

**A IMPORTÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA  
APLICADA ÀS ROCHAS ORNAMENTAIS  
Modos de Actuação do IGM**

*Jorge Carvalho*  
Instituto Geológico e Mineiro, Portugal

---

**1. INTRODUÇÃO**

A investigação científica aplicada ao sector extractivo das Rochas Ornamentais (RO) só a partir das últimas décadas do século XX passou a ser alvo de maior atenção e de investimentos específicos de alguma forma significativos. Esta mudança de atitude resultou, em grande parte, da diferenciação das RO dos restantes materiais de construção em termos de nobreza, cariz ornamental e consequente valor económico acrescido.

Actualmente a investigação aplicada ao sector das RO assenta em acções de I&D desencadeadas por instituições e serviços públicos com competência na área das Ciências da Terra em parceria com um reduzido número de empresas do sector. Uma pesquisa expedita de comunicações apresentadas em seminários e congressos ou de projectos propostos para alguma forma de financiamento, como os que constam da tabela I, permite sintetizar a tipologia dessas acções do seguinte modo:

- optimização, monitorização e segurança dos processos de lavra como resposta ao brusco aumento de consumo que se verificou nas últimas décadas, em particular a partir dos anos 80 e à necessidade de implementação das chamadas Regras de Boas Prática Ambientais e melhoria das condições de Higiene e Segurança no Trabalho.
- caracterização tecnológica, normalização e certificação das RO como suporte às necessidades normativas dum mercado fortemente concorrencial;
- caracterização e análise dos processos de alteração das RO em edifícios e monumentos e sua prevenção, preservação e restauração como resposta à tendência recente para a preservação da herança cultural edificada.

*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*

**Tabela I – Alguns exemplos actuais de acções de investigação no sector das RO**

<sup>1</sup> Characterisation of ornamental stones standards by image analysis of slab surface
<sup>1</sup> Optimisation of stone processing using diamond tules
<sup>1</sup> Downhole abrasive jet cutting operations in quarrying mining and civil engineering
<sup>1</sup> Innovative complete production line for the manufacture of slate flooring tiles
<sup>1</sup> Development of equipment for hard stone underground exploitation
<sup>1</sup> Development of advanced tools for ecological and economic sawing of granite
<sup>1</sup> Effects of the weathering on stone materials: assessment of their mechanical durability
<sup>2</sup> Integração de Sistemas Operacionais de Lavra e Gestão
<sup>2</sup> Interesse prático dos ensaios físico-mecânicos
<sup>2</sup> Dimensionamiento de la piedra natural en el marco de la normativa europea
<sup>3</sup> A machine and Technology for dragging rock blocks
<sup>3</sup> The effects of freezing-thawing cycles on the useability of Isparta Andesite as a building stone
<sup>3</sup> A method concerning the preservation and restoration works of the stones used in historical buildings
<sup>3</sup> Analysis of the bowing phenomenon on stone slabs
<sup>3</sup> Sludge production and management in the industry of Western Alps dimension stones
<sup>4</sup> Aspectos Técnicos de la Explotación de Piedra Natural (Técnicas de Arranque Primario)
<sup>4</sup> Normalización y Control de Calidad
<sup>4</sup> Rochas Ornamentais Portuguesas: Novos Rumos na Exploração de Granitos e Mármoles
<sup>4</sup> Critérios para la Determinación de la Oxidabilidad de las Rocas Graníticas

<sup>1</sup>Projectos apresentados para financiamento da União Europeia. Rede Osnet (<http://www.osnet.ntua.gr/>)

<sup>2</sup>Mini-Foro IBEROEKA de Mármoles y Granitos, Salvador, Brasil, 6 a 9 Abril de 2003

<sup>3</sup>Int. Symp. Indust. Minerals and Building Stones. IAEGE, Istanbul, Turkey, Sept 2003

<sup>4</sup>Avanços e Transf. Tecnol. em Rocha Ornamental. Série Rochas e Minerais Industriais, CETEM (eds.: B. Calvo Perez, M. Maya Sánchez)

Desta análise ressalta a ausência de trabalhos de investigação estruturantes em áreas a montante das problemáticas correntemente abordadas, nomeadamente nas metodologias e acções de prospecção e na avaliação quantitativa e qualitativa dos maciços rochosos eventualmente com aptidão para a produção de rochas ornamentais. Um dos efeitos mais perversos, pelas consequências directas a nível comercial, resulta da inclusão em catálogos de variedades ornamentais de que não se conhecem as reservas e consequentemente, não se conhecem as capacidades de fornecer o mercado. Frequentes são também os casos de variedades ornamentais constantes em catálogos mas que já não fazem parte do circuito comercial por esgotamento da jazida.

