

Estudos Geológicos Aplicados à Indústria Extractiva de Mármore no Anticlinal de Estremoz – o Caso do Núcleo de Pardais

Geological Studies Applied to the Extractive Industry of Marbles in the Estremoz Anticline – the Pardais Extractive Center

P. F. HENRIQUES*; J. M. F. CARVALHO*¹; P. FALÉ* & A. G. LUÍS*

Palavras-chave: Anticlinal de Estremoz, mármore ornamentais, cartografia geológica, fracturação, sondagens.

Resumo: O Anticlinal de Estremoz é um dos principais centros mundiais produtores de mármore para fins ornamentais, no qual estão legalmente definidas unidades de ordenamento afectas a esta actividade. Para poder continuar nesta posição privilegiada, tem sido objecto de estudos que visam melhorar a sua caracterização e permitir adaptar a sua exploração às crescentes exigências de eficácia ambiental e económica.

Neste trabalho, apresentam-se alguns estudos de carácter geológico que envolveram cartografia litoestrutural, levantamentos de fracturação e realização de sondagens que tiveram como objectivo contribuir para o ordenamento da actividade extractiva da unidade UNOR 5 – Pardais. Foi elaborada uma Carta de Risco Geoeconómico para esta UNOR que pretende classificá-la em função da sua maior ou menor aptidão para a produção de mármore ornamental.

Key-words: Estremoz Anticline, ornamental marbles, geologic mapping, fracturing, diamond drill.

Abstract: The Estremoz Anticline, located in the Portuguese region of Alentejo, is one of the largest marble production centers in the world. Nowadays, ornamental rock exploitation in this region is faced with new challenges related with environmental requirements and land use planning policies. Having in mind to support the industrial sector in these challenges, geological works were carried out in the UNOR 5-Pardais land planning unit which is settled for the extractive activity. This paper intends to present those works comprising lithostructural geological mapping, diamond drill and fracturing surveys. The obtained data allowed the delimitation of the best target areas for ornamental marble exploitation or environmental rehabilitation.

INTRODUÇÃO

Desde os tempos da ocupação da Península Ibérica pelo Império Romano que a região do Anticlinal de Estremoz tem sido alvo de exploração de mármore para fins ornamentais. Com o desenvolvimento da sociedade e inovação tecnológica esta actividade mineira sofreu um forte incremento, a partir de meados do séc. XX. No entanto, a evolução tecnológica não foi acompanhada por uma equivalente evolução do conhecimento geológico da jazida, assentando a sua exploração em conhecimentos de base empírica que conduziram ao desregramento existente, quer ao nível de cada exploração, quer ao nível de implantação e organização do seu conjunto, o que tem contribuído para o passivo ambiental que se tem vindo a acumular.

Exceptuando os trabalhos de cartografia geológica regional para a elaboração da Carta Geológica de Portugal, só em 1957 foram publicados os primeiros estudos respeitantes à aquisição de conhecimentos vocacionados para o apoio directo à actividade extractiva de mármore nesta região, nomeadamente a Carta Geológica da Zona de Calcários Cristalinos de Vila Viçosa – Souzel (SILVA & CAMARINHAS, 1957). Este tipo de estudos prosseguiram de modo mais ou menos contínuo, tendo tido como resultados posteriores mais expressivos a publicação da Carta Geológica do Anticlinal de Estremoz à escala 1/25 000 (GONÇALVES, 1973), a caracterização geral do estado de fracturação do Anticlinal (LADEIRA, 1981), estudos de análise geoestatística de dados de fracturação aplicados ao planeamento da lavra mineira (ALBUQUERQUE, 1993; LUÍS, 1995; LUÍS & SOUSA, 1998), estudos respeitantes à

* INETI, Apartado 7586, 2720-866 Alfragide, Portugal

¹ jorge.carvalho@ineti.pt

avaliação do estado de deformação dos mármore no contexto da sua evolução tectónica e consequências ao nível económico (LOPES, 1995; 2003) e os trabalhos de cartografia geológica e avaliação de potencialidades com recurso a sondagens (REYNAUD & VINTÉM, 1992; 1994). Em 1997 foi publicada a Carta Geológica do Anticlinal de Estremoz à escala 1/10 000 (MOREIRA & VINTÉM, 1997), a qual, para além da cartografia geológica realizada para o efeito, procurou ser uma síntese do conhecimento geológico-mineiro existente à data da sua publicação, mantendo-se, ainda hoje, como uma valiosa ferramenta de trabalho.

À semelhança do que acontece com outras áreas, a indústria extractiva tem vindo a sofrer pressões crescentes no sentido de uma melhor racionalização da sua actividade, por intermédio de quesitos ao nível de uma maior eficácia, rendimento e minimização dos impactes negativos no ambiente. Para apoiar o sector das rochas ornamentais na resposta a estas questões, desenvolveu-se uma nova linha de investigação geológica nos principais núcleos de exploração, os quais se encontram sistematizados, em termos de ordenamento regional do território, em Unidades de Ordenamento (UNOR's) que integram o Plano Regional de Ordenamento da Zona dos Mármore (PROZOM, 2002). Procurou-se, sobretudo, um apoio muito dirigido ao planeamento da lavra, por identificação e delimitação

detalhada das diferentes tipologias de mármore existentes e aumento do rigor no dimensionamento e disposição espacial da jazida a nível de cada UNOR.

O presente texto pretende dar a conhecer os resultados obtidos nesta nova etapa de aquisição de conhecimentos geológicos para o núcleo de Pardais (UNOR 5), que se constitui como um dos mais importantes, quer pelo número de pedreiras, quer pelo volume e valor económico da produção. Esses resultados constituem parte dos obtidos em trabalho de maior âmbito (HENRIQUES *et al.*, 2006) no qual, através de metodologias de avaliação das potencialidades económicas e de caracterização ambiental, se obtiveram dados instrumentais para o suporte técnico ao planeamento da lavra e ao ordenamento do território

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO: O ANTICLINAL DE ESTREMOZ

O Anticlinal de Estremoz (Fig. 1), estrutura de direcção NW-SE com cerca de 42 km de comprimento por 8 km de largura, é uma subdivisão do sector Estremoz – Barrancos, da Zona de Ossa-Morena, que se encontra individualizada devido às suas particulares características litológicas, estratigráficas e tectónicas (OLIVEIRA *et al.*, 1991).

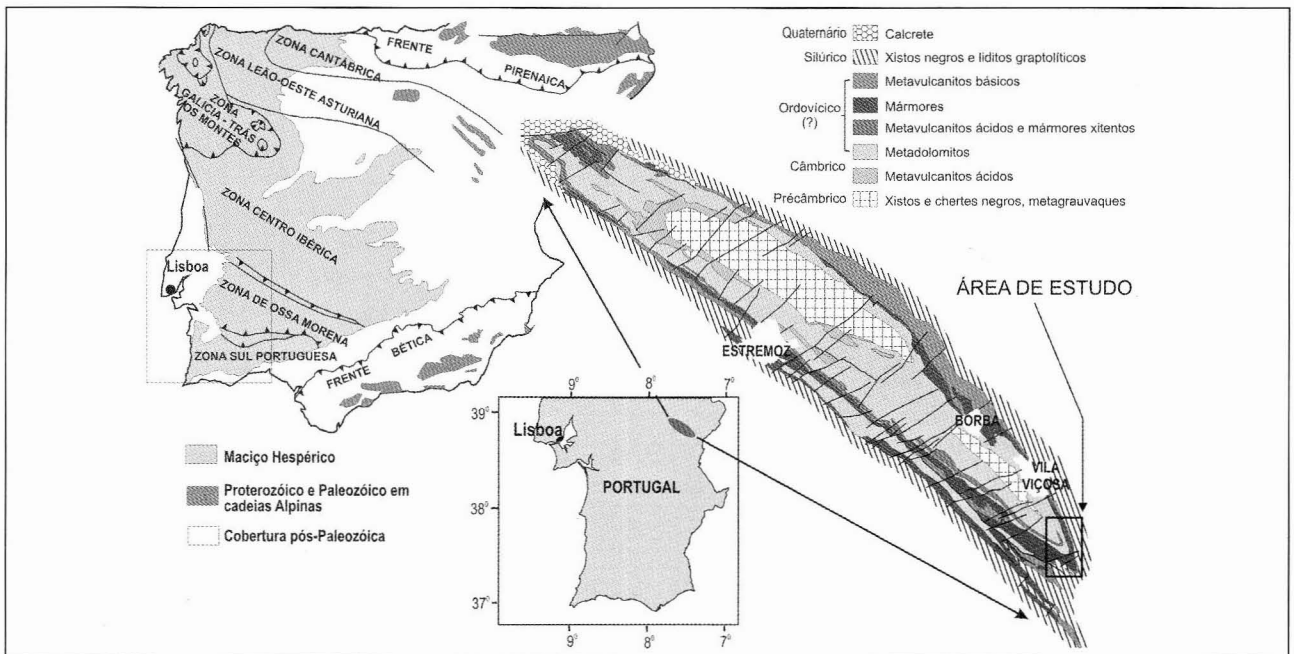


Fig. 1 – Enquadramento da área de estudo no Anticlinal de Estremoz e no contexto geológico da Península Ibérica.

– Geological setting of the study area.

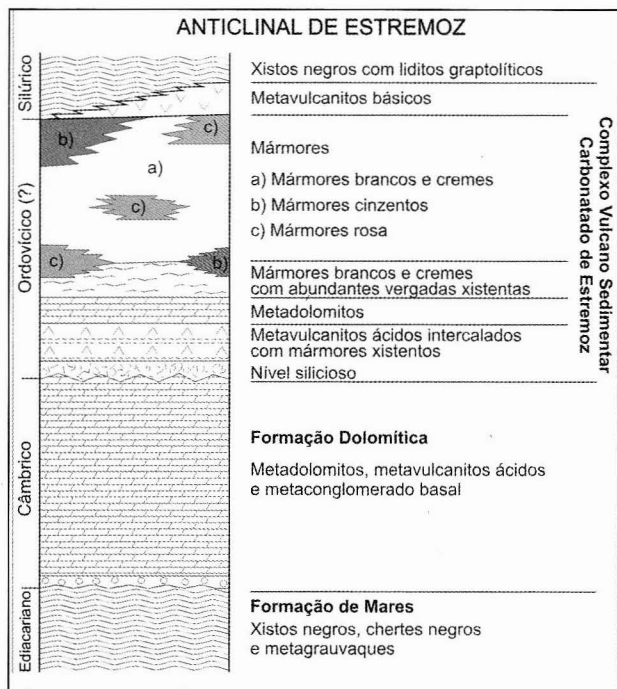


Fig. 2 – Sequência geológica simplificada do Complexo Vulcano-Sedimentar Carbonatado de Estremoz.

– Outlined geological sequence of the Estremoz Volcano-Sedimentary Complex.

A sequência litológica da região inicia-se com a Formação de Mares, datada do Proterozóico, constituída por xistos com intercalações de quartzitos e liditos, à qual sucede, em discordância, a Formação Dolomítica, datada do Câmbrico inferior, seguida de um horizonte silicioso, descontínuo. Sobre este horizonte ocorre o Complexo Vulcano – Sedimentar Carbonatado de Estremoz (CVSCE), de onde se destacam os mármore, ao qual sucede uma sequência de xistos com intercalações de liditos, de idade Silúrica/Devónica (PIÇARRA, 2000).

A sedimentação do CVSCE, representada na Fig. 2, inicia-se com um episódio vulcânico, a que se segue a deposição de sedimentos carbonatados, hoje transformados em mármore, por efeito da evolução do metamorfismo associado à orogenia hercínica. Esta sequência, que termina com um novo episódio vulcânico, aflora de modo irregular ao longo do anticlinal, o que se deve tanto às variações laterais de fácies sedimentar como à sobreposição de fases de deformação tectónica.

A datação deste complexo tem sido objecto de alguma controvérsia. Neste trabalho, adoptamos a proposta que o considera de idade Ordovícica (CARVALHOSA

et al., 1987; OLIVEIRA et al., 1991; OLIVEIRA, 1984) apesar de, mais recentemente, (PIÇARRA, 2000) ter proposto uma nova interpretação, apontando outras alternativas de idade: Ordovícico superior ou pós-Silúrico superior.

