

**MODELOS GEOMÉTRICOS PARA
CARACTERIZAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS**

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico
para obtenção do grau de Mestre em Mineralurgia e
Planeamento Mineiro*

José António de Almeida

Junho 1992

Aos meus pais ...

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de investigação desenvolvida no Centro de Valorização de Recursos Minerais da Universidade Técnica de Lisboa, integrado no Laboratório de Mineralurgia e Planeamento Mineiro do Instituto Superior Técnico nos últimos três anos e durante um estágio de três meses no B.R.G.M. (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), Orléans, França.

A todos os professores e colaboradores do CVRMUTL.

Um agradecimento muito especial ao meu orientador científico, Professor Amílcar Soares, pelo seu permanente estímulo e pelas suas sugestões e críticas imprescindíveis para a prossecução deste trabalho.

Ao Eng. Nuno do Santos pelo auxílio manifestado e pelas críticas e sugestões.

Ao Professor Jorge de Sousa pelas críticas e sugestões na elaboração deste trabalho.

Ao Carlos Guimarães e ao José Luís Gonzaga pela disponibilidade sempre manifestada e pelo seu contributo na elaboração final deste trabalho.

A todos os colegas que integram este Centro de investigação pela boa disposição, disponibilidade, apoio e estímulo sempre manifestados.

À Lígia pela disponibilidade manifestada e pelo contributo na fase final deste trabalho.

À Direcção Geral de Geologia e Minas pela autorização da publicação de informação respeitante ao estudo sobre as formações marmóreas de Pardais, aos Eng. Rui Reynaud, Eng. Paula e Dr. Vintem pela colaboração e sugestões apresentadas.

À empresa Pirites Alentejanas pela autorização da publicação de informação sobre a Mina de Aljustrel.

RESUMO

Com este trabalho pretende-se apresentar um conjunto de metodologias de modelagem geométrica de corpos do sistema geológico-mineiro. Este sistema é constituído, fundamentalmente, pela interacção de um corpo mineralizado com as estruturas de acesso, destinadas a permitir a sua exploração. A caracterização da morfologia de um corpo mineralizado é normalmente realizada com base em metodologias de inferência espacial, a partir de informação experimental reduzida, heterogénea e dispersa. As estruturas tecnológicas (poços, galerias, desmontes, etc.) são modeladas, frequentemente, recorrendo ao desenho assistido por computador ou utilizando modelos construtivos.

Um segundo objectivo é a construção de um conjunto de primitivas com forte componente gráfica que permitam, a um utilizador, construir o programa para a modelagem de um corpo particular. Assim, é apresentado um modelo modular de bases de dados geo-referenciados - informação em modo de representação vectorial e "*raster*" - (BDMIN). São implementadas, sobre este modelo de base de dados, as operações mais usuais de modelagem geométrica em modo vectorial, utilizando formalismo determinista e permitindo a inclusão de informação pericial (OBJLIB). Descrevem-se e implementam-se operações de mudança de representação e cruzamento de modelos (GRIDDLIB).

São ilustrados dois exemplos de aplicação das diferentes técnicas de modelagem e de utilização do conjunto de primitivas: i) caracterização morfológica de formações marmóreas; ii) modelagem geométrica e numérica das câmaras de desmonte de uma mina de sulfuretos cupríferos.

ABSTRACT

This study aims to present a set of methods for geometric modelling in the mining system basically defined by the orebody and the set of infrastructures as galleries, stopes, etc.. The morphological characterization of an orebody is made by spatial inference methods based on some experimental and heterogeneous information. The technological structures - galleries, shaft of a mine, stopes, etc. - are basically designed with the techniques of the Computer Aided Design Systems.

The second purpose of this study is to provide a graphic tool kit - databases and functions - to an user in order to build the software for geometric orebody modelling. Thus, it is presented a geographic information database (BDMIN). Two libraries (OBJLIB and GRIDDLIB) of modelling graphic tools are presented, as well, for vector and raster objects.

Two examples of application of the modelling techniques and graphic tool kit are presented: i) morphological characterization of a marble mass; ii) geometrical and numerical modelling of the stopes of a copper sulphide mine.

1. INTRODUÇÃO

1.1 OBJECTIVOS DO ESTUDO	2
1.2 A MODELAGEM GEOMÉTRICA NO PLANEAMENTO MINEIRO	2
1.3 MODELOS GEOMÉTRICOS	3
1.4 BASES DE DADOS DE INFORMAÇÃO GEOMÉTRICA E BIBLIOTECAS DE FUNÇÕES GRÁFICAS	4

2. BASES DE DADOS GEO-REFERENCIADOS

2.1 CONCEITOS GERAIS	7
2.2 ESQUEMAS DE BASES DE DADOS	9
2.3 REPRESENTAÇÃO VECTORIAL E " <i>RASTER</i> " DE OBJECTOS	11
2.4 ESTRUTURAS TOPOLÓGICAS DE DADOS GEO-REFERENCIADOS	14
2.4.1 FORMA VECTORIAL	15
2.4.2 FORMA " <i>RASTER</i> "	18
2.5 A BASE DE DADOS GEOLÓGICO-MINEIROS - BDMIN	19
2.5.1 ESQUEMA GERAL DA BASE	20
2.5.2 FUNÇÕES DESENVOLVIDAS	25
2.5.3 DICIONÁRIO DE OBJECTOS EM MODO VECTORIAL	25

<u>3. MODELAGEM DE OBJECTOS EM MODO DE REPRESENTAÇÃO VECTORIAL</u>	32
3.1 MODELOS VECTORIAIS 2D	33
3.1.1 MODELOS HEURÍSTICOS: DIGITALIZAÇÃO DE CONTORNOS	33
3.1.2 FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO E APROXIMAÇÃO	33
3.1.3 MODELAGEM CONSTRUTIVA 2D	41
3.2 MODELOS VECTORIAIS 3D: INTERVENÇÃO PERICIAL NA CONSTRUÇÃO DOS MODELOS	44
3.2.1 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO 3D PARTINDO DE SECÇÕES PARALELAS CONHECIDAS	46
3.2.2 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO 3D PARTINDO DE VÁRIAS SECÇÕES CONHECIDAS, ALGUMAS NÃO PARALELAS	51
3.3 INTERSECÇÃO DOS MODELOS 3D POR PLANOS	55
3.4 ESTIMAÇÃO DE MEDIDAS SOBRE MODELOS	58
3.4.1 ESTIMAÇÃO DE MEDIDAS SOBRE MODELOS 2D	58
3.4.2 ESTIMAÇÃO DE MEDIDAS SOBRE MODELOS 3D	64
3.5 BIBLIOTECA DE FUNÇÕES DESENVOLVIDAS - OBJLIB	67
<u>4. CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS MODOS DE REPRESENTAÇÃO VECTORIAL E "RASTER"</u>	70
4.1 TRANSFORMAÇÃO DE MODELOS REPRESENTADOS NA FORMA VECTORIAL PARA A FORMA "RASTER"	70
4.2 TRANSFORMAÇÃO DE MODELOS REPRESENTADOS NA FORMA "RASTER" PARA A FORMA VECTORIAL	73

4.3 ÁREAS E VOLUMES DAS CÉLULAS DE UM MODELO "RASTER" CONTIDOS NUM MODELO VECTORIAL	74
--	----

4.4 BIBLIOTECA DE FUNÇÕES DESENVOLVIDAS - GRIDDLIB	75
--	----

5. ESTIMAÇÃO GEOESTATÍSTICA PARA CARACTERIZAÇÃO

<u>MORFOLÓGICA EM MODO "RASTER"</u>	78
--	----

5.1 ESTRUTURAS BIFÁSICAS	78
--------------------------------	----

5.2 ESTRUTURAS MULTIFÁSICAS	82
-----------------------------------	----

6. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE FORMAÇÕES MARMÓREAS DA REGIÃO DE PARDAIS

6.1 INTRODUÇÃO	87
----------------------	----

6.2 LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DA REGIÃO ESTUDADA	87
---	----

6.3 INFORMAÇÃO DE BASE	88
------------------------------	----

6.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO VECTORIAL	93
---	----

6.4.1 PROGRAMAS DE MODELAGEM GEOMÉTRICA - GEOMIN	93
--	----

6.4.2 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO DE ARAME	95
---	----

6.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO ESTOCÁSTICO - MORFOLOGIA GEOESTATÍSTICA	98
--	----

6.6 CONCLUSÕES DESTE ESTUDO	106
-----------------------------------	-----

7. MODELAGEM DAS CÂMARAS DE DESMONTE DA MINA DE ALJUSTREL

7.1 INTRODUÇÃO	108
7.2 METODOLOGIAS DE MODELAGEM	109
7.3 DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO " <i>SOFTWARE</i> "	111
7.3.1 BASE DE DADOS DE FUROS	113
7.3.2 BASE DE DADOS DOS MODELOS GEOMÉTRICOS	115
7.3.3 BASE DE DADOS DO MODELO DE BLOCOS	115
7.3.4 MODELAGEM DAS CÂMARAS DE DESMONTE	116
7.3.4.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA	116
7.3.4.2 MODELAGEM NUMÉRICA	120
7.3.5 ESTIMAÇÃO DE VOLUMES E TONELAGENS	121
<u>8. CONCLUSÕES</u>	123
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	126

1. INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 OBJECTIVOS DO ESTUDO

Com este estudo pretende-se alcançar essencialmente dois grandes objectivos: i) apresentação de um conjunto de métodos de modelagem geométrica de corpos do sistema geológico-mineiro; ii) descrição do conjunto de instrumentos básicos - bases de dados geo-referenciados e bibliotecas de programas - que permitam ao utilizador construir um programa para a modelagem de um corpo mineralizado ou tecnológico relacionado com o método de exploração.

Os modelos geométricos são fundamentalmente modelos deterministas, de representação vectorial, em que o corpo é definido pela sua envolvente, e modelos estocásticos, de representação "*raster*" que caracterizam o corpo por um conjunto de pontos com a maior probabilidade estimada de pertença ao corpo.

Paralelamente aos modelos morfológicos é apresentado um conjunto de instrumentos básicos de modelagem geométrica: i) uma base de dados geo-referenciados com uma biblioteca de objectos topologicamente relacionados com os corpos do sistema geológico-mineiro - BDMIN; ii) uma biblioteca de funções de modelagem, envolvendo uma importante componente gráfica, sobre objectos vectoriais - OBJLIB; iii) uma biblioteca de funções de modelagem de objectos "*raster*" e correspondência de objectos vectoriais/"*raster*" - GRIDDLIB.

1.2 A MODELAGEM GEOMÉTRICA NO PLANEAMENTO MINEIRO

Na avaliação das reservas de um corpo mineralizado, em qualquer fase do planeamento mineiro, é fundamental a caracterização da respectiva morfologia, quer para a contabilização de volumes e tonelagens de metal, quer para o estudo da interacção geográfica com as estruturas do método de exploração.

Concretamente, na fase de projecto e de planeamento a longo prazo em jazigos de grande variabilidade morfológica, para o dimensionamento das estruturas tecnológicas de exploração e de tratamento, antes do estudo de variabilidade dos teores, é importante realizar a caracterização da dispersão espacial da forma dos corpos mineralizados. Para este objectivo podem ser utilizados os modelos resultantes da interpretação geológica ou os modelos estocásticos, nomeadamente, os

geoestatísticos (Journal e Isaaks, 1984, Soares, 1989).

Os mesmos modelos podem ser usados no planeamento a médio e curto prazo onde a caracterização da forma dos corpos mineralizados é tanto mais importante quanto maior for o valor do metal em causa. Por exemplo, a decisão de abandono da exploração de uma pequena lentícula de um jazigo de elevado teor em cobre, com óbvia repercursão económica, tem necessariamente que ser suportada por um bom estimador da forma dessa lentícula. Em métodos de lavra de grande selectividade, normalmente mais dispendiosos (nomeadamente, o "*cut and fill*"), o projecto de desmonte tem que ter por base uma boa caracterização da forma da mineralização com o objectivo de minimizar as diluições - zonas do desmonte nitidamente estéreis que são incluídas no minério e partes do minério que são abandonadas.

No cálculo das reservas recuperáveis, baseado na interacção do corpo mineralizado com o método de exploração, é de primordial importância o conhecimento prévio da morfologia das discontinuidades estruturais - falhas, dobramentos, etc. - pois são estas que determinam muitas vezes a acessibilidade da mineralização.

A caracterização morfológica de falhas e dobramentos é frequentemente realizada por intermédio de modelos geométricos deterministas, baseados na interpretação geológica, ou por modelos estocásticos, quando se pretende, nomeadamente, contabilizar a densidade de fracturação (Pereira *et al*, 1992) ou efectuar a estimação geoestatística de dobramentos com base em informação geológica (Dagbert *et al*, 1984).

No planeamento mineiro, além dos corpos mineralizados, outros corpos que carecem de ser modelados são os corpos tecnológicos: infraestruturas de acesso (galerias, chaminés, poços), desmontes, etc.. Tratam-se de estruturas que, apesar de apresentarem uma geometria simples, têm contudo de interagir com a forma do corpo mineralizado. Assim, a forma de um desmonte pode ser um paralelepípedo perfeito ou ter várias faces coincidentes com os limites da mineralização. Na modelagem geométrica de infraestruturas e desmontes são, normalmente, utilizados sistemas auxiliares de desenho por computador.

1.3 MODELOS GEOMÉTRICOS

Os modelos geométricos para caracterização dos corpos mineralizados são, na sua essência, distintos da maioria dos modelos de corpos tecnológicos: i) em primeiro lugar não há ideia

preconcebida sobre a forma do corpo mineralizado, tal como existe sobre uma galeria, rampa ou poço; ii) o corpo mineralizado não pode, na maioria dos casos, ser reduzido a uma combinação de formas simples como acontece na relação cilindro/poço e paralelepípedo/galeria; iii) nos corpos tecnológicos são normalmente conhecidos todos os parâmetros de forma (excepto quando os limites do corpo mineralizado coincidem com os limites dos corpos tecnológicos), enquanto que da forma do corpo mineralizado apenas se conhecem algumas amostras dos contactos. Pode dizer-se que, enquanto os modelos dos corpos mineralizados assentam essencialmente num processo de inferência, os modelos geométricos de corpos tecnológicos têm no desenho a sua componente mais importante.

O processo de inferência ou estimação da forma dos corpos mineralizados pode ter por base um formalismo **determinista ou estocástico**. Enquanto os modelos deterministas (Splines, curvas de Bézier, etc.) caracterizam a forma do corpo através da sua envolvente, isto é, o processo de interpolação passa-se todo ao nível do contacto do corpo com o complementar, os modelos probabilistas, nomeadamente os geoestatísticos, caracterizam a morfologia do corpo a partir do conjunto de pontos pertencentes ao corpo. Concretamente, são estimadas as probabilidades de pertença desses pontos ao corpo mineralizado com base na informação dicotómica das amostras e em informação geológica.

Os modelos geométricos de corpos tecnológicos resultantes do método de exploração assentam, basicamente, nas primitivas dos sistemas de desenho assistido por computador e nos dois vectores fundamentais destes sistemas que são a visualização gráfica e a interacção com o utilizador.

1.4 BASES DE DADOS DE INFORMAÇÃO GEOMÉTRICA E BIBLIOTECAS DE FUNÇÕES GRÁFICAS

O segundo grande objectivo deste trabalho é a construção de uma "caixa de ferramentas", composta fundamentalmente por bases de dados geo-referenciados e bibliotecas de primitivas gráficas que permitam ao utilizador modelar a geometria de um corpo mineralizado ou tecnológico (relacionado com o método de desmonte).

A modelagem geométrica do conjunto de corpos do sistema geológico-mineiro requer normalmente uma organização da informação geo-referenciada em bases de dados. Uma base de dados geológico-mineiros consiste numa colecção de dados referenciados espacialmente e arquivados em ficheiros, de um modo mais ou menos organizado, sendo o seu acesso gerido por um conjunto de programas. A estrutura destas bases de dados de informação geo-referenciada depende, por um lado, da natureza da informação - sondagens, perfis digitalizados, etc. - e por outro, do objectivo

da modelagem - corpo mineralizado, rede de galerias, etc.. Deve-se, sempre que possível, manter na organização da base as relações existentes na estrutura real dos dados.

Todos os tipos de dados geo-referenciados reportam-se a um dos quatro tipos de suportes ou objectos: ponto, linha, área e volume. A cada um destes suportes é associada uma posição espacial e uma tabela de atributos ou propriedades. Estes suportes, organizados hierarquicamente, podem ser classificados por tipos, conforme as suas características e grau de complexidade.

Existem basicamente dois modos de representação, em computador, dos suportes referidos: o modo de representação vectorial e o modo de representação "*raster*". O primeiro caracteriza a forma do corpo pela definição da sua envolvente, discretizada num conjunto limitado de vértices, segmentos de recta e/ou faces. O segundo caracteriza a forma do corpo pela definição dos pontos que pertencem ao interior do corpo (no caso dele representar uma área ou um volume) ou ao respectivo contorno (no caso de constituir uma linha poligonal).

Neste trabalho idealizou-se e desenvolveu-se uma estrutura de base de dados (BDMIN), modular, com configurações distintas, consoante a complexidade dos suportes de informação que se pretende arquivar.

Incluída na BDMIN existe uma biblioteca de objectos topologicamente relacionados com os corpos mineralizados e tecnológicos. Assente na estrutura dessa base de dados, desenvolveu-se um conjunto de primitivas de interacção com a base de dados, modelagem, visualização gráfica e quantificação de características numéricas para os modos de representação vectorial (OBJLIB) e "*raster*" (GRIDDLIB). Estas duas bibliotecas de primitivas e a

base de dados permitem a construção de programas, adaptados a cada caso particular de modelagem de corpos do sistema geológico-mineiro (Fig. 1.1).

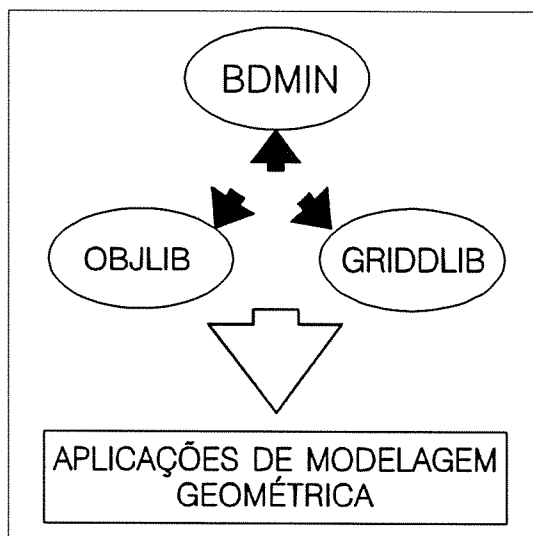


Fig. 1.1 - Interacção entre bibliotecas de primitivas e aplicações de modelagem geométrica.

2. BASES DE DADOS GEO-REFERENCIADOS

2. BASES DE DADOS GEO-REFERENCIADOS

2.1 CONCEITOS GERAIS

Definindo o sistema geológico-mineiro, do ponto de vista morfológico, como sendo o conjunto de corpos geológicos e tecnológicos, (resultantes do acesso e apropriação do recurso) interligados espacialmente, a sua edição e manipulação dada a complexidade e diversidade associada só pode ser concebida desde que integrada numa base de dados.

Nas fases iniciais do planeamento mineiro é fundamental a interacção entre a estrutura numérica - teores, quantidade de metal, tonelagens - e a estrutura morfológica - geometria dos corpos do sistema geológico-mineiro. O conjunto de atributos do sistema geológico-mineiro, por exemplo os teores, a quantidade de metal, as tonelagens, os tipos de minério, etc., pode ser referenciado geograficamente em relação às unidades tecnológicas de desmonte (Guerreiro, 1991) e, nestes casos, é possível usar linguagens com primitivas não gráficas de bases de dados, nomeadamente CLIPPER. Tratam-se de bases de dados vocacionadas para a produção, processo terminal da apropriação do recurso, não contendo informação sobre a morfologia do corpo geológico e dos corpos tecnológicos de acesso ao desmonte.

Todos os tipos de dados geo-referenciados reportam-se a um dos quatro tipos de suportes (objectos): **ponto**, **linha**, **área** e **volume**, normalmente com propriedades ou grandezas associadas, que interessa arquivar. Exemplos de informação, referida a cada um destes suportes num sistema geológico-mineiro, são entre outros:

- .**Ponto** - Pontos cotados, locais onde foram colhidas amostras em levantamentos geoquímicos, local de início de uma sondagem;
- .**Linha** - Rede de ventilação, troço de uma sondagem;
- .**Área** - Região de isovalores de uma propriedade;
- .**Volume** - Formação geológica, câmara de desmonte, galerias.

Em cada um destes suportes, para além de se associar uma tabela de dados de atributos ou propriedades, é necessário também caracterizar a sua **posição espacial** e, no caso das linhas, áreas e volumes, a sua forma.

A **posição geográfica** fornece a localização espacial do conjunto de atributos que foram registados e pode ser absoluta ou relativa:

.**Absoluta** - Dada por intermédio de um conjunto de três coordenadas (X,Y,Z), latitude, longitude e altitude, ou ainda, por um conjunto de três índices de posição (coluna, linha, nível) numa malha regular;

.**Relativa** - Dada pela posição relativa a uma outra entidade referenciada de um modo absoluto. Exemplos de posição relativa são "*estar contido em*", "*pertencer à fronteira de*", etc..

Os **atributos** permitem classificar (qualitativa ou quantitativamente) uma dada propriedade ou grandeza - química, geológica, geométrica, etc. - num determinado local. Em representação gráfica por computador, recorre-se frequentemente à cor, simbologias gráficas e padrões para o desenho de linhas e preenchimento de áreas para a identificação e visualização espacial das propriedades referidas, obrigando frequentemente a uma correspondência entre os atributos e as características gráficas adoptadas.

Num sistema de gestão de base de dados geo-referenciados para uma gestão rápida e eficiente é fundamental verificar-se um conjunto de propriedades e, em função dos dados a arquivar, escolher o tipo de base de dados mais adequado. Dessas propriedades destacam-se as seguintes (Burrough, 1986, Valenzuela, 1991):

.Redução ao máximo da redundância de valores de modo a minimizar quer o espaço total ocupado por uma base de dados quer o tempo de acesso a um registo;

.Manutenção da integridade dos dados, isto é, evitar que os dados sejam trocados dentro da base devido a erros de utilização ou de funcionamento do programa de gestão;

.Possibilidade de acesso a uma base de dados através de programas de tratamento e cálculo, e escrita de resultados, em campos previamente definidos na mesma base de dados ou numa nova base de dados com a mesma estrutura;

.Possibilidade de, com um mesmo programa (por exemplo para visualização gráfica) aceder simultaneamente a duas ou mais bases de dados, permitindo cruzamento de informação;

.Manutenção, sempre que possível, na organização da base das relações existentes na estrutura real dos dados.

Para verificar estas propriedades, torna-se necessário adoptar estruturas de bases de dados mais complexas que as de um simples ficheiro contendo uma tabela de valores, ainda que codificada e arquivada em binário. Surgem então esquemas de bases de dados hierárquicas, em rede e relacionais, com diferentes graus de complexidade (Burrough, 1986, Valenzuela, 1991, Aronoff, 1989), cujo objectivo é incluir as relações fisicamente existentes entre os dados.

2.2 ESQUEMAS DE BASES DE DADOS

A base de dados de estrutura mais simples é formada por um conjunto de registos, dispostos sequencialmente, a cada um dos quais corresponde um conjunto de valores designados por campos (Fig. 2.1).

Registo 1 – Campo 1	Campo 2	...	Campo n
Registo 2 – Campo 1	Campo 2	...	Campo n
.			
.			
.			
Registo m – Campo 1	Campo 2	...	Campo n

Fig. 2.1 - Exemplo de uma base de dados com m registos e n campos cada registo.

Os esquemas de tipo hierárquico caracterizam-se por uma relação de parentesco entre os dados, ou seja, existem conjuntos de dados com as mesmas propriedades ou valores em determinados campos mas, com propriedades e valores diferentes, noutros. O acesso aos registos na base é sempre realizado no sentido descendente e por intermédio de apontadores (Fig. 2.2).

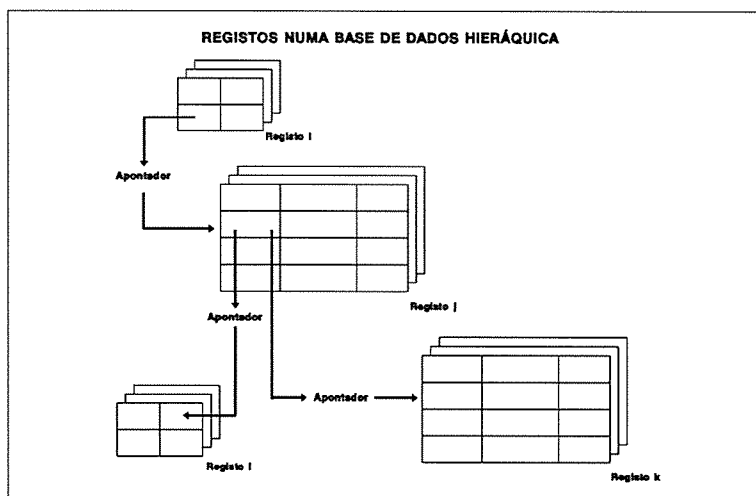


Fig. 2.2 - Estrutura geral de uma base de dados hierárquica.

Os esquemas em rede permitem que se mantenha uma estrutura hierárquica, em que existem registos que podem ser acedidos a partir de dois ou mais registos "pai". Os registos podem ainda ser acedidos sem que se passe pelos registos de topo da hierarquia. São utilizados, por exemplo, quando se pretende aceder a um conjunto de registos ignorando eventuais agrupamentos dos mesmos (Fig. 2.3).

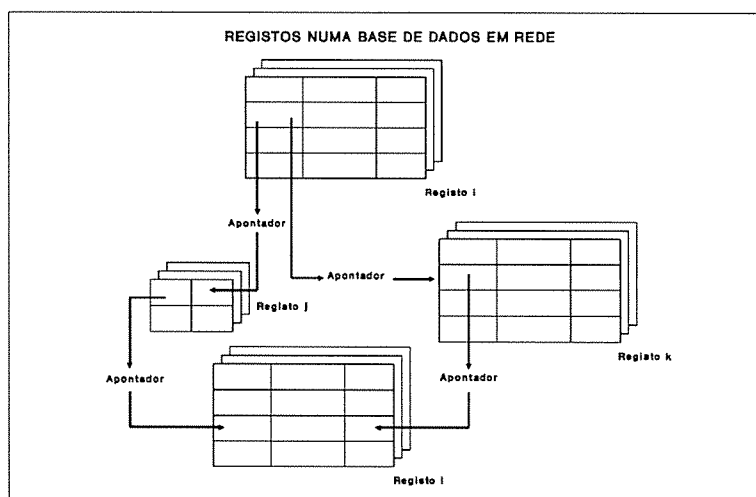


Fig. 2.3 - Estrutura geral de uma base de dados em rede.

Os esquemas de tipo relacional, consistem num conjunto de tabelas relacionadas entre si por campos comuns, "*tuples*", que fazem a ligação entre a informação contida em campos pertencentes a diferentes tabelas da base (Fig. 2.4).

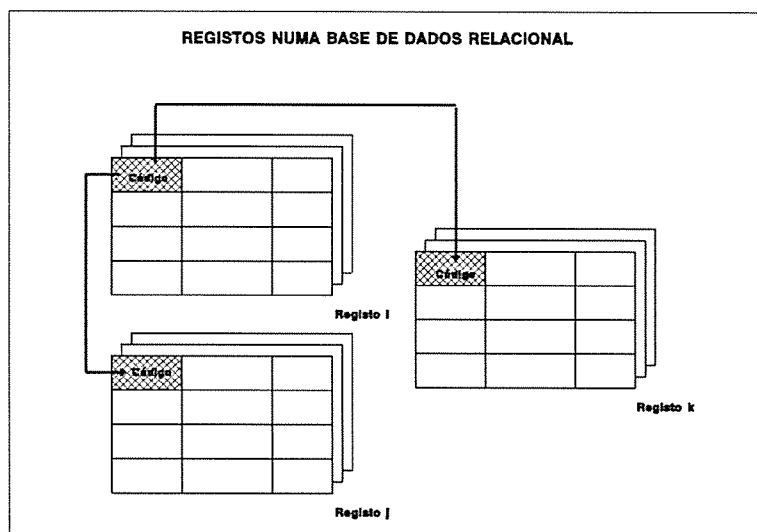


Fig. 2.4 - Estrutura geral de uma base de dados relacional.

2.3 REPRESENTAÇÃO VECTORIAL E "RASTER" DE OBJECTOS

Para a manipulação dos objectos por computador, eles devem ser decompostos em unidades simples ou parâmetros de equações de linhas ou superfícies, contendo toda a informação indispensável à caracterização, normalmente aproximada, da sua forma.

Existem basicamente dois modos de representação gráfica de objectos em computador: os modos **vectorial** e "**raster**". Cada um deles envolve metodologias particulares de construção e manipulação dos modelos associados.

O modo de representação **vectorial** caracteriza-se pela definição da envolvente de um corpo por um conjunto discreto de pontos (vértices). A forma aproximada do corpo, direita ou arredondada, é dada por um conjunto de segmentos de recta, cujo número e dimensão depende da complexidade da forma e do grau de resolução que se pretenda. Este tipo de representação permite caracterizar objectos bi ou tridimensionais.

No modo de representação "**raster**" caracteriza-se a forma de um corpo pela enumeração dos "**pixels**" ou "**voxels**", (respectivamente, elementos unitários bi e tridimensionais), de uma dada partição (efectuada num espaço limitado e na qual esteja contido o corpo) que se encontram no interior do mesmo.

Corresponde a um mapa bifásico ou multifásico, bi ou tridimensional, em que os elementos da partição assumem valores indicativos de pertença ou não a uma determinada fase. Na Fig. 2.5 comparam-se estes dois modos de representação, recorrendo às mesmas envolventes.

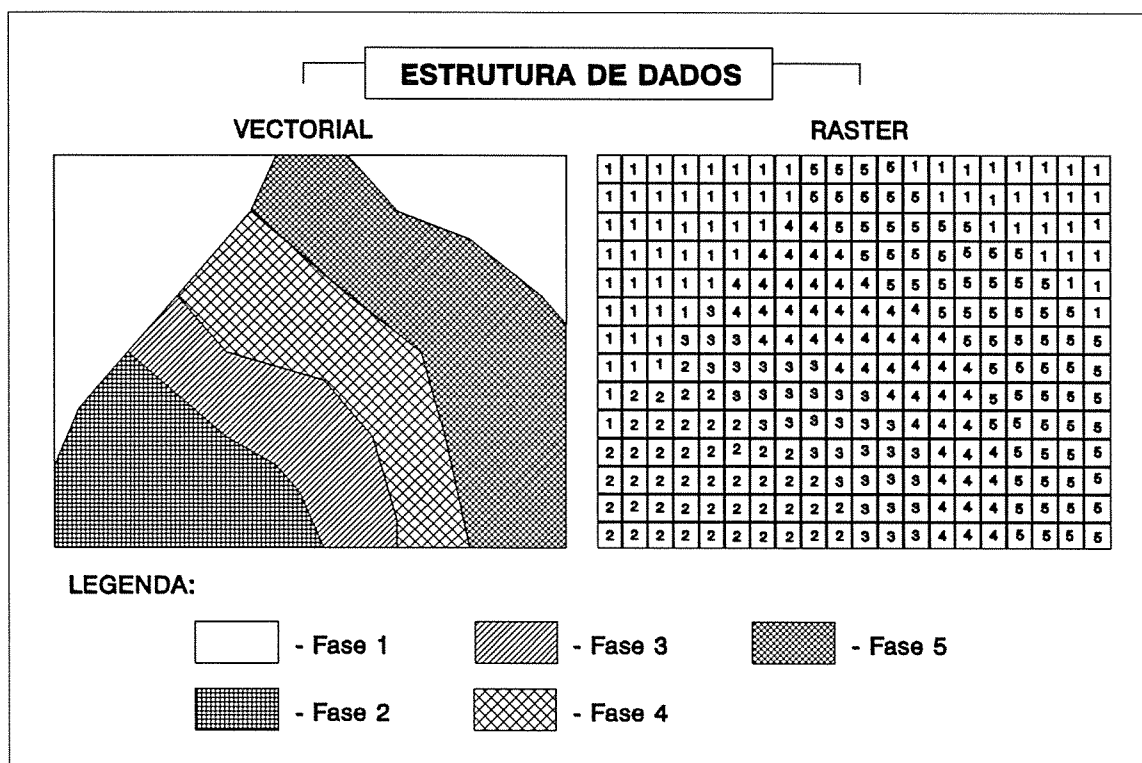


Fig. 2.5 - Comparação entre os modos de representação vectorial e "raster".

Algumas vantagens e desvantagens de cada tipo de representação são as seguintes:

Vantagens dos modelos "raster":

- Estrutura simples de dados;
- Facilidade de sobreposição de dados de diferentes variáveis "layers";
- Maior facilidade de análises espaciais de vários tipos;
- Adopção do mesmo conjunto de células para cada variável, permitindo consequentemente comparações individuais.

Desvantagens dos modelos "raster":

- Grande ocupação de memória em computador para dados dispersos. No entanto, existe a possibilidade de codificação em "quadtree" ou "octree" (Travassos, 1991), que reduz substancialmente o espaço ocupado em memória pelo modelo;
- Erros sistemáticos (enviesamentos) na estimação de perímetros e áreas;

- O uso de células elementares de maiores dimensões para reduzir o tamanho da base de dados origina, em geral, perda de informação.

Vantagens dos modelos vectoriais:

- Boa representação da estrutura geral dos dados;
- Em geral, pequena ocupação de memória;
- Bons e claros "*outputs*" gráficos.

Desvantagens dos modelos vectoriais:

- Estruturas complexas de base de dados;
- Sobreposição de poligonais em mapas de difícil percepção.

Nos dois quadros seguintes comparam-se algumas das características de cada um destes dois tipos de representação, nomeadamente, a facilidade de implementação de operações de modelagem e a quantificação numérico/espacial.

Operações ----- Modo de representação	VECTORIAL	" <i>RASTER</i> "
Visualização Translação, rotação e escalas	Rápido	Lento
Transformações Deformações em modelos	Rápido	Lento
Operações Booleanas (AND, OR, XOR, NOT)	Lento	Rápido
Caracterização - orientação, adjacência	Rápido	Rápido
Medidas - volume, área e centro de gravidade	Lento, excepto no cálculo de áreas	Rápido
Modelagem construtiva	Lento	Rápido

Características ----- Modo de representação	VECTORIAL	"RASTER"
Elementos a arquivar	Coordenadas dos pontos e estrutura de ligação entre pontos	Mapa bifásico ou multifásico de pertença ou não de cada "pixel" ou "voxel" a uma dada fase ou propriedade
Aplicabilidade à representação de linhas, superfícies e volumes	Fácil implementação na representação de linhas ou poligonais e difícil aplicação na representação de superfícies e volumes.	Fácil aplicação à representação de linhas, superfícies e volumes.
Resolução do objecto e memória ocupada	A resolução do objecto é função do número de vértices utilizados, que por sua vez depende da complexidade da forma do objecto. A memória ocupada depende do número de vértices que se utilizou para definir o objecto.	O nível de resolução é variável e a memória utilizada depende deste. Existem formas de codificação da informação como os "quadtree" e "octree" (respectivamente para partições 2D e 3D).
Uso de processos de inferência espacial	Os processos de inferência espacial são normalmente deterministas.	São utilizados processos de inferência espacial estocásticos, nomeadamente geoestatísticos, com o objectivo de determinar a probabilidade de uma dada célula da partição pertencer ao corpo.

2.4 ESTRUTURAS TOPOLÓGICAS DE DADOS GEO-REFERENCIADOS

Um dos aspectos mais importantes a ter em conta nas bases de dados geo-referenciados são as características topológicas do modelo, por exemplo, o modo como a sequência de vértices e de linhas se encontra organizada (de modo a formar cada um dos corpos 2D ou 3D, normalmente complexos). Esta topologia é distinta consoante a definição do objecto seja feita em modo de representação vectorial ou "raster". Se estiver representado na forma "raster", o modo de caracterização é o mesmo quer se trate de um ponto, de uma linha, de uma área ou de um volume. Nos modelos vectoriais, o problema da topologia é mais complexo, e terá de ser abordado de um modo diferente.

2.4.1 FORMA VECTORIAL

O ponto e o segmento de recta são as primitivas básicas deste tipo de representação. Um ponto P é referenciado pelas suas coordenadas (x, y, z) . Um segmento de recta $\overline{P_1P_2}$ é referenciado pelas coordenadas dos seus dois pontos extremos $P_1(x_1, y_1, z_1)$ e $P_2(x_2, y_2, z_2)$.

Neste tipo de representação, uma linha é representada por uma poligonal, isto é, por uma cadeia de segmentos de recta. É especificada pela sequência de vértices P_0, P_1, \dots, P_n que definem os segmentos de recta $\overline{P_0P_1}, \overline{P_1P_2}, \dots, \overline{P_nP_0}$ que a constituem. Uma linha poligonal é fechada quando os pontos inicial e final coincidem, isto é, existe um segmento de recta que liga o vértice P_0 ao vértice P_n , e é complanar quando todos os vértices pertencem ao mesmo plano.

Uma área ou polígono é representada pela região delimitada por uma linha poligonal fechada. Um polígono é representado (tal como as linhas poligonais) por uma sequência de pontos, designando-se os segmentos de recta $\overline{P_0P_1}, \overline{P_1P_2}, \dots, \overline{P_nP_0}$ por lados do polígono. Finalmente, um volume é representado pela região delimitada um conjunto de áreas ou polígonos (Fig. 2.6).

