do desmonte considerando as direcções preferenciais de corte( exemplo da pedreira de Mouro- pedreira da Calemar).

A segunda perspectiva permitiu-nos estudar a variabilidade **regional** da mesma variável (14 pedreiras pertencentes ao Monte da Vigária - pedreiras da Solubema) processando a informação local, recolhida directamente em cada uma das pedreiras, e estimando para áreas desconhecidas por Krigagem Ordinária. A inclusão de **informação regional** materializou-se de duas formas distintas:

- a) calculando as distâncias euclidianas dos suportes a qualquer um dos acidentes regionais cartografados, obtendo-se elevada correlação com os valores da variável índice e deste modo viabilizando o ulterior processo de estimação;
- b) calculando distâncias ponderadas (com atrito) aos acidentes dependendo o peso atribuído ao grau de penalização introduzido pelos mesmos, obtendo-se baixa correlação com os valores da variável índice. A fracturação local é condicionada pela existência de acidentes regionais e não pela sua tipologia

Estas distâncias foram consideradas como funções de deriva externa e permitiram a cartografia regional tendo como objectivo a determinação de volumes de maior ou menor favorabilidade para a exploração. Os algoritmos utilizados foram a **Krigagem com Deriva Externa** - utilizando as distâncias reais ou a função de correlação - e o **Soft Kriging**

A avaliação da cartografia final permitiu-nos concluir que o Soft Kriging é a metodologia que conduz a uma maior coincidência com a geologia regional. Na verdade os mapas obtidos mostram que:

- a) a aptidão para a recuperação está mais dependente da orientação das bancadas de mármore do que da fracturação regional. O estudo ulterior de características físico/mecânicas destas bancadas será interessante para confirmar (ou não) a dependência da qualidade da pedra pela orientação das bancadas de mármore em detrimento da orientação da fracturação regional.
- b) O padrão de distribuição dos valores do índice apresentam -essencialmente a NW e SE do Monte da Vigária, uma coincidência interessante com os levantamentos geológicos realizados em trabalhos anteriores (Gomes da Silva, 1989, Silva 1996)



***Bibliografia***

**Albuquerque, M.T.D. (1993)** - *Análise multivariada de dados e geoestatística da recuperação de pedreira de mármore*. Tese de mestrado, IST, Lisboa, 82p.

**Almeida, José A. (1992)** - *Modelos geométricos para a caracterização de recursos minerais*. Tese de mestrado - IST/UNL.

**Baecher, G. B. (1983)** – *Statistical analysis of rock mass fracturing*. Mathematical Geology. Vol. 15. nº2.

**Bathe, K., J. (1982)** – *Finite element procedures in engineering analysis* – Prentice-Wall. Inc..Englewood Cliffs. New Jersey.

**Benzécri, J-P,(1980)** - *Pratique de l'analyse des donnés*, Dunod, 4242p.

**Blanchin, R., Chilès, J-P** – *Étude statistique et géostatistique de la fracturation de la mine de fanay-Augères (France)*. Document BRGM n°84 RDM 074 IM, Orléans.

**Carvalho, D. , Goinhas, J. , Oliveira, V. & Ribeiro, A. (1970)** – *Observações sobre a geologia do sul de Portugal e consequências metalogenéticas*. Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de fomento Mineiro, 20, 153-199.

**Carvalhosa, A., Gonçalves, F. & Oliveira, V. (1987)** – *Carta Geológica de Portugal (escala 1:50 000). Notícia explicativa da folha 36-D. Redondo*. Serv. Geol. Port.. Lisboa. 63 pp.

**Casal Moura, A., (1991)** - *Rochas Ornamentais: Características das rochas ornamentais portuguesas e a importância do seu conhecimento no momento actual* - Geonovas, número especial 2 - Recursos minerais não metálicos em Portugal.

**Chilés, J-P, (1989)** - *Modelisation geostatistique de reseaux de fractures*, M. Amstrong (eED.), Geostatistics, voIII, 57-76 Kluwer Academic Publishers.

**Costa, C. , J. (1931)** – *O Paleozoico português* (síntese e crítica). Ed. Autor. Porto. 143pp.

**Costa, C.M.S.N (1992)** - *As pedreiras do anticlinal de Estremoz. A geologia de engenharia na exploração e recuperação ambiental de pedreiras*. Tese de Doutoramento, FCT/UNL, Lisboa, 470p.