No contexto da evolução tectónica do orógeno hercínico e particularmente da Zona de Ossa Morena, a região do Anticlinal de Estremoz foi afectada por dois episódios de deformação principais. O primeiro, datado do Devónico médio (RIBEIRO et al., 1983) conduziu à formação de dobras isoclinais, recumbentes orientadas segundo N – S, e ao desenvolvimento de xistosidade com transposição da estratificação. O segundo episódio, no Carbónico superior (RIBEIRO et al., 1979), levou ao desenvolvimento de dobras NW – SE com clivagem de fractura associada. Este episódio tem expressão a todas as escalas, sendo responsável pelas actuais macroestruturas regionais. De acordo com LOPES (2003), à fase final deste episódio está associado o desenvolvimento de estruturas de desligamento esquerdo segundo NW – SE. Com o final da orogenia hercínica, instala-se uma rede de fracturas preferencialmente orientadas segundo NE – SW, em algumas das quais se instalaram filões doleríticos.

Os Mármore

Os Mármore desta região ocorrem predominantemente na terminação periclinal sudeste do Anticlinal de Estremoz, entre Vila Viçosa e Pardais, que corresponde à área alvo de estudo (Fig. 1), e também no flanco sudoeste do Anticlinal, entre Lagoa e Barro Branco, em Estremoz, e em alguns locais entre Venda da Porca e Sousel. No flanco nordeste, ocorrem entre Vila Viçosa e Borba.

A sua formação está relacionada com a diminuição da actividade vulcânica, que permitiu a deposição de calcários, progressivamente mais puros e em bancadas mais espessas, que actualmente servem a quase totalidade das explorações de mármore. Simultaneamente, nas zonas mais distais, situadas a Sul e a Sudoeste, caso do núcleo de Pardais, depositaram-se calcários cinzentos a negros que, após metamorfose, deram origem aos “mármore azuis” e aos “mármore Ruivina”, ambos de tonalidades cinzentas, mais ou menos escuras. Estes mármore interdigitam-se com os brancos, cremes e rosas em função das condicionantes paleogeográficas que condicionaram a deposição dos calcários de que são originários, nomeadamente as oscilações do nível do mar; as variações físico-químicas do ambiente de sedimentação e a natureza dos materiais depositados. Por fim, também as condições da

sua evolução ao longo do tempo geológico, em particular as decorrentes do metamorfismo, condicionam as interdigitações verificadas. Como consequência da grande variação destes factores, os mármore resultantes são muito heterogéneos, o que, em termos de uma cartografia de temática vocacionada para o apoio à indústria extractiva, tem consequências evidentes, pois torna possível a sua diferenciação de acordo com critérios vários, como sejam, para o caso presente, a granularidade, a textura, a cor e a composição mineralógica.

GEOLOGIA DO NÚCLEO DE PARDAIS

Face à experiência adquirida em anteriores trabalhos realizados no Anticlinal de Estremoz (MOREIRA & VINTÉM, 1997; VINTÉM *et al.*, 2003) e como resposta às solicitações da Indústria Extractiva quanto à localização dos diversos tipos de mármore, para que esta possa planear a lavra mais eficazmente, optou-se por dar um especial ênfase aos critérios cromáticos aquando da realização da cartografia geológica dos mármore. Assim, no caso concreto do núcleo de Pardais, no presente trabalho os mármore foram classificados em:

Mármore brancos e cremes

Mármore cinzentos e negros

Mármore brechificados

Mármore parcialmente dolomitizados

Estes mármore, como já foi referido, encontram-se confinados entre duas sequências de metavulcanitos que tiveram a sua origem em grandes episódios vulcânicos. No entanto, durante a deposição dos calcários que deram origem aos mármore, ocorreram outros episódios vulcânicos de menor intensidade de onde resultaram intercalações no seio dos calcários. Estas, através de processos metamórficos e tectónicos, deram origem ao aspecto mais ou menos vergado que os mármore hoje apresentam.

Os *mármore brancos e cremes* são em geral rochas de grão médio a fino, apresentando frequentemente vergada de cor acinzentada, avermelhada ou acastanhada. O Catálogo das Rochas Ornamentais Portuguesas (IGM, 1983; 1984) apresenta a caracterização de três amostras destes mármore, colhidas no núcleo de Pardais. Em termos gerais são descritas como rochas de textura granoblástica, com calcite como mineral essencial (99-100%) e quartzo e moscovite como minerais acessórios. Conforme se pode constatar pela Carta

Geológica que se apresenta na Fig. 3, estes são os mármore que apresentam maior representação na região, ocupando o núcleo central da terminação periclinal do Anticlinal de Estremoz.

Os *mármore cinzentos e negros* não estão tão bem representados como os anteriores mas, mesmo assim, são bastante abundantes. Distribuem-se de uma forma contínua, no topo da sequência de mármore, mas existem também em intercalações no seio dos mármore de cores claras, atingindo, em ambos os casos, maior expressão no flanco SW da estrutura. No referido Catálogo são caracterizados como rochas de textura granoblástica, com calcite (~95%) e dolomite (~5%) como minerais essenciais e quartzo como mineral acessório.

Os *mármore parcialmente dolomitizados* são rochas resultantes da modificação de outros tipos de mármore, através de fenómenos de fracturação com circulação de fluidos ricos em ferro e magnésio. Apresentam uma baixa potencialidade para a utilização ornamental. Ao contrário do que se verifica noutros núcleos extractivos do Anticlinal de Estremoz, este tipo de mármore é pouco frequente, conhecendo-se a sua ocorrência fundamentalmente a partir dos dados de sondagens.

Os *Mármore brechificados* são considerados como resultantes de acções tectónicas sobre sequências de estratos pouco espessos, constituídas por alternâncias de mármore e vulcanitos. Apresentam uma baixa potencialidade para fins ornamentais. Maioritariamente ocorrem em faixas de orientação NW-SE a NNW-SSE, muitas vezes sem representação cartográfica, mas impondo condicionamentos ao nível da exploração.

ESTRUTURA GEOLÓGICA DA ZONA DE PARDAIS

A estrutura geológica observada na zona de Pardais, consequência da evolução tectónica regional, apresenta algumas características particulares, fruto da sua localização em relação à mega-estrutura do Anticlinal de Estremoz, mais exactamente na terminação periclinal SE deste anticlinal. Assim, a estrutura local é caracterizada macroscopicamente por uma grande dobra anticlinal de eixo mergulhante para SE, cujo flanco ocidental apresenta uma direcção NW-SE, cerca de 45° de inclinação e 200 m de espessura. O flanco oriental apresenta uma direcção NNW-SSE, cerca de 70° de inclinação e uma

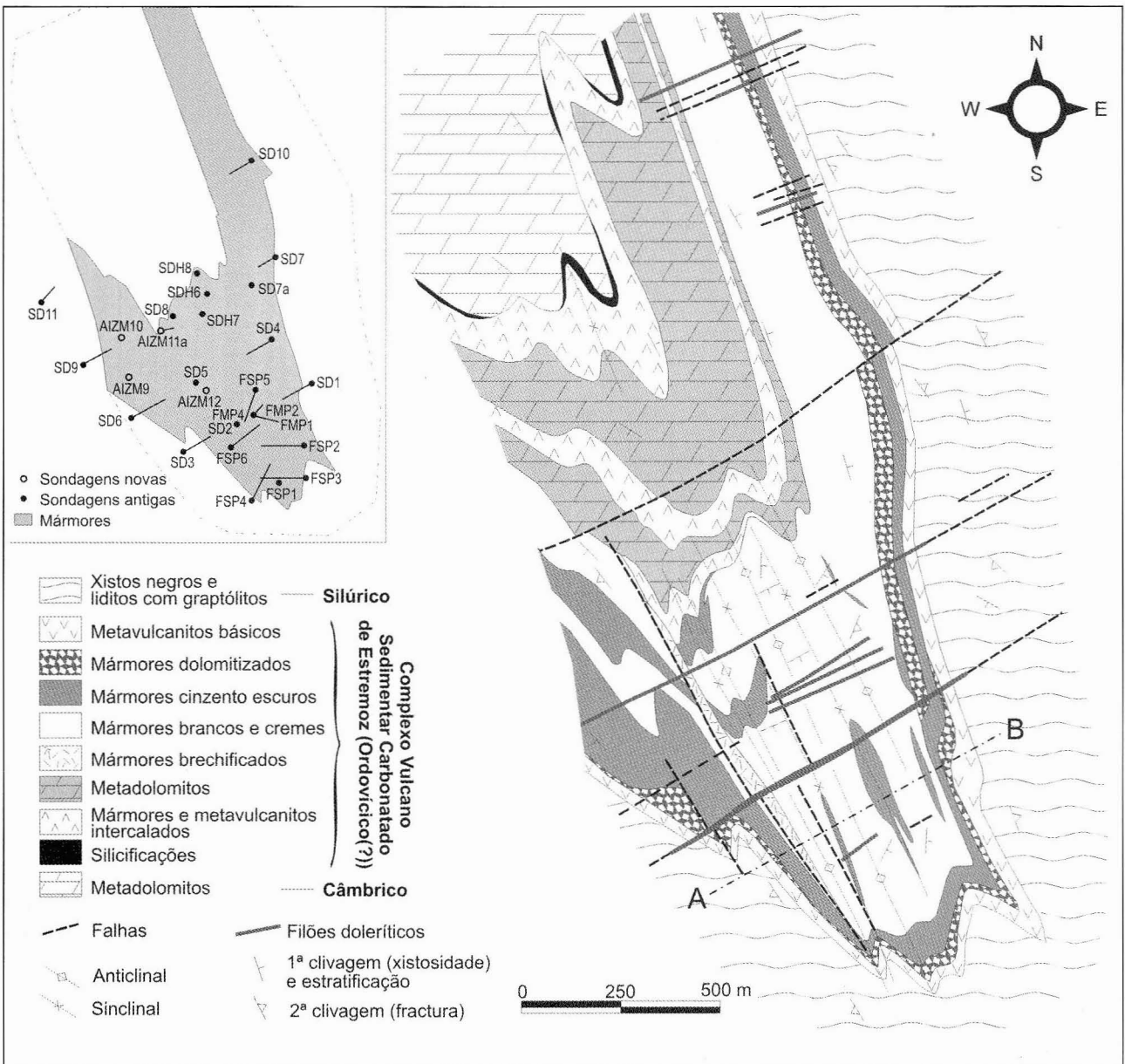


Fig. 3 – Carta Geológica da UNOR 5.

– Geological Map of the UNOR 5 area.

espessura de 150 m (Fig. 3 e Fig. 4). A clivagem de fractura associada a esta macroestrutura desenvolvida durante a 2.ª parte de deformação hercínica apresenta-se orientada segundo NNW-SSE. É na zona de charneira deste anticlinal que a sequência de mármore apresenta os mais elevados valores de espessura (cerca de 250 m) e valores de inclinação relativamente reduzidos. As pedreiras deste núcleo situam-se principalmente nesta zona de charneira.

À escala da pedra observa-se, tal como seria de esperar, a existência de alguns dobramentos menores, sendo os mais relevantes aqueles que, tal como a grande dobra, apresentam eixo NNW-SSE mergulhando cerca de 15° para SE, constituindo dobras com formato “em caixa”. Estas apresentam charneira anticlinal ampla e pouco inclinada (onde se situam a generalidade das pedreiras) e com flancos quase verticais, formando sinclinais muito

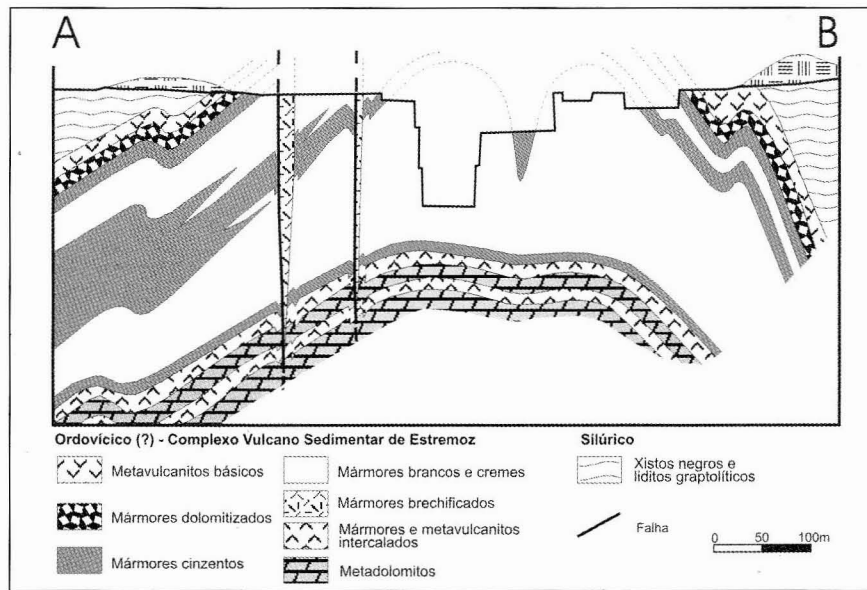


Fig. 4 – Corte Geológico SW-NE representativo da UNOR 5.