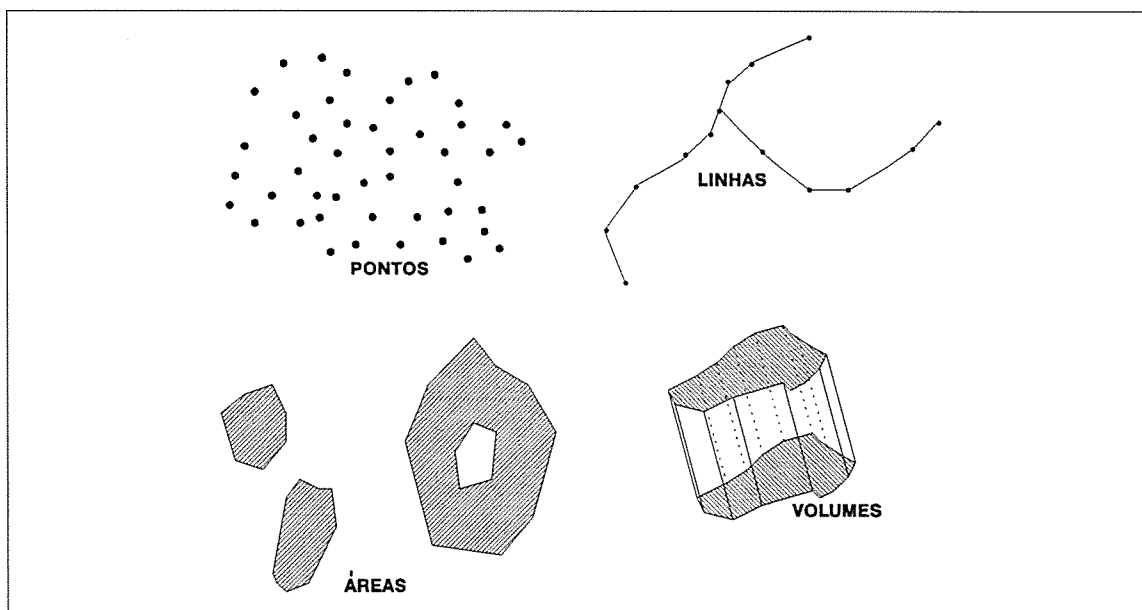


Fig. 2.6 - Objectos (pontos, linhas, áreas e volumes) em modo de representação vectorial.

Os modelos morfológicos de corpos 3D envolvendo este tipo de representação têm o nome de **modelos de linhas** ou **modelos de arame** (Plastock e Kalley, 1991). Qualquer modelo deste tipo é sempre constituído por uma lista de **pontos** e de **linhas**, cuja gestão numa base de dados permite saber quais os pontos pertencentes a cada linha e quais as linhas pertencentes a cada área. A informação destas listas pode ser descrita com recurso a um grande número de técnicas e algoritmos, nomeadamente, matrizes de adjacência ou conectividade, grafos ou ainda simplesmente apontadores entre as listas de atributos referentes a pontos (incluem-se as coordenadas), a poligonais, áreas e volumes.

Considere-se um modelo vectorial simples de um cubo (Fig. 2.7). Para representar este objecto, os oito vértices que o constituem terão de ser indexados de acordo com as regras das técnicas e algoritmos a que se recorrer.

Por exemplo, a representação do cubo através da matriz de conectividade de vértices e de faces (Mortenson, 1985), em que "1" e o "0" significam presença ou ausência de conexão são, respectivamente, as seguintes:

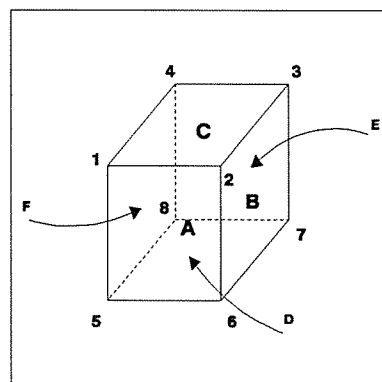


Fig. 2.7 - Representação topológica das faces de um cubo.

	Vértices							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	1	1	0	0	0
2	1	0	1	0	0	1	0	0
3	0	1	0	1	0	0	1	0
4	1	0	1	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	1	0	1
6	0	1	0	0	1	0	1	0
7	0	0	1	0	0	1	0	1
8	0	0	0	1	1	0	1	0

	Faces					
	A	B	C	D	E	F
A	0	1	1	1	0	1
B	1	0	1	1	1	0
C	1	1	0	0	1	1
D	1	1	0	0	1	1
E	0	1	1	1	0	1
F	1	0	1	1	1	0

Este processo de codificar a informação de conectividade das faces e dos vértices apresenta vantagens quanto à implementação de algoritmos de tratamento de objectos mas é desvantajosa no que respeita ao armazenamento, devido à dimensão das matrizes. Para vértices e faces corresponde a arquivar informação codificada em "uns" e "zeros" em número total de $(\text{número de vértices})^2 + (\text{número de faces})^2$.

Por outro lado, a utilização de representações que recorrem a grafos apresentam, em geral, grande dificuldade na implementação de algoritmos de tratamento e quantificação de medidas.

Apesar de obrigar a algumas repetições de atributos que implicam maior utilização de memória, o recurso a listas sequenciais de atributos e a apontadores entre essas listas (de modo a agrupar os atributos por linhas, faces e volumes) é um processo de implementação bastante simples. Assim, na construção da base de dados e "software" apresentado neste trabalho, foi esta a metodologia escolhida e implementada.

O processo de apontadores utilizado tem como base a existência de três listas, respectivamente i) vértices; ii) linhas poligonais, polígonos ou áreas; iii) volumes. Existem dois grupos de apontadores que fazem a ligação entre estas três entidades, indicando cada uma a posição final dos registos que interessa considerar na lista seguinte (Fig. 2.8).

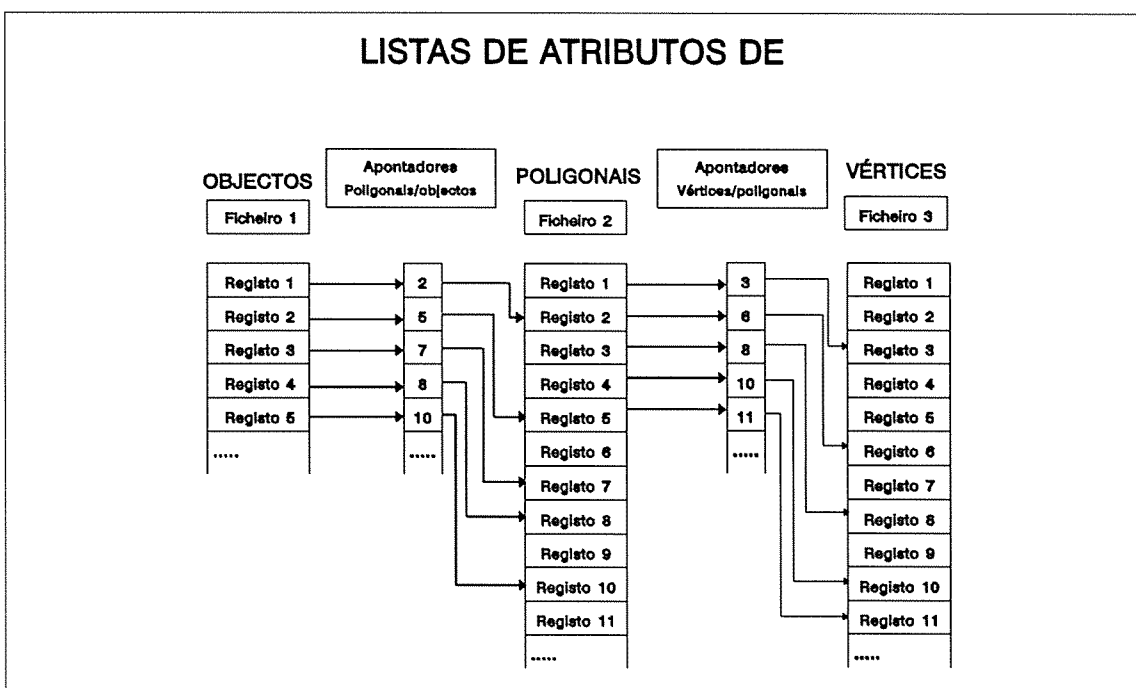


Fig. 2.8 - Exemplo de apontadores entre objectos, poligonais e vértices.

No exemplo ilustrado na Fig. 2.8, a lista dos apontadores entre vértices e poligonais { 3 6 8 10 ...} e a lista dos apontadores entre poligonais e objectos { 2 5 7 8 ...}, implica as seguintes relações de correspondência entre estas três entidades:

1º Objecto - poligonais 1 e 2

2º Objecto - poligonais 3 a 5

3º Objecto - poligonais 6 e 7

.....

1º Poligonais - vértices 1 a 3

2º Poligonais - vértices 4 a 6

3º Poligonais - vértices 7 e 8

.....

Os modelos de linhas são bastante utilizados em aplicações de engenharia, nomeadamente, em Sistemas de Desenho Assistido por Computador - CAD - dada a sua facilidade de construção e de manipulação. No entanto, a sua utilização em modelos com grande complexidade morfológica ou elevado número de curvas pronunciadas, apresenta problemas na implementação de algoritmos de cálculo devido ao grande número de vértices que é necessário arquivar, tornando operações elementares, por vezes, bastante morosas.

2.4.2 FORMA "RASTER"

O modo de representação "*raster*" apresenta as mesmas características, qualquer que seja o objecto a descrever. A dimensão das unidades elementares da partição define a resolução de representação do objecto. Neste modo de representação, as aproximações na modelagem de contornos são semelhantes às da representação vectorial. Qualquer contorno, mesmo curvo, é assemelhado na representação vectorial a um conjunto discreto de segmentos e no modo "*raster*" a um conjunto de "*pixels*" ou "*voxels*".

Para caracterizar uma partição do espaço e conhecer a localização de todos os seus elementos (células) é suficiente definir o seguinte (Fig. 2.9):

- .Coordenada de um dos cantos da partição, nomeadamente, a do canto que tem menores valores absolutos;
- .Número de unidades elementares em cada direcção;
- .Dimensão das unidades elementares em cada direcção.

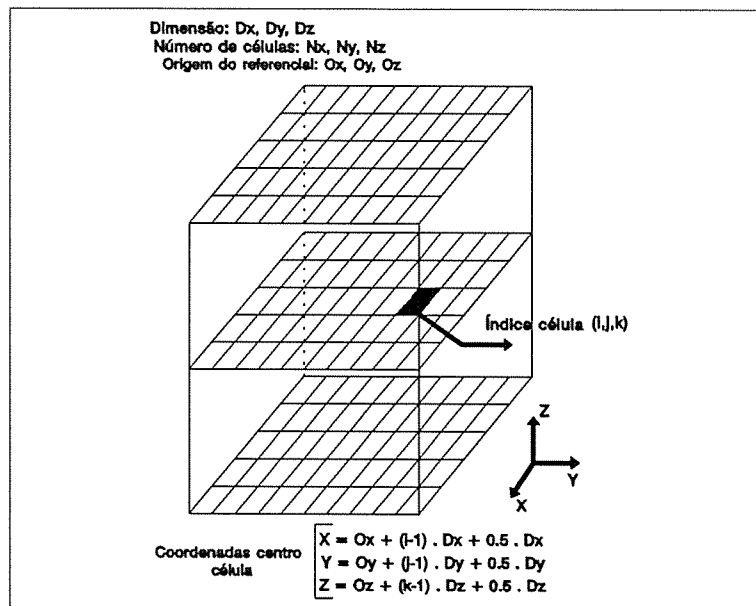


Fig. 2.9 - Modo de representação "raster" - grandezas características de uma partição.

Uma base de dados, que arquive uma partição deste tipo (e os respectivos atributos associados a cada elemento da partição) não necessita guardar as coordenadas espaciais de todos os elementos, mas apenas os três parâmetros anteriormente referidos. O acesso às coordenadas de cada elemento é feito através do conhecimento dos respectivos índices de linha, coluna e nível. Há, no entanto, formas de definir outro tipo de partições do espaço de modo a reduzir o número de elementos unitários constituintes de um modelo, como é o caso dos "quadtree" ou "octree".

2.5 A BASE DE DADOS GEOLÓGICO-MINEIROS - BDMIN

Para o arquivo e manipulação de objectos e para o desenvolvimento de "software" criou-se um esquema de base de dados para arquivar os modelos de formas de tipo vectorial e "raster".

As primitivas programadas em linguagem C (versão Microsoft 6.0) permitem as operações usuais em bases de dados: abertura de ficheiros, definição de variáveis, leitura/escrita de valores, apagar valores, inserir valores e o fecho. A escolha da linguagem C deve-se a várias razões, nomeadamente, à portabilidade em diferentes processadores e sistemas operativos, possibilidade de acesso através de outras linguagens de programação, tais como o FORTRAN 77, código rápido e condensado e possibilidade de utilização de interfaces gráficas e "menus" recorrendo a bibliotecas de primitivas já existentes.

2.5.1 ESQUEMA GERAL DA BASE

A base de dados está estruturada em quatro tipos de ficheiros: dois ficheiros de dados de atributos (ficheiro de BASE e ficheiro de GRELHA), um ficheiro de APONTADORES e um ficheiro de INDEXAÇÃO. O formato de cada um dos tipos de ficheiros é o seguinte:

.Ficheiro de BASE

Este ficheiro está dividido em duas zonas: uma fixa que corresponde ao formato e outra variável que contém os atributos a arquivar segundo o formato definido. Na zona fixa, cuja dimensão é de 552 "bytes" (se a base estiver dimensionada para ter no máximo vinte variáveis de cada um dos tipos), aparecem os seguintes campos (Fig. 2.10):

Nome do projecto Objecto associado Tipo de ficheiro Nº de registos
Nº de variáveis de tipo inteiro, real e alfanumérico Formato de variáveis de tipo inteiro, real e alfanumérico Nome de variáveis de tipo inteiro, real e alfanumérico
Sequência de registos: Registo nº 1 -- Variáveis inteiras, reais e alfanuméricas Registo nº 2 -- Variáveis inteiras, reais e alfanuméricas . . . Registo nº n -- Variáveis inteiras, reais e alfanuméricas

Fig. 2.10 - Formato de um ficheiro de BASE.

A informação do ficheiro de BASE compreende:

- .Projecto - título de reconhecimento de uma base de dados (oitenta caracteres no máximo);
- .Objecto associado - ligação a um dicionário de temas de bases de dados (sondagens, galerias, etc.);
- .Tipo de ficheiro - posição deste ficheiro na hierarquia da base, em que as possibilidades são 1, 2 ou 3;

- .Nº de registos - número de registos que este ficheiro da base de dados contém;
- .Nº de variáveis de cada tipo - máximo vinte variáveis por tipo (inteiro, real e alfanumérico);
- .Formato de cada variável:
 - 2 "bytes" para variáveis de tipo inteiro;
 - 4 "bytes" para variáveis de tipo real;
 - 1 x N(nº de caracteres) "bytes" para variáveis de tipo alfanumérico;
- .Nome de cada variável - conjunto de cinco caracteres.

Seguidamente, aparece a sequência ordenada de registos, numa zona de dimensão variável, contendo a informação referente a cada ponto, segmento de recta, área ou volume.

.Ficheiro de GRELHA

Este ficheiro tem um formato idêntico ao de BASE, além da informação necessária para aceder às coordenadas de cada ponto da malha (Fig. 2.11).

Nome do projecto Objecto associado Tipo de ficheiro Nº de registos
----- Nº de variáveis de tipo inteiro, real e alfanumérico Formato de variáveis de tipo inteiro, real e alfanumérico Nome de variáveis de tipo inteiro, real e alfanumérico
----- Coordenadas de um dos cantos da malha (X,Y,Z) Dimensões entre malhas (X,Y,Z) Nº de malhas em (X,Y,Z)
Sequência de registos: Registo nº 1 -- Variáveis inteiras, reais e alfanuméricas Registo nº 2 -- Variáveis inteiras, reais e alfanuméricas . . . Registo nº n -- Variáveis inteiras, reais e alfanuméricas

Fig. 2.11 - Formato de um ficheiro de GRELHA.

A informação adicional em relação ao ficheiro de BASE é a seguinte:

- .Coordenadas de um dos vértices da malha de pontos ou blocos (o vértice de menores coordenadas X, Y e Z);
- .Distâncias entre pontos nas direcções X, Y e Z;
- .Número de pontos ao longo das direcções X, Y e Z.

Na zona de dimensão variável aparece a sequência ordenada de registos, contendo a informação referente a cada ponto ou bloco da malha.

A correspondência entre o número do registo e a posição de cada célula é determinada pelo modo de ordenação segundo linhas (Y), colunas (X) e níveis (Z). O ponto de índices (i_x, i_y, i_z) corresponderá ao registo:

$$R_i = (i_z - 1) \cdot (N_{lin} \cdot N_{col}) + (i_x - 1) \cdot N_{col} + i_y$$

em que N_{lin} e N_{COL} são, respectivamente, o número de linhas e colunas da malha. Por exemplo, o registo 116 de um ficheiro de GRELHA com dez blocos segundo cada um dos eixos corresponde ao bloco de índices (2,6,2) da base de dados.

.Ficheiro de APONTADORES

Este ficheiro permite fazer a ligação entre dois ficheiros de BASE. Para cada registo do ficheiro de BASE de primeira hierarquia informa quais os registos do outro ficheiro de BASE a que se encontra associado. Por cada conjunto de dois ficheiros de BASE existirá um ficheiro de apontadores (Fig. 2.12).

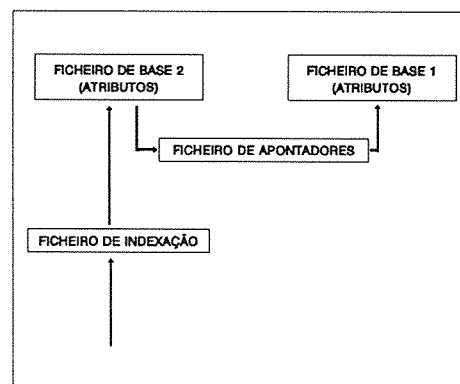


Fig. 2.12 - Ligação entre dois ficheiros de BASE.

O seu conteúdo consiste numa cadeia de registos em que, cada um contém dois campos: posição inicial e número de registos.

.Ficheiro de INDEXAÇÃO

O esquema geral das bases assenta, normalmente, sobre dois grupos de ficheiros: um de valores de variáveis (ficheiros de BASE) e outro de ficheiros de APONTADORES. No entanto, poderá existir, adicionalmente, um ficheiro de INDEXAÇÃO.

Este ficheiro, cujo conteúdo consiste numa cadeia de valores inteiros, permite criar uma nova sequência de ordenação dos registos (diferente da ordenação imposta pela escrita sequencial dos registos no ficheiro de BASE). A sua função consiste em que o acesso aos registos seja feito por uma sequência pré-determinada, bem como a possibilidade de ocultar determinados registos. É, por exemplo, possível criar vários ficheiros de INDEXAÇÃO, os quais possibilitam o acesso por temas, a uma base de dados geométrica, em que cada ficheiro deste tipo contém o índice dos registos associados a cada tema. Se, por exemplo, o ficheiro de BASE incluir dez registos e o ficheiro de INDEXAÇÃO contiver a seguinte sequência de valores 3, 5 e 1, os restantes registos são ignorados, impondo-se uma nova ordenação para aqueles a que se continua a ter acesso (3º passa a 1º, 5º passa a 2º, 1º passa a 3º).

Em cada um daqueles quatro tipos de ficheiros (BASE, GRELHA, APONTADORES e INDEXAÇÃO), a informação é escrita em binário, sendo o seu acesso efectuado de forma aleatória. Estes quatro tipos de ficheiros podem ser combinados de sete formas, constituindo sete tipos de bases de dados:

- A - um ficheiro de BASE;
- B - um ficheiro de BASE e um ficheiro de INDEXAÇÃO;
- C - dois ficheiros de BASE e um ficheiro de APONTADORES;
- D - dois ficheiros de BASE, um ficheiro de APONTADORES e um ficheiro de INDEXAÇÃO;
- E - três ficheiros de BASE, e dois ficheiros de APONTADORES;
- F - três ficheiros de BASE, dois ficheiros de APONTADORES e um ficheiro de INDEXAÇÃO;
- G - um ficheiro de GRELHA.

A opção por um destes tipos de base de dados é feita consoante o suporte de informação que se pretende arquivar (Fig. 2.13). As bases de tipo A e B são bases de dados não hierárquicas (para arquivo de valores cujo suporte é pontual); as bases de tipo C e D são simplesmente hierárquicas (para arquivo de valores cujo suporte é constituído por pontos, linhas poligonais e áreas); as de tipo E e F são duplamente hierárquicas (para arquivo de valores cujo suporte é constituído por pontos, linhas poligonais, áreas e volumes); as bases de tipo G destinam-se a informação em modo de representação "raster" (malhas de pontos ou blocos).

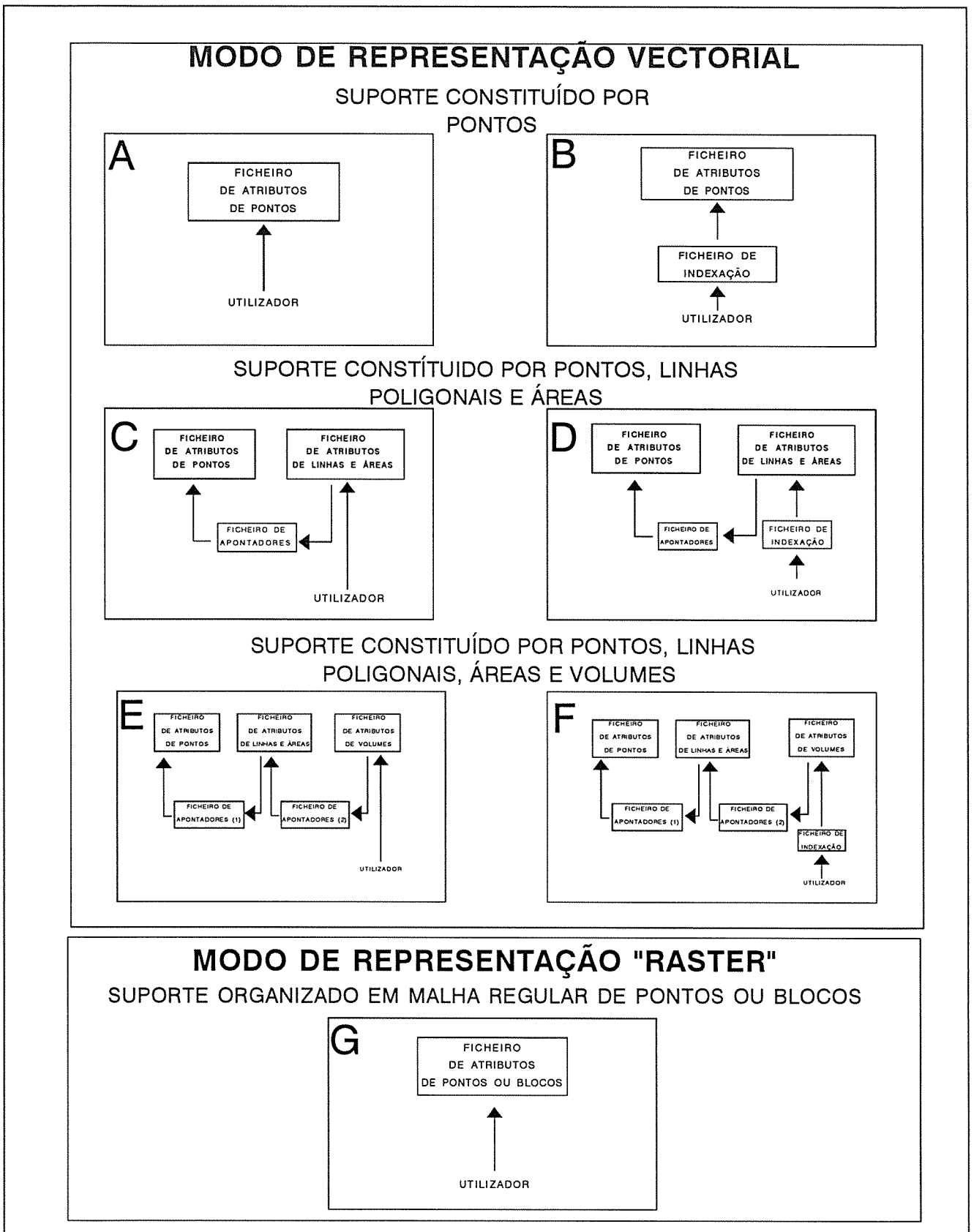


Fig. 2.13 - Configuração da base BDMIN para informação respeitante a diferentes suportes.

A filosofia de construção desta base de dados foi a completa modularidade dos ficheiros que a constituem. Por exemplo, numa base de dados de tipo F, qualquer um dos três ficheiros BASE formam uma base de dados de tipo A e duas de tipo C. Deste modo, o tipo de base de dados escolhido corresponde a uma situação particular de utilização.

2.5.2 FUNÇÕES DESENVOLVIDAS

Para cada tipo de base de dados foram desenvolvidas as seguintes primitivas, que permitem as operações fundamentais de inicialização, leitura e edição:

- .Inicialização, abertura e fecho de uma base de dados;
- .Leitura e escrita das características gerais da base de dados (nome do projecto, objecto associado, tipo de base de dados e número total de registos);
- .Leitura e escrita, em bases de dados de tipo G, da posição e dimensões da malha;
- .Leitura e escrita de um campo (inteiro, real ou carácter conhecido pelo nome ou por um índice) de um determinado registo;
- .Apagar um determinado registo (excepto em bases de dados de tipo G que têm um número fixo de registos);
- .Efectuar cópias entre registos;
- .Leitura e escrita de formatos de variáveis (número de caracteres das variáveis de tipo alfanumérico);
- .Leitura e escrita do número e nome das variáveis;
- .Apagar e inserir variáveis;
- .Acesso a registos em ficheiros de diferentes hierarquias por intermédio de apontadores;
- .Efectuar cópias de segurança de uma base.

2.5.3 DICIONÁRIO DE OBJECTOS EM MODO VECTORIAL

Na base de dados BDMIN, os objectos são classificados do ponto de vista topológico para uma melhor eficiência e rapidez das operações de modelagem, quantificação e visualização.

Considerando, por exemplo, o cubo representado na Fig. 2.7, a sua forma pode ser identificada à custa de duas faces paralelas (dois polígonos de cinco vértices cada), tendo necessariamente de existir as ligações entre vértices homólogos dos dois polígonos. Um outro processo de identificação de forma seria a enumeração de todas as faces que constituem o modelo (neste caso seis polígonos, cada qual formado à custa de cinco vértices).

Para a representação de objectos definidos em modo vectorial (pontos, poligonais, áreas, volumes) criou-se um dicionário de tipos de objectos, codificados de 0 a 7, de modo a atender à diversidade e complexidade das formas. Os códigos são arquivados na base de dados como uma variável de tipo inteiro, com uma localização fixa (primeira variável de tipo inteiro), o que permite que os programas reconheçam rapidamente as características gerais do objecto que lêem e, consequentemente, controlar a aplicação das funções específicas de modelagem e quantificação. Estes códigos são apenas utilizados em bases dos tipos C, D, E e F, no ficheiro BASE de maior hierarquia.

Objecto de tipo 0 - É um objecto constituído por um conjunto discreto de pontos P_1, P_2, \dots, P_n (Fig. 2.14). Um exemplo deste tipo de objecto, é o conjunto de pontos amostrados resultantes de um levantamento geoquímico de teores.

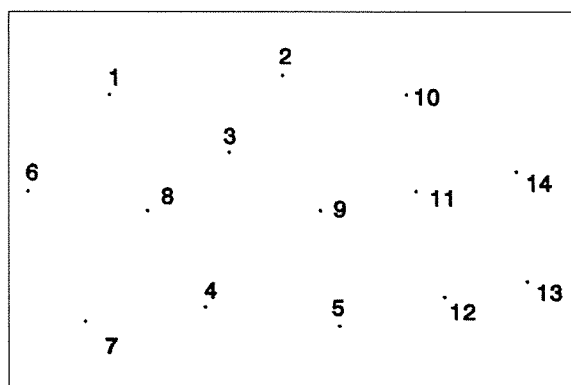


Fig. 2.14 - Exemplo de um objecto de tipo 0.

Objecto de tipo 1 - É um objecto 2D formado por uma linha poligonal, aberta ou fechada (Fig. 2.15). Alguns exemplos são a representação de um troço de uma rede de ventilação de uma mina, um troço de sondagem ou uma linha de isovalores.

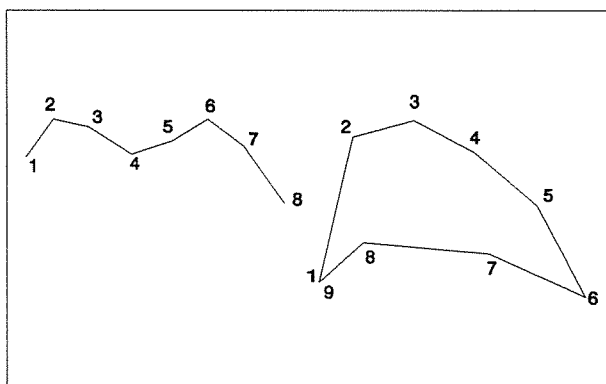


Fig. 2.15 - Exemplo de dois objectos de tipo 1 (aberto e fechado).

Objecto de tipo 2 - É uma superfície plana, delimitada por um polígono côncavo ou convexo e cujos vértices P_1, P_2, \dots , se encontram numerados em sentido directo, de modo a que os segmentos de recta que constituem as faces da poligonal $\overline{P_1P_2}, \overline{P_2P_3}, \dots, \overline{P_NP_1}$ não se intersectem. Um objecto deste tipo pode conter "cavidades", que também são delimitadas por polígonos, e cujos vértices, neste caso, são numerados em sentido inverso (Fig. 2.16). Um exemplo deste tipo de objecto é o polígono resultante da intersecção de um corpo 3D por um plano.

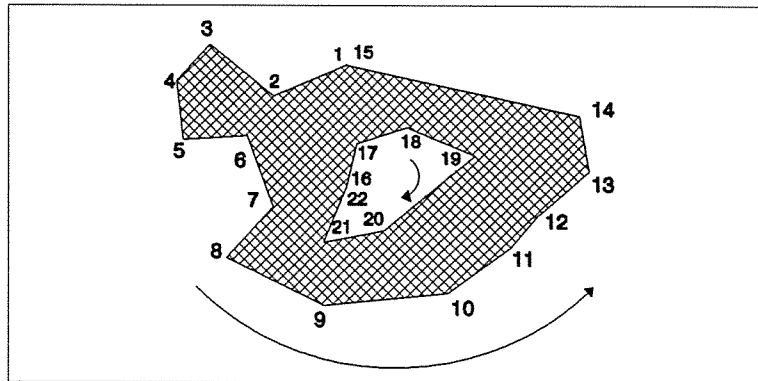


Fig. 2.16 - Exemplo de um objecto de tipo 2.

Objecto de tipo 3 - Trata-se de um volume formado por dois ou mais objectos iguais de tipo 2. Este tipo de objecto é gerado por rotação(ões) e/ou translação(ões) sucessivas de um único objecto. Neste tipo de objecto existem segmentos de recta que ligam os vértices homólogos dos objectos elementares de tipo 2 (Fig. 2.17).

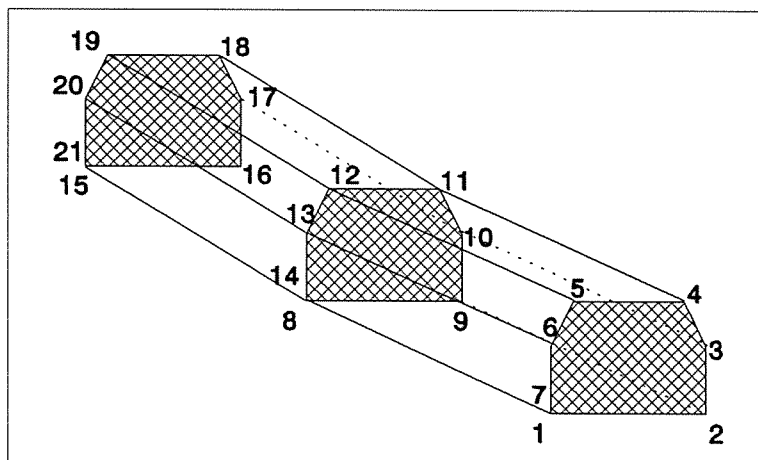


Fig. 2.17 - Exemplo de um objecto de tipo 3.

Objecto de tipo 4 - Trata-se de um volume formado a partir de dois ou mais objectos de tipo 2 que podem ter contornos diferentes, mas com o mesmo número de vértices. Neste tipo de objecto existem segmentos de recta entre as várias poligonais consecutivas, ligando vértices homólogos (Fig. 2.18).

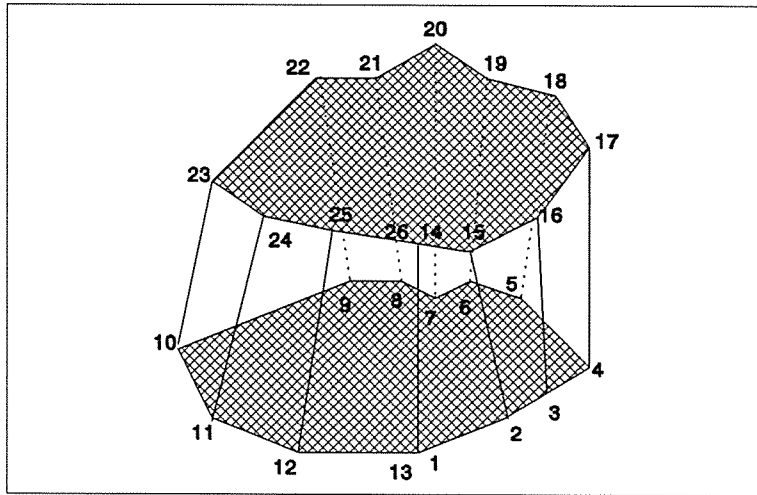


Fig. 2.18 - Exemplo de um objecto de tipo 4.

Objecto de tipo 5 - Trata-se de um objecto formado por vários objectos de tipo 4. É em geral complexo e para garantir a sua continuidade espacial, obriga a que se arquivem as poligonais internas (do tipo 2) por duas vezes, embora com número diferente de vértices (Fig. 2.19).

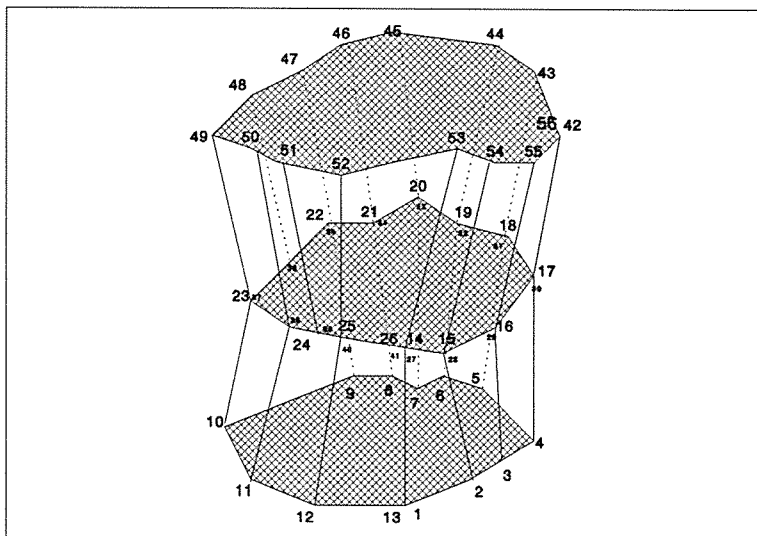


Fig. 2.19 - Exemplo de um objecto de tipo 5 formado por dois objectos de tipo 4.

Objecto de tipo 6 - Ao contrário dos objectos 3D anteriores, (formados por polígonos resultantes de secções conhecidas), os objectos de tipo 6 são representados pelos polígonos de todas as faces - objectos de tipo 2 (Fig. 2.20). Note-se que, faces com mais de três vértices, podem não ser coplanares.

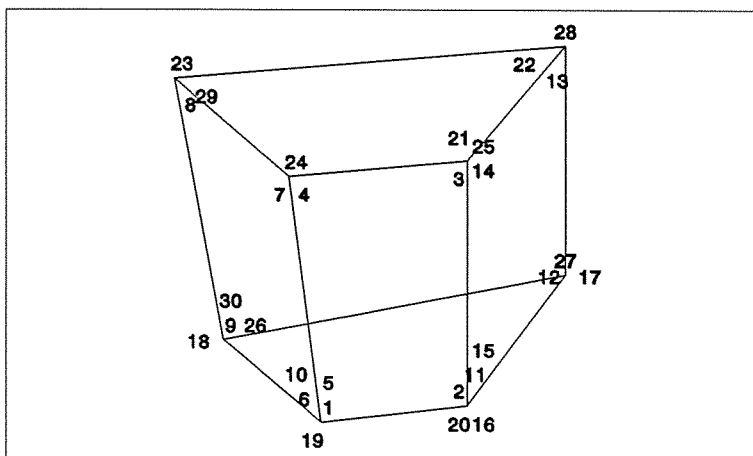


Fig. 2.20 - Exemplo de um objecto de tipo 6.

Objecto de tipo 7 - Trata-se de um objecto formado por um conjunto de linhas poligonais abertas e fechadas (Fig. 2.21). Corresponde à representação de um conjunto de objectos de tipo 1 coplanares ou não. O conjunto das curvas topográficas de uma dada região é o exemplo de um objecto deste tipo.