**Cruz, C. (1998)** - *Aplicação do SIG na elaboração de cartas de aptidão aplicadas ao planeamento de exploração de mármore*s, relatório de fim de curso em Eng<sup>a</sup> de Ordenamento dos Recursos Naturais, ESA/IPCB,62p.

**D.G.G.M (1983)** - *Catálogo de rochas ornamentais portuguesas*. D.,G.G.M, Lisboa, 1, pp 81-144.

**Delgado, J. F. N. (1908)** – *Système Silurique du Portugal. Étude de stratigraphie paléontologique*. Mem. Ser. Geol. Portugal. Lisboa. 245 pp.

**Deutsch, C. & Journel, A.G.(1992)** – *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press. 314 pp.

**Figueira, R.P.N (1996)** - *Modelação Geoestatística de um Sistema de Biomonitorização de salinidade* - Dissertação de Mestrado, IST/UNL, 115p.

**Figueira, R., Sousa, A.J., Pacheco, A.M.G. & Catarino F. (1998)** - *Space-Time Geostatistical Modelling: a Case Study of Sea-salt Measured on lichens*. Actas do Second European Conference on Geostatistics dor Environmental Applications, 18-20 November, Valencia.

**Gonçalves, F. & Coelho. A.P. (1974)** – *Carta Geológica de Portugal (escala 1:50 000). Notícia explicativa da folha 36-B. Estremoz*. Serv. Geol. Port.. Lisboa. 64 pp.

**Gonçalves, F. (1971)** – *Contribuição para o conhecimento geológico dos mármore de Estremoz*. Est,.. Not. e Trab.. Serv. Fom. Min.. Porto. 20 (1-2). Pp. 201-207.

**Gonçalves, F. (1972)** – *Observações sobre o anticlinório de Estremoz. Alguns aspectos geológico-económicos dos mármore*. Est.. Not. E Trab.. Serv. Fom. Min.. Porto. 22 (1-2). Sep.pp. 121-132.

**Gonçalves, Francisco, (1972)** - *Observações sobre o anticlinório de Estremoz. Alguns aspectos geológico - Económicos dos Mármore* - Separata do vol.XXII, Fasc. 1-2, Estudos Notas e Trabalhos de serviço de Fomento Mineiro, p.121-132, Porto.

**Goovaerts, P. (1997)** - *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, 483pp.

**Grossmann, N.F. , (1977)** – *Contribuição para o estudo da compartimentação dos maciços rochosos*. Tese apresentada ao concurso para especialista do LNEC. Lisboa. 251 pp.

Journel, A., Huijbregts, (1978) - *Mining Geostatistics* - Academic Press, 600p.

La Pointe, R. (1980) – *Analysis of the spacial variation in rock mass properties through geostatistics*. Proceedings of 21 st. US Symposium on Rock Mechanics.

Lorenzo, Barros J.C.(1994) - *Métodos y tecnologia de arranque, carga y transporte de pizarra*, Canteras y Explotaciones.

Lopes, J.L.G. (1995) - *Caracterização geológico-estrutural do flanco sudoeste do anticlinal de Estremoz*. Tese de mestrado, Fac. Ciênc.,Lisboa,135p.

Luís, J.,L.,G. (1995) – *Caracterização geológico-estrutural do flanco sudoeste do anticlinal de Estremoz*. Tese de Mestrado. Fac. Ciên. Lisboa. 135 pp.

Martins, O.R.(1989) – *A indústria extractiva das rochas ornamentais de Portugal em 1987*. Boletim de Minas, 26 (1) , 7-52.

Miller, S. (1979) - *Geostatistical analysis for evaluation apatial dependence in fracture set characteristics*, Proceedings 16 APCOM, AIME, 537-545p.

Nanache, J-P, (1973) - *Influence do cotage des donnés en analyse factorielle des correspondences*, revue de statistique Appliquee, AAI, nº2, 57-70 p.

Oliveira, V. M. J. (1984) – *Contribuição para o conhecimento geológico-mineiro da região de Alandroal-Juromenha ( Alto Alentejo)*. Estudos, Notas, e Trabalhos de Lisboa, 2ª série-C, 17(1) , 248-250.

**Pereira et al (1995)** – *Reconhecimento e avaliação da fracturação em pedreiras de mármore com base na definição de um índice de recuperação*. 5º Congresso Nacional de geotecnia, Vol. 1, Tema 2, p. 459-478.