– Representative SW-NE geological section of the UNOR 5 area.

apertados que, normalmente, limitam lateralmente as explorações. Por vezes estas dobras sinclinais têm o núcleo preenchido por mármore negro ou metabasaltos do topo da sequência dos mármore.

Outros elementos estruturais importantes, no que respeita aos condicionamentos geológicos impostos à indústria extractiva, são as bandas de cisalhamento de direcção NW-SE a NNW-SSE, subverticais. Segundo LOPES (1995; 2003), estes corredores de deformação evidenciam critérios de deformação que variam do domínio dúctil ao frágil, podendo desenvolver brechas tectónicas. Inicialmente terão desenvolvido critérios cinemáticos esquerdos, relacionados com os momentos finais da 2.^a fase de deformação hercínica, mas poderão ter sido retomados, em período mais tardio, como acidentes direitos. Por vezes, estes corredores funcionam como barreiras, limitando

lateralmente zonas de mármore com diferentes características litológicas e cromáticas, devido à movimentação a que estiveram sujeitos.

SONDAGENS

Com a finalidade de eliminar algumas das incertezas surgidas durante a cartografia geológica, visando a determinação mais directa da aptidão ornamental dos mármore em profundidade e a confirmação de aspectos estruturais, foram realizadas 5 sondagens mecânicas com recuperação de testemunho, totalizando 640 m de comprimento, e cuja localização se apresenta na Fig. 3. Na Tabela 1, apresentam-se os dados mais relevantes destas sondagens, encontrando-se em anexo os respectivos logs.

TABELA 1

Sondagens efectuadas na UNOR 5 no âmbito deste trabalho (coordenadas *Hayford-Gauss*, datum de Lisboa e referentes ao Ponto Fictício).

Drill-holes at UNOR 5 (Hayford-Gauss coordinates, datum Lisbon; false easting: 200 000, false northing: 300 000).

| Sondagem | Latitude | Longitude | Inclinação | Direcção | Comprimento |
|----------|----------|-----------|------------|----------|-------------|
| AIZM 9 | 196.805 | 263.507 | 90° | --- | 200,04m |
| AIZM 10 | 196.999 | 263.472 | 90° | --- | 100,04m |
| AIZM 11 | 197.041 | 263.621 | 60° | N60°E | 48,74m |
| AIZM 11A | 197.029 | 263.658 | 60° | N75°E | 141,49m |
| AIZM 12 | 196.744 | 263.880 | 90° | --- | 150,29m |

Para além de terem contribuído para o esclarecimento de aspectos estruturais locais, estas sondagens permitiram também confirmar a potencialidade das zonas investigadas pelas sondagens AIZM 9 e 10, para a produção de mármore de cores escuras, e pela AIZM 12, para a produção de mármore de cores claras, ainda que seja expectável o surgimento de intercalações de mármore de cores escuras. A zona investigada pelas sondagens AIZM 11 e 11A não se afigura favorável à exploração de mármore, essencialmente devido às frequentes intercalações de metavulcanitos e dolomitização.

FRACTURAÇÃO

A maior ou menor concentração de fracturas é uma das características que mais condicionam o aproveitamento dos mármore para fins ornamentais, uma vez que são as principais responsáveis pela blocometria. A aquisição de informação relativa ao estado de fracturação do maciço rochoso foi realizada em todas as pedreiras a que foi possível aceder e em sondagens, quer nas realizadas no decorrer do presente estudo, quer em estudos anteriores. Fora das pedreiras, e devido à escassez de afloramentos, tal não foi possível. Foi utilizado o método de amostragem ao longo de uma linha (*scanline*), em relação à qual foram referenciadas todas as fracturas intersectadas. As *scanline* foram traçadas na horizontal, a 1,5 m acima do piso, em todo o perímetro das pedreiras, nos pisos que estavam acessíveis. No total foram colhidos dados referentes a 1443 fracturas, distribuídas por 18 pedreiras.

A análise da atitude das fracturas permitiu identificar quatro famílias predominantes de fracturas (Tabela 2) que se enquadram no esquema regional de fracturação já conhecido de trabalhos anteriores (LADEIRA, 1981; REYNAUD & VINTÉM, 1992; REYNAUD & VINTÉM, 1994; VINTÉM *et al.*, 2003).

TABELA 2

Atitudes médias das principais famílias de fracturação na UNOR 5.

Main fracturing directions at UNOR5.

| Direcção | Inclinação |
|--------------|------------|
| NNW-SSE | 90° |
| ENE-WSW | 90° |
| Sem direcção | 0° a 15° |
| N-S | 45° E |

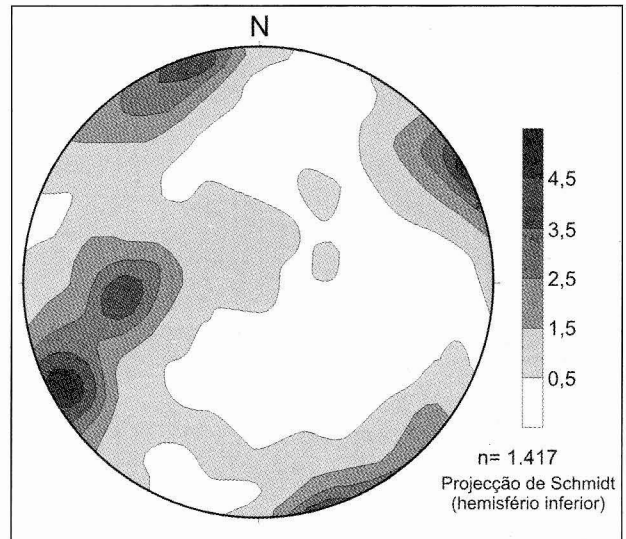


Fig. 5 – Stereograma das atitudes da totalidade das fracturas medidas na UNOR 5.

– Stereogram with all UNOR 5 surveyed fractures.

Em face da geometria e atitude média, estas famílias de fracturas tendem a condicionar a forma e dimensão dos blocos de mármore do seguinte modo:

- A primeira família, subparalela ao eixo do Anticlinal de Estremoz, à direcção da clivagem S_2 e aos corredores de deformação, é responsável por limitar a largura dos blocos;
- A segunda, subparalela à rede de filões doleríticos, é limitativa do comprimento;
- A terceira, subhorizontal e interpretada como resultante da decompressão do maciço ao ser libertado, por efeito da erosão, da carga litostática que suportava, limita a altura;
- A quarta, de associação dúbia, limita, simultaneamente, a altura e a largura.

As duas primeiras famílias de fracturas são as mais representativas, como se pode constatar pelo estereograma apresentado na Fig. 5, sendo as que mais condicionam a exploração.

O cruzamento da informação, referente ao espaçamento médio entre as fracturas de cada família principal obtido para cada uma das pedreiras amostradas (HENRIQUES *et al.*, 2006), com a informação relativa à cartografia geológica, permitiu concluir que:

- Na generalidade das pedreiras, os blocos são talhados com o seu maior comprimento na direcção subparalela à da clivagem S_2 (NNW-SSE);

- De uma forma geral, a dimensão esperada para os blocos será média a grande, uma vez que os espaçamentos médios obtidos para as principais famílias de fracturação são vulgarmente superiores a 3 m e raramente inferiores a 1 m;
- Na proximidade imediata de filões doleríticos é expectável a produção de blocos penalizados no comprimento, devido ao espaçamento mais reduzido entre as fracturas subparalelas a estes filões;
- No flanco nordeste da estrutura, a tendência será para a produção de blocos penalizados na largura, uma vez que aí os estratos se apresentam bastante inclinados, estirados e laminados segundo a estratificação, o que resultou na redução da sua espessura;
- As duas condicionantes anteriores podem coexistir numa mesma pedreira.

DENSIDADE LINEAR DE FRACTURAÇÃO

A densidade linear de fracturação (*dlf*) define-se como o número de fracturas por unidade de comprimento. Trata-se de um bom indicador do grau de fracturação de um maciço, e consequentemente, da sua aptidão para a implantação de explorações de rocha ornamental. Porém, é sabido que, só por si, o conhecimento da *dlf* não traduz o comportamento blocométrico das diferentes zonas de um maciço rochoso (ALBUQUERQUE, 1993; LUÍS & SOUSA, 1998; RIBEIRO, 1994), pois dois sistemas com as mesmas *dlf* podem afectar de forma diferente a blocometria, devido, principalmente, às diferenças nas atitudes das

famílias presentes, à dimensão e forma das fracturas, à sua posição relativa e às probabilidades de intersecção entre fracturas. Possui no entanto, a vantagem de poder ser encarada como uma Variável Regionalizada (MATHERON, 1970) e, como tal, poder beneficiar do formalismo geoestatístico para ser estimada em todos os pontos do seu domínio a partir dos valores amostrais (PEREIRA, 1979). A utilização desta metodologia na estimação da *dlf* permite apontar e definir os contornos cartográficos das zonas mais propícias à localização e/ou desenvolvimento de explorações de rocha ornamental.

Como mencionado anteriormente, o levantamento da fracturação, em pedreiras nesta área, conduziu à obtenção de dados relativos a 1443 fracturas, obtidos ao longo de 2602,54 m de amostragem, repartidos por 222 *scanlines* em 18 pedreiras. Para os cálculos de estimação da *dlf* fez-se uso, ainda, de dados respeitantes a 6830 fracturas levantadas em 33 sondagens implantadas na região, que foram utilizados como se fossem provenientes de *scanlines*.

Sendo a *dlf* uma variável dependente do comprimento do suporte onde é calculada, realizaram-se ensaios com suportes de 3, 4 e 5 metros de comprimento, o que, entre outros aspectos, permitiu testar a influência dos diferentes comprimentos de suporte sobre o comportamento da variabilidade estrutural da *dlf* e seleccionar o suporte de 4 m como sendo o que conduz à obtenção das estimações com os erros mais baixos. Os valores da *dlf* nestes suportes são caracterizados pela função de distribuição e principais estatísticos, representados no histograma da Fig. 6 e nos valores da Tabela 3, respectivamente.

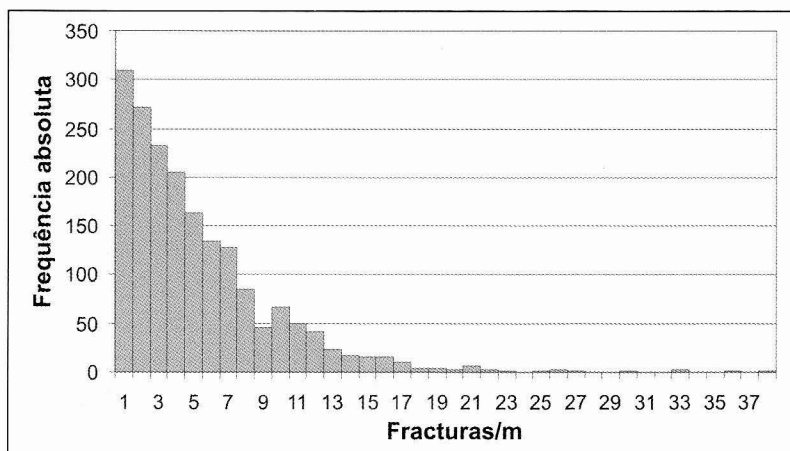


Fig. 6 – Histograma da *dlf* presente na amostragem.