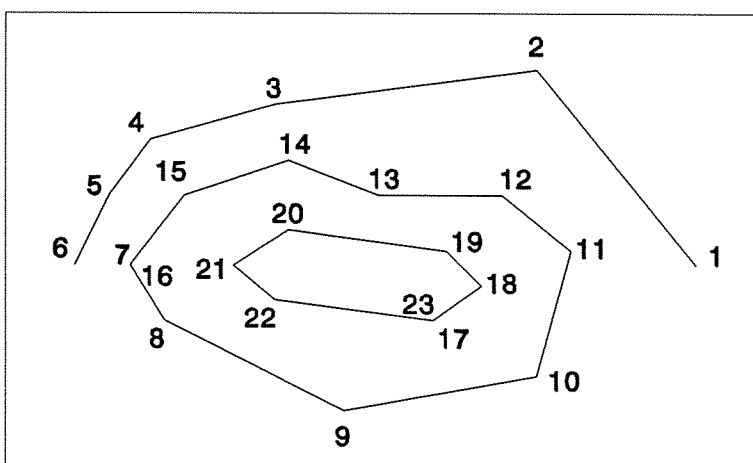


Fig. 2.21 - Exemplo de um objecto de tipo 7.

Através da classificação referida, fica reconhecido o tipo de modelo (objecto), que se encontra arquivado na base de dados, permitindo a selecção, consoante o tipo de topologia, das operações de modelagem, quantificação e visualização. Por exemplo, a operação de cálculo de áreas só terá lugar se o objecto enviado para a função que implementa este cálculo for de tipo 2 e a operação de cálculo de volumes não terá lugar se o objecto, enviado para a função de cálculo, for de tipo diferente de 3, 4, 5, ou 6.

Para além desta classificação, é necessário fixar e tornar obrigatória a utilização de algumas variáveis, nomeadamente, coordenadas e atributos indispensáveis à representação gráfica. Se o tipo de base de dados utilizado for qualquer de A a F, o ficheiro de atributos dos vértices terá obrigatoriamente três variáveis de tipo real, onde são arquivadas as coordenadas X, Y e Z dos pontos. Se o tipo de base for qualquer de C a F, o ficheiro de dados referente aos objectos conterà, obrigatoriamente, uma variável de tipo inteiro (a primeira), com o código (0 a 7) do tipo de objecto.

3. MODELAGEM DE OBJECTOS EM MODO DE REPRESENTAÇÃO VECTORIAL

3. MODELAGEM DE OBJECTOS EM MODO DE REPRESENTAÇÃO VECTORIAL

Neste capítulo descrevem-se alguns algoritmos para a construção de modelos vectoriais 2D e 3D e operações sobre os mesmos, de acordo com a topologia dos modelos descrita no capítulo 2 e utilizada na base de dados BDMIN.

A construção de modelos geométricos em modo de representação vectorial é, em geral, uma operação rodeada de alguma complexidade, que depende directamente das características morfológicas do corpo que se pretende modelar. Esta complexidade pode ser ainda incrementada por alguns factores exteriores ao modelo, como por exemplo, o modo como se encontra disponível a informação sobre o contorno do corpo a modelar (secções, conhecimento parcial ou total da sua envolvente, grau de resolução pretendido no tratamento, etc.).

Regra geral, os modelos vectoriais podem ser obtidos por um dos seguintes modos (Mortenson, 1985):

.Utilização de equações paramétricas de linhas, superfícies e volumes a partir de pontos conhecidos experimentalmente;

.A partir de um contorno 2D, um modelo é construído por uma sucessão de rotações e/ou translações sobre um mesmo contorno, de modo a formar um objecto;

.A partir de secções de contorno conhecido com as quais, por transformações não isomorfas, se obtém um modelo 3D;

.Por utilização de operações Booleanas (teoria dos conjuntos) sobre objectos simples bi e tridimensionais (quadrado, rectângulo, cubo, esfera, cilindro, etc.) dos quais resultam modelos mais ou menos complexos. Por exemplo, a modelagem construtiva aditiva ou subtractiva tem, por base, a adição ou subtracção, respectivamente, de objectos elementares.

Uma vez conhecidos, os modelos podem ser validados através da sua visualização e da sua consistência com os dados experimentais. Após validação podem ser determinadas toda uma série de medidas como por exemplo: perímetros, áreas, áreas superficiais, volumes, posição do centro de gravidade em modelos 2D e 3D.

3.1 MODELOS VECTORIAIS 2D

Com os modelos vectoriais 2D pretende-se caracterizar o contorno bidimensional de corpos geológicos, tipos mineralógicos, trabalhos subterrâneos - galerias, desmontes, etc. - a partir do conhecimento de alguns dados experimentais (intersecções de sondagens com o corpo mineralizado, levantamentos topográficos, etc.).

3.1.1 MODELOS HEURÍSTICOS: DIGITALIZAÇÃO DE CONTORNOS

Tratam-se de modelos com uma componente, predominantemente, pericial; por exemplo, o desenho geológico de uma lentícula mineralizada, em que a intervenção do cálculo automático se resume a: i) digitalização do desenho/modelo; ii) armazenamento dos pontos digitalizados, códigos (cor), coordenadas do plano, etc.; iii) visualização do desenho/modelo, validado através da sua consistência com os dados experimentais e outros modelos bidimensionais já construídos.

3.1.2 FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO E APROXIMAÇÃO

Com estas funções pretende-se interpolar por uma curva (caracterizada parametricamente por um polinómio), um conjunto discreto de pontos/vértices.

As situações que estas funções pretendem abranger no âmbito dos corpos geológico-mineiros são de diversa ordem. A figura digitalizada de um contorno resulta tanto mais angulosa (com mais pontos de descontinuidade) quanto menor for o número de pontos digitalizados. Nestas situações é normal interpolar os pontos digitalizados por uma curva atenuada. O problema coloca-se então da seguinte forma: dados os $(n + 1)$ pontos $P_0(x_0, y_0), \dots, P_n(x_n, y_n)$, pretende-se determinar a curva que de algum modo é definida por estes vértices.

Estes modelos baseiam-se em algoritmos que recorrem a funções polinomiais de ajustamento. Um polinómio de grau n é uma função com a seguinte forma:

$$Q(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$$

sendo definido pelos seus $n + 1$ coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n . Os polinómios utilizados nos ajustamentos não devem ser de grau muito elevado (superior a três), devido à natureza oscilatória dos mesmos. Assim, para manter as funções de ajustamento com um grau baixo, decompõe-se a

totalidade da curva na soma de pequenos troços ajustados individualmente. No entanto, o problema desta composição de funções é a descontinuidade nos locais de transição das funções. Utilizando algumas classes de funções, nada impede o aparecimento num ponto de transição de valores da tangente completamente díspares (introduzindo descontinuidades), criando situações pouco agradáveis à vista e incompatíveis, na maior parte dos casos, com a realidade que se pretende modelar (Fig. 3.1).

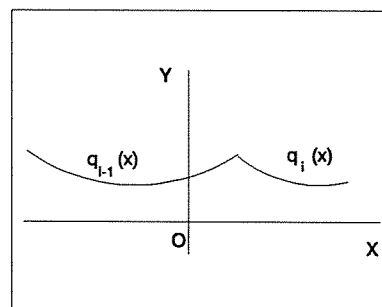


Fig. 3.1 - Exemplo de descontinuidade entre duas funções de ajustamento.

Uma vez obtida a curva de ajustamento, e pretendendo continuar a trabalhar em modo vectorial, extraem-se desta, pontos igualmente espaçados com uma resolução dependente da qualidade do trabalho a efectuar e da confiança nos dados de partida.

As funções de ajustamento podem-se dividir em dois grupos: i) **interpolação** - se a curva obtida passa por todos os vértices de partida; ii) **aproximação** - quando a curva obtida passa apenas pelo primeiro e último, aproximando-se dos restantes (Mortenson, 1985, Plastock e Kalley, 1991). As funções de interpolação e aproximação geralmente utilizadas são as seguintes:

a) **Interpolação com recurso a polinómios de Lagrange de grau n:**

O polinómio interpolador de Lagrange é dado por:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n y_i L_i(x) \quad (3.1)$$

em que os termos $L_i(x)$ são os polinómios de Lagrange de grau n que interpolam os $(n + 1)$ pontos experimentais.

$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, \quad i=1, 2, \dots, n$$

em que: $L_i(x_i) = 1$

b) Interpolação com recurso a polinómios cúbicos de Hermite:

Para a utilização desta função, ter-se-à que conhecer as primeiras derivadas nos pontos de partida $P'(x_0, y_0), \dots, P'(x_n, y_n)$, ou seja, os declives das rectas tangentes à curva ajustados nesses pontos.

O polinómio interpolador é dado por:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n [y_i H_i(x) + P'(x_i, y_i) \bar{H}_i(x)] \quad (3.2)$$

em que $H_i(x)$ e $\bar{H}_i(x)$ são as funções cúbicas de base de Hermite e $t_0 = x_0, t_1 = x_1, \dots, t_n = x_n$ são os $(n + 1)$ vértices escolhidos para interpolar por esta função.

$$H_i(x) = \begin{cases} -\frac{2(x-t_{i-1})^3}{(t_i-t_{i-1})^3} + \frac{3(x-t_{i-1})^2}{(t_i-t_{i-1})^2} & \text{se } t_{i-1} \leq x \leq t_i \\ -\frac{2(t_{i+1}-x)^3}{(t_{i+1}-t_i)^3} + \frac{3(t_{i+1}-x)^2}{(t_{i+1}-t_i)^2} & \text{se } t_i \leq x \leq t_{i+1} \end{cases}$$

$$\bar{H}_i(x) = \begin{cases} \frac{(x-t_{i-1})^2 (x-t_i)}{(t_i-t_{i-1})^2} & \text{se } t_{i-1} \leq x \leq t_i \\ \frac{(x-t_i) (t_{i+1}-x)^2}{(t_{i+1}-t_i)} & \text{se } t_i \leq x \leq t_{i+1} \end{cases}$$

c) Interpolação por Splines:

Utilizam-se Splines quando se pretende obter uma interpolação o mais suave possível nos pontos experimentais. O grau de uma curva Spline pode ser variado (não depende do número de pontos a interpolar), sendo escolhido na maior parte dos casos uma curva Spline de grau dois (quadrática) ou de grau três (cúbica), devido às facilidades de implementação. Por exemplo, se se pretender ajustar um conjunto de $(n + 1)$ pontos por uma curva Spline de grau m , procede-se do seguinte modo:

i) Escolher um conjunto de nós $t_0, t_1, \dots, t_{n+m+1}$ sendo m o grau do Spline e $(n + 1)$ o número de pontos a interpolar. Estes nós são seleccionados do seguinte modo:

$$t_0 = t_1 = \dots = t_m < x_0 \quad \text{e} \quad t_{n+1} = t_{n+2} = \dots = t_{m+n+1} > x_n$$

e

$$t_{i+m+1} = \frac{x_{j+1} + \dots + x_{j+m}}{m}, \quad \text{com } i=0, \dots, n-m-1$$

ou concretamente se $m=3$ (Spline cúbica):

$$t_{i+4} = x_{i+2} \quad \text{com } i=0, \dots, n-4$$

ii) A curva Spline de grau m que interpola os $(n + 1)$ pontos experimentais é dada por:

$$f(x) = \sum_{i=0}^{n+m-1} a_i B_{i,m}(x) \quad (3.3)$$

em que $B_{i,m}(x)$ são as funções B-Splines que podem ser obtidas, recursivamente, para os nós $t_0, t_1, \dots, t_{m+n+1}$ a partir de:

$$B_{i,0}(x) = \begin{cases} 1 & t_i \leq x \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$B_{i,n}(x) = \frac{x-t_i}{t_{i+n}-t_i} B_{i,n-1}(x) + \frac{t_{i+n-1}-x}{t_{i+n-1}-t_{i+1}} B_{i+1,n-1}(x) \quad \text{para } t_i \leq x \leq t_{i+n+1}$$

iii) Determinação dos $(n + m)$ coeficientes a_i da equação (3.3) por resolução do sistema de $(n + m)$ equações, com a imposição de $f(x_j) = y_j$:

$$f(x_j) = \sum_{i=0}^{n+m-1} a_i B_{i,m}(x_j)$$

As restantes condições necessárias para a resolução do sistema são impostas pelas condições de fronteira, como por exemplo, os declives da curva a ajustar nos pontos x_0 e x_n respectivamente $f'(x_0) = P'(x_0, y_0)$ e $f'(x_n) = P'(x_n, y_n)$.

d) Aproximação por curvas de Bézier:

A aproximação por curvas de Bézier recorre, parametricamente, aos polinómios de Bernstein, do seguinte modo:

$$f(t) = \begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^n x_i BE_{i,n}(t) \\ y(t) = \sum_{i=0}^n y_i BE_{i,n}(t) \\ z(t) = \sum_{i=0}^n z_i BE_{i,n}(t) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (3.4)$$

sendo os polinómios de Bernstein, de grau n definidos por:

$$BE_{k,n}(x) = \frac{n!}{k!(n-k)!} x^k (1-x)^{n-k}, \quad \text{com } 0 \leq x \leq 1$$

A aproximação por curvas de Bézier apresenta algumas características particulares, como por exemplo:

.Tem como pontos extremos, o primeiro e último ponto da linha poligonal a aproximar, ou seja $f(0) = P(x_0, y_0, z_0)$ e $f(1) = P(x_n, y_n, z_n)$;

.A curva fica definida no envelope convexo da linha poligonal a aproximar;

.Para os pontos extremos P_0 e P_n , a direcção do vector tangente à curva nesses pontos é definida apenas pelo primeiro e último segmentos $\overline{P_0P_1}$ e $\overline{P_{n-1}P_n}$ da linha poligonal a aproximar sendo $f'(0) = n.(P_1 - P_0)$ e $f'(1) = n.(P_{n-1} - P_n)$. Esta condição permite evitar as mudanças bruscas de declive em situações de transição.

e) Aproximação por curvas B-Splines:

A aproximação por curvas B-Splines recorre, parametricamente, aos polinómios B-Spline, do seguinte modo:

$$f(t) = \begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^n x_i B_{i,m}(t) \\ y(t) = \sum_{i=0}^n y_i B_{i,m}(t) \\ z(t) = \sum_{i=0}^n z_i B_{i,m}(t) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq n-m+1 \quad (3.5)$$

Os nós $t_0, t_1, \dots, t_{n+m+1}$ utilizados na construção dos polinómios de B-Spline, em que m é o grau do Spline e $(n + 1)$ o número de pontos a aproximar, são escolhidos do seguinte modo (para modelar um conjunto de pontos que constituem uma linha poligonal aberta):

$$\begin{cases} t_i = 0 & \text{se } 0 < i < m+1 \\ t_i = i-m & \text{se } m+1 \leq i \leq n \\ t_i = n-m+1 & \text{se } n < i < n+m-1 \end{cases}$$

Esta aproximação verifica algumas propriedades, nomeadamente:

.Apresenta as mesmas características descritas para a aproximação de Bézier, verificando contudo uma maior aproximação ao polígono de partida;

.Permite a existência de pontos com multiplicidade dois ou superior, o que faz a curva aproximar-se mais desses pontos. Se um ponto tiver multiplicidade igual a $m + 1$, a curva interpola esse ponto, tal como os pontos inicial e final da curva que apresentam essa multiplicidade;

.Ao contrário das curvas de Bézier, o grau da curva de ajustamento não depende do número de pontos a aproximar mas sim de um parâmetro. Utilizam-se geralmente, para maior facilidade de implementação e manipulação, as curvas B-Spline de grau dois e três (respectivamente quadráticas e cúbicas);

.Se num troço a poligonal for constituída por $(m + 1)$ vértices colineares, a curva de ajustamento é linear entre esses pontos.

Nas figuras seguintes ilustram-se os resultados de ajustamentos (recorrendo a algumas destas funções) aplicadas sobre um contorno de um perfil digitalizado (Fig. 3.2 (a)) pertencente a uma formação marmórea da região de Pardais. É utilizada uma função de interpolação (3.2), (recorrendo aos polinómios cúbicos de Hermite, ilustrada na Fig. 3.2(b)) e uma função de aproximação (curvas de Bézier (3.4), ilustrada na Fig. 3.2 (c)). Os declives da tangente à função de ajustamento (que foi necessário incorporar nas funções), foram determinados com base nos declives médios dos segmentos formados pelos pontos digitalizados nos troços ajustados. Qualquer um dos contornos obtidos apresenta-se mais suavizado, eliminando-se algumas discontinuidades introduzidas pela digitalização.

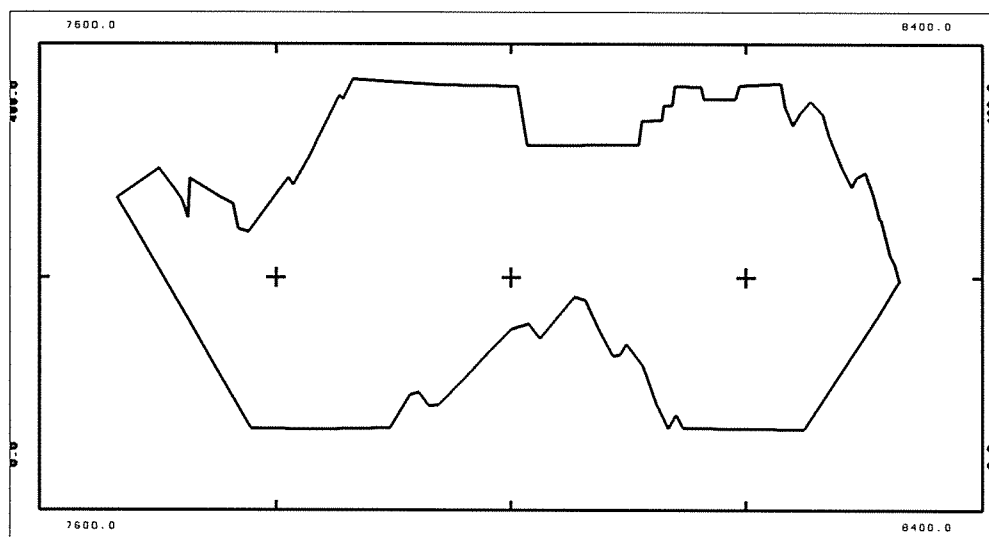


Fig. 3.2(a) - Limite geológico digitalizado.

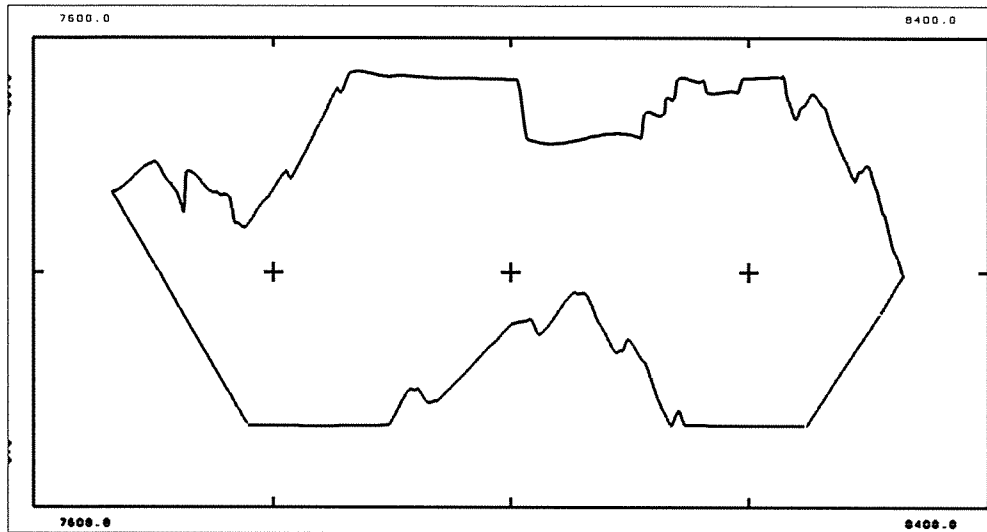


Fig. 3.2 (b) - Interpolação com polinômios cúbicos de Hermite.

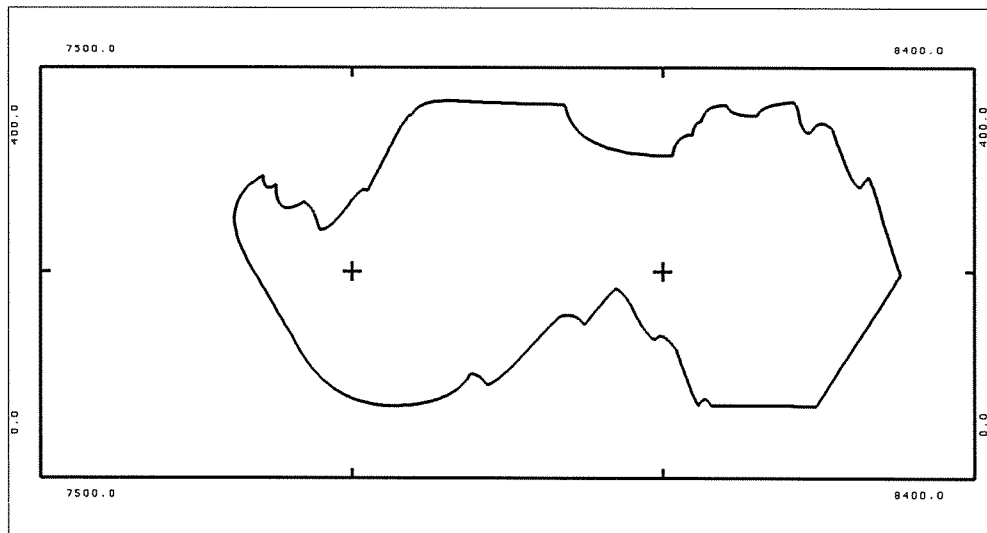


Fig. 3.2 (c) - Ajustamento com curvas de Bézier.

3.1.3 MODELAGEM CONSTRUTIVA 2D

Os modelos construtivos 2D, de uso predominante nos auxiliares de desenho por computador (CAD), baseiam-se na construção de formas complexas a partir de objectos/primitivas simples (polígonos, círculos, etc.). Por exemplo, uma galeria pode ser obtida através da "adição" de um conjunto de rectângulos elementares, segundo o percurso pretendido (Fig. 3.3).

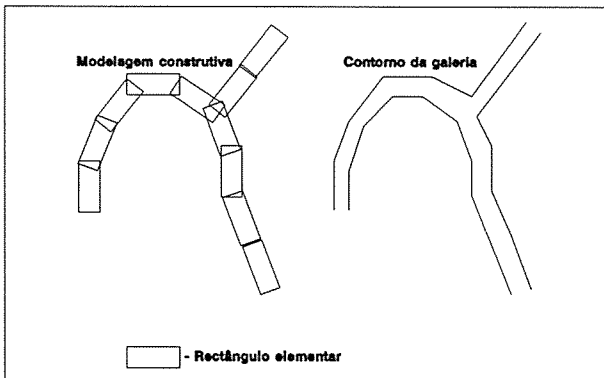


Fig. 3.3 - Exemplo de construção de uma galeria curva a partir de um rectângulo elementar.

A base destes modelos aditivos é a teoria dos conjuntos. Sejam os conjuntos A e B, cada um definido por uma envolvente vectorial. A Fig. 3.4 (diagrama de Venn) ilustra as operações Booleanas (reunião, intersecção e diferença), afectadas aos conjuntos A e B:

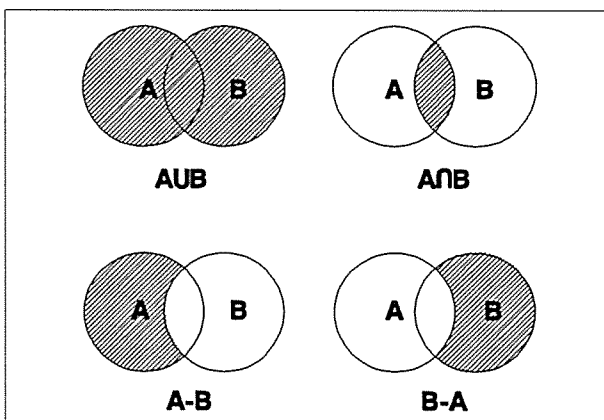


Fig. 3.4 - Diagramas de Venn (reunião, intersecção e diferença).

Estas mesmas operações podem ser aplicadas a contornos vectoriais de formas 2D, as quais se ilustram com o seguinte exemplo: dados os dois polígonos A e B (Fig 3.5 - 1), em que os respectivos vértices se encontram numerados em sentido positivo (cada qual forma um objecto de tipo 2 na base de dados BDMIN). Os polígonos intersectam-se nos vértices I_1 e I_2 dando origem às linhas poligonais 1, 2, 3 e 4 (Fig 3.5 - 2). O conjunto de operações Booleanas pode então ser definido do seguinte modo:

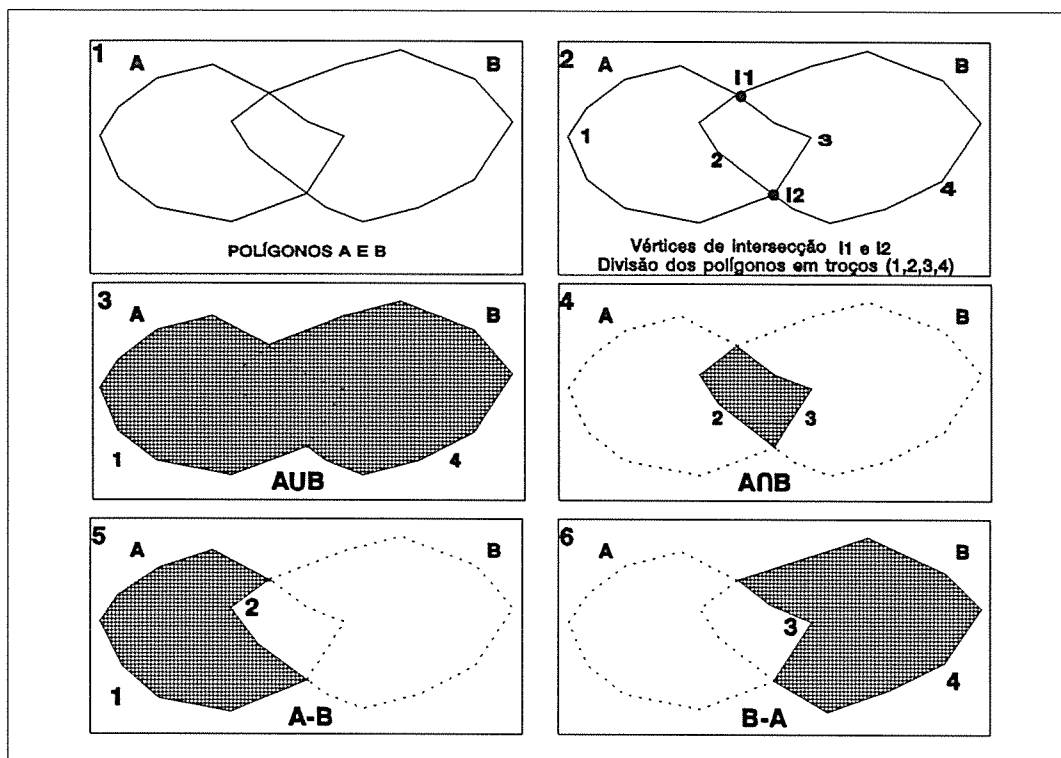


Fig 3.5 - Implementação de operações Booleanas sobre polígonos.

.Reunião - A área resultante é limitada pelos troços de linhas poligonais provenientes do polígono que não está contido no interior do outro (Fig. 3.5 - 3).

.Intersecção - A área resultante é limitada pelos troços de linhas poligonais provenientes do polígono que estão contidos no interior do outro (Fig. 3.5 - 4).

.Diferença (A-B) - A área resultante é limitada pelos troços de linhas poligonais provenientes do polígono A que não estão contidas no interior do polígono B e pelos troços de linhas poligonais provenientes do polígono B que estão contidas no interior do polígono A (Fig. 3.5 - 5).

.Diferença (B-A) - Trata-se de um caso semelhante ao anterior, bastando trocar a ordem dos polígonos (Fig. 3.5 - 6).

No caso de não existirem vértices de intersecção, as mesmas operações são assim caracterizadas:

.Reunião - Se os polígonos forem exteriores um ao outro, a área resultante é limitada pelos dois polígonos em conjunto, ou seja, o objecto resultante terá um número de polígonos

igual à soma dos polígonos de partida; se um dos polígonos se encontrar no interior do outro, o polígono resultante é o que se encontra no exterior.

.Intersecção - Se os polígonos forem exteriores um ao outro, a área resultante é um conjunto vazio de vértices; se um dos polígonos se encontrar no interior do outro, o polígono resultante é o que se encontra no interior.

.Diferença (A-B) - Se os polígonos forem exteriores um ao outro, a área resultante é delimitada pelo polígono A. Se um dos polígonos se encontrar no interior do outro, podem distinguir-se as seguintes situações:

- .O polígono A é interior ao B: a área resultante é o conjunto vazio de vértices;
- .O polígono B é interior ao A: a área resultante é delimitada pelos dois polígonos; no polígono A (exterior) os vértices mantêm a numeração em sentido positivo e no polígono B (interior) os vértices trocam de numeração, passando a estar orientados em sentido negativo, o que define uma "cavidade" em A.

Um exemplo de aplicação destes modelos no planeamento da exploração é o seguinte: a digitalização ou modelagem independente de duas superfícies (correspondentes a dois desmontes contíguos) gera contornos que, na zona de contacto, não são normalmente coincidentes. Para eliminar esta inconsistência de digitalização que eventualmente pode envolver erros posteriores de medidas (perímetros, áreas, etc.) recorre-se à modelagem construtiva 2D: i) efectua-se a digitalização do contorno do desmonte A tendo em conta que, na fronteira com o desmonte B, a digitalização deve passar pelo interior do desmonte B, definindo o contorno e a região X; ii) a partir da região X, gera-se o corpo correspondente ao desmonte A de modo que a intersecção deste com B seja o conjunto vazio e corpo C resultante da reunião de A e B. O algoritmo pode ser ilustrado pelas operações apresentadas na Fig. 3.6.

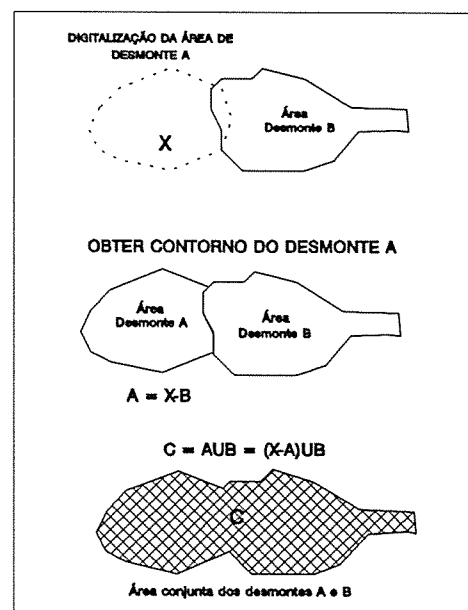


Fig. 3.6 - Exemplo de utilização de modelagem construtiva 2D a dois contornos adjacentes.

3.2 MODELOS VECTORIAIS 3D: INTERVENÇÃO PERICIAL NA CONSTRUÇÃO NOS MODELOS

A utilização exclusiva de modelos bi-dimensionais para a caracterização morfológica dos corpos de natureza geológico-mineira é, normalmente, insuficiente. Pode-se, no entanto, utilizar as facilidades dadas pela implementação deste tipo de modelos em estudos prévios de caracterização morfológica sobre secções ou plantas de corpos 3D. Por exemplo, após o reconhecimento morfológico de uma massa mineral por sondagens, seguem-se as seguintes etapas de modelagem: i) modelagem bi-dimensional dos contornos das secções do corpo geológico definidos pelas sondagens; ii) modelagem tridimensional do corpo, partindo do conhecimento da forma das secções obtida num estudo prévio por digitalização dos contornos dessas secções e validação dos mesmos.

Uma vez que a natureza dos algoritmos utilizados na construção de modelos vectoriais é bastante pobre no que respeita ao controlo dos resultados obtidos, torna-se necessário intervir nas fases intermédias da aplicação sucessiva destes algoritmos, de modo a possibilitar a inclusão de conhecimento pericial da região em estudo sem a qual o modelo obtido dificilmente será coerente - **intervenção heurística**. Em particular, a sua aplicação é possível na modelagem de massas minerais subterrâneas, por exemplo, reconhecidas através de troços de sondagem (Fig. 3.7) ou a partir do levantamento geológico dos contornos de alguns perfis, efectuado por um perito na geologia da região.

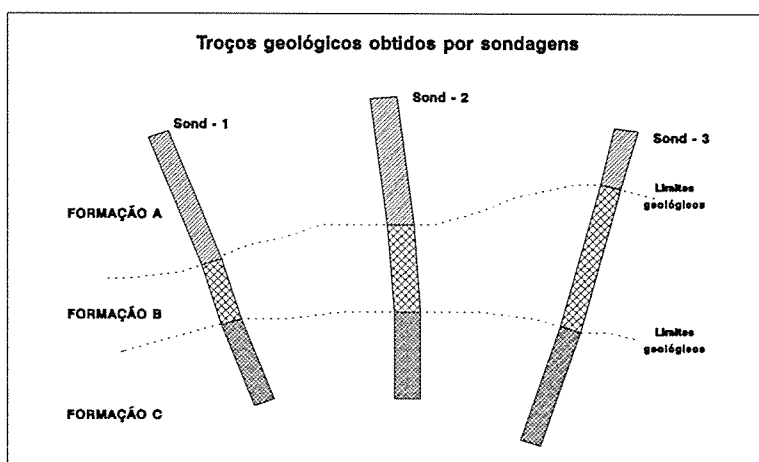


Fig. 3.7 - Reconhecimento geológico por sondagens.

Concretamente, perante um reconhecimento por sondagens, é necessário (para posteriores etapas de modelagem) efectuar o desenho dos contornos das envolventes das diferentes mineralizações atravessadas. Este procedimento deve ser feito, se possível, recorrendo ao conhecimento geológico da região e integrar informação pericial que não resulta directamente dos dados das sondagens. Neste processo pode, por exemplo, ser integrado o conhecimento geológico da superfície, a orientação média das camadas ou das falhas, etc. (Fig. 3.8).

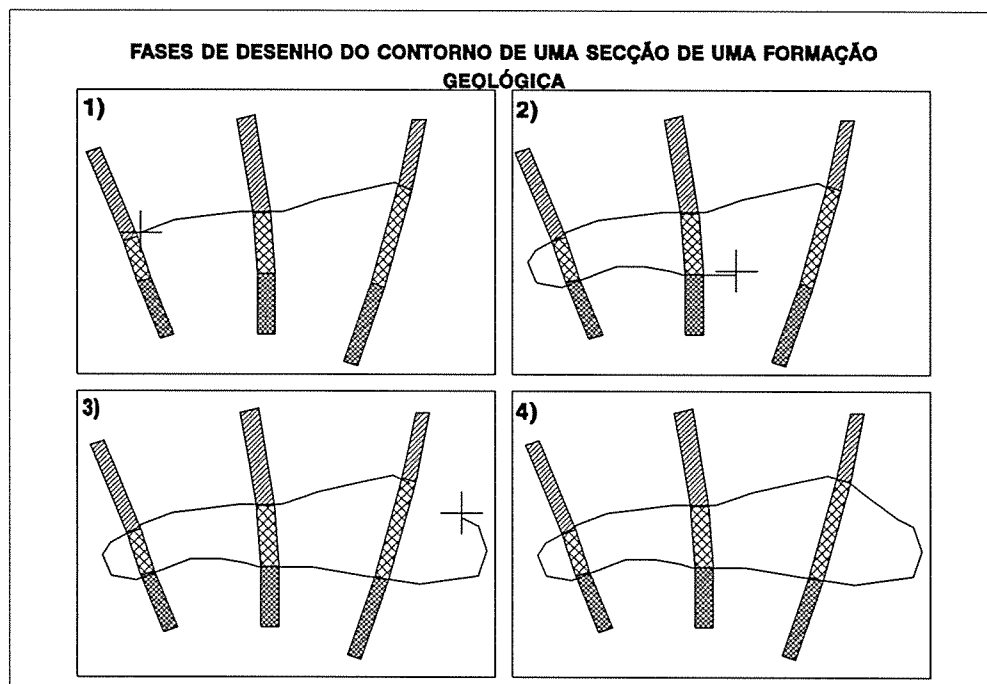


Fig. 3.8 - Desenho do contorno de formações geológicas num perfil a partir do reconhecimento por sondagens.

Uma vez desenhados/digitalizados os contornos das diferentes formações geológicas atravessadas, o modelo 3D resume-se a criar um modelo tridimensional de linhas ou de arame da formação geológica total ou individualizada em cada uma das fases constituintes. Para tal, recorre-se a métodos de modelagem 3D, partindo de alguns contornos conhecidos (Soares, 1989, P. Dowd, 1984, Plastock e Kalley, 1991). Este processo é sempre efectuado por fases (entre duas secções conhecidas), podendo ser realizado de um modo interactivo e incorporando na sua construção, sempre que necessário, informação geológica. Para a implementação desta metodologia num "software" é imprescindível que os programas desenvolvidos contenham uma forte componente gráfica e interactiva, de modo a permitir uma visualização imediata dos resultados e a repetição do processo (tantas vezes quantas as necessárias), até à obtenção de um modelo coerente e estruturalmente coerente.

3.2.1 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO 3D PARTINDO DE SECÇÕES PARALELAS CONHECIDAS

Conhecidos os contornos de secções paralelas de uma formação geológica, a modelagem 3D resume-se à interpolação da envolvente entre pares de secções consecutivas, através de um modelo de arame.

A caracterização da forma de um modelo conhecido inicialmente em N secções, consiste na modelagem de $(N-1)$ conjuntos de duas secções (objecto de tipo 4 da base de dados BDMIN). Um modelo mais complexo é formado por um conjunto sucessivo destes objectos de tipo 4, formando um objecto de tipo 5.