**Pereira, H. G. & Sousa, A J. (1988)** – *Análise de dados para o tratamento de quadros multidimensionais*. CVRM/IST. Lisboa. 155pp.

**Pereira, et al (1992)** - *Geostatistical Estimation of a Summary Quality Index for Marble Quarries* - IV Geostat Congress.

**Pereira, H.G et al (1995<sup>a</sup>)** – *Exploitation planning in slate quarries by merging the recovery and quality indices*. Proceedings IV Intern. Symp. Mine Opla. And Equip. Selec. Calgary/Canada. Singhal et al (eds) A. A. Balkema Publisher.

**Pereira, H.G. (1988)** - *Case study on application of qualitative data analysis technics to an uranium mineralization*, in C.F. Chung et al (Eeds.) - Quantitative of Mineral and Energy Resources, Reidel, 617-624 p.

**Pereira, H.G.(1981)** - *Análise Estrutural e seus reflexos na avliação económica se recursos minerais* - Dissertação apresentada no Instituto Superior Técnico para obtenção do Grau de Doutor em Ciências de Engenharia (Planeamento Mineiro).

**Priest, S. D. (1993)** – *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall. London, 473 pp.

**Ramsay, J. G. (1967)** – *Folding and Fracturing of rocks*: New York. McGraw-Hill.

**Razack, M. (1979)** – *Approche numérique et quantitative de l'étude sur clichés aériens de la fracturation des réservoirs en roches fissurés*. Revue de Géographie Physique et de la Géologie Dynamique, Vol. 23, Fasc. 2, P 131-142.

**Reynaud, R. & Vintém, C. (1992)** - *Estudo da jazida de calcários cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa (Sector Pardais)*. Est., Not., e Trab. , DGGM, Porto,34,pp. 3-84.

**Ribeiro, A .et al (1979)** – *Introduction à la Géologie Général du Portugal*, Serv. Geol. de Portugal, Lisboa, 114 pp.

**Ribeiro, JMT (1994)** - *Planeamento da exploração das pedreiras de mármore com base em um índice de recuperação, a uma pedreira de Borba*. Tese de Mestrado, IST, Lisboa, 121pp.

**Rico, J.V. (1996)** - *Previsão da qualidade do maciço rochoso numa pedreira de xistos com base em um índice de recuperação*, trabalho de estágio em Engenharia Geológica, FCT/UNL, 71p.

**Serpa, C.R.D.N.(1998)** - *Caracterização espacial de um poluente atmosférico resultante de emissões multi-fonte*, Dissertação de Mestrado, IST/UNL.

**Silva, J.M. & Camarinhas. M. V. F. (1957)** – *Calcários cristalinos de Vila Viçosa – Souzel*. Est.. Not. E Trab.. Serv. Fom. Min.. Porto. 12 (1-2). Pp. 66-139.

**Silva, C.G. (1989)** - *Mármoreos da região de Estremoz-Borba-Vila Viçosa. Caracterização minero-petrográfica, geoquímica e geomecânica. Contribuição para o conhecimento da sua alterabilidade, fracturação e blocometria*. Tese de Doutoramento, IST, Lisboa, 136 p.

**Silva, V.M.P.L. (1997)** -*Contribuição da Estatística Espacial Multivariada para o Zonamento das rochas Ornamentais de Estremoz*, Dissertação de mestrado, IST\_UNL, 149 pp.

**Sousa, A., Muge, F. (1990)** - *Elementos de Geoestatística* - Documentos de Centro de Valorização de Recursos Minerais - IST.

**Taboada, J. (1993)** – *Diseno de minas subterráneas de pizarra* – Tese de doutoramento – Universidade de Oviedo.

**Taboada, J. C. (1993)** – *Calculo del rendimiento de una cantera. Métodos Estadísticos Aplicados a la Planificación de Explotación de Rocas Ornamentales*. Tomo nº 3. Programa AFAIRS/COMETT. Universidade de Vigo. EST de Enxeneiros Industriales. CVRM/IST. Vigo. 23 pp.

**Teixeira, C. (1954)** – *El Cámbrico de Portugal*. Est. Geol.. Madrid. 10 (23-24). pp.355-369.

**Teixeira, C. (1966)** – *A evolução do território português no decurso dos tempos geológicos*. Palestra. Lisboa. 28. Pp.111-157.

**Wackernagel, H. (1995)** - *Multivariate Geostatística*. Springer-Verlag, Berlin, 256pp.