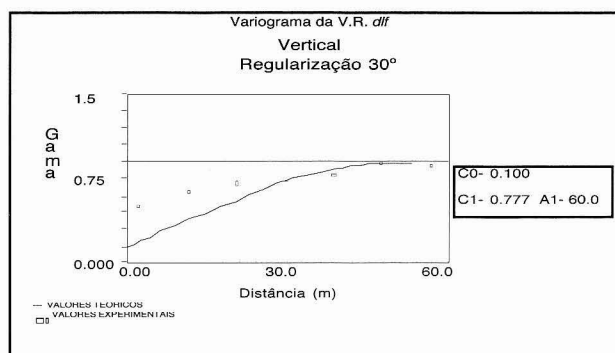
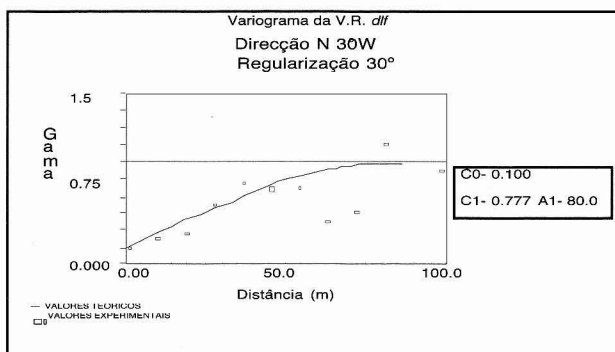
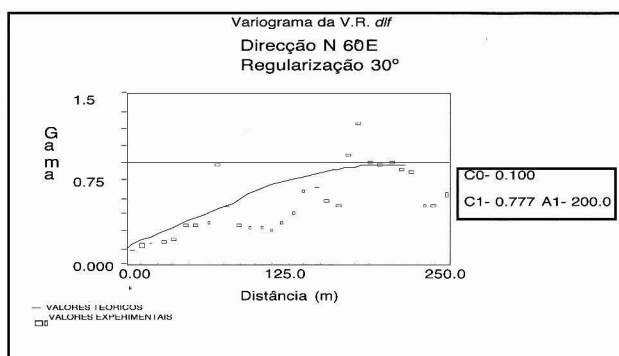
– Linear density of fracturing histogram for the sampled fractures.

TABELA 3

Estatísticos básicos da *dlf* em troços com 4 m de comprimento.

Basic statistic data of the linear density of fracturing for 4 m sampling lengths.

| | |
|-------------------------------|------|
| Número de troços | 1847 |
| Valor mínimo da <i>dlf</i> | 0,00 |
| Valor máximo da <i>dlf</i> | 9,48 |
| Valor médio da <i>dlf</i> | 1,12 |
| Variância dos dados amostrais | 1,20 |

Fig. 7 – Variograma experimental da *dlf* e ajustamentos efectuados para as direcções principais N60°E, N30°W e Vertical.

- Experimental Linear density of fracturing variograms with adjustments for the N60°E and N30°W main directions and for the vertical

Para avaliar a continuidade espacial da variável *dlf*, foram calculados os variogramas experimentais para as 3 principais direcções, fazendo uso dos módulos geoVAR e geoMOD do sistema de programas geoMS, desenvolvido por R. Alexandre e J. Almeida, no Centro de Modelização de Reservatórios Petrolíferos do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa. Conforme se pode constatar nos variogramas apresentados na Fig. 7, a continuidade espacial da *dlf* revela um comportamento anisótropo, modelizado por funções teóricas do tipo esférico, com uma primeira estrutura (efeito de pepita) relativamente baixo, mas diferente de zero, o que evidencia, para distâncias pequenas, uma boa correlação entre os valores da *dlf*. Assim, pela análise dos variogramas, e tendo em atenção as direcções principais encontradas, verifica-se a existência de correlações no plano horizontal para distâncias de 200 m e 80 m, segundo as direcções N 60 E e N 30 W, e apenas de 60 m na vertical.

A estimação dos valores da *dlf* foi realizada sobre uma malha de blocos regulares com dimensões de 25 × 25 m na horizontal e 80 m na vertical através do módulo geokrig do sistema de programas geoMS. A escolha da dimensão da malha prendeu-se com uma suficiente descritização no plano horizontal e com a distribuição vertical dos mármore, face à dimensão média das pedreiras da região. Os valores obtidos permitiram mapear a distribuição espacial dos valores médios estimados para a *dlf* em cada bloco (Fig. 8) e a respectiva variância de estimação (Fig. 9).

Tendo em atenção os baixos valores obtidos para a variância de estimação, traduzidos no mapa da Fig. 9, constata-se que valores estimados para a *dlf* (Fig. 8) são globalmente fiáveis. Esta fiabilidade está relacionada com a distribuição espacial da amostragem. As zonas que apresentam valores de variância intermédia, em particular as zonas limítrofes da região estudada, são

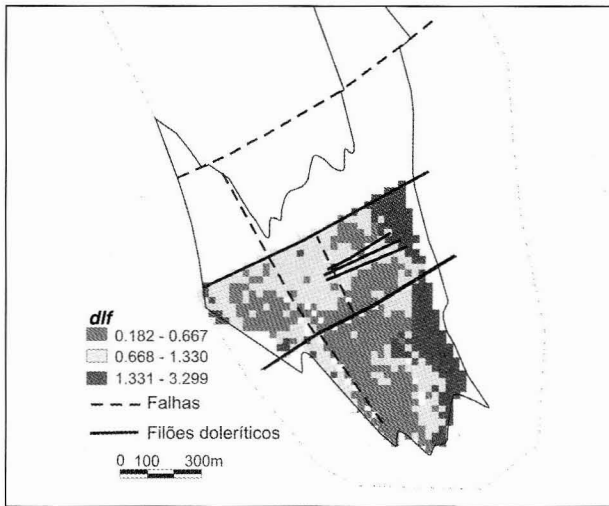


Fig. 8 – *dlf* estimada por *krigagem* ordinária.

– Estimated linear density of fracturing by ordinary kriging..

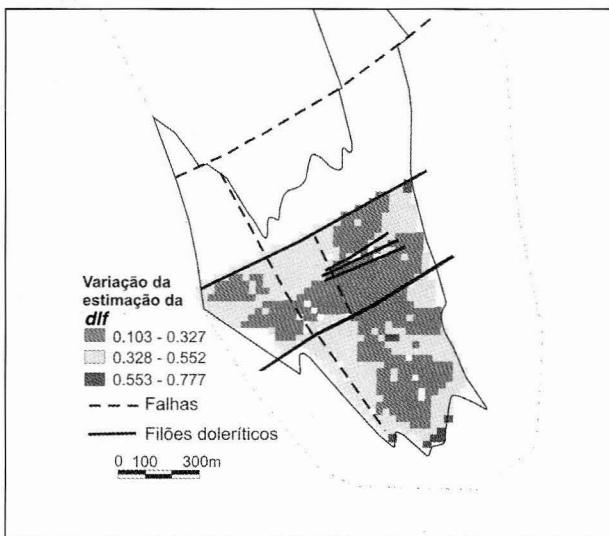


Fig. 9 – Variância de estimação da *dlf* estimada por *krigagem* ordinária.

– Estimation variance of the linear density of fracturing.

aquelas sobre as quais importa ter maiores cuidados em planeamento futuro, pois correspondem a zonas onde a amostragem é mais esparsa. No entanto, numa perspectiva global, existe um certo grau de homogeneidade na distribuição de valores, tanto da *dlf* como da variância da sua estimação que estão de acordo com o conhecimento apreendido no terreno e, portanto, indicia um bom grau de confiança para os resultados alcançados.

AVALIAÇÃO DE RECURSOS

Com base na interpretação da cartografia e cortes geológicos elaborados, admite-se a existência de uma volumetria de $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ de mármore disponível, tratando-se de um valor aproximado, muito dependente da complexidade estrutural da área. Considerando que na UNOR 5 o rendimento típico das explorações poderá chegar a 20 %, o volume efectivamente disponível para aproveitamento económico rondará os $8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Esta é uma previsão algo optimista, visto que a continuação da laboração das explorações as faz aproximar do núcleo da dobra anticlinal, zona mais comprimida onde, em virtude do aumento das tensões residuais e do aumento do número de fracturas, bem como da modificação das suas atitudes, se exigem estudos ainda mais aprofundados. Outra perspectiva que não deve ser descurada prende-se com o aumento das dificuldades técnicas inerentes ao incremento da profundidade das explorações actuais e o surgimento de fracturas de descompressão do maciço rochoso, o que poderá implicar que algumas zonas da jazida apenas devam ser acedidas por intermédio de exploração subterrânea.

RISCO GEOECONÓMICO

A análise do Risco Geoeconómico tem por principal objectivo definir áreas com potencialidade para a exploração das rochas ornamentais, em função dos descritores Litologia, Estrutura Geológica e sistema de Fracturação. Esta análise possibilita também definir áreas caracterizadas pela ausência de recursos, ou com baixo potencial para a exploração, que podem ser vocacionadas para a implantação de escombreciras ou unidades de transformação. A análise de risco efectuada neste estudo não adopta os modelos probabilísticos (quantitativos) que geralmente estão associados a este tipo de conceito, sendo apenas feita uma análise da informação em termos qualitativos. Esta análise está relacionada com a natureza dos próprios dados que originam os descritores. A avaliação desses dados é, na sua origem, sempre de carácter interpretativo, não passível de quantificação.

A metodologia adoptada assentou na selecção e parametrização dos descritores geológicos considerados como principais condicionadores da exploração do recurso para fins ornamentais, a fim de obter a sua repre-

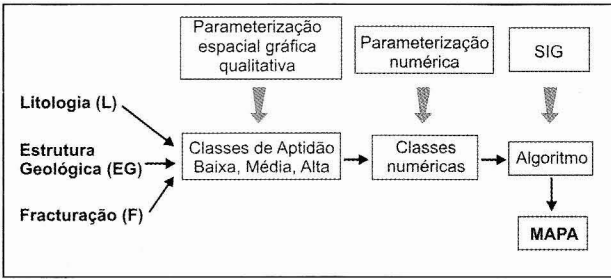


Fig. 10 – Metodologia utilizada na elaboração da Carta de Risco Geoeconómico.

– Methodology used for the elaboration of the Geoeconomic Risk Map.

sentação gráfica conjunta (Fig. 10). Para o caso do Anticlinal de Estremoz foram apontados como principais descritores a Litologia, a Estrutura Geológica e o estado de Fracturação do maciço.

No que respeita ao descritor Litologia, este permite distinguir à partida os locais onde ocorre mármore dos restantes. No que respeita aos primeiros e em função da cartografia geológica realizada, procedeu-se à sua classificação de acordo com o grau de pureza e cor. A Tabela 4 apre-

TABELA 4

Classificação do Descritor Litologia.
Classification of the Lithology description.

| | |
|---------------|--|
| Alta aptidão | Mármore Branco e Creme |
| Média aptidão | Mármore Branco e Creme, com algumas vergadas Mármore Negro azul |
| Baixa aptidão | Mármore Branco e Creme, muito vergado Mármore brechificado Mármore parcialmente dolomitizado |
| Sem aptidão | Ausência de mármore |

senta as diferentes classes utilizadas para caracterizar o espaço em função da aptidão litológica, as quais se traduzem cartograficamente pelo mapa que se apresenta na Fig. 11.

A disposição estrutural das unidades litológicas é um dos factores que permite definir a maior ou menor aptidão dessa unidade para a exploração de rochas ornamentais. Tendo em conta a propensão das diferentes estruturas geológicas presentes na área em

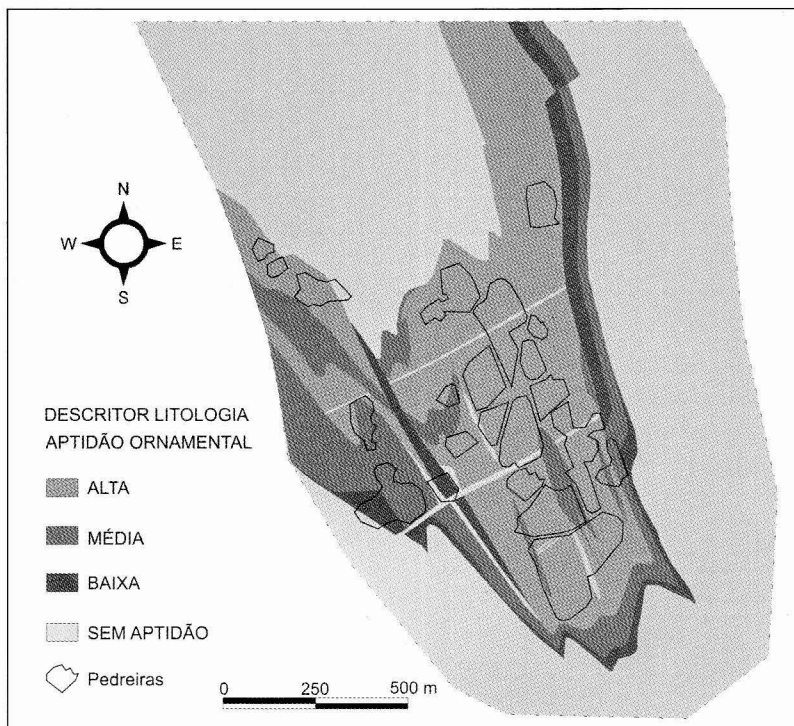


Fig. 11 – Descritor Litologia da UNOR 5.