De acordo com a topologia de objectos definidos na forma vectorial da base de dados BDMIN, um modelo formado por duas ou mais secções diferentes com o mesmo número de vértices forma um objecto de tipo 4, cuja envolvente é caracterizada pelas faces delimitadas pelo contorno da primeira e última secção e pelas faces delimitadas por estas secções e o conjunto de segmentos de ligação. Por esta razão, antes de se poder inferir a evolução da forma entre duas secções conhecidas, interessa pelas razões topológicas impostas aos modelos de tipo 4, que estas tenham o mesmo número de vértices, de modo a que seja possível efectuar as ligações entre vértices com o mesmo índice, assegurando simultaneamente a participação de todos os vértices nas ligações. Este processo consiste na segmentação secundária de cada um dos contornos (Fig. 3.9), seguindo as etapas:

. Considere-se os dois contornos da Fig. 3.9 - 1, em que n_1 e n_2 representam o número de pontos iniciais de \overline{AB} e \overline{CD} . Recorrendo às expressões:

$$d_{(P_{\overline{AB},1}, P_{\overline{AB},i})}^* = d_{(P_{\overline{CD},1}, P_{\overline{CD},i})} \cdot \frac{d_{(P_{\overline{AB},1}, P_{\overline{AB},n_1})}}{d_{(P_{\overline{CD},1}, P_{\overline{CD},n_2})}} \quad (3.6)$$

$i=1, \dots, n_2$

$$d_{(P_{\overline{CD},1}, P_{\overline{CD},i})}^* = d_{(P_{\overline{AB},1}, P_{\overline{AB},i})} \cdot \frac{d_{(P_{\overline{CD},1}, P_{\overline{CD},n_2})}}{d_{(P_{\overline{AB},1}, P_{\overline{AB},n_1})}} \quad (3.7)$$

$i=1, \dots, n_1$

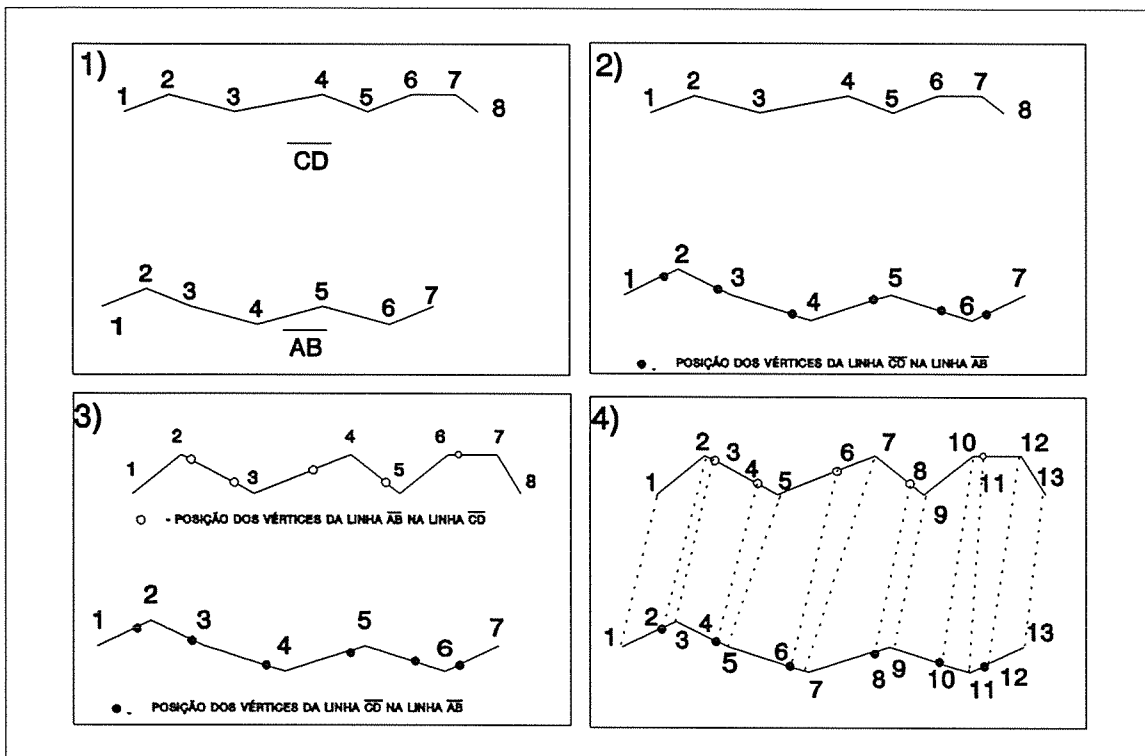


Fig 3.9 - Colocação de dois contornos com o mesmo número de vértices.

em que:

$d(P_{AB,i}, P_{AB,j})$ - Soma do comprimento dos segmentos na linha \overline{AB} entre os pontos i e j

$d(P_{CD,i}, P_{CD,j})$ - Soma do comprimento dos segmentos na linha \overline{CD} entre os pontos i e j

pode obter-se a posição equivalente de cada vértice (depois de calculado d^* - distância equivalente) da linha \overline{CD} na linha \overline{AB} e vice-versa (Fig. 3.9 - 2 e 3);

.As duas linhas, passam a ter o mesmo número de vértices ($n_1 + n_2 - 2$), mantendo a forma do respectivo contorno;

.Efectuando ligações entre os vértices homólogos das duas linhas, obtém-se um modelo completo (Fig. 3.9 - 4), que fica definido por:

.Equações dos dois contornos \overline{AB} e \overline{CD} ;

.Equações dos segmentos de recta de ligação entre os contornos $\overline{1_{AB} 1_{CD}}$, $\overline{2_{AB} 2_{CD}}$.

Entre dois perfis geológicos, representados por dois planos de um corpo mineralizado, a divisão de cada um deles em "porções" equivalentes é realizada com base nas evidências geológicas comuns a ambos (falhas, dobramentos, etc.). A identificação destes troços permite aumentar a coerência do modelo 3D por controlo das ligações entre formações homogéneas.

Seguindo o exemplo ilustrado na Fig. 3.10, cada contorno é dividido em quatro troços homólogos. Assim, o processo de interpolação linear descrito irá ser aplicado individualmente sobre cada troço, reunindo-se depois as linhas interpoladas, as quais em conjunto garantem o mesmo número de vértices para as duas secções, formando um objecto classificado como sendo de tipo 4.

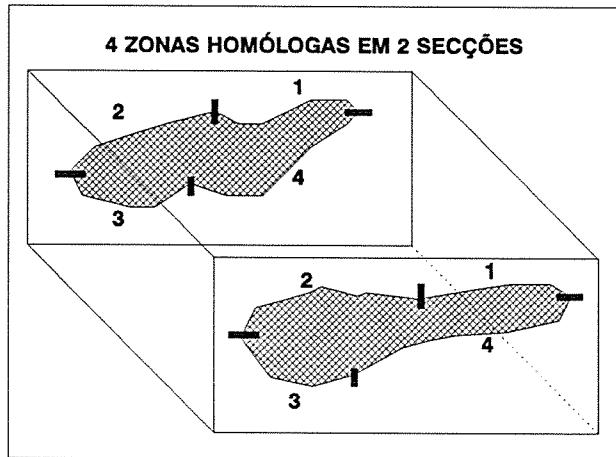


Fig. 3.10 - Identificação de zonas homólogas em duas secções.

O modelo descrito tem por base a ligação linear entre cada par de vértices homólogos entre os dois perfis. Um modelo mais geral, não necessariamente linear, da geometria de transição entre dois perfis é constituído pelas denominadas "*lofted surfaces*" ou superfícies de ligação (Plastock e Kalley, 1991).

Dada duas linhas poligonais $P_1(s)$ e $P_2(s)$, a superfície intermédia é descrita, parametricamente, por:

$$Q(s,t) = (1 - t) \cdot P_1(s) + t \cdot P_2(s) \quad \text{com } t \in [0,1] \quad (3.8)$$

Nesta expressão, se $t=0$, então $Q(s,t)=P_1(s)$ e se $t=1$ então $q(s,t)=P_2(s)$.

Utilizando esta expressão, e conhecidos os contornos $P_1(s)$ e $P_2(s)$ sob a forma vectorial (discretizados em n vértices cada), é possível obter os contornos intermédios, de uma forma linear e com o mesmo número de vértices.

Veja-se o exemplo ilustrado na Fig. 3.11 e os segmentos de recta \overline{TZ} dos contornos \overline{AB} e \overline{CD} :

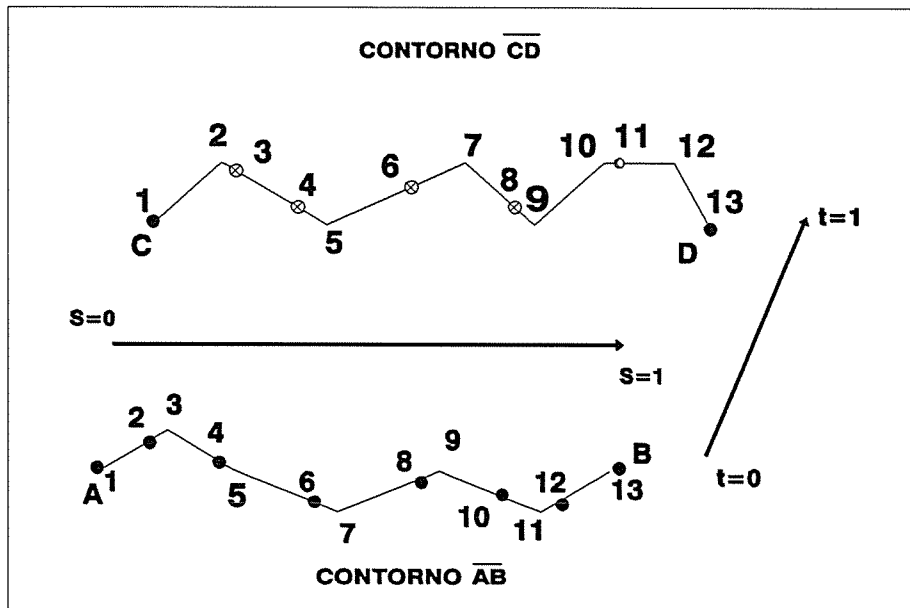


Fig. 3.11 - Inferência de contornos intermédios entre $P_1(s)$ e $P_2(s)$.

$$\overline{(1,2)}_{AB} \quad P_1(s) = Q(s,0) = a.s + b$$

$$\overline{(1,2)}_{CD} \quad P_2(s) = Q(s,1) = c.s + d$$

Os segmentos de recta $\overline{(1,2)}$ situados entre \overline{AB} e \overline{CD} terão as equações (recorrendo à equação 3.8):

$$t=0.5 \quad Q(s,0.5) = \left(\frac{a+c}{2}\right) \cdot s + \frac{b+d}{2}$$

$$t=0.8 \quad Q(s,0.8) = 0.2 \cdot (a+c) \cdot s + 0.8 \cdot (b+d)$$

.....

Se não se pretender que a transição entre $P_1(s)$ e $P_2(s)$ seja linear, o parâmetro t torna-se função não linear da distância que separa $P_1(s)$ e $P_2(s)$, o que permite modelar situações em que um contorno se "propague" mais do que outro. As discontinuidades presentes entre duas secções podem ser também modeladas recorrendo a uma ponderação não linear apropriada.

Nas Fig. 3.12 (c), (d) e (e) ilustram-se diferentes modos de transição entre as duas secções conhecidas de um corpo 3D (Fig. 3.12 (a) e (b)), recorrendo às seguintes ponderações linear e não lineares:

$$i) t = \frac{d}{d_{total}} \quad (3.9)$$

$$ii) t = \left(\frac{d}{d_{total}}\right)^2 \quad (3.10)$$

$$iii) t = \sqrt{\frac{d}{d_{total}}} \quad (3.11)$$

em que d_{total} é a distância que separa as duas secções conhecidas e d é a distância entre uma secção conhecida e uma secção a inferir.

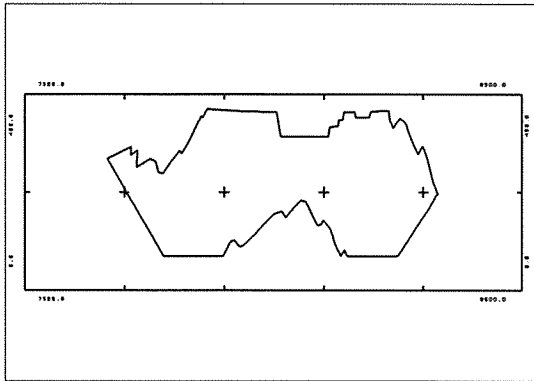


Fig. 3.12(a) - Secção conhecida de um corpo 3D.

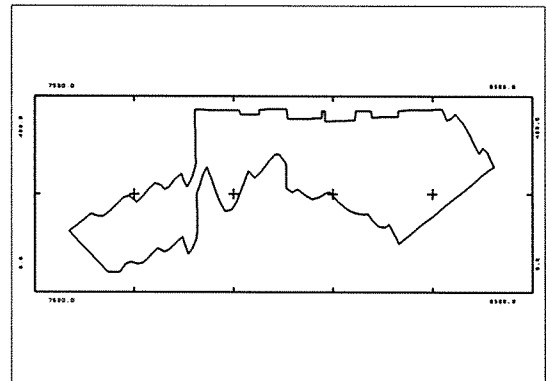


Fig. 3.12 (b) - Secção conhecida de um corpo 3D.

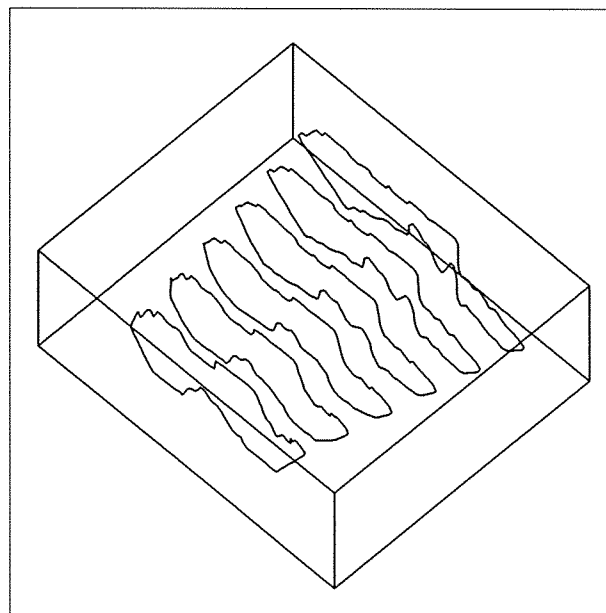


Fig. 3.12 (c) - Modelagem 3D de um corpo recorrendo a uma ponderação linear para o parâmetro t (equação 3.9).

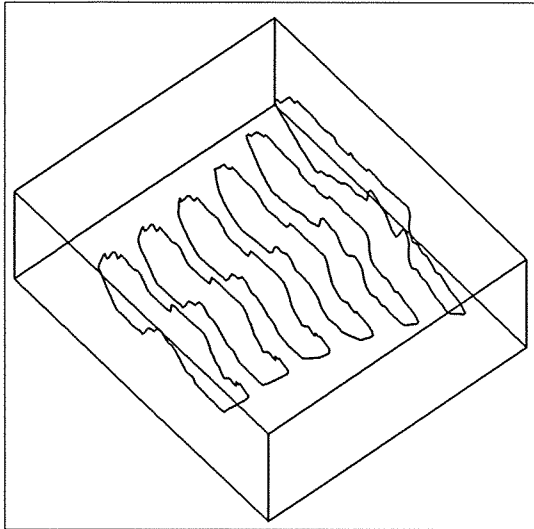


Fig. 3.12 (d) - Modelagem de um corpo 3D recorrendo a uma ponderação não linear para t (equação 3.10).

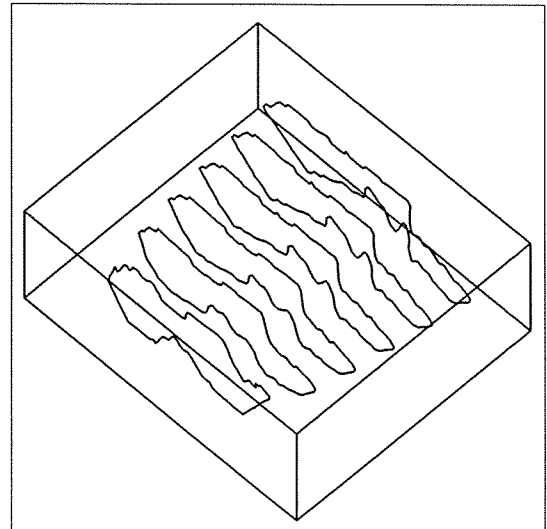


Fig. 3.12 (e) - Modelagem de um corpo 3D recorrendo a uma ponderação não linear para t (equação 3.11).

Na modelagem do corpo 3D ilustrado na Fig. 3.12 (d), a secção inicial tem uma maior preponderância, enquanto que no corpo ilustrado na Fig. 3.12 (e), é a secção final que se "propaga" de um modo mais acentuado.

Esta metodologia apresenta no entanto algumas limitações: i) está condicionada a que cada secção seja formada apenas por uma poligonal conexa, isto é, que o corpo não se divida; ii) não permite a utilização de informação proveniente de uma secção perpendicular às duas ou conjunto de secções paralelas conhecidas. Estes casos, bastante frequentes nos corpos mineralizados, podem ser tratados recorrendo à metodologia mais geral de modelagem de superfícies partindo de quatro curvas de fronteira - superfícies de "Coons".

3.2.2 CONSTRUÇÃO DE UM MODELO 3D PARTINDO DE VÁRIAS SECÇÕES CONHECIDAS, ALGUMAS NÃO PARALELAS

No caso mais complexo de ser conhecido um ou mais contornos não paralelos às secções principais do modelo (dois ou mais), a técnica de modelagem vectorial pode recorrer à utilização das chamadas superfícies de "Coons", (Plastock e Kalley, 1991). Dadas as quatro curvas de fronteira, designadas de forma vectorial ou paramétrica por $P(s,0)$, $P(s,1)$, $P(0,t)$, $P(1,t)$ com $0 \leq s,t \leq 1$ (Fig. 3.13), superfície interpoladora $Q(s,t)$ é definida, parametricamente, por:

$$Q(s,t) = P(s,0) \cdot (1-t) + P(s,1) \cdot t + P(0,t) \cdot (1-s) + P(1,t) \cdot s - P(0,0) \cdot (1-s) \cdot (1-t) - P(0,1) \cdot (1-s) \cdot t - P(1,0) \cdot s \cdot (1-t) - P(1,1) \cdot s \cdot t \quad (3.12)$$

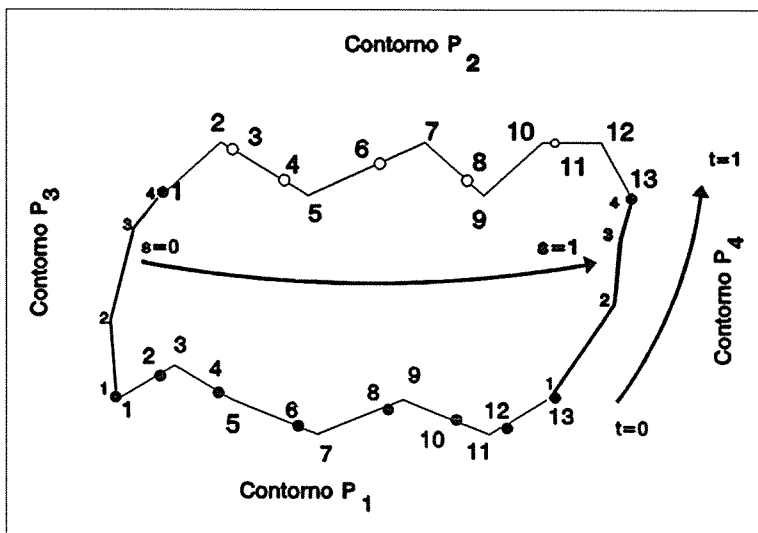


Fig. 3.13 - Interpolação de uma superfície partindo de quatro curvas de fronteira.

Na equação (3.12), $P(0,0)$ e $P(0,1)$ representam respectivamente o primeiro e último vértice do contorno P_1 , e $P(1,0)$ e $P(1,1)$ o primeiro e último vértice do contorno P_2 .

De referir, tal como no método anterior, que os parâmetros de posição na superfície interpoladora s e t podem não ser uma função linear da distância a cada uma das quatro linhas de fronteira (ocorrência de contornos preponderantes), podendo-se incluir, nesta fase, informação de carácter pericial ao variar s e t de acordo com essa informação.

Utilizando este algoritmo é possível, por um lado, construir modelos, integrando uma ou mais secções não paralelas às secções principais e, por outro, tratar casos de duas secções consecutivas em que o número de polígonos em cada secção é variável (por exemplo, um corpo que se divide em duas ou mais partes).

Vejam-se agora, dois exemplos de aplicação da metodologia descrita, referentes a situações comuns encontradas na modelagem de corpos geológicos:

a) Considere-se o exemplo ilustrado na Fig. 3.14, onde se conhecem duas secções principais e uma secção perpendicular; é o caso típico de um corpo mineralizado em que se conhecem vários perfis transversais paralelos e um perfil longitudinal. Determinados os pontos de intersecção entre os diversos contornos (em número de quatro), estes permitem dividir cada um deles em duas partes. A modelagem é feita individualmente para cada uma das partes, sendo o processo de inferência do contorno de uma superfície, feito com base nos quatro contornos envolventes. O modelo final é obtido por união dos dois modelos parciais.

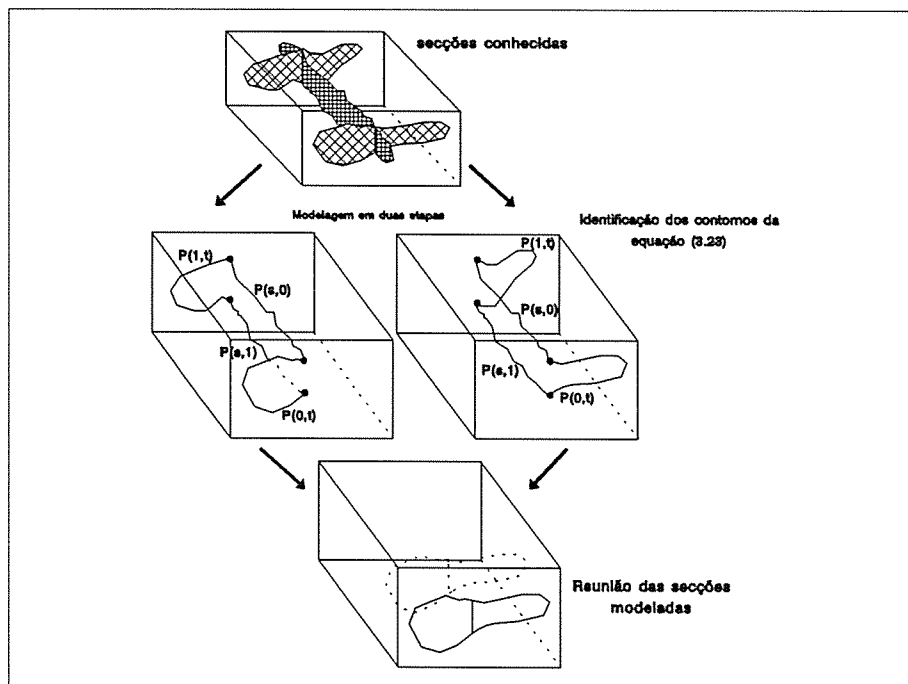


Fig. 3.14 - Modelagem de um corpo, em que se conhecem duas secções paralelas e uma perpendicular.

b) Numa outra situação pretende-se modelar um corpo que se torna desconexo (divide-se em dois), entre duas secções conhecidas, e do qual se detêm os contornos adicionais assinalados na Fig. 3.15: uma secção perpendicular e uma planta do contorno. No caso destas não estarem disponíveis, admite-se que o processo de divisão do corpo se inicia sobre a secção conexa conhecida.

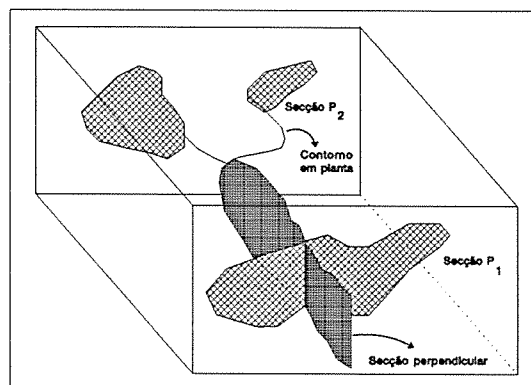


Fig. 3.15 - Contornos, cujo conhecimento é necessário para a modelagem de um corpo que a dada altura se torna desconexo.

A sequência de modelagem, ilustrada na Fig. 3.16, é idêntica à apresentada na Fig. 3.14; após a modelagem de cada uma das partes individualmente, efectua-se a união dos modelos parciais obtidos.

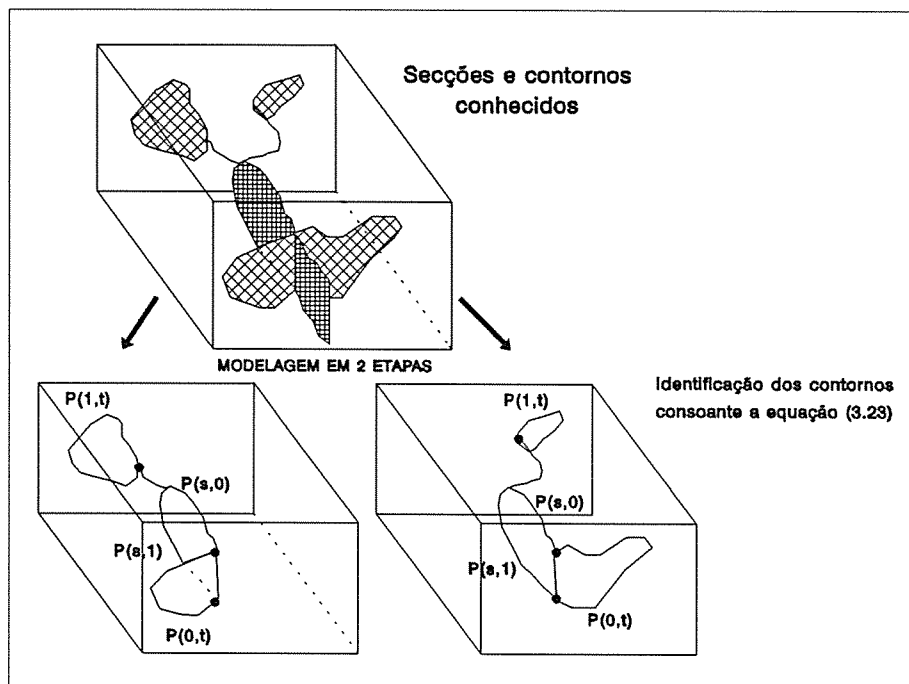


Fig. 3.16 - Etapas de modelagem de um corpo não conexo.

Desde que os contornos $P(0,t)$ e $P(1,t)$ tenham o mesmo número de vértices, o modelo final de secções, é constituído por polígonos que contêm o mesmo número de vértices, podendo o modelo obtido deste modo ser integrado na base de dados - BDMIN, classificado como um objecto de tipo 4.

3.3 INTERSECÇÃO DOS MODELOS 3D POR PLANOS

As secções de modelos 3D intersectados por um plano (ou uma família de planos) permitem por um lado, uma visualização mais detalhada do interior dos mesmos, constituindo um auxiliar de validação dos modelos obtidos, geralmente complexos, e por outro, a implementação de algoritmos sobre modelos 3D que se baseiam na decomposição do modelo num conjunto discreto de secções - 2D, sobre as quais se efectuam a maior parte dos cálculos. Por exemplo, a determinação do volume de um modelo 3D é normalmente realizada à custa de um somatório ponderado das áreas do conjunto de secções do modelo.

Os algoritmos de determinação de secções dos modelos definidos em modo vectorial, estão estritamente associados ao modo de representação topológica dos modelos 3D definidos na base de dados BDMIN. Assim, dependendo do tipo de corpo 3D são propostos os seguintes algoritmos para partição dos modelos em secções:

.Determinação de uma secção 2D de um modelo de tipo 3:

A determinação da secção resultante da intersecção de um plano com o corpo definido por um modelo de tipo 3 pode ser ilustrado com a seguinte sequência algorítmica (Fig. 3.17):

- 1 - Considere-se um plano definido pela distância à origem dos eixos coordenados e pela direcção do versor da sua normal;
- 2 - Determinação dos vértices de intersecção de cada uma das poligonais que caracterizam o modelo com o plano escolhido, e armazenamento desses vértices, cujo número é par. Pares consecutivos de vértices definem segmentos de recta interiores a estas poligonais (Fig. 3.17 -b);
- 3 - A partir de um vértice de intersecção numa das poligonais das extremidades procurar o restante conjunto de vértices até se atingir novamente o vértice inicial, formando a envolvente fechada. Para um dado vértice, e na pesquisa do vértice seguinte, há que distinguir duas situações particulares: o vértice encontra-se num polígono ou numa ligação entre dois polígonos. O algoritmo de determinação dos vértices terá que, consoante os dois casos procurar o próximo vértice de intersecção de acordo com o que se ilustra na Fig. 3.17 - (c) e (d).

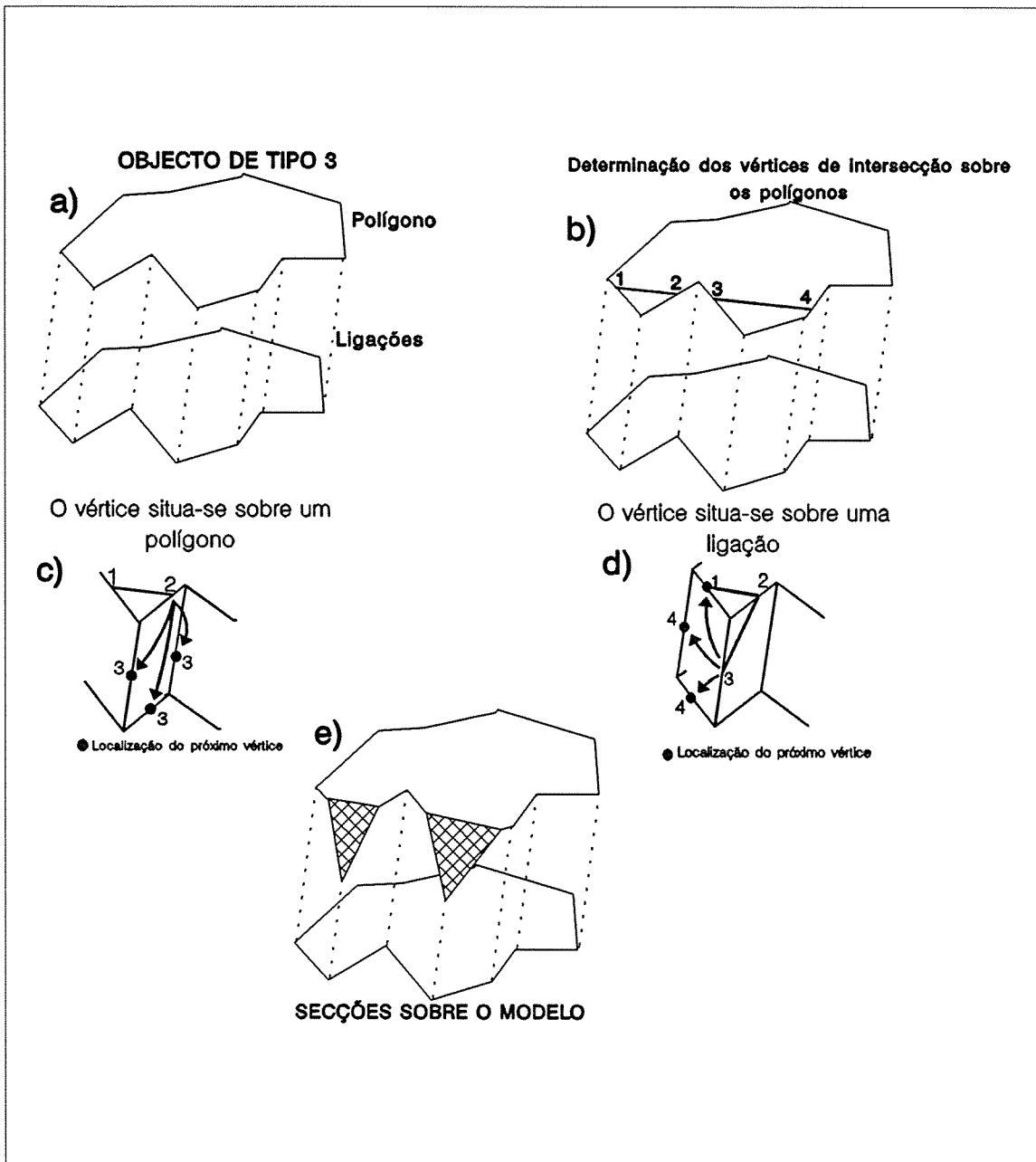


Fig. 3.17 - Etapas de determinação do contorno de uma secção num objecto de tipo 3.

Quando se atingir o ponto de partida (fecho da secção), marcar todos os vértices obtidos no passo 2) e que foram utilizados. Verificar se todos os vértices determinados no passo 2) já foram percorridos. Caso contrário, a secção permite a obtenção de mais de uma poligonal, que poderá ser obtida repetindo o passo 3) e partindo de um vértice obtido em 2) ainda não utilizado (Fig. 3.17 - e).

.Determinação de uma secção 2D de um modelo de tipo 4:

Para este tipo de modelo e na determinação das suas secções pode ser aplicado o mesmo algoritmo descrito no ponto anterior, uma vez que ele possui as mesmas características topológicas (ligações entre vértices com o mesmo índice nas poligonais) do objecto de tipo 3.

.Determinação de uma secção 2D de um modelo de tipo 5:

A determinação da secção resultante da intersecção de um plano com o corpo definido por um modelo de tipo 5 pode ser ilustrado com a seguinte sequência algorítmica:

- 1 - Decomposição nos vários objectos de tipo 4;
- 2 - Determinação da secção em cada objecto de tipo 4, utilizando o algoritmo descrito no ponto anterior;
- 3 - Efectuar a reunião dos contornos determinados, obtendo-se o contorno da secção do objecto de tipo 5.

.Determinação de uma secção 2D de um modelo de tipo 6:

O determinação da secção resultante da intersecção de um plano com o corpo definido por um modelo de tipo 6, pode ser ilustrado com a seguinte sequência algorítmica:

- 1 - Para todas as faces: determinação dos vértices de intersecção da poligonal que as delimita com o plano considerado. O número total de vértices obtido é sempre par, e define dois a dois, segmentos de recta interiores às faces;
- 2 - Ligação dos segmentos de recta obtidos, formando o contorno da secção.

3.4 ESTIMAÇÃO DE MEDIDAS SOBRE MODELOS

Uma vez construídos e validados, sobre os modelos morfológicos dos corpos mineralizados e tecnológicos, podem estimar-se grandezas que são fundamentais para o planeamento mineiro, nomeadamente:

- .Tonelagens de minério contido no total ou em partes do corpo mineralizado;
- .Quantidades de metal;
- .Volumes de material a explorar;
- .Volumes de material a explorar nos acessos, galerias, poços, etc.;
- .Distâncias do desmonte à chaminé de descarga, da galeria à rampa de acesso, etc..

Neste capítulo pretende-se abordar um conjunto de algoritmos para a estimação daquelas quantidades.

3.4.1 ESTIMAÇÃO DE MEDIDAS SOBRE MODELOS 2D

.Perímetro e área

O perímetro de uma linha poligonal é dado pela soma dos comprimentos dos segmentos de recta que a constituem.

A área total da região delimitada por uma linha poligonal fechada (objecto de tipo 2), constituído pelos n vértices $P(x_1, y_1)$, $P(x_2, y_2)$, ... $P(x_n, y_n)$, é dada pela seguinte expressão (quer seja côncava ou convexa):

$$ÁREA\ TOTAL = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})(y_i + y_{i+1})$$

.Posição de um vértice relativamente a uma linha poligonal fechada

A determinação, se um ponto de coordenadas (x, y) se localiza no interior ou não de uma região delimitada por um polígono, pode ser realizada recorrendo a alguns algoritmos, dos quais se destacam os seguintes:

a) O seguinte algoritmo (Hall, 1975) baseia-se na determinação da soma dos ângulos que o ponto de coordenadas (x,y) faz com todos os vértices da poligonal, considerados dois a dois (Fig. 3.18). O somatório dos ângulos (positivos ou negativos consoante a direcção de rotação) para todos os vértices considerados permite determinar a posição do mesmo relativamente à poligonal. Se este for igual a $\pm 360^\circ$, o ponto localiza-se no interior; se for igual a $\pm 180^\circ$, o ponto está sobre a fronteira; se for igual a 0° , então encontra-se no exterior.

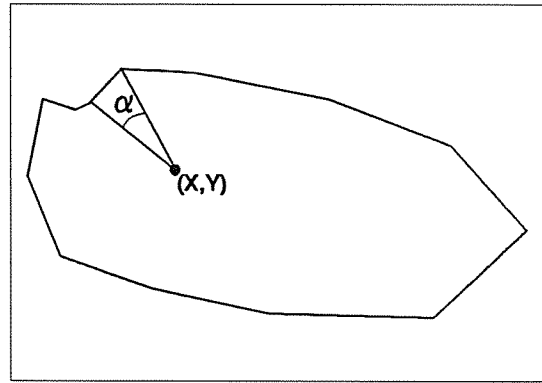


Fig. 3.18 - Determinação da posição de um vértice relativamente a uma poligonal.

Este algoritmo tem o inconveniente de ser bastante lento no caso de haver um elevado número de pontos a testar ou se o número de vértices do polígono for elevado. Nestes casos, e quando se pretende determinar a posição relativa de um conjunto de vértices dispostos numa malha, deve ser substituído por b).

b) Como exemplo de aplicação nobre deste algoritmo, salienta-se a classificação em interiores ou exteriores de um conjunto de pontos de uma malha relativamente a uma poligonal, o que constitui a base da transformação de uma forma representada em modo vectorial para a forma "raster", utilizando como critério a localização do centro da célula em que foi feita a partição do espaço;

O algoritmo que se apresenta seguidamente é, particularmente, eficiente quando se pretende testar um elevado número de vértices alinhados¹ e envolve as seguintes etapas:

1º. Determinação da equação da recta que passa por cada um dos alinhamentos de pontos que constituem a malha regular;

2º. Determinação dos vértices de intersecção dessa recta com a poligonal (este número é obrigatoriamente par), e simultaneamente dos segmentos de recta totalmente interiores à poligonal;

3º. Considerando estes segmentos pelos seus pontos inicial e final, determinação dos vértices interiores à poligonal, ou seja, dos que estejam contidos no segmento de recta e se encontram entre os pontos inicial e final.

¹ Utilizado na função "paint" da computação gráfica.

.Centro de gravidade

A posição do centro de gravidade de um corpo 3D é dada por:

$$M.(G-O) = \int_M (P-O) dm \quad (3.13)$$

em que :

$G(g_x, g_y, g_z)$ - Coordenadas do centro de gravidade

$O(o_x, o_y, o_z)$ - Origem do referencial

M - Massa do corpo

P - Conjunto de pontos em M

No caso de corpos que apresentem uma distribuição homogénea da massa, a expressão (3.13) simplifica-se, e então, as coordenadas do centro de gravidade são dadas por:

$$G = \frac{\int_V P dV}{\int_V dV} = \begin{cases} g_x = \frac{\int_V x dV}{\int_V dV} \\ g_y = \frac{\int_V y dV}{\int_V dV} \\ g_z = \frac{\int_V z dV}{\int_V dV} \end{cases}$$

A determinação das coordenadas do centro de gravidade da região delimitada por um polígono qualquer pode ser realizada recorrendo a vários algoritmos, dos quais se destacam dois: o primeiro, por decomposição prévia num conjunto de polígonos regulares (por exemplo triângulos), e o segundo, por determinação do ponto de intersecção de duas rectas com orientações distintas que dividem a região (cujo centro de gravidade se pretende determinar) em duas com a mesma área, situadas respectivamente, à esquerda e à direita das rectas.

i) O seguinte algoritmo tem por base a decomposição prévia do polígono, cujo centro de gravidade se pretende calcular, num conjunto de figuras regulares onde a determinação do individual do centro de gravidade seja simples. O triângulo constitui uma figura geométrica que permite, com grande facilidade, a determinação do seu centro de gravidade, que corresponde à intersecção das rectas que ligam o centro de cada uma das arestas com o vértice oposto (Fig. 3.19).

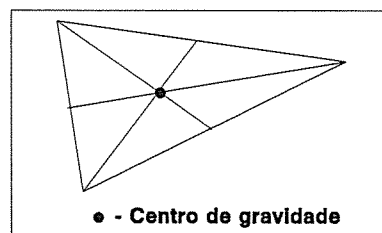


Fig. 3.19 - Posição do centro de gravidade de um triângulo.

O algoritmo segue, em traços gerais, a seguinte sequência de operações (ilustrado para um polígono que se encontra representado no plano XoY), supondo homogeneidade de massa:

.Decomposição do polígono P, cujo centro de gravidade se pretende determinar, num conjunto de n triângulos;

.Determinação das coordenadas do centro de gravidade de cada um dos n triângulos (g_{x_i}, g_{y_i});

.Determinação do centro de gravidade do polígono P, por ponderação das coordenadas calculadas pela área respectiva de cada triângulo:

$$\begin{cases} g_{xP} = \frac{\sum_{i=1}^n (g_{x_i} \cdot A_i)}{A_P} \\ g_{yP} = \frac{\sum_{i=1}^n (g_{y_i} \cdot A_i)}{A_P} \end{cases}$$

em que:

A_i - Área do triângulo i

A_P - Área do polígono P

(g_{x_i}, g_{y_i}) - Coordenadas do centro de gravidade do triângulo i

(g_{xP}, g_{yP}) - Coordenadas do centro de gravidade do polígono P

A decomposição de um polígono qualquer em triângulos pode ser feita recorrendo ao seguinte algoritmo, ilustrado na Fig. 3.20:

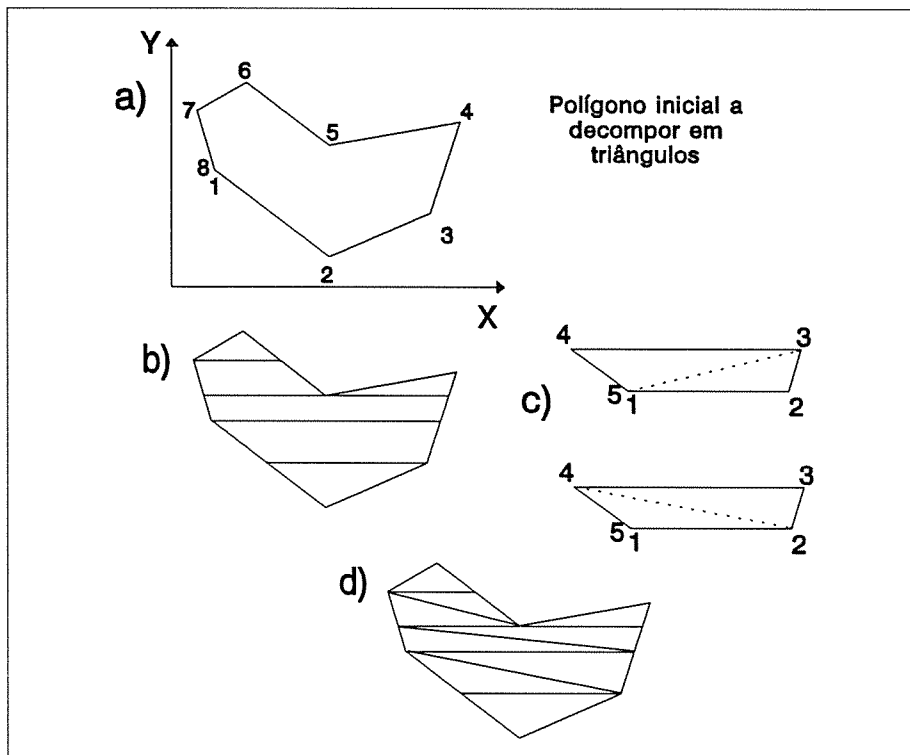


Fig. 3.20 - Decomposição de um polígono em triângulos.

.Divisão do polígono em fatias, obtidas por intersecção da figura com rectas horizontais que passam por cada um dos vértices, excepto o vértice de menor e maior coordenada Y (Fig. 3.20 - b). Os polígonos que formam as fatias possuem quatro (triângulos) ou cinco vértices (paralelogramos);

.Triangulação dos paralelogramos por divisão, através de qualquer uma das diagonais (segmentos de recta ligando vértices opostos). Existem duas possibilidades, ambas coerentes para o resultado que se pretende atingir, Fig. 3.20 - (c). Na figura 3.20 - (d), ilustra-se o resultado final da aplicação deste algoritmo sobre um polígono.

ii) Passa-se a descrever um outro algoritmo que permite a determinação do centro de gravidade de um polígono e que não necessita de uma divisão prévia em triângulos, encontrando-se ilustrado na figura Fig. 3.21:

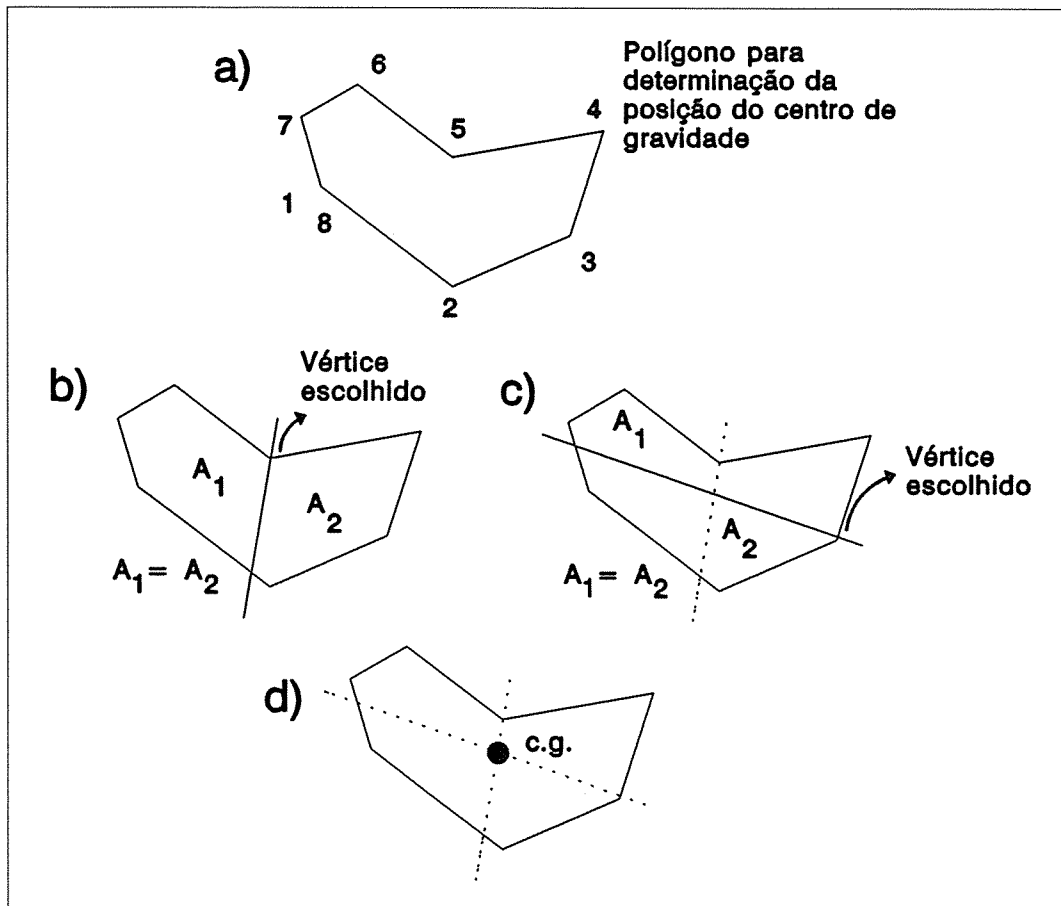


Fig. 3.21 - Determinação das coordenadas do centro de gravidade de um polígono.

a) Escolhe-se um vértice do polígono e considera-se a família de rectas que passa por esse vértice (Fig. 3.21 - (a) e (b));

b) Dessa família de rectas, determina-se a recta que permite dividir a área delimitada pelo polígono em duas iguais situadas, respectivamente, à esquerda e à direita dessa recta (Fig. 3.21 - (b));

c) Repetem-se os procedimentos a) e b) para um outro vértice do polígono (Fig. 3.21 - (c));

d) O ponto de intersecção das duas rectas obtidas nos passos anteriores é o centro de gravidade da região delimitada pelo polígono (Fig. 3.21 - (d)).

3.4.2 ESTIMAÇÃO DE MEDIDAS SOBRE MODELOS 3D

.Triangulação dos modelos vectoriais 3D

A triangulação de objectos de tipo 3, 4 ou 5 permite transformá-los em objectos de tipo 6 (definidos pelo conjunto de todos os polígonos correspondentes a todas as faces), cuja topologia apresenta vantagens na aplicação de determinados algoritmos, (rapidez e não enviesamento) nomeadamente, cálculo da área superficial e volume. A visualização destes modelos em "workstations" utilizando algoritmos para visualização ("shading") já existentes como primitivas em linguagens gráficas de programação (por exemplo X-Windows e GKS-3D), permite constituir um precioso auxiliar de validação visual destes mesmos modelos.

O conjunto de triângulos entre as linhas poligonais \overline{AB} e \overline{CD} , constituídas cada uma por n vértices, (pertencentes a um objecto de tipo 3, 4 ou 5) pode ser obtido pela seguinte sequência de vértices, ilustrada na Fig. 3.22; existem duas possibilidades para a triangulação (Fig. 3.22 (b) e (c)), ambas válidas e que deverão ser escolhidas caso a caso. Uma das possibilidades (Fig. 3.22 (b)), é dada por:

$$\overline{1AB^2AB^1CD^1AB}, \overline{2AB^3AB^2CD^2AB} \dots \overline{iAB^{i+1}AB^iCD^iAB} \quad (i=1, \dots, n-1)$$

$$\overline{2CD^1CD^2AB^2CD}, \overline{3CD^2CD^3AB^3CD} \dots \overline{(i+1)CD^iCD^{i+1}AB^{i+1}CD} \quad (i=1, \dots, n-1)$$

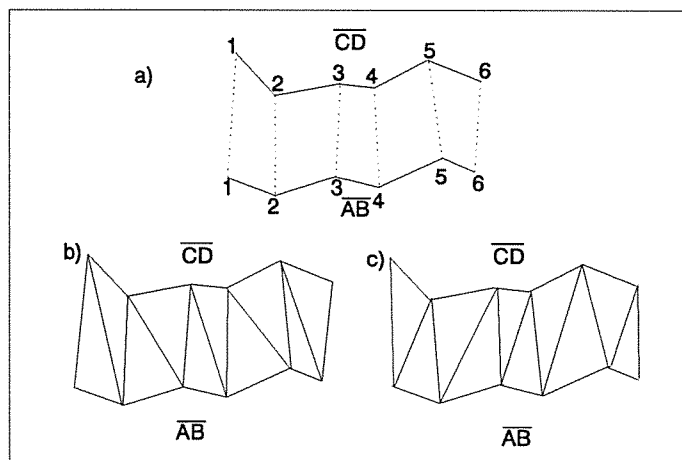


Fig. 3.22 - Exemplo de identificação de faces triangulares em objectos de tipo 3, 4 ou 5.

Esta forma de identificação de triângulos permite que a numeração dos respectivos vértices se faça no sentido positivo, quando vistos do exterior do modelo.

.Área superficial

A área da superfície total de um modelo 3D é obtida pela soma das áreas de cada uma das faces que o constituem. O seu cálculo requer que as faces do modelo sejam planas (objecto de tipo 6), bastando para isso a aplicação prévia da operação de triangulação descrita no ponto anterior, sobre os objectos de tipos 3, 4 ou 5.

.Volume total

O estimador do volume total de objectos de tipo 3, 4 ou 5 pode ser obtido pelo somatório das áreas dos polígonos (secções) que constituem o modelo, ponderado pela semi-distância entre eles:

$$V = \sum_{i=1}^{N-1} (a_i + a_{i+1}) \cdot \frac{d_{(i,i+1)}}{2}$$

em que:

N - Número de polígonos (secções)

a_i - Área do polígono *i*

d_(i,i+1) - Distância entre os polígonos *i* e *i+1*

Os polígonos utilizados neste cálculo podem ser apenas os que conduziram à construção do modelo (no caso das ligações entre polígonos ser linear), ou caso contrário, devem ser gerados outros polígonos por intersecções com planos paralelos.

Para o cálculo do volume de objectos de tipo 6 são propostos os dois seguintes algoritmos:

i) O algoritmo que se passa a descrever tem por base a determinação de secções paralelas (intersecção por planos paralelos) e pode ser definido pela seguinte sequência algorítmica:

.Seleção de uma das direcções principais, por exemplo, a direcção de maior alongamento do modelo ou a direcção perpendicular às secções que intervêm na sua construção;

.Determinação das coordenadas máximas e mínimas do modelo segundo a direcção seleccionada;

.Construção de uma família de planos perpendicular à direcção escolhida e compreendida entre os valores mínimos e máximos calculados para esta direcção. A precisão do estimador depende do espaçamento entre os planos;

.Determinação do conjunto de intersecções dos planos com o modelo segundo o algoritmo descrito anteriormente. O volume total será, então, dado por:

$$V = \sum_{i=1}^{(N-1)} (a_i + a_{i+1}) \cdot \frac{D}{2}$$

em que:

N - Número de intersecções efectuadas sobre o modelo

D - Distância entre os polígonos i e $i+1$

a_i - Área do polígono i resultante da intersecção

Se, por exemplo, se pretender calcular o volume parcial de um modelo 3D (definido por um intervalo de coordenadas) delimita-se o início e fim da família de planos ou, se necessário, confina-se o contorno obtido nas intersecções aos limites impostos (Fig. 3.23);

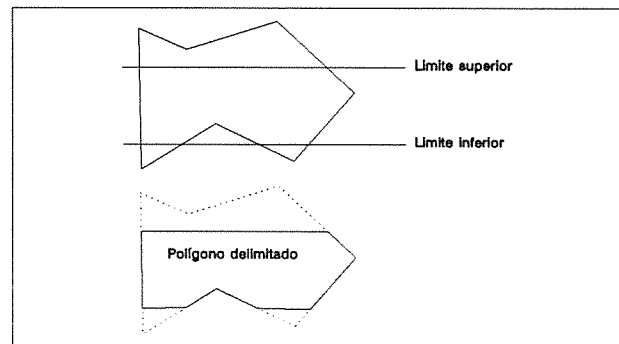


Fig. 3.23 - Delimitação de um polígono a um intervalo de coordenadas.

ii) Um segundo algoritmo bastante mais preciso, mas no entanto de difícil aplicação quando se pretende o cálculo do volume limitado a uma determinada região, envolve os seguintes passos:

1º. Para uma das faces do modelo (os vértices do polígono envolvente terão de estar numerados em sentido positivo, quando visto do exterior do modelo) determina-se o volume de um sólido cuja base corresponde à projecção sobre o plano XoY da face do modelo seleccionada e o topo coincide com esta mesma face seleccionada.

$$v_i = z_i \cdot A_{P_i} \quad (3.14)$$

em que:

z_i - Coordenada z média dos vértices que formam a face i

A_{P_i} - Área de projecção da face i

v_i - volume parcial respeitante a uma das faces do modelo

2º. Determina-se o sinal que afectará o valor do volume parcial calculado em 1). Para tal, determina-se a direcção da normal ao polígono considerado (n_x, n_y, n_z) (este tem de estar orientado em sentido positivo quando visto do exterior). A direcção da normal é dada pelo produto externo de dois vectores formados por dois segmentos de recta consecutivos constituintes do polígono. O sinal a afectar ao volume será o sinal da componente n_z do versor da normal. Este procedimento permite distinguir duas situações:

- i) sinal positivo - a parte imediatamente inferior da face escolhida está dentro do modelo;
- ii) sinal negativo - a parte imediatamente inferior da face escolhida está fora do modelo;

A repetição dos passos 1º e 2º, tantas vezes quantas as faces existentes no modelo, permite a determinação do volume total, que será dado por:

$$V_T = \sum_{i=1}^{N_f} v_i$$

em que:

N_f - Número de faces

v_i - Volume parcial afecto à face i - positivo ou negativo (expressão 3.14)

V_T - Volume total do modelo 3D de tipo 6

3.5 BIBLIOTECA DE FUNÇÕES DESENVOLVIDAS - OBJLIB

As operações de construção e estimação de medidas sobre modelos 2D e 3D, podem ser concretizadas através de um conjunto de primitivas desenvolvidas em linguagem C e inseridas na biblioteca OBJLIB. Estas funções utilizam a base de dados BDMIN (descrita no capítulo 2) como arquivo de atributos (coordenadas, atributos de representação gráfica, tipo de objecto, etc.). O tipo de base de dados para a implementação destes modelos vectoriais é o de tipo E ou F, dado que os suportes envolvidos podem ser simultaneamente um conjunto diversificado de vértices, poligonais e corpos 3D. Alguns exemplos de funções implementadas apresentam-se de seguida:

i) Funções globais para modelos 2 e 3D

- .Leitura e escrita, numa base de dados, dos atributos referentes aos três suportes (vértices, poligonais e corpos 3D);
- .Operações de edição de objectos (apagar, adicionar dois ou mais objectos);
- .Determinação da orientação de uma poligonal e reorientação da mesma num outro sentido;
- .Edição de contornos já digitalizados para correcção da posição, inserção ou eliminação de vértices e alteração de atributos;
- .Delimitação de uma poligonal a uma região definida por um rectângulo limite;
- .Operações de reunião, intersecção e diferença entre duas poligonais;
- .Visualização de modelos geométricos por projecção em planos/secções de acordo com os atributos gráficos;
- .Visualização de modelos geométricos por projecção em perspectiva, com possibilidade de rotação segundo os três eixos coordenados;
- .Preenchimento das poligonais com códigos geológicos ou outros símbolos particulares.

ii) Funções para modelos 2D

- .Função de digitalização em mesa ou teclas com introdução de atributos particulares (cor, tipo de linha de desenho, atributos geológicos, etc..) de poligonais sobre um dos planos coordenados;
- .Interpolação polinomial: polinómios de Lagrange, Hermite, curvas Bézier e curvas B-Spline;
- .Determinação de perímetros e áreas;
- .Determinação do plano sobre o qual a poligonal se encontra assente;
- .Determinação da posição de um ponto relativamente a uma poligonal;
- .Colocação de dois contornos com o mesmo número de vértices.

iii) Funções para modelos 3D

- .Construção de modelos de tipo 3 por translação(ões) e/ou rotação(ões) sucessivas de um objecto de tipo 2;
- .Construção de modelos de tipos 3, 4 e 5;
- .Triangulação de modelos de tipos 3, 4 ou 5;
- .Determinação de intersecções por planos sobre modelos;
- .Determinação de áreas de modelos de tipo 6;
- .Determinação de volumes.

4. CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS MODOS DE REPRESENTAÇÃO VECTORIAL E "RASTER"

4. CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS MODOS DE REPRESENTAÇÃO VECTORIAL E "RASTER"

Na prática do planeamento mineiro coexistem os dois tipos diferentes de modelos de forma e de qualidade (teores), directa ou indirectamente associados à forma, e com significativas diferenças em termos dos seus suportes (respectivamente vectoriais e "raster"). Por exemplo, depois de se definir os limites do corpo mineralizado (modo de representação vectorial) os valores de metal são estimados num conjunto de pontos ou blocos (modo de representação "raster") que estão incluídos no modelo vectorial. O projecto de desenho de infraestruturas de acesso à mineralização (por exemplo, um desmonte) só toma em conta a dispersão dos diferentes tipos mineralúrgicos (diferenciados pelos teores estimados em pontos ou blocos) se houver compatibilidade entre os dois modos de representação dos modelos. Assim, é necessário efectuar esta compatibilização através de algoritmos de transformação.

4.1 TRANSFORMAÇÃO DE MODELOS REPRESENTADOS NA FORMA VECTORIAL PARA A FORMA "RASTER"

A necessidade mais frequente da transformação vectorial/"raster" reside na passagem da definição de um corpo, dada pela sua envolvente, para uma definição dada a partir do conjunto de pontos ou blocos interiores ao corpo. Esta situação verifica-se, nomeadamente:

- .Na transformação de um desmonte desenhado na forma vectorial e definido pelos seus contornos num conjunto de pontos, nos quais se pretende inferir valores de metal;
- .Na transformação de uma lentícula mineralizada definida pela sua envolvente, num conjunto de blocos regulares - desmontes.

A transformação de modelos vectoriais em modelos "raster" depende essencialmente da dimensão unitária das células da partição do espaço efectuada no modo de representação "raster". Esta passagem envolve, na maior parte dos casos, uma perda de informação relativa aos limites do corpo, função da dimensão das células e da complexidade da forma (grau de irregularidade do contorno relativamente à dimensão unitária das células). Por exemplo, se se efectuar uma passagem de um modelo vectorial a "raster" seguida da operação inversa (esta última, só por si, não envolve perda de informação), a figura obtida não é necessariamente igual à figura de partida. Esta perda de informação deriva da não coincidência dos limites das células e dos segmentos de

recta constituintes das poligonais que delimitam os desenhos a transformar. Apenas no caso mais simples de algumas figuras regulares é que a figura obtida na sequência das duas operações seria exactamente a mesma.

Os modelos vectoriais a transformar podem ser bi ou tridimensionais. A transformação destes últimos pode ser realizada sobre os contornos resultantes da intersecção dos modelos tridimensionais por planos que passam pelo centro de cada um dos níveis de células da partição do espaço.

Normalmente, o valor de pertença de uma célula ao corpo definido vectorialmente é dado pela posição do seu centro de gravidade, relativamente ao corpo. No entanto, quando se tratam de células unitárias de grande dimensão (relativamente ao corpo definido em modo vectorial), o critério de atribuição do valor de pertença de uma célula ao interior do polígono pode ser feito com base na percentagem de ocupação deste por parte do modelo vectorial, e neste caso ter-se-á que estimar áreas ou volumes de ocupação.

Alguns algoritmos de representação em visor de linhas e de regiões fechadas delimitadas por um polígono, podem ser aplicados nesta conversão (vectorial/"*raster*"). Um algoritmo de transformação bidimensional da região delimitada por um polígono para a forma "*raster*", compreende a seguinte sequência de operações (Foley, 1984):

1º. Definição de uma partição no espaço 2D que envolva completamente o modelo vectorial (polígono) e determinação dos índices das linhas e colunas de células da partição "*raster*" que o intersectem (Fig. 4.1 - (a));

2º. Determinação para cada uma das linhas de células obtidas em 1º, do índice da coluna inicial e final de células que intersectam o polígono. (Fig. 4.1 - (b));

3º. Percorre-se as células por linhas, e dentro destas, entre a coluna inicial e final identificadas em 2º. Cada célula percorrida, caso o seu centro de gravidade se encontre no interior do polígono (Fig. 4.1 (c)) ou se o seu grau de ocupação por parte da região delimitada pelo polígono for superior a um determinado valor de corte entre 0 e 100%, (Fig. 4.1 (d)), passa a ser identificada com a região correspondente.

Este algoritmo é igualmente utilizado em computação gráfica "*Scan-Line Algorithm*" (Hearn e Baker, 1986) para a identificação dos "*pixels*" do visor que participam no preenchimento de polígonos.

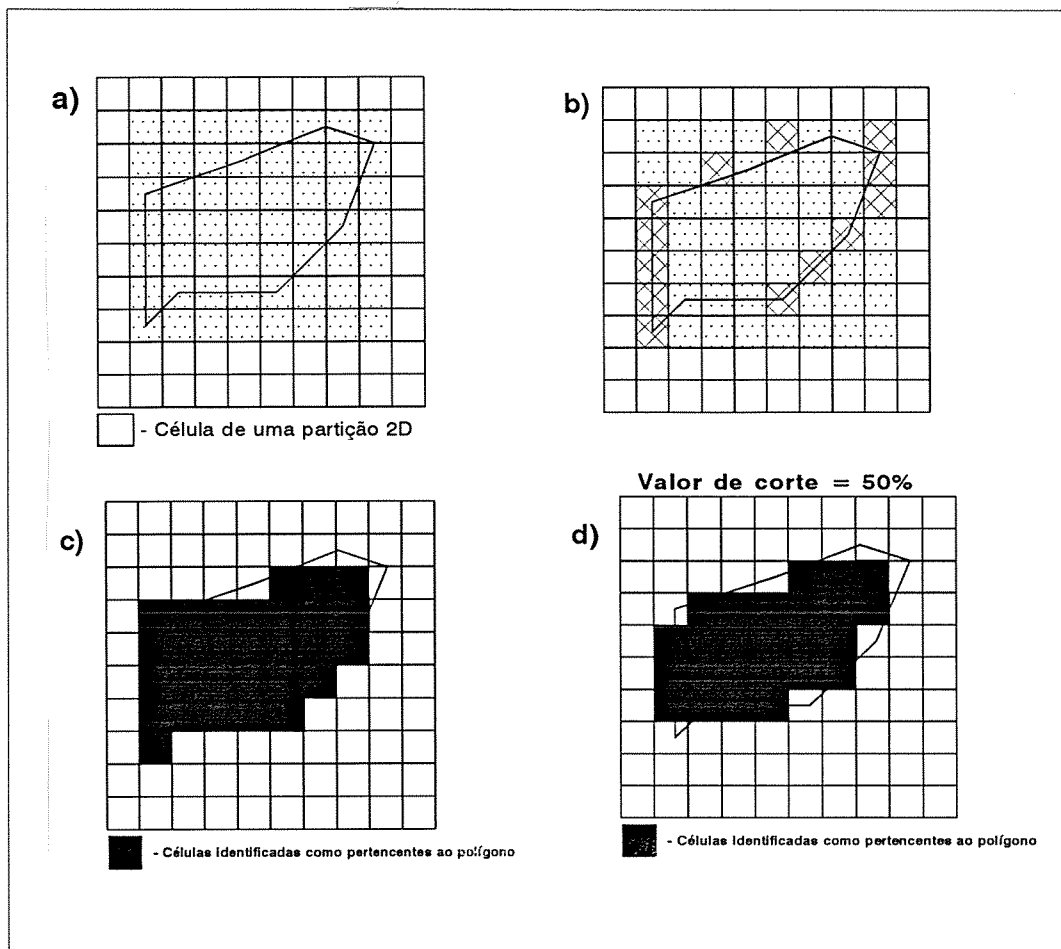


Fig. 4.1 - Etapas de transformação vectorial/"*raster*" sobre um modelo 2D.

O algoritmo de passagem de um modelo 3D definido na forma vectorial para a forma "*raster*" consiste na generalização do algoritmo anteriormente descrito, incluindo as seguintes etapas adicionais:

1º. Definição de uma partição tridimensional que envolva completamente o modelo;

2º. Determinação dos polígonos resultantes de intersecções ao modelo vectorial 3D por planos que passam pelos centros de gravidade ou pelas faces formadas por conjuntos de células complanares (passagem 3D a 2D). A escolha da orientação de um determinado plano é realizada tendo em conta a geometria do modelo vectorial. Por exemplo, se o modelo 3D for topologicamente definido por um conjunto de polígonos com as respectivas ligações entre vértices homólogos (objecto de tipo 3 a 5 na base de dados BDMIN), então os planos seleccionados deverão ser, sempre que possível, paralelos aos planos onde se encontram representados os polígonos;

3°. Determinação das células pertencentes a cada região delimitada pelo polígono obtido no passo 2°, utilizando o algoritmo anteriormente descrito para o caso bidimensional.

4.2 TRANSFORMAÇÃO DE MODELOS REPRESENTADOS NA FORMA "*RASTER*" PARA A FORMA VECTORIAL

No âmbito do planeamento mineiro, a transformação de modo de representação "*raster*"/vectorial ocorre com mais frequência na interface entre o planeamento e a produção, onde as estruturas morfológicas "*raster*" são resumidas em modo vectorial para uma melhor visualização e interpretação. Por exemplo, depois de desenhado o projecto dos desmontes (modo de representação vectorial), estes são transformados em malhas de pontos ou blocos (modo de representação "*raster*") para poderem ser estimadas as reservas nos diferentes metais. Em função destas, pode proceder-se a modificações do contorno dos desmontes de forma a atingir objectivos de produção predefinidos. Estabelecida a geometria final do desmonte, esta terá que ser transmitida à produção (exploração) na sua forma mais simples (modo de representação vectorial) - conjunto de vértices coordenados.

Outros tipos de aplicação desta transformação (não tão específicos do planeamento mineiro) resultam da necessidade de reduzir o volume de informação ocupado pelos modelos "*raster*", obtidos, por exemplo, por digitalização de mapas a partir de um "*scanner*". Esta informação, dado o grande volume ocupado e por, frequentemente, ser desejável trabalhar em modo vectorial, deve ser vectorizada.

A transformação de um modelo "*raster*" a vectorial é relativamente simples e não conduz a perda de informação, ao contrário da transformação inversa. Pode efectuar-se recorrendo a várias técnicas (algumas do domínio da análise de imagem), que consistem em percorrer para uma dada partição bidimensional (que caracteriza formas bifásicas ou multifásicas) as células com igual valor, e seguir o respectivo contorno.

O algoritmo que implementa esta transformação resume-se a, uma vez identificada uma determinada célula de fronteira, pesquisar as sucessivas células da mesma fronteira, até atingir-se a célula de partida. Na Fig. 4.2, ilustra-se o resultado da aplicação deste algoritmo sobre uma partição 2D que define um conjunto multifásico.

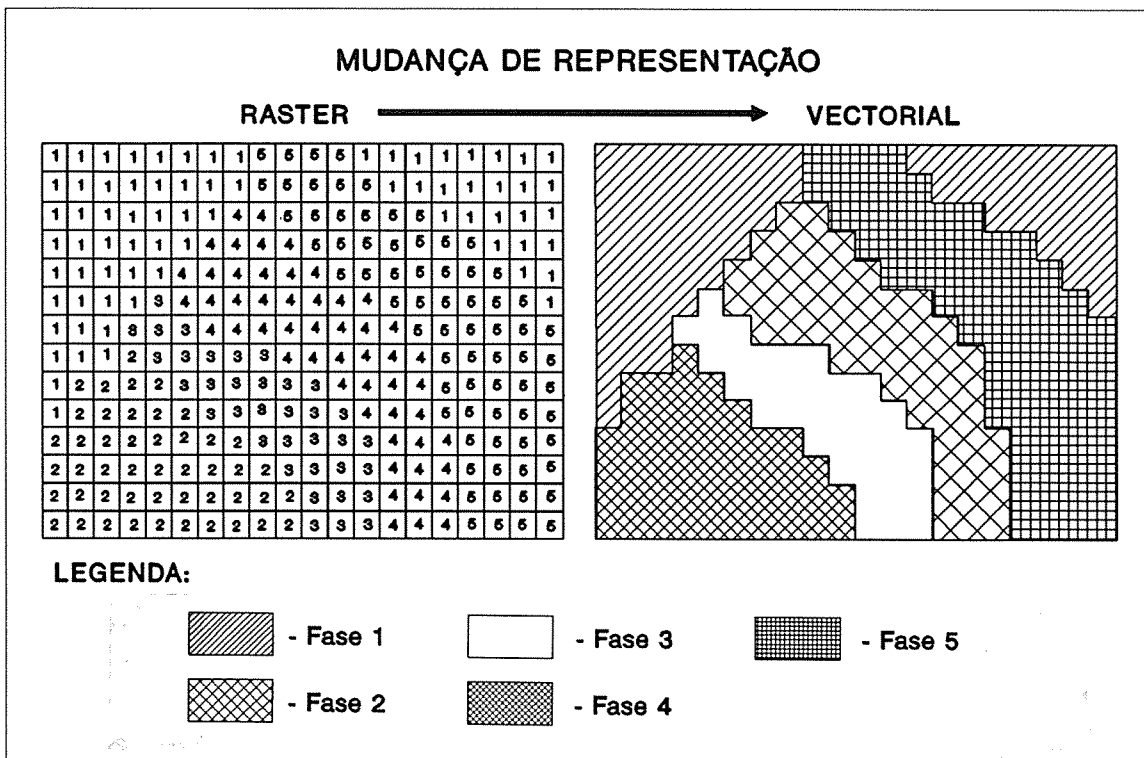


Fig. 4.2 - Transformação "raster"/vectorial sobre um conjunto multifásico 2D.

4.3 ÁREAS E VOLUMES DAS CÉLULAS DE UM MODELO "RASTER" CONTIDOS NUM MODELO VECTORIAL

A determinação das áreas e volumes de ocupação de um conjunto de células por um modelo vectorial, respectivamente 2D e 3D, é importante em algumas aplicações do planeamento mineiro, nomeadamente, quando se conhecem os valores de uma grandeza aditiva (teores em suportes constantes, quantidades de metal, etc.) numa malha regular de blocos e se pretende estimar o valor médio dessa grandeza no interior de um polígono ou volume (modelos representados na forma vectorial).

No caso bidimensional, o grau de ocupação é dado pelo quociente entre a área de ocupação e a área total de uma célula. O cálculo da área de ocupação de cada célula de uma partição 2D pode ser efectuado utilizando diversos algoritmos (Larkin, 1988, Deutsch, 1990).

Um estimador da grandeza aditiva dentro do modelo vectorial é calculado pela média dos valores estimados nos blocos, ponderados pelas áreas ou graus de ocupação.

$$Z_A^* = \frac{\sum_{i_y=1}^{N_{lin}} \sum_{i_x=1}^{N_{col}} (Z_{(i_x, i_y)}^* \cdot O_A(i_x, i_y))}{\sum_{i_y=1}^{N_{lin}} \sum_{i_x=1}^{N_{col}} O_A(i_x, i_y)} \quad (4.1)$$

em que:

$O_A(i_x, i_y)$ - Grau de ocupação da célula (i_x, i_y) em %

$Z_{(i_x, i_y)}^*$ - Valor estimado na célula (i_x, i_y)

Z_A^* - Valor estimado no modelo vectorial 2D

O cálculo do valor médio de uma grandeza aditiva dentro de um modelo vectorial 3D é feito segundo (4.1). O grau de ocupação (no caso tridimensional) é dado pelo quociente entre o volume de ocupação e o volume total da célula. O volume de ocupação para cada uma das células é dado por:

$$V_{(i_x, i_y, i_z)} = \frac{A_1(i_x, i_y, i_z) + A_2(i_x, i_y, i_z)}{2} \cdot d \quad (4.2)$$

em que:

d - Dimensão da célula na direcção perpendicular a A_1 e A_2

$A_1(i_x, i_y, i_z)$ - Área de ocupação da base da célula

$A_2(i_x, i_y, i_z)$ - Área de ocupação do topo da célula

4.4 BIBLIOTECA DE FUNÇÕES DESENVOLVIDAS - GRIDLIB

As funções descritas e funções de visualização utilizando códigos de cor, foram implementadas sob a forma de primitivas, que permitem as seguintes operações:

- .Determinação de áreas de ocupação de cada uma das células de uma malha bidimensional pela região delimitada por um polígono situado no mesmo plano;
- .Determinação de volumes de ocupação de cada uma das células de uma malha tridimensional por um modelo vectorial 3D (4.2);
- .Estimação de valores de uma variável aditiva conhecida numa malha regular de blocos em áreas (delimitadas por polígonos) e volumes (delimitados por modelos de arame tridimensionais) contidos completamente no interior do modelo de blocos, em que se utilizam como ponderadores, respectivamente, áreas e volumes de ocupação (4.1);
- .Visualização da posição geométrica de malhas de pontos e de blocos e atributos associados com recurso a códigos de cor seleccionados previamente.