– Lithology descriptor of the UNOR 5.

estudo para a produção de blocos de rocha ornamental, para o descritor Estrutura Geológica consideraram-se as classes de aptidão constantes da Tabela 5 e cuja representação cartográfica se traduz no mapa da Fig. 12.

Para o descritor Fracturação, recorreu-se directamente à informação resultante da análise geoestatística da *dlf*, apresentada anteriormente, o que permitiu a classificação da área em estudo segundo zonas pouco, medianamente ou muito fracturadas, em sintonia com

TABELA 5

Classificação do descritor Estrutura Geológica.
Classification of the Geological Structure descriptor.

| | |
|---------------|---|
| Alta aptidão | <ul style="list-style-type: none"> – Camadas de atitude constante – Espessuras elevadas – Charneiras de dobras anticlinais – Ocorrência de mármore até profundidades elevadas |
| Média aptidão | <ul style="list-style-type: none"> – Estratos inclinados em flanco normal – Espessura média – Charneiras de dobras sinclinais |
| Baixa aptidão | <ul style="list-style-type: none"> – Estratos bastante inclinados em flanco inverso – Estratos dolomitizados, brechificados ou particularmente deformados |

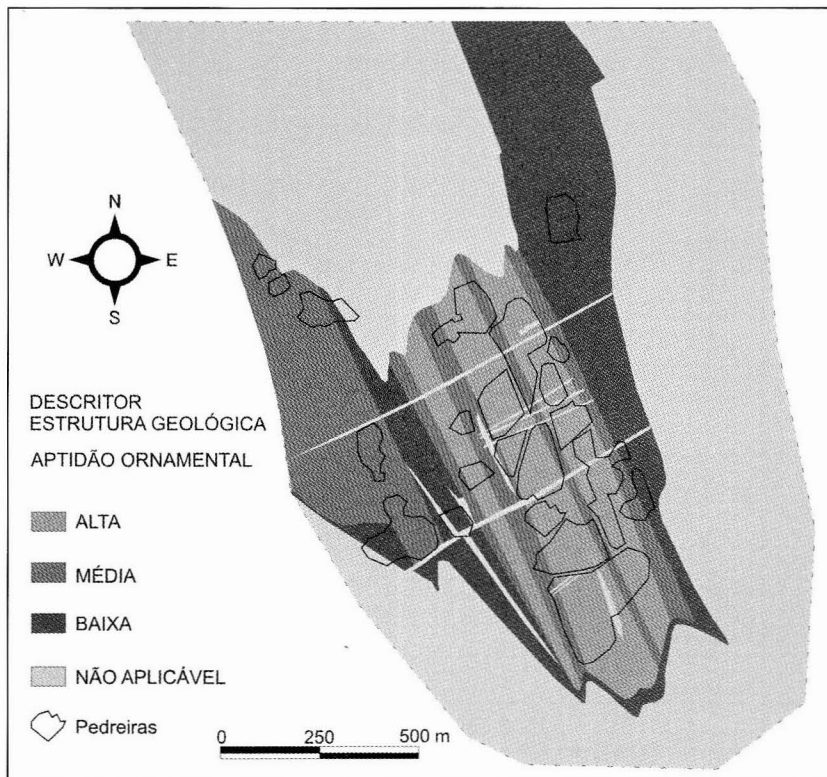


Fig. 12 – Descritor Estrutura Geológica da UNOR 5.

– Geological Structure descriptor of the UNOR 5.

TABELA 6

Classificação e ponderação dos descritores geológicos.

Classification and weighing of the geologic descriptors.

| DESCRITOR | CLASSES | PONDERADORES |
|--------------------------|------------------------------|--------------|
| LITOLOGIA (L) | Sem aptidão | 20 |
| | Baixa aptidão | 5 |
| | Média aptidão | 3 |
| | Alta aptidão | 0 |
| ESTRUTURA GEOLÓGICA (EG) | Não aplicável | 20 |
| | Baixa aptidão | 10 |
| | Média aptidão | 5 |
| | Alta aptidão | 1 |
| FRACTURAÇÃO (F) | Não aplicável | 20 |
| | Zona não estimada | 6 |
| | Zona muito fracturada | 6 |
| | Zona medianamente fracturada | 4 |
| | Zona pouco fracturada | 2 |

as classes de *dlf* apresentadas na Fig. 8. Dado que o estudo geoestatístico não abrangeu a totalidade da área, por inexistência de amostragem, os espaços não abrangidos foram considerados “zona não estimada” e considerados equivalentes aos das zonas muito fracturadas, em termos de razoabilidade para a obtenção de blocos.

A cada uma das classes dos três descritores foi atribuído um peso, a fim de evitar situações discrepantes. Esta ponderação foi objecto de várias simulações que, após validação no terreno, permitiram chegar aos ponderadores apresentados na Tabela 6. É, portanto, uma ponderação para aplicar caso a caso porque carrega subjectividade inerente à interpretação realizada.

Para a avaliação do Risco Geoeconómico do território afecto à UNOR 5 e à excepção de situações limite, como por exemplo a ausência de mármore ou intensa fracturação, não é relevante a caracterização do território em função de cada um dos descritores individualmente. A relevância deve sim ser dada à sua apreciação conjunta, pelo que a análise de Risco Geoeconómico teve como base o cruzamento da informação de cada um dos descritores por intermédio do módulo *Map Calculator* da aplicação informática *ArcGis*, através da seguinte fórmula:

$$\text{RISCO GEOECONÓMICO (RGE)} = \alpha L + \beta EG + \gamma F$$

em que α é o ponderador relativo à Litologia; β é o ponderador relativo à Estrutura Geológica e γ é o ponderador relativo à Fracturação.

O mapa apresentado na Fig. 13 é representativo dos resultados da análise de Risco Geoeconómico, traduzindo, portanto, a susceptibilidade da área UNOR 5 para o aproveitamento económico dos mármore para fins ornamentais. Assim, as zonas correspondentes às classes de Baixo e Médio Risco são as que preferencialmente são favoráveis à exploração do recurso, nomeadamente pela abertura de novas pedreiras ou expansão das existentes. As zonas de Alto Risco são as não favoráveis e que devem, por isso, ser propostas para reabilitação ambiental. Por fim, as zonas Sem Interesse poderão ser objecto de afectação para outros usos que não a exploração propriamente dita.

CONCLUSÕES

O futuro da actividade mineira no anticlinal de Estremoz não passa unicamente pela já conseguida integração em sede de ordenamento do território, nem exclusivamente por condicionalismos de mercado. A sua sustentabilidade futura depende, primeiro que tudo, dos condicionalismos intrínsecos à própria jazida, como sejam a disponibilidade e qualidade do recurso, seguindo-se-lhes então a definição de áreas para abertura de novas explorações ou alargamento das existentes e o planeamento da lavra, entre outras.

O presente estudo procurou dar resposta a algumas destas preocupações através de uma abordagem inova-

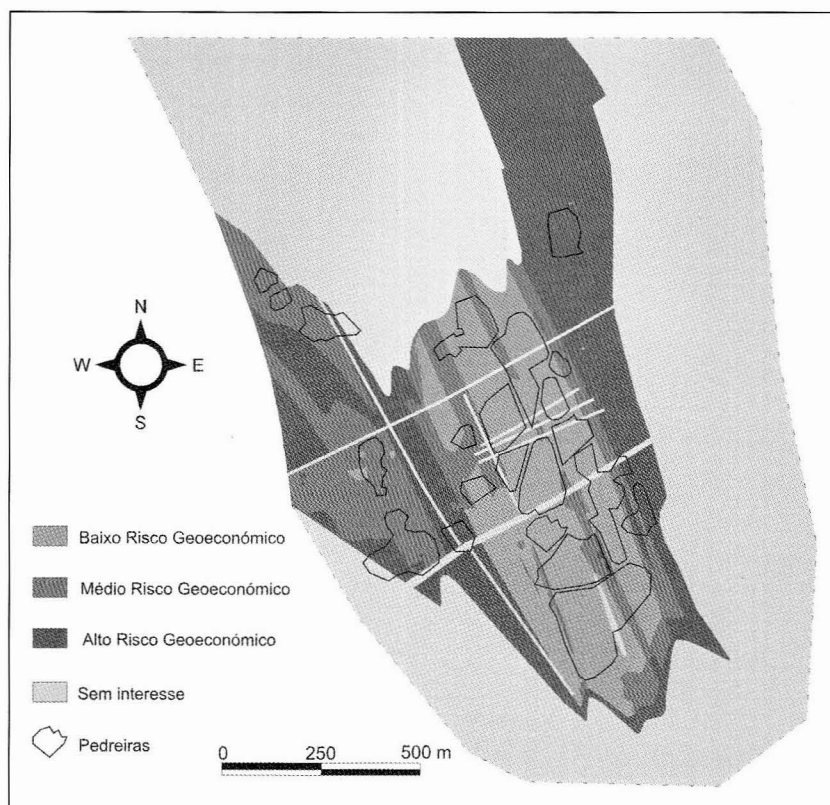


Fig. 13 – Carta de Risco Geoeconómico da UNOR 5.

– Geoeconomic Risk Map of UNOR 5.

dora no que respeita à delimitação e qualificação de áreas, consoante a sua maior ou menor favorabilidade para a exploração. Importa sublinhar que esta abordagem não se pretende definitiva, mas antes metodológica e capaz de adaptação a diferentes cenários, tanto mais que apresenta uma forte componente de subjectividade, inerente à Geologia como disciplina de base que lhe preside. Este é um facto importante a reter, pois é o conhecimento geológico que deve presidir a todas as questões que de algum modo estejam relacionadas com o planeamento da actividade extractiva e uso do solo.

Os resultados alcançados traduzem, em termos de apoio ao sector extractivo e às políticas de ordenamento no Anticlinal de Estremoz, o estado da arte dos conhecimentos geológicos, em particular para a área estudada. A sua fiabilidade poderá ser aumentada através de investimentos para a aquisição de novos conhecimentos

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, T. (1993) – *Análise multivariada de dados e geoestatística da recuperação de pedreiras de mármore*. MSci Thesis, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 82 p.
- CARVALHOSA, A.; GONÇALVES, F. & OLIVEIRA, V. (1987) – *Notícia explicativa da folha 36-D, Redondo*. Serviços Geológicos de Portugal, 63 p.
- GONÇALVES, F. (1973) – Observações Sobre o Anticlínório de Estremoz. Alguns Aspectos Geológico Económicos dos Mármore. *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, XXII, (1/2), pp. 121-132.
- HENRIQUES, P.; FALÉ, P.; MIDÕES, C.; FERNANDES, J.; LUÍS, G.; LOPES, S.; CARVALHO, J. M. F.; MARTINS, L.; SAÚDE, J.; BONITO, N.; AUGUSTO, J.; MACHUCO, A.; DORES, F.; ALMEIDA, I.; MARTINS, N. & VINTÉM, C. (2006) – *Cartografia Temática do Anticlinal como Instrumento de Ordenamento do Território e Apoio à Indústria Extractiva – UNOR 5 (Pardais)*. Internal Report for “AIZM – Acção Integrada da Zona dos Mármore (FEDER) do Eixo Prioritário 2 do PORA”. INETI, Lisboa.