5. ESTIMAÇÃO GEOESTATÍSTICA PARA CARACTERIZAÇÃO
MORFOLÓGICA EM MODO "RASTER"

5. ESTIMAÇÃO GEOESTATÍSTICA PARA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA EM MODO "RASTER"

No planeamento mineiro, a representação "*raster*" de um corpo tem a aplicação nobre na interpolação estocástica (geoestatística) da qualidade (teores) de um jazigo mineral, conhecida apenas num número discreto de pontos.

Recentemente, a geoestatística tem vindo a dar resposta à modelagem morfológica de jazigos minerais, através da aplicação do formalismo de estimação estocástica à interpolação da forma de um corpo, representado na forma "*raster*".

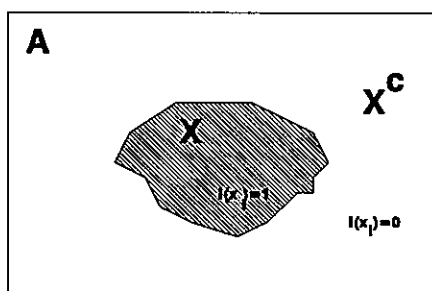
Nos modelos estocásticos de forma, a morfologia é dada pelo conjunto de pontos com maior probabilidade estimada de pertencer ao corpo, ao contrário dos modelos vectoriais em que a forma é definida pelos contornos. Uma das grandes vantagens deste tipo de modelos estocásticos é a construção de mapas de probabilidades estimadas, que permitem localizar as zonas de maior ou menor incerteza de forma (Soares, 1989).

A probabilidade de um ponto qualquer pertencer ao corpo, depende do grau de pertença ao corpo das amostras experimentais vizinhas a esse ponto e também, de medidas de continuidade ou contiguidade médias do corpo - covariância e variograma.

Com este capítulo, pretende-se abordar de uma forma resumida o esqueleto metodológico da morfologia geoestatística. A estimação geoestatística de estruturas bifásicas e multifásicas pode ser consultada com mais detalhe em (Soares, 1992).

5.1 ESTRUTURAS BIFÁSICAS

Considere-se uma variável indicatriz definida do seguinte modo: dado um corpo ou fase X e o seu complementar X^C na área A (Fig. 5.1), em que $A = X \cup X^C$ e na qual existe um conjunto de N amostras localizadas em A (x_i , $i = 1, N$), a variável indicatriz $I(x_i)$ é expressa por:



$$A = X \cup X^C$$

Fig. 5.1 - Área em estudo A e fase X.

$$I(x_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j \in X \\ 0 & \text{se } x_j \in X^C \end{cases} \quad (5.1)$$

em que:

X - Uma dada fase de A e *X^C* é o complementar

x_j - Localização espacial da amostra *i*

A fase X pode identificar, por exemplo, uma determinada formação geológica, um tipo de minério, uma classe de um conjunto de valores com características discretas ou contínuas, etc..

A variável indicatriz tem o significado de probabilidade de pertença de um dado ponto a uma fase X, $I(x_j) = \text{prob} \{ x_j \in X \}$, podendo ser considerada como uma realização de uma função aleatória *I(x)* com uma lei de distribuição Binomial.

Esta função aleatória é caracterizada pelos seguintes momentos (respectivamente de primeira e segunda ordem):

$$m_I = E \{ I(x) \}$$

$$\text{var}_I = E \{ (I(x) - m_I)^2 \} = m_I (1 - m_I)$$

.Variograma da variável indicatriz

A covariância $C(h)$ de uma variável indicatriz bifásica, é dada pela seguinte expressão:

$$C(h) = E \{ (I(x_j) \cdot I(x_{j+h})) \}$$

e pode ser interpretada como a probabilidade de duas amostras (x_j e x_{j+h}), separadas de h , pertencerem a X , $prob \{ x_j, x_{j+h} \in X \}$,

A função variograma $\gamma(h)$ é dada pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [I(x_j) - I(x_{j+h})]^2 \}$$

Os valores de $C(h)$ e $\gamma(h)$ são medidas que quantificam a contiguidade do corpo X .

.Estimação da probabilidade de pertença de um ponto ao corpo X

Para o conjunto de pontos da área A pretende-se estimar a probabilidade de pertença ao corpo X :

$$prob \{ x \in X \} \quad \forall x \in A$$

Esta quantidade pode ser estimada através de uma combinação linear do conjunto de valores indicatriz das amostras experimentais:

$$[prob \{ x \in X \}]^* = [I(x)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} I(x_{\alpha})$$

Trata-se da aplicação do estimador geoestatístico de Krigagem (Journel and Huijbregts, 1978) aplicado à variável indicatriz.

A este estimador linear de Krigagem impõem-se duas condições:

.Não enviesamento:

$$E \{ I(x) - [I(x)]^* \} = 0 \quad (5.2)$$

o que implica:

$$\sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1 \quad (5.3)$$

.Variância de estimação mínima:

$$\min \{ E[I(x) - [I(x)]^*]^2 \} \quad (5.4)$$

As condições (5.3) e (5.4) conduzem ao sistema de (N+1) equações escrito em função das covariâncias entre as amostras experimentais e entre as amostras experimentais e o ponto a estimar x.

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} C(x_{\alpha}, x_{\beta}) + \mu = C(x_{\beta}, x) & \beta = 1, \dots, N \\ \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

μ - parâmetro Lagrange

.Transformação do mapa de probabilidades em mapas binários

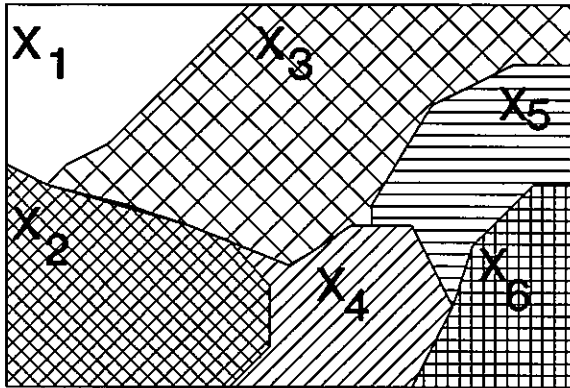
Uma vez estimadas, para toda a área A as probabilidades de pertença a uma das fases de todos os pontos contidos em A, a morfologia binária do corpo X e X^c pode ser calculada através do seguinte algoritmo (Soares 1989): no mapa binário final, pretende-se que a proporção de valores estimados como pertencentes a X - proporção de X em A - seja a mesma que a média dos valores experimentais m_I (condição de não enviesamento 5.2). Assim, se ordenarmos por ordem decrescente os Q valores de probabilidade estimados, o corpo X é constituído pelos S mais altos valores de probabilidade $I^*(x_i)$ citada, tal que:

$$\frac{S}{Q} = m_I$$

5.2 ESTRUTURAS MULTIFÁSICAS

.Estimação geoestatística de estruturas multifásicas

A variável indicatriz pode ser utilizada no caso da área A estar dividida não em duas fases, mas em P fases (Fig. 5.2), e de modo que $K_l(x_j) = \text{prob} \{ x_j \in X_l \} \quad l=1, \dots, P$.



$$A = \{ X_1 \cup X_2 \cup X_3 \dots X_{K-1} \cup X_K \}$$

Fig. 5.2 - Área A e divisão em P fases (P = 6).

A estrutura multifásica passa então a ser representada por um vector de valores de indicatriz, $K_1(x_j), K_2(x_j), \dots, K_P(x_j)$, cada qual definido por:

$$K_l(x_j) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j \in X_l \\ 0 & \text{se } x_j \notin X_l \end{cases} \quad (5.6)$$

em que:

$X_l \ (l=1, \dots, P)$ - Cada uma das fases de A

Tal como no caso bifásico, pretende-se obter um estimador da probabilidade de qualquer ponto $x \in A$ pertencer à fase $X_l, l=1, \dots, P$.

$$[K_l(x)]^* = [\text{prob} \{ x \in X_l \}] \quad l=1, \dots, P$$

Este estimador de krigagem multifásica é obtido a partir de uma combinação linear das N amostras experimentais:

$$[K_I(x)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} K_I(x_{\alpha}) \quad (5.7)$$

e tem por base a estrutura de continuidade global dada pela covariância multifásica:

$$C(h) = \sum_{I=1}^P E [K_I(x) \cdot K_I(x+h)]$$

ou o correspondente variograma multifásico:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \sum_{I=1}^P E [(K_I(x) - K_I(x+h))^2] \quad (5.8)$$

A krigagem multifásica, além de garantir as condições de não enviesamento e de variância de estimação mínima, garante também que, em qualquer ponto $x \in A$ a soma das probabilidades estimadas seja igual a "um":

$$\sum_{I=1}^P [prob \{ x \in x_K \}]^* = 1$$

.Transformação dos mapas de probabilidades em mapas morfológicos multifásicos

Cada ponto $x \in A$ é caracterizado por um vector $K_1^*(x), K_2^*(x), \dots, K_p^*(x)$ de probabilidades estimadas. O objectivo é alocar a cada ponto x uma só fase X_I baseada nas probabilidades estimadas, de modo a que no mapa multifásico final sejam verificadas as proporções de cada fase, calculadas com base nas amostras experimentais.

Seja π_j a proporção da fase X_j . O conjunto de pontos estimados como pertencentes a X_j devem ter a mesma proporção π_j . Assim, a classificação dos vectores estimados em fases, consiste nos dois seguintes passos: i) os vectores $K^*_j(x)$ são ordenados por ordem decrescente, para cada fase X_j ; ii) cada ponto x é alocado à fase X_j correspondendo ao mais alto valor $K^*_j(x)$ até que a proporção π_j seja atingida.

.Incorporação de informação geológica nos modelos estocásticos - KRIGAGEM MORFOLÓGICA

Os estimadores geoestatísticos de estruturas bifásicas e multifásicas podem incluir informação geológica relativa à forma do jazigo mineral. É o caso da krigagem morfológica (Soares, 1990), na qual o estimador linear da variável indicatriz é condicionado à orientação das camadas que contêm as amostras experimentais.

Concretamente, no estimador de krigagem morfológica as covariâncias do segundo membro do sistema de krigagem (5.5) - covariância entre a amostra experimental e o ponto a estimar - são rodadas segundo um ângulo de inclinação da camada à qual pertence a amostra.

No estimador de krigagem morfológica em vez de se utilizar as covariâncias globais (Fig 5.3 (a)), são utilizadas as covariâncias locais rodadas de um ângulo θ - inclinação de cada camada - (Fig 5.3 (b)).

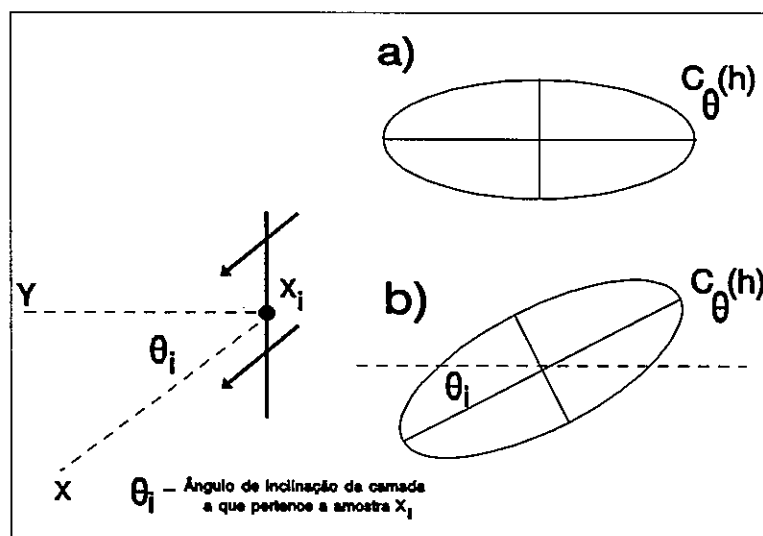


Fig. 5.3 - Representação gráfica da rotação local do elipsóide de anisotropias.

.Construção de mapas ilustrando zonas de maior incerteza de forma

Uma das grandes vantagens de utilização dos modelos estocásticos para a caracterização morfológica dos corpos geológicos é a identificação de zonas de maior incerteza de forma. Com efeito, as formas bifásicas ou multifásicas são determinadas com base num valor de corte. No entanto, em torno de uma fronteira pode representar-se graficamente os pontos com maior probabilidade de estarem mal classificados, isto é, aqueles que têm idêntica probabilidade de pertencer a qualquer uma de duas ou mais fases.

Estas zonas de maior incerteza morfológica são auxiliares fundamentais para o planeamento da exploração de jazigos minerais, em que a variabilidade da forma é tão ou mais importante que a variabilidade das outras variáveis quantitativas (teores, quantidades de metal, etc.) - ver exemplo ilustrado no capítulo 6.

6. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE FORMAÇÕES MARMÓREAS DA REGIÃO DE PARDAIS

6. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE FORMAÇÕES MARMÓREAS DA REGIÃO DE PARDAIS

6.1 INTRODUÇÃO

Com este estudo pretende-se efectuar a caracterização morfológica de algumas formações presentes no maço calcário de Borba-Vila Viçosa e a consequente estimação dos recursos, isto é, a determinação dos volumes e tonelagens afectos às formações marmóreas identificadas (Sousa *et al*, 1982).

Para a caracterização morfológica, ensaiaram-se duas metodologias distintas de modelagem: uma determinista, tendo por base a construção de um modelo de arame tridimensional (que inclui uma acentuada componente pericial - modelo de características essencialmente heurísticas), e outra em que se aplicam as metodologias geoestatísticas, mais concretamente a análise estrutural de contiguidade e a krigagem morfológica multifásica. A utilização destes dois tipos de construção de modelos morfológicos sobre um mesmo exemplo, permite a sua comparação, tanto nos aspectos metodológicos particulares, como na informação de base.

6.2. LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DA REGIÃO ESTUDADA

A região estudada situa-se no Sudeste de Portugal (Fig. 6.1). Nesta região localiza-se o anticlinal de Estremoz, com orientação NW-SE, desenvolvendo-se entre as povoações de Sousel e Alandroal com um comprimento total aproximado de 40 km. A zona estudada, situa-se na extremidade Sul, e prolonga-se até cerca de 250 m de profundidade (profundidade máxima alcançada pelas sondagens).

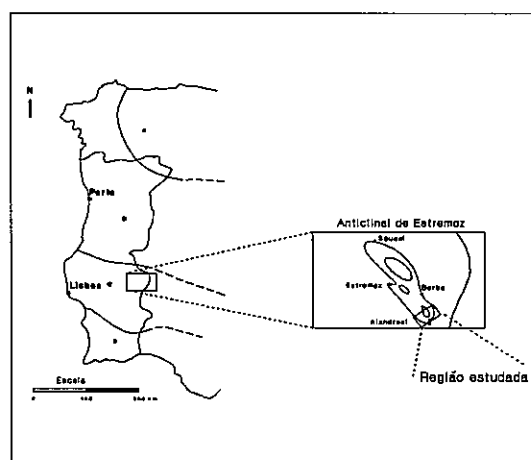


Fig. 6.1 - Localização da região estudada no anticlinal de Estremoz.

Esta área durante a sua formação, foi afectada por dois períodos de intensos dobramentos, seguidos de processos que conduziram ao desenvolvimento, em algumas zonas, de intensa fracturação e metamorfismo regional. Estes últimos, levaram ao aparecimento de calcários cristalinos com diferentes colorações - mármore brancos, rosas e cinzentos (Gonçalves, 1970, 1972).

6.3 INFORMAÇÃO DE BASE

A informação de base para este estudo é proveniente de doze sondagens realizadas na região de Pardais. Em cada sondagem existe levantamento topográfico, litológico e de fracturação. O levantamento topográfico inclui informação sobre a orientação das sondagens medidas em determinados troços de profundidades conhecidas e as coordenadas da "boca". Estes dados permitem coordenar toda a informação retirada das sondagens. O levantamento litológico engloba informação sobre as formações atravessadas por cada troço de sondagem. Da coluna litográfica, retiveram-se os dez seguintes tipos principais de formações, identificadas pelos códigos seguintes:

- .M1 - Mármore cinzentos;
- .M2 - Mármore rosas;
- .M3 - Mármore claros;
- .M4 - Zona de transição entre mármore e dolomias;
- .D1 - Dolomias diagenéticas;
- .D2 - Dolomias epigenéticas;
- .X1 - Xistos carbonosos com intercalações de mármore;
- .X2 - Xistos do Silúrico;
- .V1 - Metavulcanitos de topo;
- .V2 - Metavulcanitos de base;
- .V3 - Metavulcanitos com intercalações de mármore;

O levantamento de fracturação conduz ao conhecimento das fracturas atravessadas pelas sondagens e a respectiva orientação, relativamente a uma linha geratriz traçada ao longo da carote.

A litologia de superfície é também conhecida, ilustrando-se na Fig. 6.2 as formações litológicas e principais filões e falhas identificadas e classificadas nesta região assim como a localização das coordenadas da "boca" das doze sondagens efectuadas.

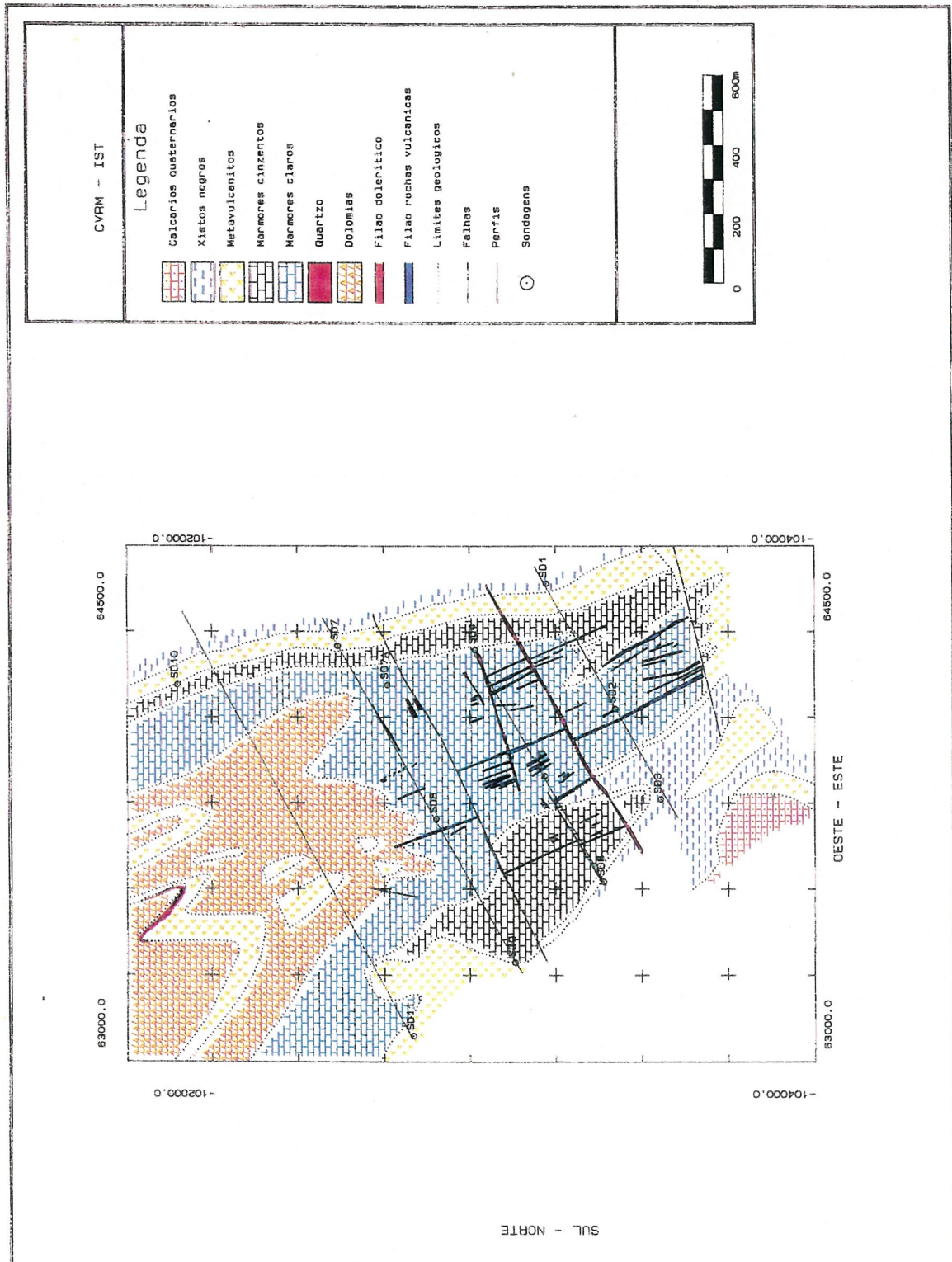


Fig. 6.2 - Litologia de superfície e localização dos perfis e sondagens.

Estas sondagens encontram-se mais ou menos alinhadas ao longo de quatro perfis: no perfil I, localizam-se as sondagens de códigos SD1, SD2 e SD3, no perfil II as sondagens de códigos SD4, SD5 e SD6, no perfil III as sondagens de códigos SD7, SD7A, SD8 e SD9 e no perfil IV as sondagens de códigos SD10 e SD11 (note-se que as sondagens SD7A e SD10 se encontram um pouco distantes dos perfis III e IV, respectivamente). Nas Fig. 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6 ilustram-se as formações atravessadas pelas sondagens por projecção em cada um destes perfis.

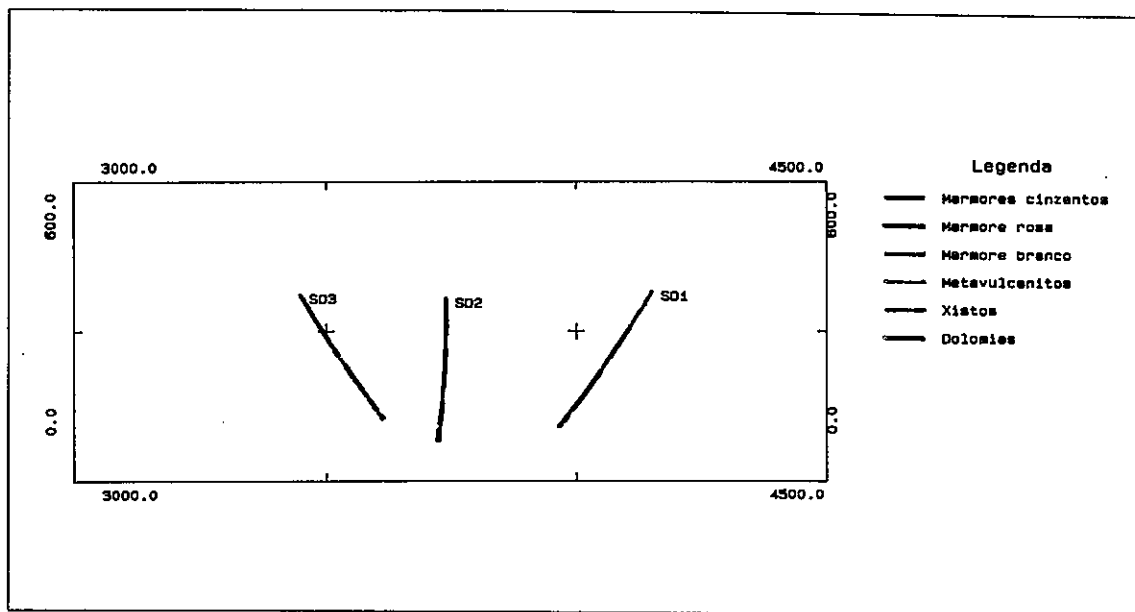


Fig. 6.3 - Representação de sondagens no perfil I.

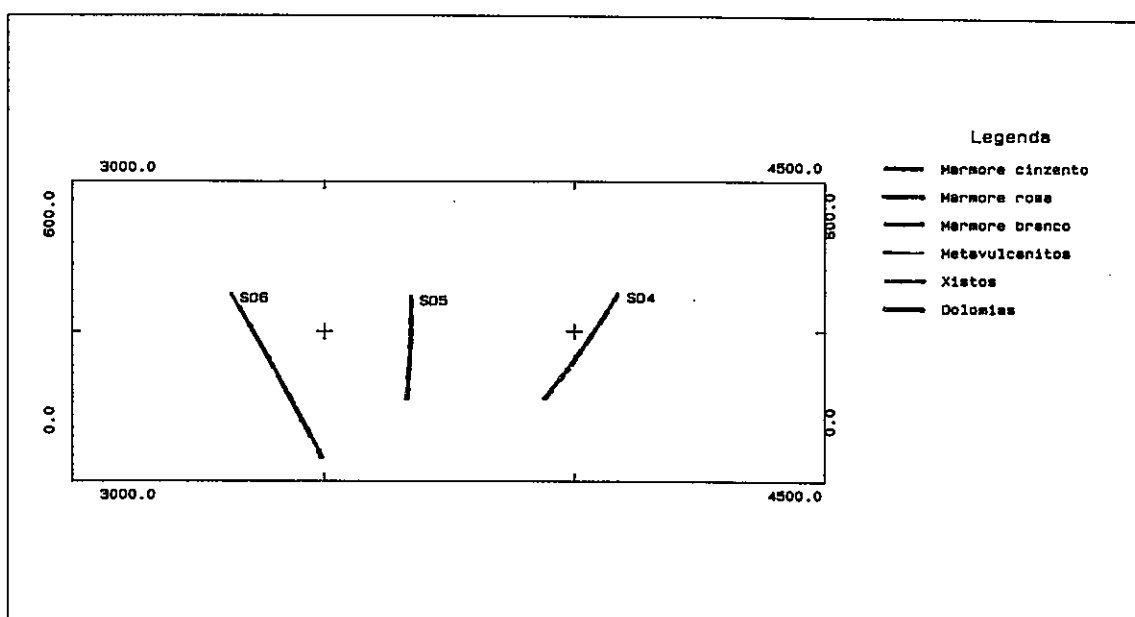


Fig. 6.4 - Representação de sondagens no perfil II.

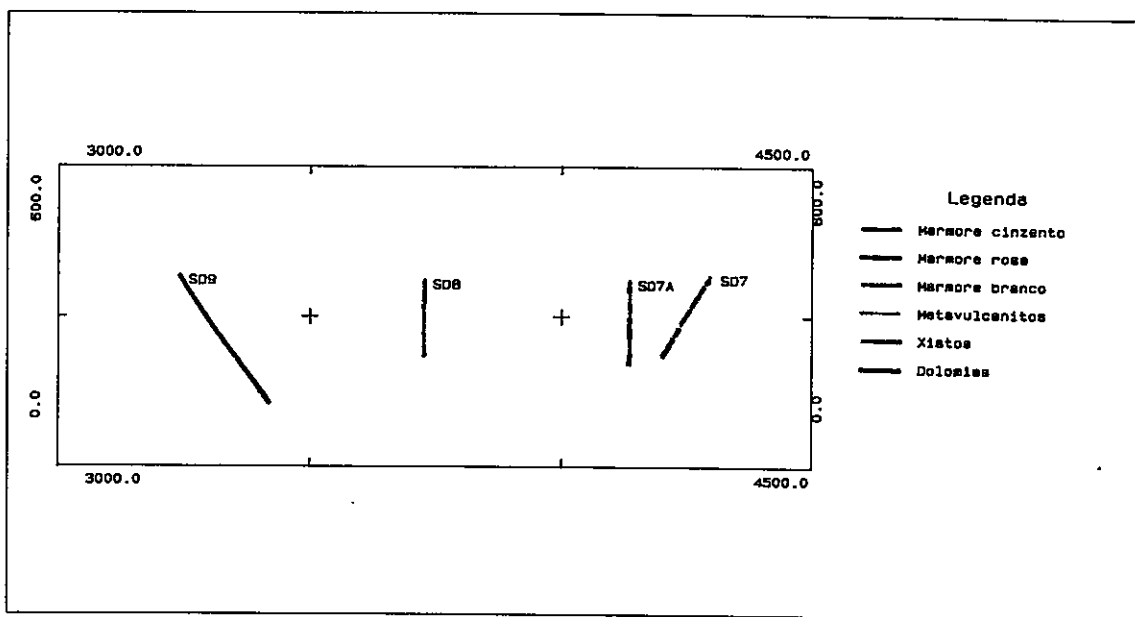


Fig. 6.5 - Representação de sondagens no perfil III.

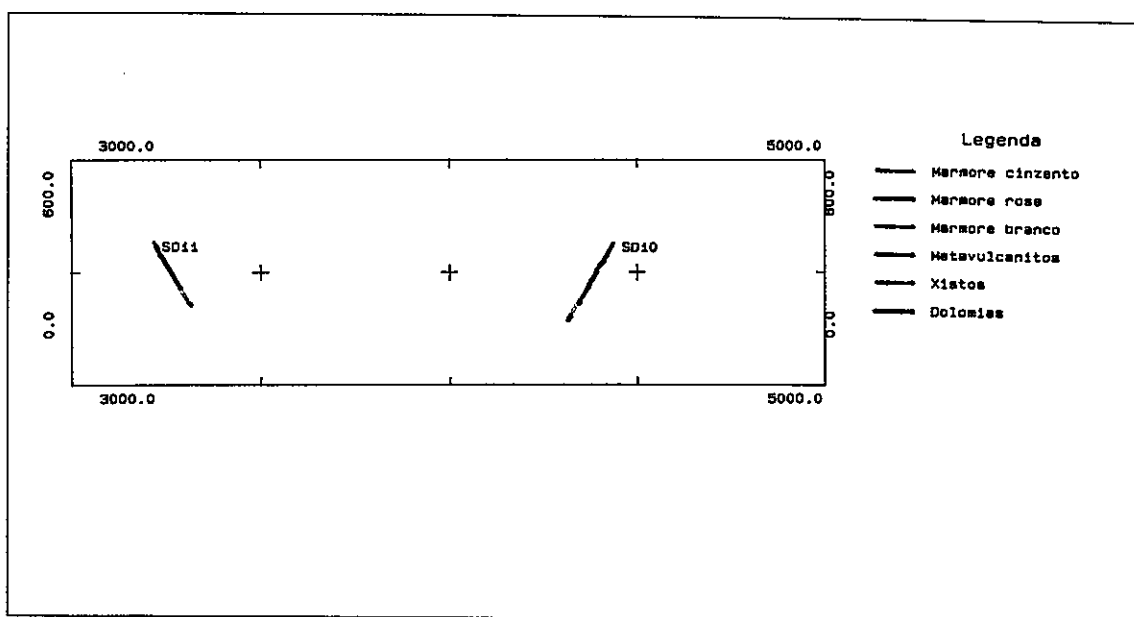


Fig. 6.6 - Representação de sondagens no perfil IV.

Antes da construção de qualquer modelo 3D, efectuou-se uma rotação do conjunto total dos dados das sondagens e da superfície, de modo a alinhar os perfis com o eixo YY' - Norte/Sul. O ângulo de rotação é de 63° em sentido positivo em torno de um eixo vertical.

Em cada um destes quatro perfis foi efectuada, pela Direcção Geral de Geologia e Minas (D.G.G.M.) em colaboração com especialistas da Universidade de Évora, uma interpretação geológica, no sentido de localizar a envolvente das formações marmóreas existentes. Esta interpretação é baseada na informação contida nas sondagens e na informação de superfície resultando no desenho dos contornos das principais formações identificadas (mármore cinzentos, brancos e rosas, metavulcanitos e dolomitos). Estes contornos previamente digitalizados são utilizados directamente na construção do modelo geométrico de arame, método descrito no capítulo 3. Na Fig. 6.7, ilustra-se, para os quatro perfis, o conjunto dos contornos digitalizados das formações de interesse (mármore cinzentos e claros, em que nestes últimos se engloba os mármore de tipo branco e rosa).

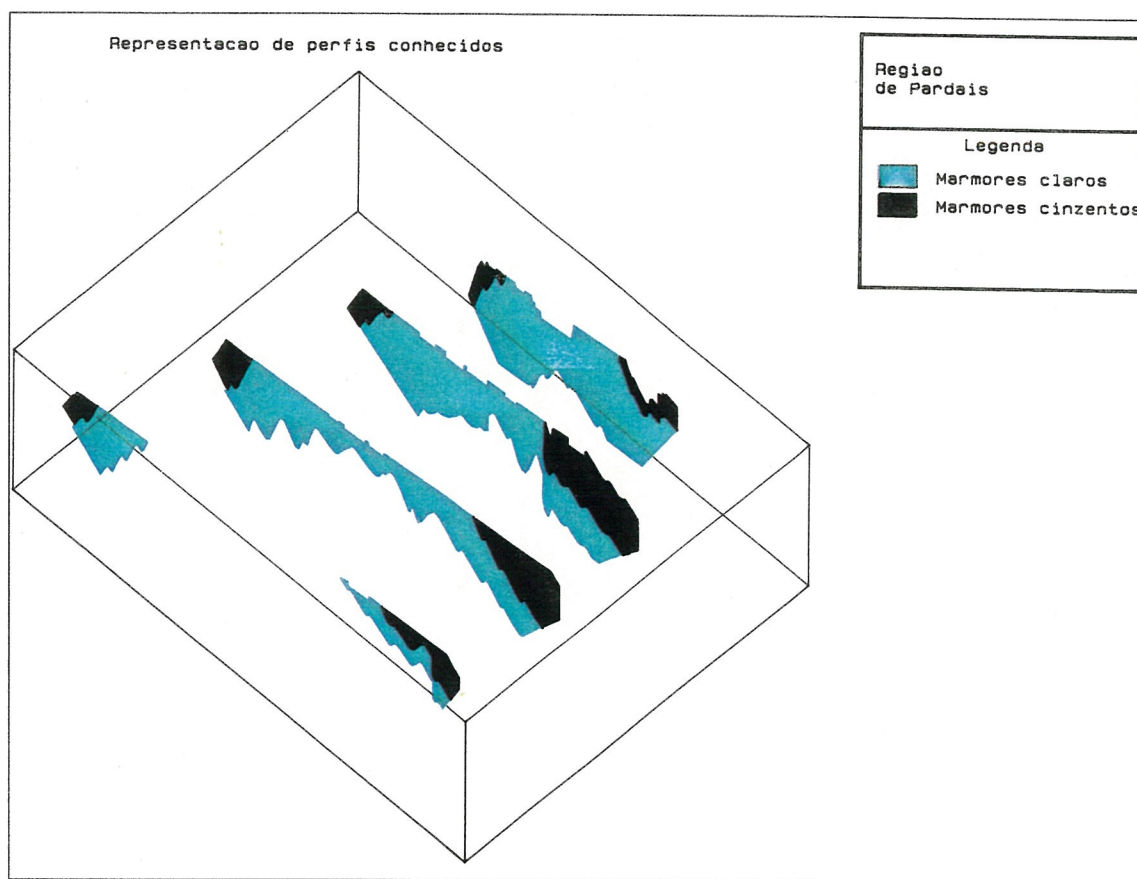


Fig. 6.7 - Representação dos contornos das formações marmóreas ao longo dos quatro perfis.

A forma dos dois contornos de mármore cinzento decorre da geometria do anticlinal de Estremoz. Também por esta razão, no perfil IV e para as formações de mármore claro aparecem dois contornos, resultantes da divisão da massa rochosa. Uma vez que não se conhece o local exacto de divisão (situado entre os perfis III e IV), admite-se, para as operações de modelagem geométrica, que esta ocorre no perfil III.

6.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO VECTORIAL

Com o objectivo de calcular as reservas de mármore por cada tipo, construiu-se um modelo geométrico de arame, modelo esse elaborado à custa do conhecimento nos quatro perfis, dos contornos das formações litológicas (mármore claros e cinzentos). Depois de construído o modelo, um para cada tipo de mármore, calcularam-se os volumes totais e parciais (entre níveis). Nas etapas de construção dos modelos, visualização/validação e estimação de volumes, recorreu-se a um conjunto de programas desenvolvidos para modelagem geométrica vectorial.

6.4.1 PROGRAMAS DE MODELAGEM GEOMÉTRICA - GEOMIN

Para a construção do modelo geométrico vectorial, desenvolveu-se e utilizou-se um conjunto de programas de nome genérico GEOMIN, recorrendo à base de dados BDMIN de tipo E ou F (para os contornos) e G (para malhas de blocos), descritas no capítulo dois e às bibliotecas de primitivas que implementam os algoritmos e metodologias descritos nos capítulos três e quatro (OBJLIB e GRIDDLIB, respectivamente). Os programas e as respectivas funções, agrupados nos seguintes conjuntos: i) gestão de bases de dados; ii) edição de desenhos e operações de modelagem geométrica; iii) estimação de grandezas sobre os modelos geométricos 2D e 3D; iv) cruzamento de modelos geométricos de arame com modelos de blocos, são:

GESTÃO DE BASES DE DADOS:

.BD_FORM - Inicialização de uma base de dados geométrica vectorial (tipo E ou F) ou de uma base de dados de tipo G e escolha dos atributos pretendidos em cada ficheiro;

.BD_VER - Consulta e edição de registos de uma base de dados geométrica ou de blocos;

.IMP_EXP - Importação de um ficheiro de formato ASCII para uma base de dados BDMIN e exportação de registos para um ficheiro ASCII.

EDIÇÃO DE DESENHOS E OPERAÇÕES DE MODELAGEM GEOMÉTRICA:

.DIGIT - Programa que permite, com mesa digitalizadora ou teclado, a digitalização de figuras, apagar figuras, composição de figuras simples formando figuras complexas (por

exemplo, a composição de objectos de tipo 1 ou 2 formando um objecto de tipo 7), a construção de figuras (objecto de tipo 3) por translação e/ou rotação de um objecto de tipo 2, etc.;

.EDITDES - Programa que permite a junção de figuras digitalizadas em diferentes sessões de trabalho, a correcção de coordenadas, a conversão de um objecto de tipo 3, 4 ou 5 num objecto de tipo 6 (por triangulação), utilização de funções de ajustamento (polinómios de Lagrange, Hermite, curvas de Bézier e Splines - utilizando as expressões (3.1), (3.2), (3.4) e (3.5)), etc.;

.TRIARA - Programa que permite fornecer indicação sobre a existência de troços homólogos em pares de contornos adjacentes e efectuar a construção do modelo de arame 3D - utilizando as expressões (3.6), (3.7), (3.8) e (3.12);

.PERF_3D - Programa que permite determinar uma secção ou uma família de secções paralelas a um dos planos coordenados sobre um objecto de tipo 3, 4, 5 ou 6;

.VER_2D e VER_3D - Programas de visualização por projecção em visor ou "output" para "plotter" ou impressora dos modelos seleccionados. Permitem a sobreposição, na mesma representação, de várias bases de dados com modelos diferentes e preenchimentos de áreas com símbolos geralmente associados ao desenho de cada uma das formações geológicas envolvidas;

ESTIMAÇÃO DE GRANDEZAS SOBRE OS MODELOS GEOMÉTRICOS 2D E 3D:

.CALC_MOD - Estimação de grandezas sobre modelos tais como perímetros, áreas e centros de gravidade em modelos 2D, e volumes em modelos 3D;

CRUZAMENTO DE MODELOS GEOMÉTRICOS DE ARAME COM MODELOS DE BLOCOS:

.INI_GRD - Selecção em modo gráfico da localização de uma malha de pontos ou blocos;

.SEL_GRD - Selecção do conjunto de blocos ou pontos de uma malha definida numa base de dados de tipo grelha que se encontram no interior de um modelo geométrico vectorial, e determinação de graus de ocupação de blocos por parte de um modelo geométrico vectorial.

6.4.2 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO DE ARAME

O conjunto de programas GEOMIN permite a construção de um modelo geométrico de arame com base numa série de perfis paralelos. A localização dos perfis utilizados encontra-se ilustrada na Fig. 6.2, e os respectivos contornos espelham a interpretação pericial acerca dos limites: continuidade espacial das formações, presença de falhas, etc.. Para cada par de perfis adjacentes, é necessário a identificação de pontos ou troços homólogos que devem estar concordantes com o conhecimento geológico da região. Esta etapa encontra-se ilustrada na Fig. 6.8.

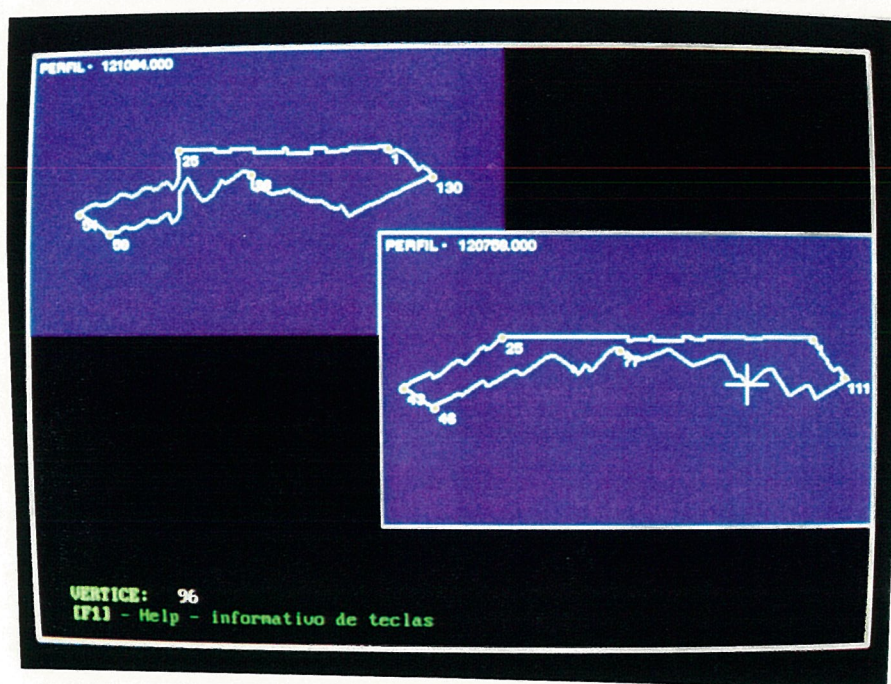


Fig. 6.8 - Programa TRIARA - identificação de pontos homólogos entre os perfis II e III de mármore claros.

O processo de construção deste modelo condiciona fortemente o volume estimado para as diversas formações. Assim, na modelagem tridimensional, a identificação destes vértices homólogos constitui um ponto crucial da metodologia utilizada, devendo incorporar todo o conhecimento pericial disponível, de índole naturalista.

Uma vez identificados os vértices homólogos entre os perfis disponíveis, o modelo tridimensional é construído por interpolação linear entre perfis (uma vez que não existe, neste caso, nenhum factor que justifique a utilização de interpolação não linear). As Fig. 6.9 e 6.10 ilustram os modelos de arame obtidos, respectivamente, para as formações de mármore claros e cinzentos.

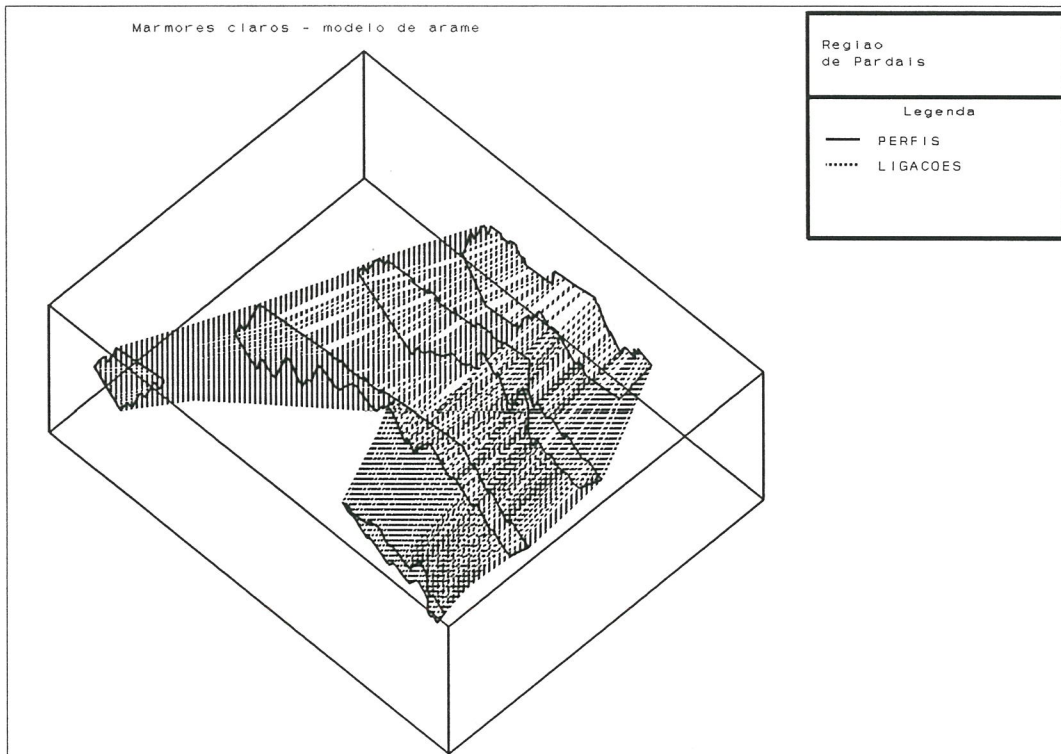


Fig. 6.9 - Modelo de arame dos mármore claro.

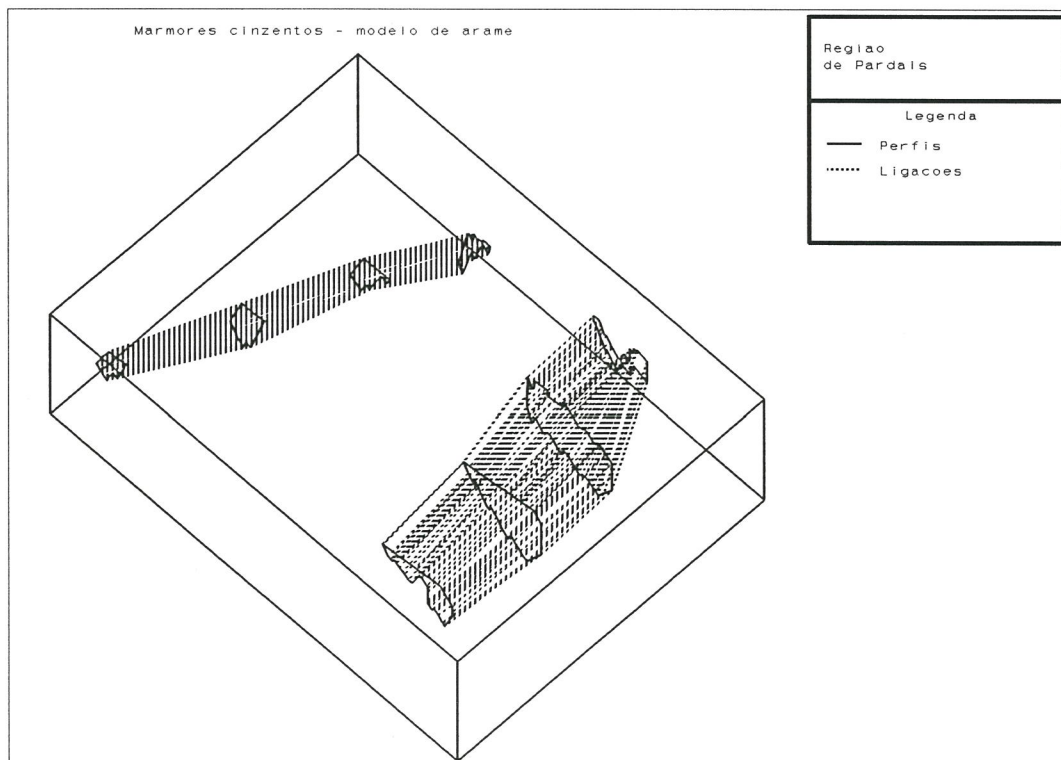


Fig. 6.10 - Modelo de arame dos mármore cinzento.

A construção dos modelos de arame exige sempre uma validação dos mesmos. Esta fase é realizada por visualização e por comparação com a informação de partida. A visualização dos modelos, dada a complexidade de interpretação da representação dos modelos de arame, pode ser efectuada através de planos de intersecção. Nas Fig. 6.11 e 6.12 ilustram-se um conjunto de secções paralelas, efectuadas sobre o modelo da formação de mármore claros, observados de um ângulo diferente.

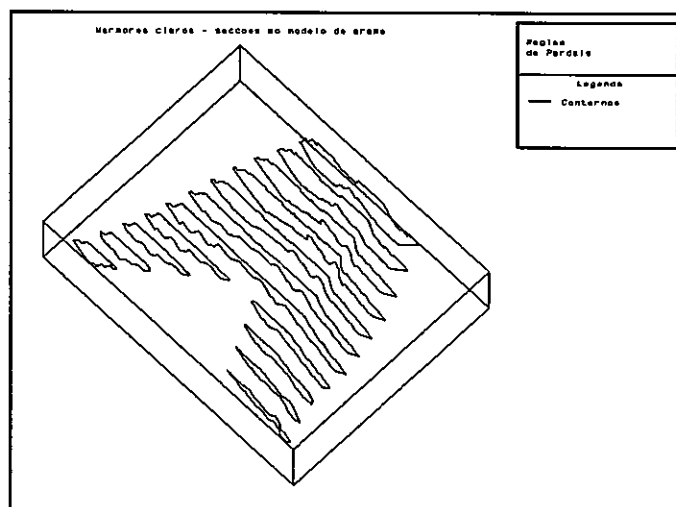


Fig. 6.11 - Conjunto de secções sobre o modelo de arame.

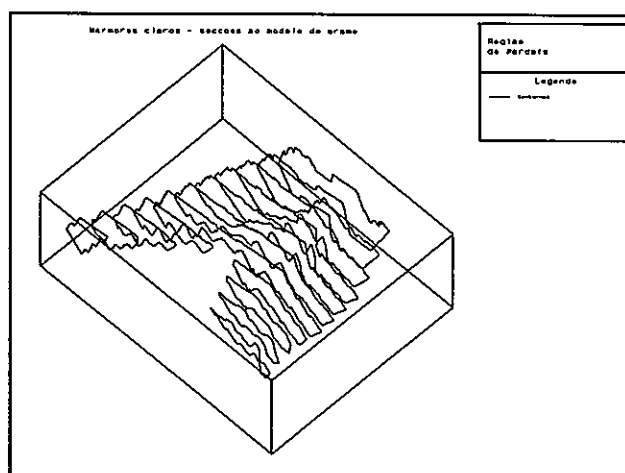


Fig. 6.12 - Conjunto de secções sobre o modelo de arame.

Uma vez construídos os modelos, é possível a determinação dos respectivos volumes. Note-se, no entanto, que esta metodologia, na medida em que se baseia num modelo geométrico determinista, não permite quantificar o erro associado ao valor estimado para o volume.

6.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO ESTOCÁSTICO - MORFOLOGIA GEOESTATÍSTICA

A utilização da metodologia geoestatística de estimação morfológica, nesta aplicação, tem como objectivo a elaboração de um mapa de probabilidades que caracterize o grau de pertença de um ponto a uma determinada formação litológica. Concretamente, recorreu-se neste estudo, à estimação multifásica por krigagem morfológica (descrita do capítulo 5), utilizando um modelo de contiguidade estrutural média global, que permite a estimação de uma variável indicatriz codificada em n fases. A implementação desta metodologia nesta aplicação específica envolve, sucintamente, as seguintes etapas:

.Definição de um conjunto de P fases associadas às formações em estudo;

.Construção de um vector de P valores de indicatriz multifásica para cada ponto onde se conhece a formação litológica presente nas N amostras experimentais;

$$K_l(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \in X_l \\ 0 & \text{se } x_i \notin X_l \end{cases}$$

em que:

X_l ($l=1, \dots, P$) - Uma dada fase de A

.Análise estrutural de contiguidade das fases escolhidas, por variografia multifásica e ajustamento de um modelo teórico de variograma aos valores médios dos variogramas experimentais;

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^P E [(K_l(x) - K_l(x+h))^2]$$

.Estimação, por krigagem morfológica, da probabilidade de cada ponto (de uma malha regular) pertencer a uma dada fase;

$$[K_l(x)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} K_l(x_{\alpha}) \quad (l=1, \dots, P)$$

.Transformação dos valores de probabilidade estimados a uma variável dicotómica (ver capítulo 5, pág. 83).

.Elaboração de um mapa cromático dos valores da variável indicatriz estimados para cada uma das diferentes formações litológicas (fases) e elaboração de mapas ilustrando as zonas de maior incerteza;

As formações litológicas identificadas nas sondagens foram divididas em quatro fases. Esta divisão reflete o interesse relativo das formações em estudo, agrupando na fase 4 todas as formações que não são de mármore. Cada fase inclui as seguintes formações:

.Fase 1 - Mármore cinzento;

.Fase 2 - Mármore rosa;

.Fase 3 - Mármore branco;

.Fase 4 - Restantes formações: zonas de transição, metavulcanitos, dolomias, xistos, etc..

Construiu-se um vector de valores codificados em "1" e "0", provenientes da informação litológica retirada das doze sondagens e da superfície (na direcção dos perfis), de acordo com a divisão em fases efectuada. As formações litológicas atravessadas, conhecidas pela coordenada inicial e final de cada troço, foram regularizadas para pontos localizados de metro a metro.

O conjunto de amostras provenientes de sondagens e da superfície encontra-se alinhado segundo quatro direcções (Fig. 6.13): i) azimute 90° e inclinação 55° ; ii) azimute 0° e inclinação 90° ; iii) azimute 270° e inclinação 55° ; iv) azimute 90° e inclinação 0° (superfície);

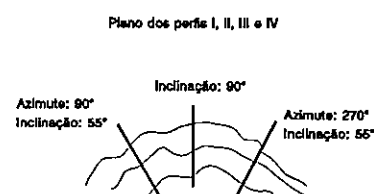


Fig. 6.13 - Orientação das sondagens.

As tabelas seguintes resumem os estatísticos dos dados de base da variável indicatriz multifásica:

Estatísticos		Direcção			
		Azimute: 270° Inclinação: 55°	Azimute: 0° Inclinação: 90°	Azimute: 90° Inclinação: 55°	Azimute: 90° Inclinação: 0°
Lista de sondagens ou perfis		SD1, SD4, SD7, SD10	SD2, SD5, SD7A, SD8	SD3, SD6, SD9, SD11	Perfis I, II, III e IV
Nº de amostras		1028	848	1287	4345
Média de valores de indicatriz	Fase 1	0.222	0.204	0.460	0.260
	Fase 2	0.116	0.059	0.045	0.035
	Fase 3	0.344	0.483	0.223	0.335
	Fase 4	0.318	0.254	0.272	0.370
	Mult.	0.250	0.250	0.250	0.250
Variância de valores de indicatriz	Fase 1	0.173	0.162	0.248	0.193
	Fase 2	0.102	0.055	0.043	0.034
	Fase 3	0.226	0.250	0.173	0.223
	Fase 4	0.217	0.189	0.198	0.233
	Mult.	0.179	0.164	0.166	0.171

FASES	Média	Variância
Fase 1	0.246	0.186
Fase 2	0.084	0.077
Fase 3	0.383	0.236
Fase 4	0.287	0.204
Multifase	0.250	0.176

A média multifásica é calculada a partir de:

$$m_K = \sum_{l=1}^P E \{K_l(x)\}$$

e a variância multifásica é calculada a partir de:

$$var_K = \sum_{i=1}^P E \{K_i(x) - m_K\}$$

Utilizando os valores de indicatriz, calcularam-se os variogramas experimentais para cinco direcções, das quais três se definem pelo alinhamento médio das sondagens e as outras são perpendiculares às sondagens que se encontram nos flancos do anticlinal. Estas últimas, são supostamente as direcções de maior continuidade das formações, dado que as sondagens de flanco atravessam, perpendicularmente, grande parte das formações litológicas.

A cada um dos variogramas experimentais foi ajustado um modelo teórico de tipo esférico, com duas estruturas, e apresentando os seguintes parâmetros:

Direcção - Parâmetros	Direcções perpendiculares às sondagens de flanco	Sondagens verticais Inclinação: 90°	Sondagens de flanco Azimute: 90° Inclinação: 60°	Sondagens de flanco Azimute: 270° Inclinação: 60°
C ₀	0.050	0.050	0.050	0.050
C ₁	0.080	0.080	0.080	0.080
C ₂	0.046	0.046	0.046	0.046
a ₁	65	65	65	65
a ₂	250	160	160	160

O respectivo elipsóide de anisotropias é ilustrado na Fig. 6.14, onde se pode observar que a direcção de maior amplitude é paralela à orientação média das camadas e a direcção de menor amplitude é perpendicular a esta.

Os variogramas experimentais e o andamento do modelo teórico ajustado encontra-se representado nas Fig. 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18 para as direcções consideradas.

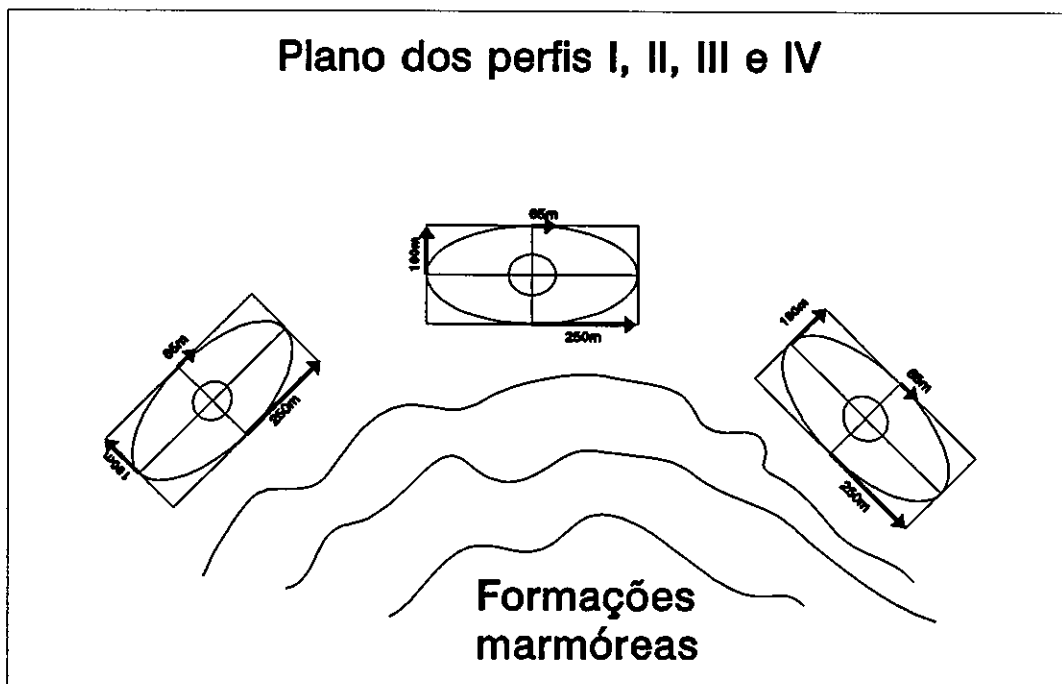


FIG. 6.14 - Elipsóide de anisotropia.

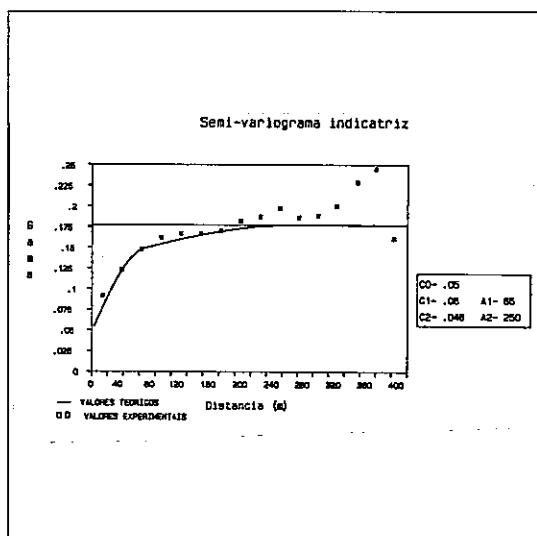


Fig. 6.15 - Direcção perpendicular às sondagens de flanco.

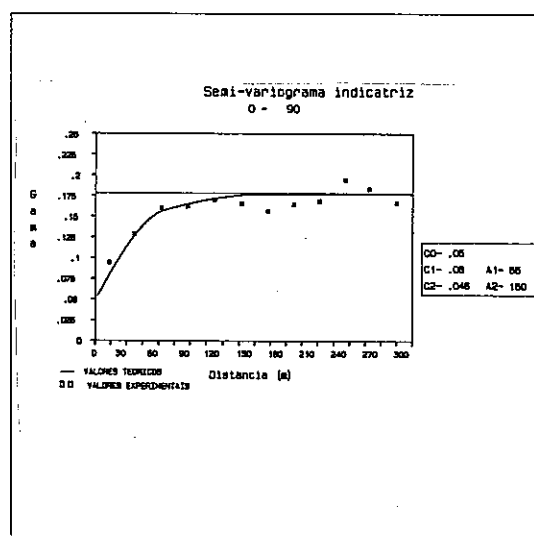


Fig. 6.16 - Direcção vertical.

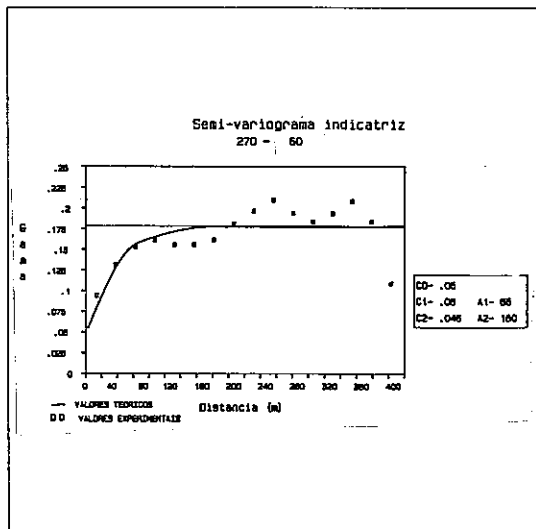


Fig. 6.17 - Direcção das sondagens de flanco.

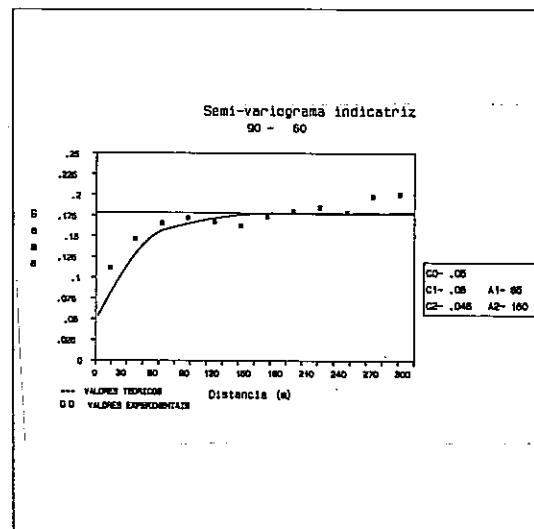


Fig. 6.18 - Direcção das sondagens de flanco.

Foi ajustado um modelo global de tipo esférico, tendo por base, os parâmetros da direcção perpendicular às sondagens de flanco, e evidenciando duas estruturas, uma isotrópica e outra com uma relação de anisotropia de $250:160 = 1.563$.

Recorrendo a este modelo teórico de variograma, foi estimada a forma de cada uma das formações em cada perfil (perfis onde se localizam as sondagens), utilizando, para a estimação de cada perfil, às amostras provenientes das respectivas sondagens.

A estimação foi realizada por krigagem morfológica, o que permite efectuar rotações locais do elipsóide de anisotropias do variograma. Trata-se de uma aplicação que, pelas suas características, nomeadamente os dobramentos evidenciados pelas formações, tornam a estimação por krigagem morfológica o processo mais adequado para integrar a informação sobre a orientação das camadas. A informação adicional, necessária para a utilização deste tipo de estimação, consiste nos ângulos que as camadas fazem no contacto com as sondagens, valores esses que foram retirados dos desenhos dos perfis efectuados pelos geólogos da D.G.G.M. e da Universidade de Évora.

Depois de estimados os valores de probabilidade em cada ponto, estes são convertidos a uma variável indicatriz multifásica.

Na Fig. 6.19 ilustram-se os valores obtidos para os perfis I e II.

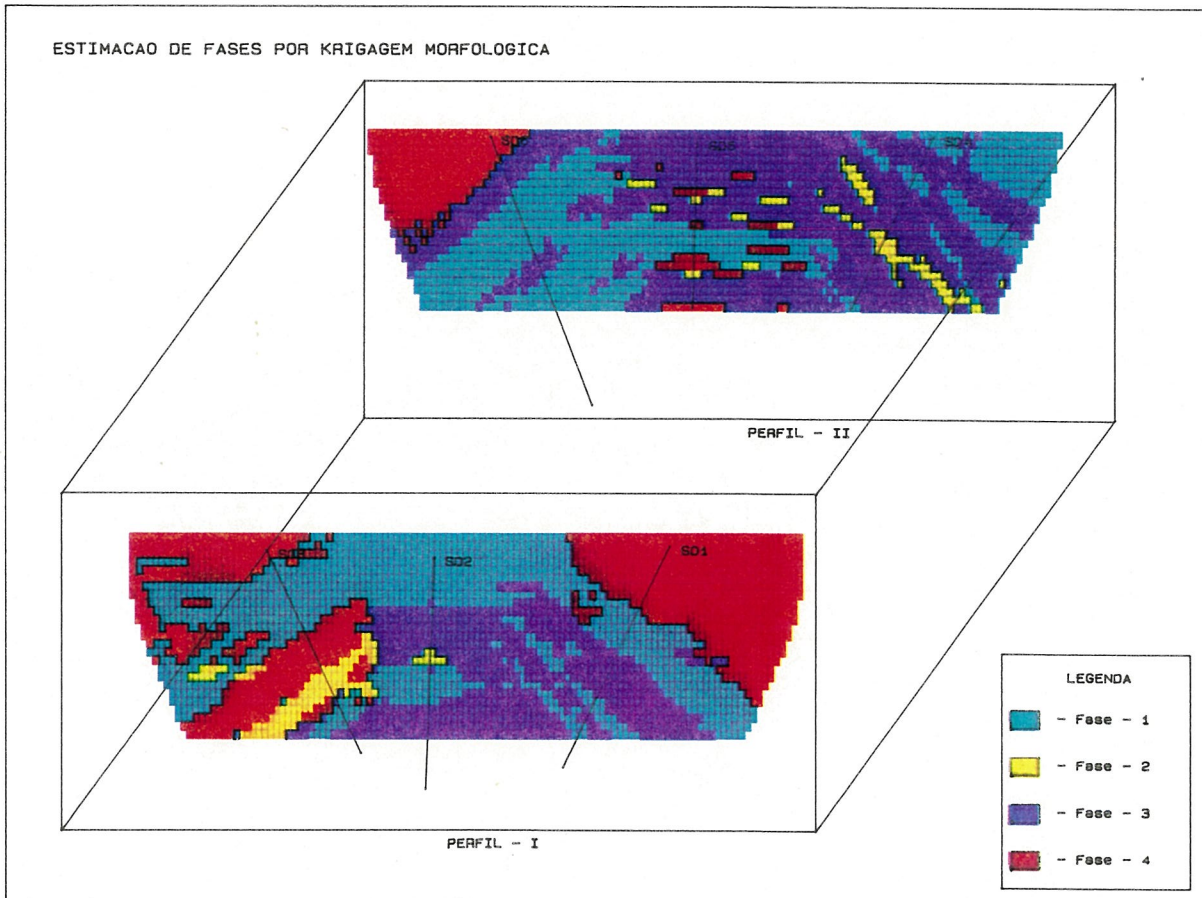


Fig. 6.19 - Mapa de fases estimadas nos perfis I e II.

Uma das vantagens referidas na descrição deste processo (capítulo 5), foi a possibilidade de elaboração de mapas ilustrando as zonas estimadas de maior incerteza da forma. Na Fig. 6.20, apresenta-se para o conjunto das quatro fases estimadas, os pontos com maior probabilidade de terem sido mal classificados (20% maiores) - zonas de maior incerteza morfológica, nos perfis I e II.

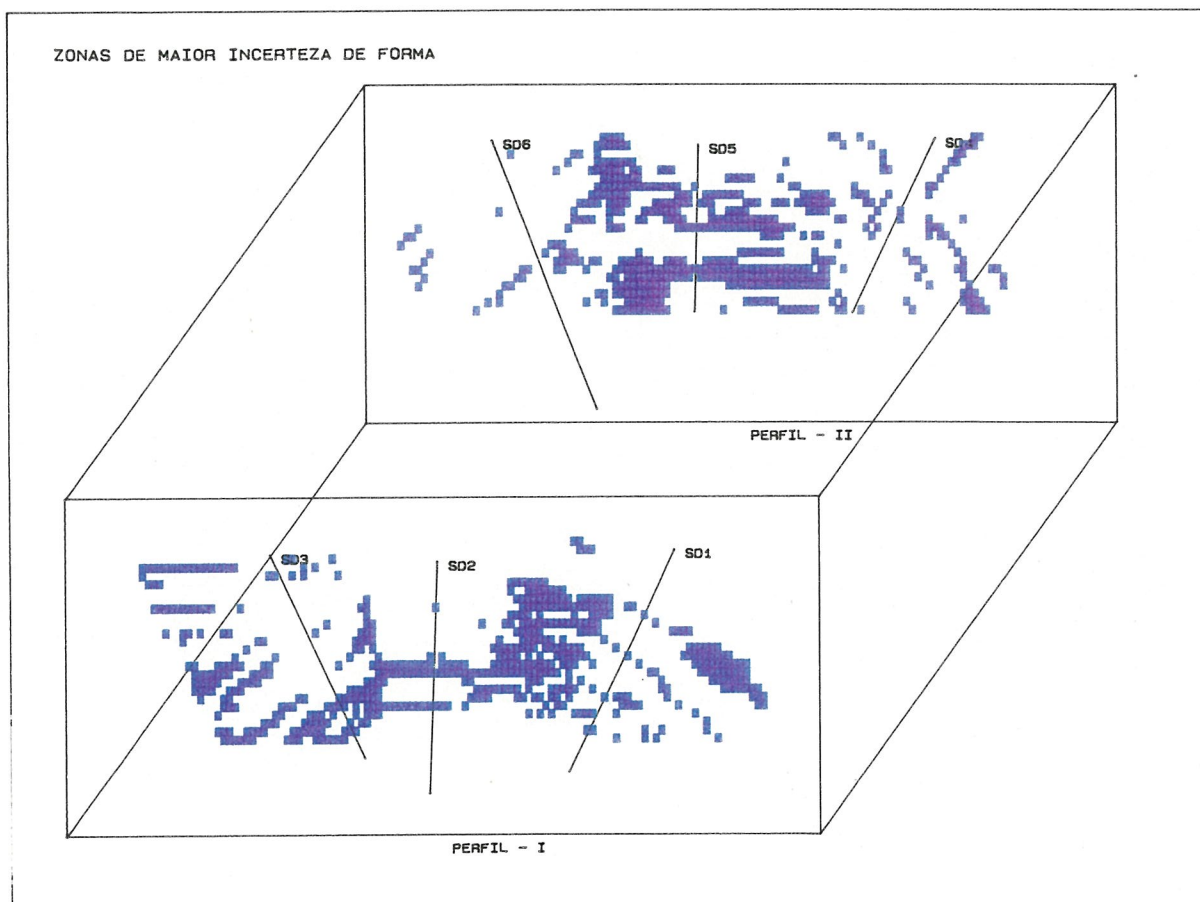


Fig. 6.20 - Mapa de zonas de maior incerteza morfológica nos perfis I e II.

6.6 CONCLUSÕES DESTE ESTUDO

Este estudo permite comparar duas metodologias distintas de caracterização de forma.

No primeiro caso a construção de um modelo de arame a partir da informação sobre os contornos das formações em perfis, com base em sondagens, na superfície e em informação de carácter pericial e naturalista, torna o modelo completamente dependente deste tipo de informação subjectiva. Este tipo de modelo, pela sua natureza, não fornece qualquer quantificação dos erros envolvidos na estimação de grandezas características, tais como o volume. Trata-se contudo de um modelo de fácil construção e manuseamento desde que se recorra, no caso de grande complexidade das formações, a simplificações importantes, tal como acontece neste exemplo.

No caso do modelo geoestatístico, a sua construção permite a integração de informação mais diversa (por exemplo, a orientação das camadas nos pontos experimentais) e detalhada, possibilitando também a localização das zonas estimadas de maior incerteza morfológica. Note-se que este modelo pode ser significativamente melhorado se na estimação multifásica se incluir a informação de superfície, nomeadamente, a orientação das camadas.

7. MODELAGEM DAS CÂMARAS DE DESMONTE DA MINA DE ALJUSTREL

7. MODELAGEM DAS CÂMARAS DE DESMONTE DA MINA DE ALJUSTREL

7.1 INTRODUÇÃO

O depósito de sulfuretos complexos de Aljustrel é um dos maciços constituintes da faixa piritosa Ibérica, localizando-se a Sul de Portugal, no Alentejo, perto da povoação de Aljustrel. Os concentrados a obter por flutuação são de cobre, zinco e chumbo.

Por forma a dotar a mina de Aljustrel de um sistema de planeamento da exploração e do processamento mineralúrgico (Muge *et al*, 1992), encontra-se em desenvolvimento e implementação uma metodologia adequada, no âmbito do projecto comunitário CAPUME II. No que concerne ao planeamento da exploração a curto e médio prazos a metodologia envolve a modelagem geométrica e numérica dos desmontes e o subsequente planeamento temporal das sequências de desmonte de modo a atingirem-se objectivos de produção de concentrados, previamente fixados.

Na exploração do jazigo são utilizados dois métodos de desmonte:

- i) O método "*sub-level stopping*", também conhecido por "*long wall*", em zonas cujas características geomecânicas permitem o desenvolvimento de grandes câmaras de desmonte (Fig. 7.1 e 7.2);
- ii) O método "*cut-and-fill*", na variante de corte ascendente com enchimento hidráulico, para desmonte de massas com piores características geomecânicas e/ou maiores exigências de selectividade.

Seguidamente, descreve-se a implementação de metodologias, expostas em capítulos anteriores para a modelagem geométrica e numérica das câmaras de desmonte no método "*long wall*", actualmente em curso na mina de Aljustrel.

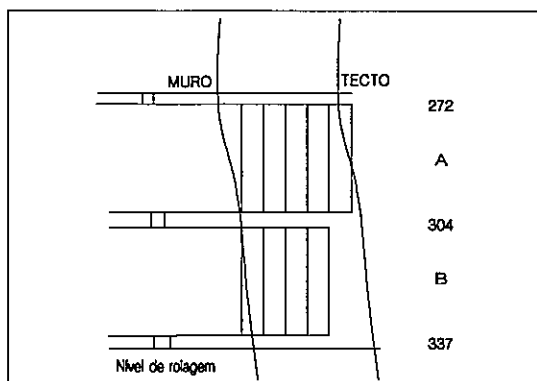


Fig 7.1 - Ilustração do método de desmonte "long wall" - secção longitudinal do jazigo.

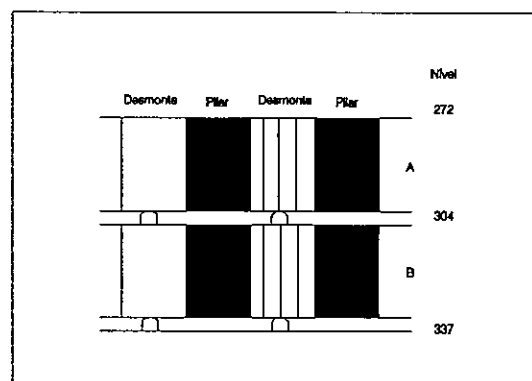


Fig 7.2 - Ilustração do método de desmonte "long wall" - secção transversal do jazigo.