- IGM (1983) – *Catálogo das Rochas Ornamentais Portuguesas*, I, Porto.
- (1984) – *Catálogo das Rochas Ornamentais Portuguesas*, II, Porto.
- LADEIRA, F.L. (1981) – Relação das fracturas dos mármore alentejanos com outras estruturas. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, **XXII**, pp. 227-232.
- LOPES, J.L.G. (1995) – *Caracterização Geológico-Estrutural do Flanco Sudoeste do Anticlinal de Estremoz e suas Implicações Económicas*. MSci Thesis, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 135 p.
- (2003) – *Contribuição para o Conhecimento Tectono-Estratigráfico do Nordeste Alentejano. Transversal Terena – Elvas*. PhD Thesis, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 435 p.
- LUÍS, A.G. (1995) – *Caracterização, avaliação e simulação da blocometria de um jazigo de mármore*, Univ. Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- LUÍS, A.G. & SOUSA, A.J. (1998) – Simulação Geoestatística de Redes de Fracturas Aplicação à Avaliação da Blocometria de um Jazigo de Mármore. *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, **85**, pp. 117-137.
- MATHERON, G. (1970) – *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Les Cahiers du CGMM. Fontainebleau, Paris, 212 p.
- MOREIRA, J. & VINTÉM, C. (1997) – *Carta Geológica do Anticlinal de Estremoz*. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- OLIVEIRA, J.T.; OLIVEIRA, V. & PIÇARRA, J.M. (1991) – Traços gerais da evolução tectono-estratigráfica da Zona de Ossa Morena, em Portugal: síntese crítica do estado actual dos conhecimentos. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **77**, pp. 3-26.
- OLIVEIRA, V.M. (1984) – Contribuição para o conhecimento geológico -mineiro da região de Alandroal – Juromenha (Alto Alentejo). *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, **XXVI**, (1-4), pp. 103-126.
- PEREIRA, H.G. (1979) – Introdução às variáveis regionalizadas. *Técnica*, **451/452**, pp. 89-96.
- PIÇARRA, J.M. (2000) – *Estudo Estratigráfico do Sector de Estremoz - Barrancos, Zona de Ossa Morena, Portugal*. PhD Thesis, Universidade de Évora, Évora.
- PROZOM (2002) – Plano Regional de Ordenamento do Território da Zona dos Mármore. *Diário da República*, I Série – B(106): pp. 4318-4338.
- REYNAUD, R. & VINTÉM, C. (1992) – Estudo da Jazida de Calcários Cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa (Sector Pardais). *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, **34**, pp. 3-84.
- (1994) – Estudo da Jazida de Calcários Cristalinos de Estremoz-Borba-Vila Viçosa. *Boletim de Minas do IGM*, **31**, (4), pp. 357-473.
- RIBEIRO, J. (1994) – *Planeamento da exploração de pedreiras de mármore com base em um índice de recuperação*. MSc Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 121 p.
- SILVA, J.M. & CAMARINHAS, M.V.F. (1957) – Calcários Cristalinos de Vila Viçosa-Sousel. *Estudos, Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro*, **XII**, (1/2), pp. 66-139.
- VINTÉM, C.; SOBREIRO, S.; HENRIQUES, P.; FALÉ, P.; SAÚDE, J.; MIDÕES, C.; ANTUNES, C.; BONITO, N.; DILL, A.C. & CARVALHO, J.M.F. (2003) – *Fase A. AIZM – “Acção Integrada da Zona dos Mármore” (FEDER) do Eixo Prioritário 2 Programa Operacional Regional do Alentejo 2000-2006*. Instituto Geológico e Mineiro e Cevalor, Lisboa. 99 p.

Artigo recebido em Junho de 2007

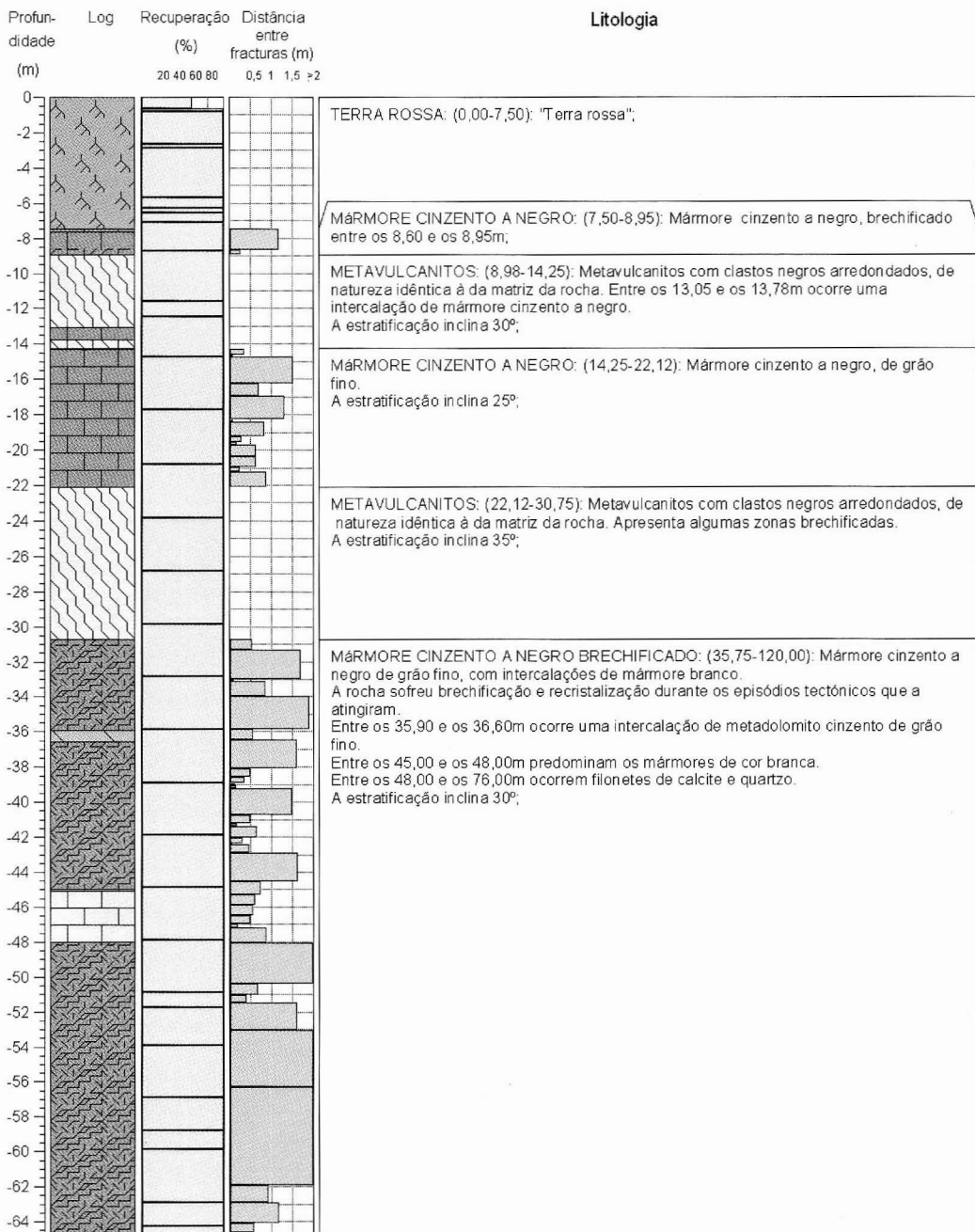
Aceite em Julho de 2007

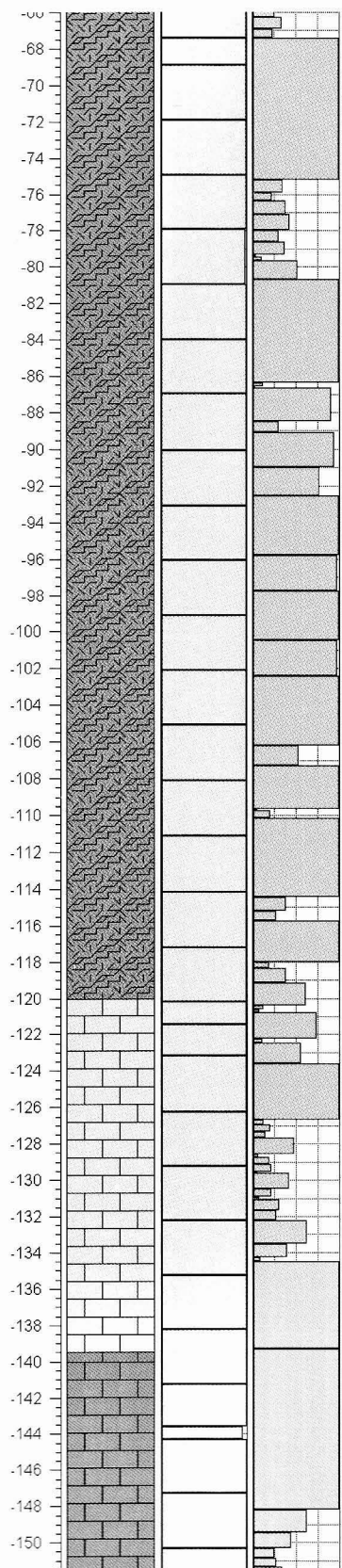
ANEXOS



Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.
Departamento de Prospecção de Rochas e Minerais Não Metálicos

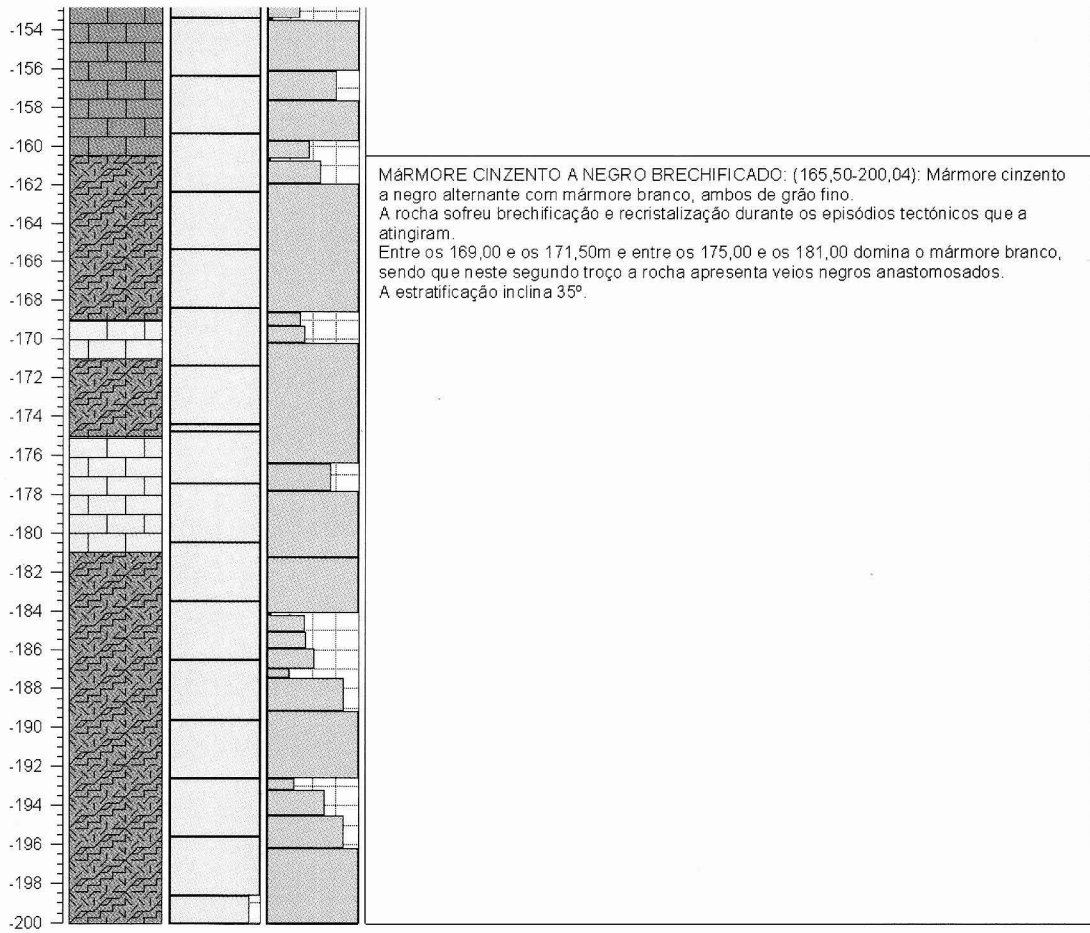
Sondagem: **AIZM 9** Localização: **Pardais (Vila Viçosa)**
 Latitude: **196.805** Longitude: **263.507** Sistema de coordenadas Hayford-Gauss, datum de Lisboa Cota: **374 m**
 Azimute: **---** Inclinação: **90°** Comprimento: **200,04 m** Data: **15Dez04-24Jan05**





MÁRMORE BRANCO A ROSA: (120,00-139,50): Mármore branco de grão fino com muitos veios vermelhos, com intercalações de mármore cinzento a negro que se tornam mais frequentes e menos espessas para o final do troço. A rocha encontra-se brechificada, com veios anastomosados. A estratificação inclina 35°;