7.2 METODOLOGIAS DE MODELAGEM

As metodologias de modelagem das câmaras de desmonte de Aljustrel assentam num conjunto de bases de dados e num conjunto de programas de gestão das bases e de modelagem propriamente dita.

A modelagem dos desmontes compreende a construção de um modelo geométrico e de um modelo numérico. Com o modelo geométrico pretende-se obter uma estimativa da forma dos volumes a desmontar e das respectivas tonelagens de minério. O modelo numérico corresponde aos estimadores dos teores dos elementos de controlo de qualidade, sobre uma partição de blocos previamente estabelecida. Efectuando o cruzamento dos dois modelos é possível estimar, no "tal qual", a quantidade de cada um dos elementos de controlo de qualidade em cada câmara de desmonte e em cada pega de fogo.

A modelagem geométrica e a modelagem numérica das câmaras de desmonte utiliza em conjunto três bases de dados: a base de dados de furos, a base de dados geométrica, onde são arquivados os contornos das câmaras, e a base de dados para arquivo do modelo numérico de teores.

A informação de base consiste nos contornos limites das câmaras, na posição dos furos efectuados ao longo das diferentes fiadas de rebentamento e em cinco teores analisados sobre amostras retiradas dos furos de rebentamento. Estes furos são feitos ao longo de fiadas, cujo rebentamento permite o arranque de fatias da massa mineralizada, que posteriormente são transportadas a partir da base das câmaras, no nível de rolagem. Cada furo, encontra-se referenciado em relação ao piso da mina (por exemplo: Piso 272), à câmara de desmonte (por exemplo: Câmara 6), à fiada de furos numa câmara (por exemplo: fiada 2) e em cada fiada a um índice de posição (por exemplo: furo B). Estes, em conjunto permitem codificar os furos; por exemplo o furo de código 272-6-B2 é o

segundo furo da segunda fiada da câmara 6 do piso 272. Para além deste código, cada furo encontra-se ainda referenciado pelas coordenadas da boca e do fundo do furo, ao sistema de coordenadas utilizado na mina.

Em todos os furos e em cada troço de amostragem (amostragem regular em troços de dois metros), são determinados os teores em cobre, chumbo, zinco, prata e insolúvel, sendo cada amostra constituída pelas lamas da furação do respectivo troço.

A informação disponível e utilizada para a construção dos modelos (modelo numérico de teores de blocos e modelos geométricos) é armazenada na base de dados de furos. Adicionalmente a esta informação, são ainda utilizados dados referentes aos contornos finais das câmaras de desmonte, tanto da base como do tecto, armazenados na base de dados geométrica.

A geometria dos desmontes é estimada através de modelos de arame das câmaras de desmonte, a partir de informação relativa aos contornos do tecto e do piso das câmaras, e à posição dos furos e fiadas de rebentamento. Esta informação encontra-se arquivada na base de dados dos furos e na base de dados geométrica. A modelagem geométrica das câmaras envolve, sucintamente, as seguintes etapas:

- i) Importação, da base de dados dos furos, das coordenadas da "boca" e do fundo dos furos, para a base de dados geométrica;
- ii) Construção dos modelos das linhas poligonais correspondentes às fiadas de furos no topo e na base de cada câmara;
- iii) Digitalização dos contornos do topo e da base da câmara;
- iv) Construção de um conjunto de polígonos correspondentes aos limites do topo e da base da câmara e aos limites definidos pelas fiadas dos furos;
- v) Construção dos modelos de arame da câmara e das fiadas de desmonte;

Os resultados das diferentes operações de modelagem são arquivados na base de dados geométrica.

Na construção do modelo numérico de teores é retirada, da base de dados de furos, informação dos seguintes campos: coordenadas da "boca" e do fundo dos furos, número de amostras, suporte e atributos (teores) das amostras. O acesso aos valores da base é feito pesquisando, previamente, os campos piso e câmara. A sequência de procedimentos inclui a inicialização de uma malha de blocos (posicionamento da malha de blocos sobre o modelo geométrico da câmara de desmonte e a escolha da dimensão e número de blocos constituintes do modelo), a estimação dos cinco teores pretendidos e a visualização gráfica e numérica dos valores estimados.

A fase final da metodologia corresponde à estimação de volumes e/ou tonelagens de minério, expressa em "tal qual" ou no conteúdo em metal, a obter no arranque de fiadas de desmonte e/ou de uma câmara. Para tal procede-se à intersecção, segundo critério adequado, do modelo geométrico com o modelo numérico de teores. Na Fig. 7.3 apresenta-se um esquema geral da metodologia proposta.

7.3 DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO "SOFTWARE"

O conjunto de programas desenvolvidos utiliza três bases de dados BDMIN, de tipos diferentes, para arquivo e gestão da informação envolvida nas diferentes etapas de modelagem: uma base de dados para os furos, uma base de dados para os modelos geométricos das câmaras de desmonte e uma base de dados para os modelos numéricos de teores de blocos dispostos em malha regular.

O "software" compreende dois grupos de programas: i) um sistema de gestão de uma base de dados de furos para edição/actualização de furos e respectivas amostras; ii) um sistema integrado de modelagem geométrica e numérica das câmaras de desmonte, que permite modelar interactivamente a forma das câmaras, efectuar estimações de teores em blocos, visualizar os teores estimados e estimar tonelagens a desmontar. Nos programas, desenvolvidos em linguagem C (Versão Microsoft 6.0), recorre-se a bibliotecas de primitivas gráficas e de "menus", à biblioteca de primitivas de base de dados - BDMIN (descrita no capítulo 2), e às funções que implementam primitivas geométricas de modelagem em modo vectorial -OBJLIB (descrita no capítulo 3) e em modo "raster" - GRIDDLIB (descrita no capítulo 4).

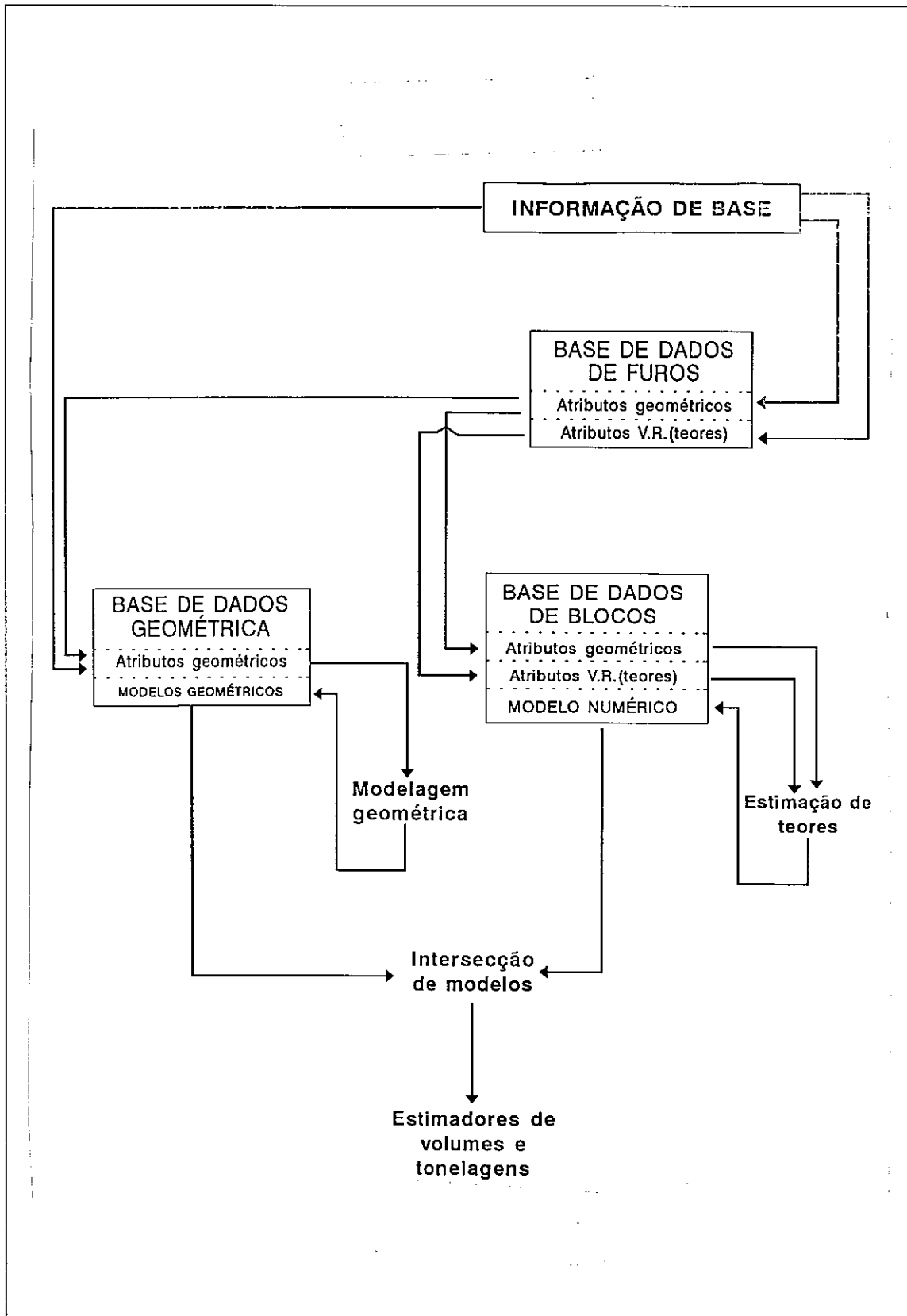


Fig. 7.3 - Diagrama geral da metodologia proposta.

7.3.1 BASE DE DADOS DE FUROS

Trata-se de uma base de dados com estrutura hierárquica constituída por um ficheiro para arquivo de atributos dos furos e um ficheiro para arquivo de atributos das amostras. A ligação entre estes dois ficheiros é assegurada por um ficheiro de apontadores. Trata-se de uma base de dados de tipo C, conforme descrição da base de dados BDMIN (capítulo 2).

A opção por este tipo de base deve-se ao suporte da informação: o suporte de cada amostra é um segmento de recta, tendo cada furo como suporte da informação um conjunto de segmentos de recta, referentes às respectivas amostras.

O sistema de gestão da base de dados de furos permite a realização de diversas funções como, por exemplo, edição de novos furos ou amostras, consulta e listagem em impressora de registos, alteração e eliminação de registos, importação e exportação de certos registos a partir de ficheiros ASCII. Para aceder aos registos dos furos foi construída uma chave de pesquisa à qual foram alocados os seguintes campos do ficheiro de atributos dos furos: piso, câmara, furo, fiada, nome do operador e data de lançamento (dia, mês e ano).

.Estruturas dos ficheiros

Os ficheiros compreendem os seguintes registos:

a) Ficheiro de atributos de furos:

.Número total de furos, ano, mês e dia de edição dos furos na base;

.Coordenadas X, Y e Z da boca e do fundo do furo;

.Piso onde se localiza o furo, câmara a que respeita o furo, índice de fiada (número de 1 a ...), índice do furo (caracter de A a ...), nome do operador que efectuou o lançamento do furo;

b) Ficheiro de atributos de amostras:

.Teores em cobre, chumbo, zinco, prata e insolúvel.

.Sistema de gestão da base de dados de furos

O sistema de gestão compreende os seguintes oito módulos, geridos a partir de um "menu" principal:

a) Edição de novos furos - permite a edição da informação total ou parcial dos furos. Se o lançamento de valores de um furo foi parcial, os campos que se encontram incompletos podem ser posteriormente preenchidos no módulo de alteração de valores.

b) Importação a partir de um ficheiro em ASCII - introdução de informação que se encontra em dois ficheiros ASCII, respectivamente, de atributos de furos e de atributos de amostras.

c) Exportação para um ficheiro em ASCII - construção de um ficheiro ASCII com os registos de todos ou de alguns furos (seleccionados recorrendo à chave de pesquisa), e transferência para outros programas, nomeadamente, de estimação geoestatística ou de representação gráfica.

d) Pesquisa de registos - consulta de registos em visor recorrendo a uma chave de pesquisa;

e) Listagem de registos - consulta de registos de furos em visor e impressão utilizando uma chave de pesquisa. Permite também o cálculo de teores médios por furo e por conjunto de furos que obedeçam à chave de pesquisa (por exemplo, cálculo de médias de teores numa fiada de uma câmara).

f) Alteração de valores - permite a correcção de atributos dos furos ou das amostras, bem como a introdução de informação complementar. O acesso aos registos, cujos atributos se deseja alterar ou introduzir, é feito recorrendo a uma chave de pesquisa.

g) Eliminação de registos - eliminação temporária de registos, que deixam de estar acessíveis aos outros módulos. Tais registos podem ser recuperados com este módulo desde que não se utilize o módulo de formatação de ficheiros e a opção de reformatação dos ficheiros da base.

h) Formatação de ficheiros e "backup" - formatação dos ficheiros da base ou seja limpeza de registos apagados e uma nova escrita sequencial dos registos, eliminando os vazios correspondentes aos registos apagados; "backups" e recuperação da base de dados para outro directório ou unidade de "disquette".

7.3.2 BASE DE DADOS DOS MODELOS GEOMÉTRICOS

Para arquivo de modelos geométricos, foi desenvolvida uma base de dados de tipo E com uma estrutura duplamente hierárquica constituída por um ficheiro para arquivo de atributos de vértices, um ficheiro para arquivo de atributos de linhas poligonais e um ficheiro para arquivo de atributos de objectos (modelos). A ligação entre os três ficheiros é assegurada por dois ficheiros de apontadores.

.Estrutura dos ficheiros

a) Ficheiro de atributos de objectos:

.Código de tipo de objecto (0 a 7);

.Nome do objecto. Permite a identificação das características do objecto armazenado, em que as possibilidades são: posição dos furos ("FURO"), linha poligonal que define uma fiada de furos ("FIAD"), contorno 2D da câmara de desmonte ("CONT") e modelo 3D do desmonte ("DS3D");

b) Ficheiro de atributos de linhas poligonais:

.Código de cor e código de tipo de linha (atributos gráficos);

.Código indicativo de furo e fiada;

c) Ficheiro de atributos de vértices:

.Código utilizado em alguns algoritmos de modelagem e coordenadas X, Y e Z;

7.3.3 BASE DE DADOS DO MODELO DE BLOCOS

Para arquivo dos teores estimados dos blocos dispostos em malha regular (modelo numérico de teores), desenvolveu-se uma base de dados BDMIN de tipo G.

.Estrutura dos ficheiros

a) Ficheiro de atributos dos blocos:

.Código utilizado nos algoritmos de modelagem;

.Teores estimados de cobre, chumbo, zinco, prata e insolúvel;

7.3.4 MODELAGEM DAS CÂMARAS DE DESMONTE

7.3.4.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA

O programa que implementa as operações de modelagem geométrica das câmaras, é constituído por dois conjuntos de "*menus*". No primeiro conjunto, selecciona-se a zona da mina que se pretende modelar e o modo de operação, nomeadamente:

a) Selecção do piso e câmara do desmonte a modelar, permitindo assim o acesso às bases de dados específicas de um determinado desmonte;

b) Importação, da base de dados dos furos, das coordenadas do início e do fim dos furos. Na Fig. 7.4, ilustra-se a localização dos furos, em planta, importados de uma base de dados de furos referente a uma câmara de desmonte;

c) Escolha do plano coordenado (XoY, YoZ ou XoZ) de projecção dos desenhos;

d) Escolha das coordenadas mínimas e máximas da janela de desenho dos desmontes (calculadas por defeito, em função dos objectos arquivados numa base de dados geométrica);

e) Opção de digitalização por teclas ou mesa digitalizadora. Em caso de opção por mesa digitalizadora é necessário a introdução da dimensão da mesa em coordenadas de mesa e a digitalização de dois vértices de coordenadas conhecidas do mapa e situados ao longo do mesmo eixo coordenado. Estes pontos permitem efectuar a conversão da escala do desenho para coordenadas da mesa e a determinação do ângulo que os eixos coordenados do mapa fazem com os eixos coordenados da mesa;

f) Funções de modelagem - opção que activa o segundo conjunto de "*menus*", que dispõe das seguintes opções:

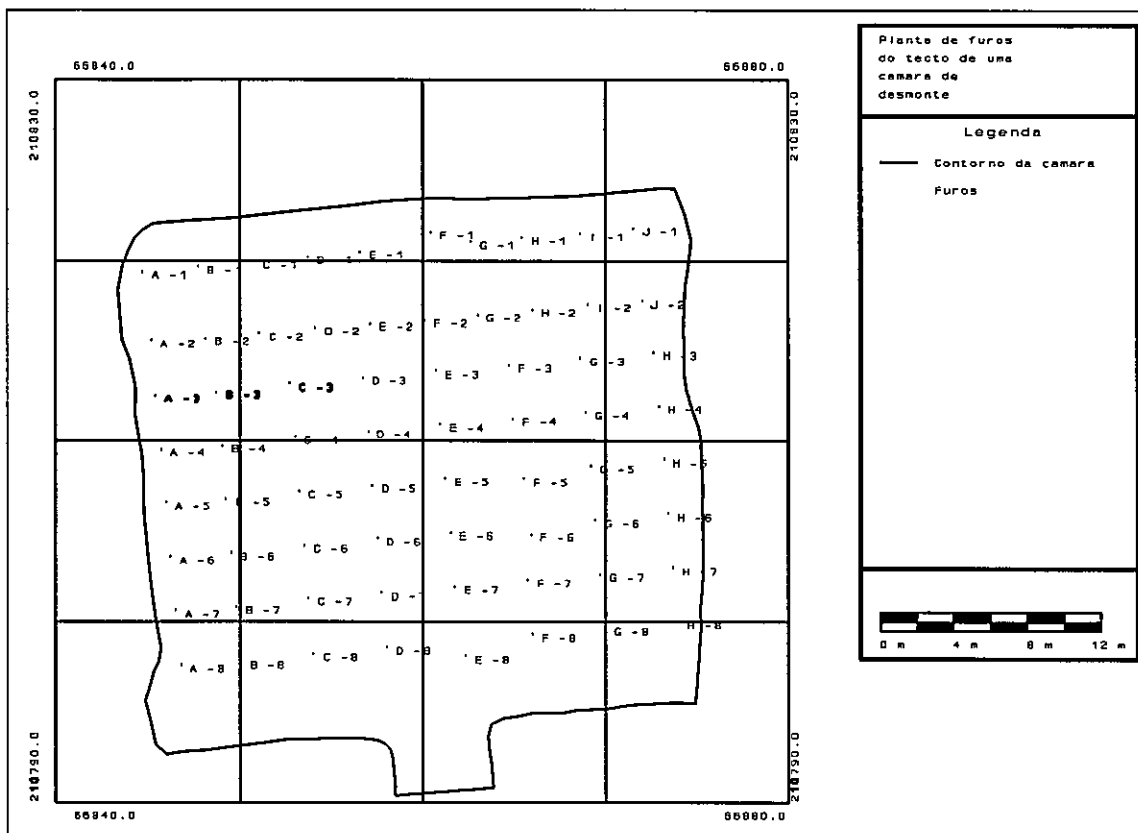


Fig. 7.4 - Planta de furos de uma câmara de desmonte.

- i) Sobreposição dos desenhos dos desmontes com uma malha de blocos já inicializada;
- ii) Plano coordenado (XoY, YoZ ou XoZ) de projecção dos desenhos;
- iii) Opção de "zoom" e anulação de "zoom" com reposição dos desenhos;
- iv) Modelagem de desmontes, que dispõe do seguinte conjunto específico de operações:
 - I) Edição - permite a digitalização de um contorno aberto ou fechado, utilizando as teclas direccionais ou o rato da mesa digitalizadora, inserir ou mover pontos num contorno, apagar um contorno, divisão de um determinado contorno em contornos mais pequenos, fechar um contorno, adição de contornos e rotação de objectos em torno do eixo Z.
 - II) Construção de fiadas - ligação por segmentos de recta dos vértices correspondentes à localização dos furos, de modo a formar as fiadas no topo e na base dos desmontes;

III) Modelagem 3D - construção automática de modelos 3D a partir dos contornos das câmaras e dos contornos das fiadas (Fig. 7.5(a)). Este processo engloba a realização dos seguintes passos:

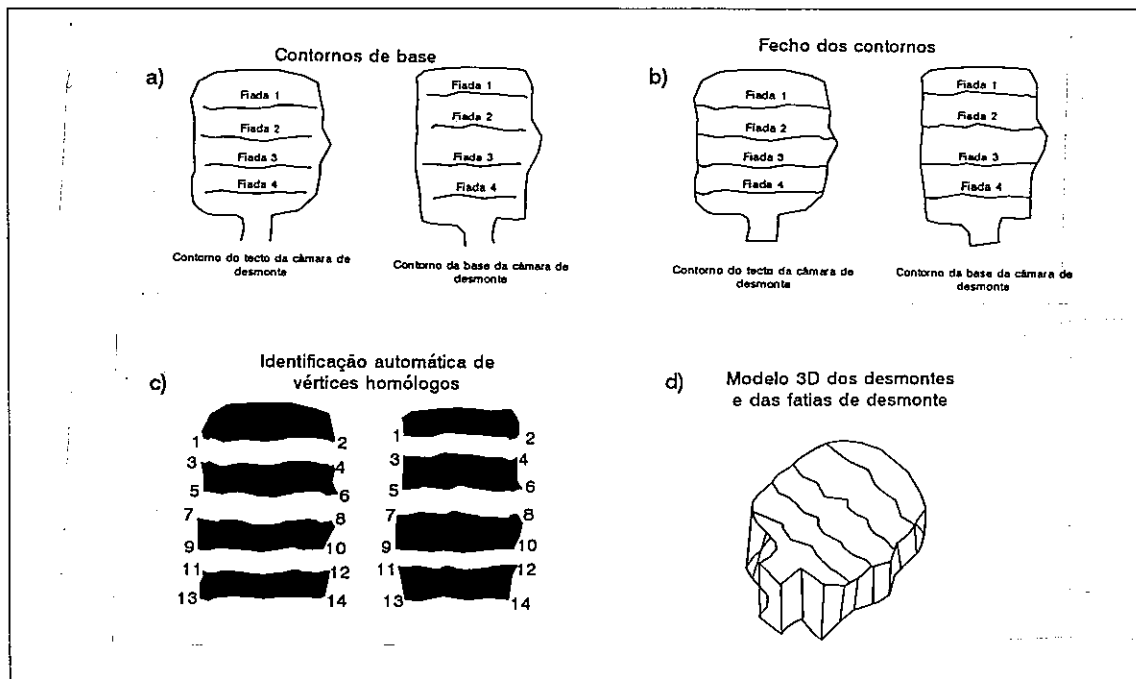


Fig. 7.5 - Etapas de construção do modelo 3D de um desmonte.

.Divisão do contorno da câmara de desmonte em pequenos contornos de acordo com as fiadas e fecho dos contornos de cada zona de desmonte (Fig. 7.5 - (b));

.Identificação automática de pontos homólogos nos contornos - pontos de intersecção entre as fiadas e os contornos dos desmontes (Fig. 7.5 - (c));

.Construção do modelo 3D de arame (na base de dados BDMIN um objecto de tipo 4), tendo por base os dois contornos superior e inferior do desmonte (Fig. 7.5 - (d)).

A modelagem 3D (alínea III) é efectuada de modo não automático, no caso de se pretender ensaiar a geometria de um desmonte a partir de dois contornos quaisquer, referentes, respectivamente, ao topo e à base do desmonte. Torna-se então necessário que o processo de identificação dos vértices homólogos seja manual. Esta opção adicional, permite, dados dois contornos fechados, a identificação de vértices homólogos e a construção do modelo com base nos dois contornos conhecidos.

Na Fig. 7.6 ilustra-se um modelo tridimensional de uma câmara de desmonte e na Fig. 7.7 o modelo tridimensional das fatias a desmontar delimitadas pelos furos.

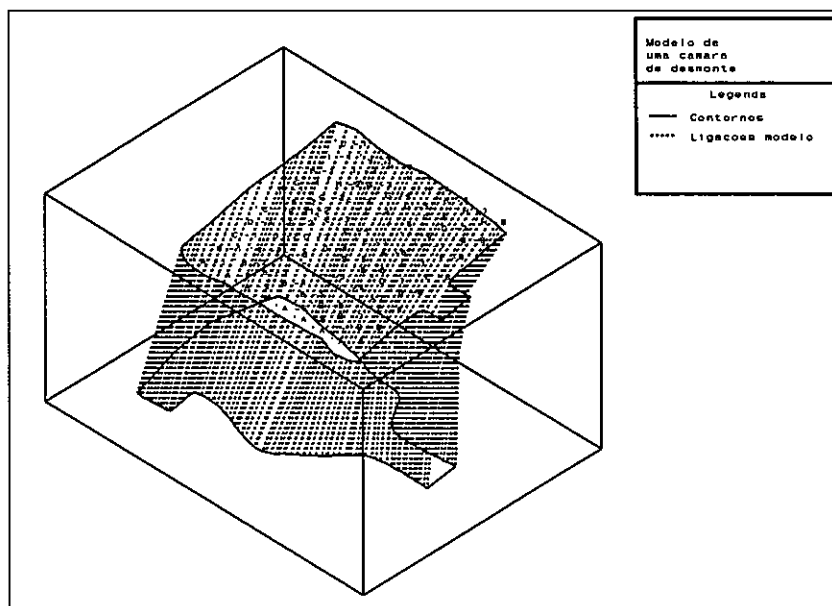


Fig. 7.6 - Modelo 3D de uma câmara de desmonte.

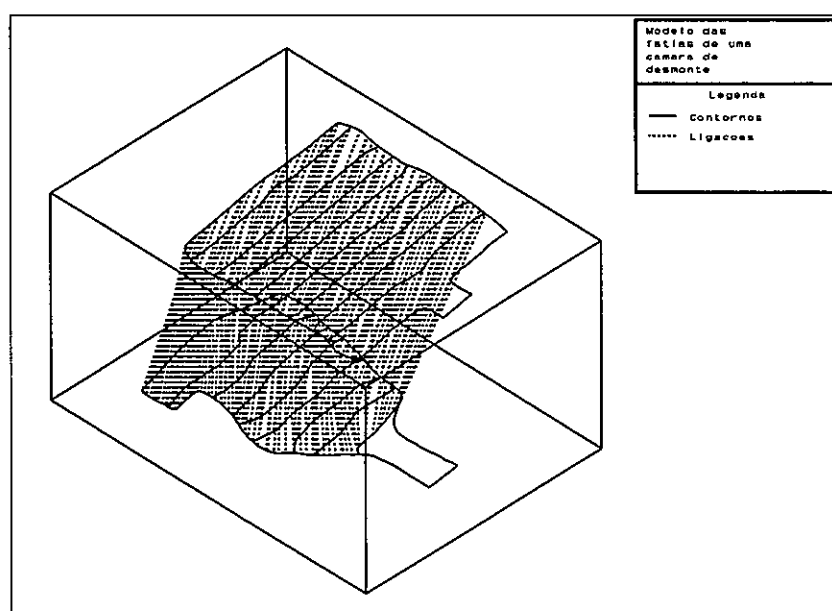


Fig. 7.7 - Modelo 3D das fatias a desmontar numa câmara de desmonte.

7.3.4.2 MODELAGEM NUMÉRICA

O "*software*" de modelagem numérica das câmaras compreende os seguintes módulos:

a) Inicialização de uma grelha de blocos - programa que permite escolher a posição geométrica e a dimensão de uma malha tridimensional de blocos que esteja contida nos limites geométricos dos modelos vectoriais das câmaras. O programa dispõe das funções gerais utilizadas no programa de digitalização, nomeadamente, escolha de planos coordenados de trabalho, de limites de coordenadas, "*zoom*" e a opção de escolha da posição da grelha de blocos. Esta pode ser seleccionada em modo texto (por escrita das coordenadas de um dos cantos, número de blocos em cada direcção e dimensões de cada bloco) ou em modo gráfico, com um cursor, que se movimenta sobre o desenho dos contornos dos modelos geométricos das câmaras, utilizando as teclas direccionais.

b) Estimação de teores - módulo completamente automático de estimação de teores de blocos com base na informação dos furos. Dada a grande densidade de informação disponível, a estimação resume-se ao cálculo de médias de teores das amostras dos furos em cada bloco. Para os blocos que contêm amostras no seu interior os teores são estimados pela média de teores calculados em blocos contíguos.

c) Importação e exportação de atributos - permite a importação de valores, a partir de um ficheiro em ASCII (por exemplo, teores estimados por outros métodos) para a base de dados dos blocos e a exportação de valores para um ficheiro ASCII que possa ser utilizado por outros programas (por exemplo para cálculo de estatísticos e curvas de parametrização - tonelagem/teor de corte, quantidade de metal/teor de corte e teor médio/teor de corte). Os ficheiros ASCII de importação e/ou exportação têm obrigatoriamente as coordenadas X,Y e Z do centro de cada bloco e adicionalmente, o(s) valor(es) do(s) teor(es) seleccionado(s).

d) Visualização - módulo de visualização dos blocos com o recurso a códigos de cor, em que cada cor corresponde a um intervalo de teores. É possível sobrepor num mesmo desenho as poligonais dos contornos das câmaras de modo a relacionar a distribuição de teores com a geometria dos desmontes. Durante a opção de visualização, o cursor pode percorrer os centros dos blocos, sendo escritos os valores dos teores estimados em cada bloco onde se encontra o cursor, permitindo a edição dos mesmos. É possível ainda seleccionar dois blocos alinhados segundo o mesmo eixo (linhas ou colunas), onde são calculados valores médios dos teores.

7.3.5 ESTIMAÇÃO DE VOLUMES E TONELAGENS

O programa de estimação de volumes, tonelagens e quantidades de metal recorre à base de dados geométrica das câmaras e à base de dados do modelo numérico de teores. Para cada modelo geométrico 3D é estimado o volume, a tonelagem de minério e a quantidade de metal no "tal qual", em cada um dos elementos.

A determinação do volume de um modelo geométrico 3D recorre ao algoritmo de estimação do volume de um objecto de tipo 4 da base BDMIN, descrito no capítulo 3. O cálculo da tonelagem de "tal qual" é imediato, conhecida a densidade do minério. O cálculo da tonelagem de cada um dos metais no "tal qual" recorre aos teores estimados e a volumes de ocupação de cada célula do modelo numérico ("*raster*") pelo modelo vectorial das câmaras de desmonte, utilizando alguns dos algoritmos descritos no capítulo 4 - expressões (4.1) e (4.2).

8. CONCLUSÕES

8. CONCLUSÕES

Com este trabalho alcançaram-se dois objectivos com níveis distintos de funcionalidade: i) um conjunto de metodologias de modelagem geométrica de corpos geológico-mineiros; ii) um conjunto de bases de dados e bibliotecas que permite ao utilizador construir modularmente o programa para a modelagem de cada corpo geológico-mineiro.

Os modelos apresentados para a caracterização geométrica de corpos geológico-mineiros são divididos, basicamente, em modelos vectoriais e modelos "*raster*".

Os modelos vectoriais assentam fundamentalmente nos sistemas de desenho assistido por computador - construção de formas básicas ou de modelos construtivos 2D - e em métodos de interpolação por funções de ajustamento - Splines, curvas de Bézier, etc. e em interpoladores heurísticos na modelagem 3D a partir de secções conhecidas. Sobre os modelos vectoriais de forma dos corpos podem facilmente ser realizadas medidas, tais como volumes, tonelagens, centros de gravidade, etc..

Os modelos geométricos apresentados sob a forma "*raster*" são sobretudo modelos estocásticos, em que um corpo é definido pelo conjunto de pontos com maior probabilidade estimada de pertença a esse corpo. Neste domínio predominam os métodos da morfologia geoestatística nomeadamente a krigagem multifásica e a krigagem morfológica.

Construiu-se um conjunto de instrumentos básicos - bibliotecas de programas e bases de dados - que permitem a um utilizador usá-los no seu próprio programa para a modelagem de um corpo geológico-mineiro. Concretamente, construíram-se: i) uma base de dados geológico-mineiros **BDMIN** com funções de operações sobre a base de dados e com um dicionário de objectos topologicamente relacionados com os corpos geológico-mineiros usuais; ii) uma biblioteca de funções de computação gráfica de modelos 2D e 3D de funções **OBJLIB**: operações de edição de objectos, operações de reunião, intersecção, diferença entre dois polígonos, interpolação poligomial, determinação de perímetros, áreas, etc.; iii) uma biblioteca de funções desenvolvida para modelos "*raster*" - **GRIDDLIB**.

Os casos estudados de caracterização morfológica de formações marmóreas da região de Pardais e modelagem das câmaras de desmonte de uma mina de sulfuretos cupríferos demonstram a aplicabilidade dos métodos desenvolvidos neste estudo.

Com vista à melhoria das técnicas descritas, será indispensável um esforço suplementar de investigação nas seguintes áreas:

1 - Generalização para o caso tridimensional de metodologias implementadas em técnicas de modelagem em modo vectorial 2D, nomeadamente, aplicação da modelagem construtiva 3D ao desenho de infraestruturas mineiras e interacção destas com os modelos de arame dos corpos mineralizados a explorar;

2 - Integração de novas primitivas dos modelos geoestatísticos em bibliotecas, de modo a beneficiar-se mais da informação de carácter pericial nas técnicas de modelagem, como por exemplo, heterogeneidades estruturais, falhas, dobramentos, etc..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aronoff, S., 1989, "Geographic Information Systems: A Management Perspective", Ottawa, Canada, 294p.

Burrough, P. A., 1986, "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment", Clarendon Press, Oxford, 194p.

Dagbert, M., David, M., Crozel, D., Desbarats, A., 1984, "Computing Variograms in Folded Strata-Controlled Deposits", Geostatistics for Natural Resources Characterization - Part 2, NATO ASI Series, Vol. 1, p. 71-89.

Dowd, P., 1984, "Two Algorithms for Geometrical Control in Kriging and Orebody Modelling", Sciences de la Terre, Informatique Géologique, N° 21, p. 189-209.

Deutsch, C., 1990, "A FORTRAN 77 Subroutine for determining the Fractional Area of a Rectangular Grid Blocks within a Polygon", Computers & Geosciences, Vol. 16, N° 3, p. 379-384.

Evans, D. G., Jones, S. M., 1987, "Detecting Voronoi (Area-of-Influence) Polygons", Mathematical Geology, Vol. 19, N° 6, p. 523-537.

Foley, J. D., Dam, A. V., 1984, "Fundamentals of Interactive Computer Graphics", Addison Wesley, 664p.

Gonçalves, F., 1970, "Contribuição para o Conhecimento Geológico dos Mármore de Estremoz", Separata do vol. XX, Fasc. 1 - 2, Estudos Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro, p. 5-11, Porto.

Gonçalves, F., 1972, "Observações sobre o Anticlinório de Estremoz. Alguns aspectos Geológico-Económicos dos Mármore", Separata do vol. XXII, Fasc. 1 - 2, Estudos Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro, p. 121-132, Porto.

Guerreiro, L. F., 1991, "Concepção e Implementação de um Sistema de Gestão de Bases de Dados -Integração no Planeamento Mineiro", Tese de Mestrado, L.M.P.M./I.S.T., Lisboa, 79p.

Hall, J.K., 1975, "PTLOC - A FORTRAN Subroutine for Determining the Position of a Point Relative to a Closed Boundary", *Mathematical Geology*, Vol. 5, p. 523-539.

Hearn, D., Baker, M. P., 1986, "Computer Graphics", Prentice-Hall, 352p.

Journel, A., Huijbregts, 1978, "Mining Geoestistics", Academic Press, 600p.

Journel, A., Isaaks, E., 1984, "Conditional Indicator Simulation: Application to a Saskatchewan Uranium Deposit", *Mathematical Geology*, Vol. 16, Nº 7, p. 658-718.

Larkin, B. J., 1988, "A FORTRAN 77 Program to Calculate Areas of Intersection Between a Set of Grid Blocks and Polygons", *Computers & Geosciences*, Vol. 14, Nº 1, p. 1-14.

Mortenson, M. E., 1985, "Geometric Modeling", John Wiley Sons, Inc., 763p.

Muge, F. H., Santos, N., Vieira, J. L., and Cortez, L., 1992, "Dynamic Programming in Mine Planning and Production Scheduling", XXIII APCOM, p. 769-779.

Pereira, H. G., Brito, M. G., Ribeiro, J., Albuquerque, T., 1992, "Geoestistical Estimation of a Summary Quality Index for Marble Quarries", A apresentar no IV Geostat Congress.

Plastock, R. A., Kalley, G., 1991, "Computação Gráfica", McGraw-Hill, Edição Portuguesa - Tradução de José Carlos Teixeira, 414p.

Soares, A., 1989, "Morfologia Geoestatística de Recursos Minerais", Tese de Doutoramento, L.M.P.M./I.S.T., Lisboa, 136p.

Soares, A., 1990, "Geoestistical Estimation of Orebody Geometry: Morphological Kriging", *Mathematical Geology*, Vol. 22, Nº2, p. 149-160.

Soares, A., 1992, "Geoestistical Estimation of Multi-Phase Structures", *Mathematical Geology*, Vol. 24, Nº2, p. 149-160.

Sousa, A. J., Muge, F., Almeida, J. A., Pina, P. and Reynaud, R., 1992, "Advanced Computerized Techniques Applied to Ornamental Rocks", XV World Mining Congress, The Mining Outlook (R. Mañana, editor), Vol. 1, p. 685-693, Madrid-Espanha.

Travassos, J. F., 1991, "Sistema de Codificação por *OCTREES*", Tese de Mestrado, L.M.P.M./ I.S.T., Lisboa, 79p.

Valenzuela, C. R., "Introduction to Geographic Information Systems", 1991, ITC, Holanda, 212p.