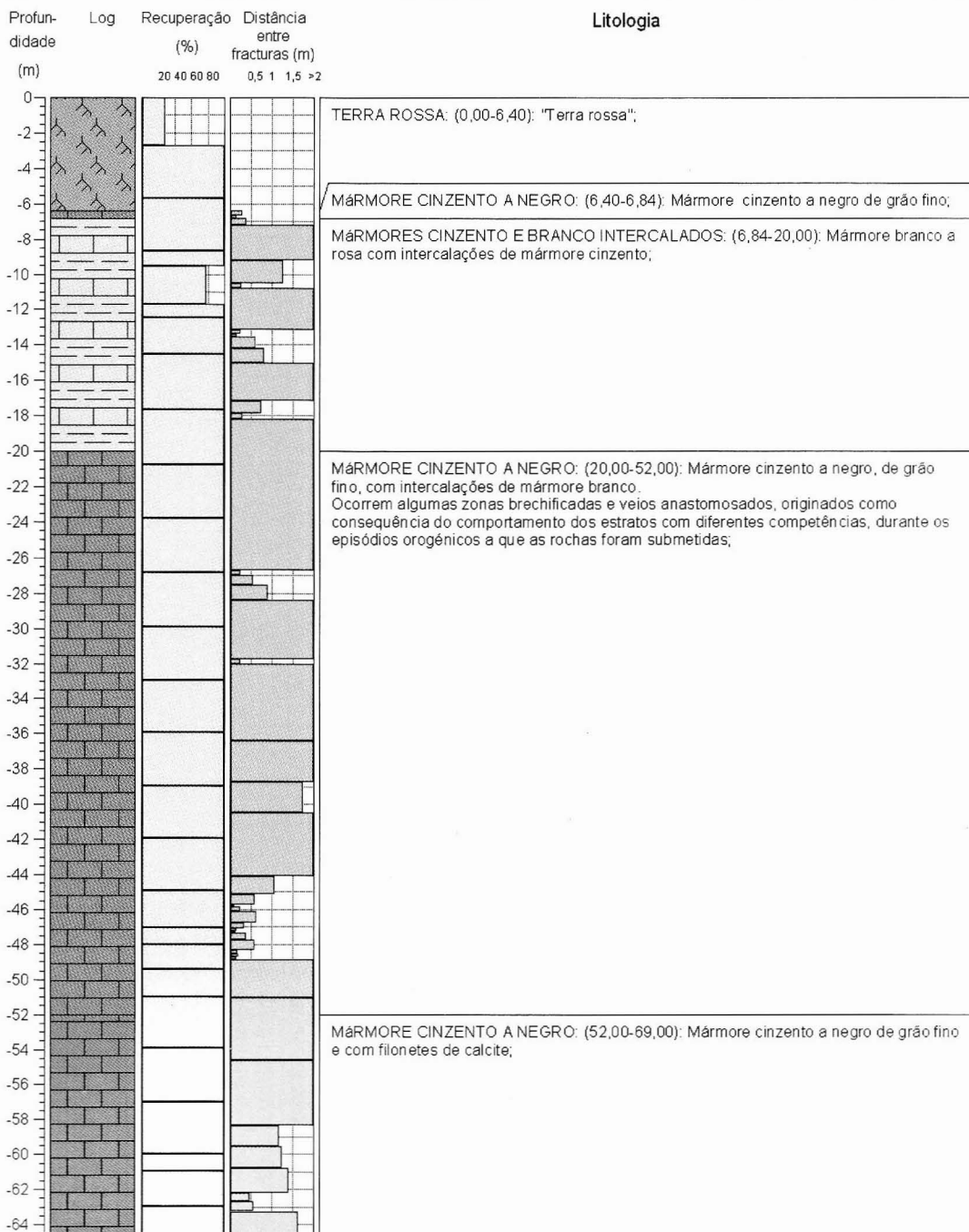
MÁRMORE CINZENTO A NEGRO: (139,50-160,50): Mármore cinzento a negro, de grão fino, ocasionalmente com veios anastomosados;

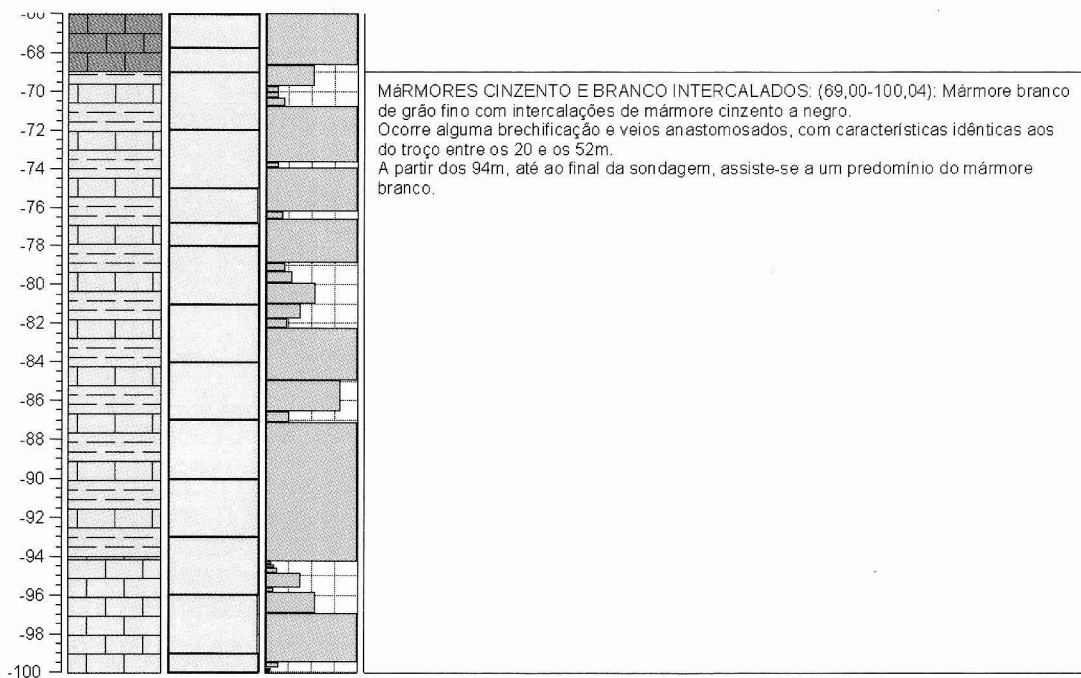




Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.
Departamento de Prospeção de Rochas e Minerais Não Metálicos

Sondagem: **AIZM 10** Localização: **Pardais (Vila Viçosa)**
 Latitude: **196.999** Longitude: **263.472** Sistema de coordenadas Hayford-Gauss, datum de Lisboa Cota: **375 m**
 Azimute: **---** Inclinação: **90°** Comprimento: **100,04 m** Data: **27Jan-15Fev05**

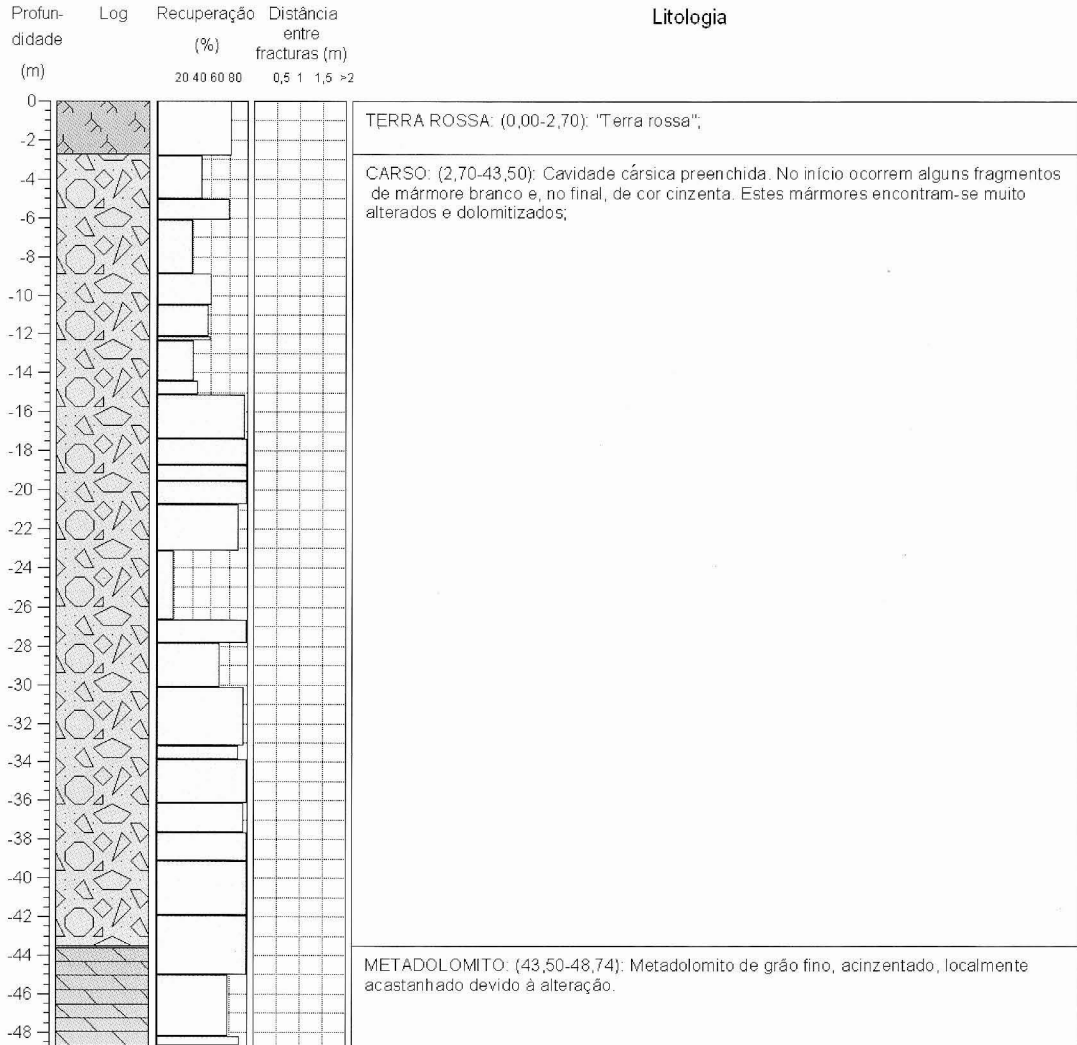






Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.
Departamento de Prospecção de Rochas e Minerais Não Metálicos

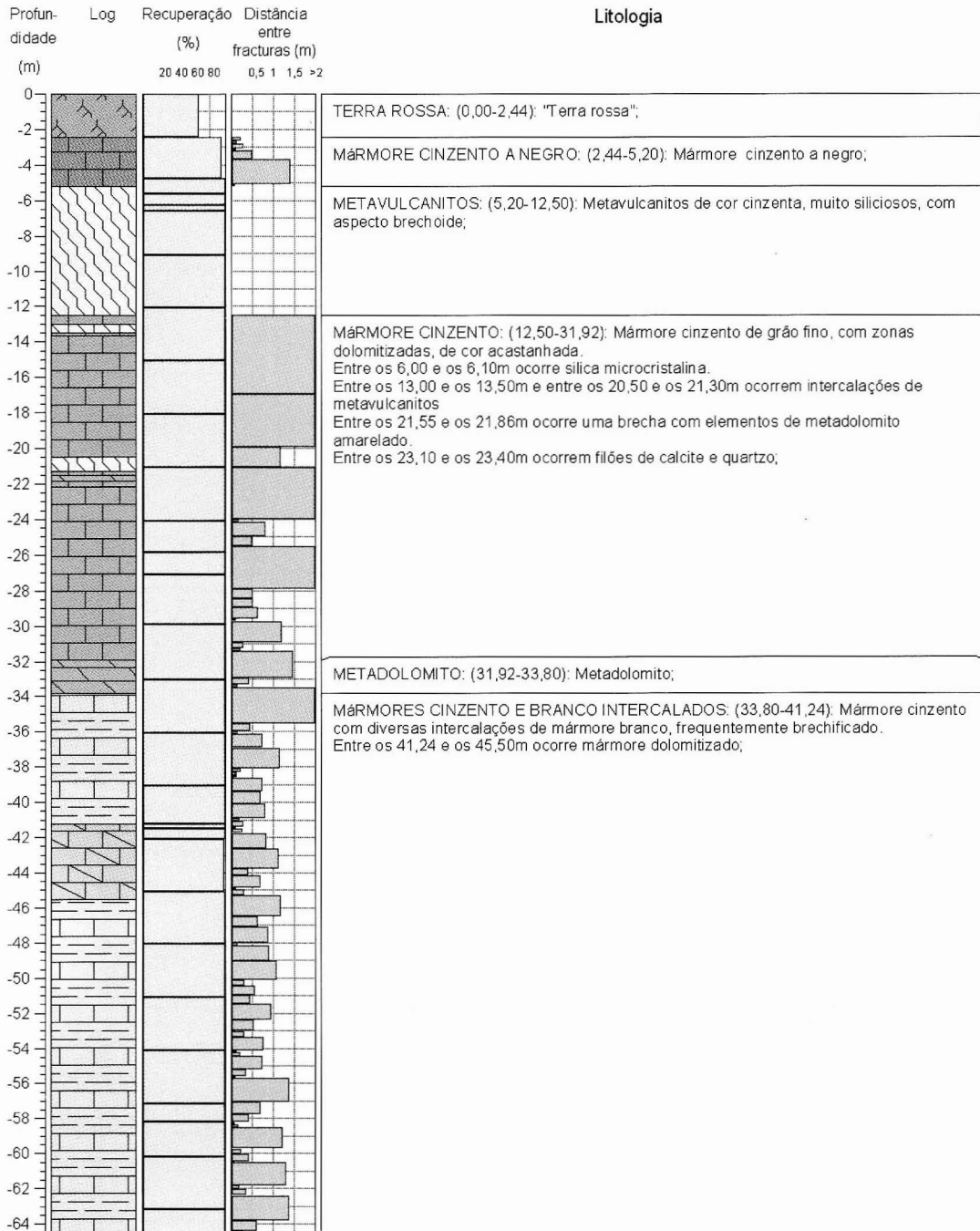
Sondagem: **AIZM 11** Localização: **Pardais (Vila Viçosa)**
 Latitude: **197.041** Longitude: **263.621** Sistema de coordenadas Hayford-Gauss, datum de Lisboa Cota: **373 m**
 Azimute: **N60°E** Inclinação: **60°** Comprimento: **48.74 m** Data: **5-11Abr05**

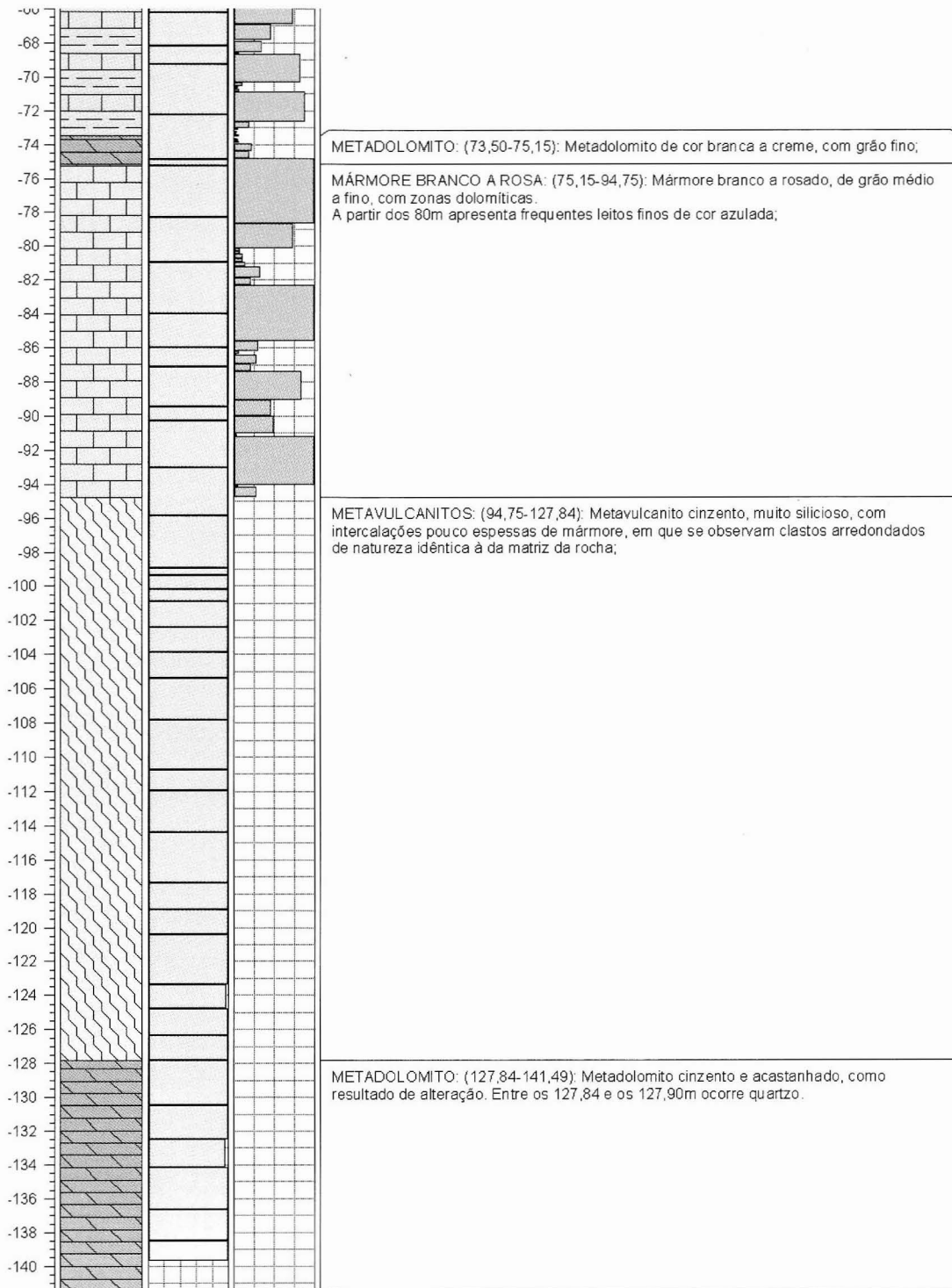


INETI

Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.
Departamento de Prospecção de Rochas e Minerais Não Metálicos

Sondagem: **AIZM 11A** Localização: **Pardais (Vila Viçosa)**
 Latitude: **197.029** Longitude: **263.658** Sistema de coordenadas Hayford-Gauss, datum de Lisboa Cota: **372 m**
 Azimute: **N75°E** Inclinação: **60°** Comprimento: **141,49 m** Data: **12Abr-4Mai05**

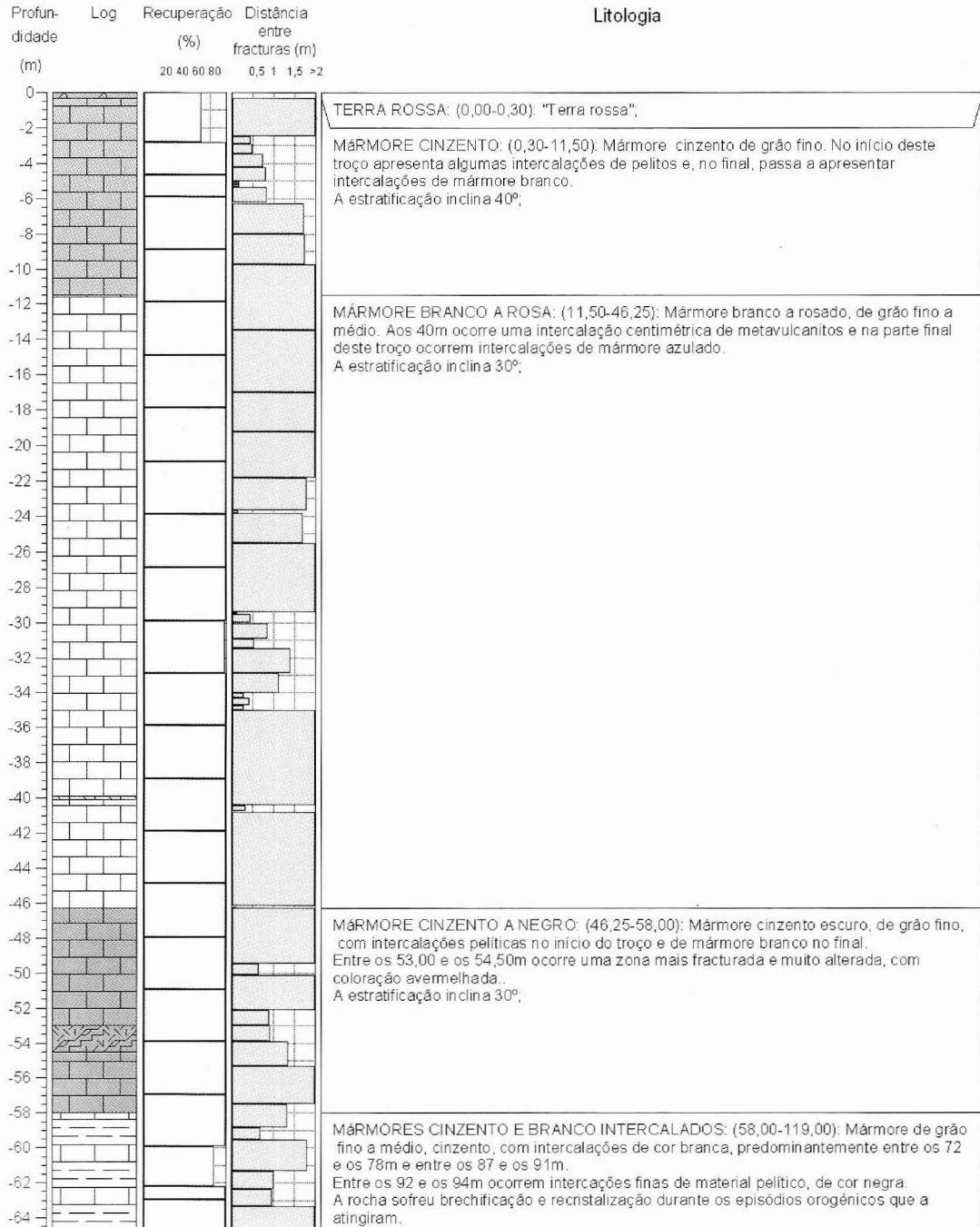


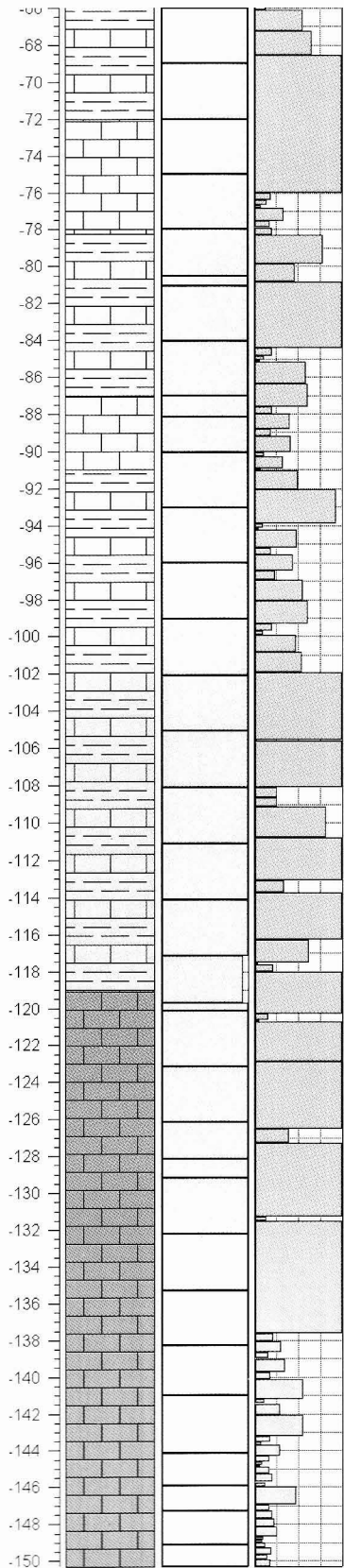




Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.
Departamento de Prospeção de Rochas e Minerais Não Metálicos

Sondagem: **AIZM 12** Localização: **Pardais (Vila Viçosa)**
 Latitude: **196.744** Longitude: **263.880** Sistema de coordenadas: **Hayford-Gauss, datum de Lisboa** Cota: **368 m**
 Azimute: **---** Inclinação: **90°** Comprimento: **150.29 m** Data: **21Fev-11Mar05**





MÁRMORE CINZENTO A NEGRO: (119,00-150,29): Mármore cinzento escuro a negro, de grão fino, de textura e composição bastante uniformes. A estratificação inclina 35°.