Em suma, o investimento em investigação no sector das RO durante os últimos anos tem sido fortemente condicionado, de modo legítimo, por objectivos de natureza comercial, de cariz imediatista, como resultado da forte concorrência que se verifica no sector, com o surgimento de novos centros de produção e de novas variedades ornamentais a um ritmo acelerado, um pouco por todo o mundo. A investigação geológica tendente à descoberta racional de novas jazidas tem estado votada ao esquecimento, o que acarreta dificuldades à elaboração de planos de ordenamento territorial minimamente ajustados a uma política de desenvolvimento sustentável. É esta a problemática que se pretende abordar no presente texto.

## **2. PORQUE NÃO SE INVESTE EM PROSPECÇÃO GEOLÓGICA?**

As razões pelas quais pouco se tem investido em acções de investigação geológica a nível da prospecção e caracterização dos maciços rochosos, quer por parte das empresas do sector, quer por parte dos organismos públicos e outras entidades com competências na área das Ciências da Terra, devem ser analisadas separadamente.

No que respeita às empresas e para além dos elevados custos que tais acções acarretam, o facto de só raramente se investir em investigação tem a sua razão de ser nos aspectos históricos que desde sempre pautaram a relação do Homem com as rochas como materiais de construção, em particular ao nível da disponibilidade de recursos.

Ao contrário de outras matérias primas que pela sua escassez sempre se caracterizaram por um elevado valor económico, justificando fortes investimentos nas metodologias e acções de prospecção geológica visando a revelação de jazidas economicamente rentáveis, o aproveitamento das rochas como material de construção esteve desde sempre facilitado em termos de disponibilidade e acesso aos recursos: os afloramentos rochosos de maiores ou menores dimensões e mais ou menos fracturados que nos rodeiam. No entanto e como mais à frente se fará referência, tais razões já não são válidas. Prevalece a problemática da acessibilidade aos recursos como factor condicionante à sua disponibilidade.

Por outro lado, também a tipologia das empresas do sector contribui para esta ausência de investimento em acções de investigação. São empresas:

- de pequena a média dimensão e com um forte cariz de gestão familiar;
- em que não existem quadros técnicos com aptidão na área das Ciências da Terra e
- em que o desenrolar da actividade extractiva propriamente dita se faz com base em conhecimentos empíricos.

A não existência de técnicos com formação na área das Ciências da Terra nos quadros das empresas revela-se de extraordinária importância. Com efeito, as empresas do sector enfermam, com algumas excepções, duma grande falta de cultura científica neste domínio, pese embora estarem ligadas à actividade extractiva. Assim, perante eventuais investimentos em investigação, as empresas tendem a criar expectativas muito exageradas no que respeita aos resultados e ao prazo de obtenção das mais valias inerentes ao investimento. Face ao goro de tais expectativas, as empresas optam por continuar a desenvolver a sua actividade de modo empírico já que, mesmo perante dificuldades no acesso aos recursos, as condições de mercado que têm vindo a vigorar continuam a permitir a obtenção de elevados rendimentos. Em suma e como já referido anteriormente, as empresas do sector das RO não sentem necessidade nem reconhecem razões para disponibilizarem recursos financeiros a acções de investigação geológica em domínios

em que não possam verificar uma relação de curto prazo entre os investimentos realizados e os lucros obtidos, ou seja, em domínios não directamente relacionadas com a actividade comercial. Quanto muito, pelo menos no que respeita ao caso português, consideram que tal investimento deva ser subsidiado pelo Estado.

Também no que respeita às diversas entidades e organismos públicos com competências na área das Ciências da Terra, pouco desenvolvimento se tem verificado ao nível das metodologias de prospecção geológica e caracterização dos maciços rochosos para RO. Com efeito e embora nos últimos anos se tenha vindo a verificar alguma evolução a esse respeito, prevalece ainda nestas entidades, nomeadamente no meio académico, uma forte vocação para a investigação aplicada ao domínio dos jazigos minerais metálicos e que tem resultado numa estagnação no que respeita ao desenvolvimento de metodologias de trabalho vocacionadas especificamente ao domínio das rochas e minerais industriais e em particular, ao sector das RO. Reside aqui um dos pontos chave com implicações directas na actividade (ou falta de actividade) de investigação por parte das empresas. Os jovens técnicos que entram no mercado de trabalho não têm, dum modo geral, vocação e preparação adequadas ao sector das RO.

### **3. VANTAGENS DO INVESTIMENTO EM INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA**

Face ao exposto até aqui resta a pergunta “porquê investir na investigação geológica das RO?”. A resposta a esta questão pode assumir duas vertentes: uma de cariz directamente relacionado com os aspectos económicos inerentes à exploração dos recursos e outra, mais abrangente, relacionada com o papel a desempenhar e enquadramento da actividade extractiva na sociedade actual.

Assim e tendo em consideração que quanto maior o investimento, por norma avultado, menor será o grau de risco por incertezas, um conhecimento adequado da jazida ao nível da sua morfologia, dimensão e aspectos qualitativos traduz-se, por vezes a curto prazo, em mais valias económicas como resultado da diminuição de custos em diversas fases da actividade, em particular:

- Permite a realização de estudos de pré-viabilidade económica, em contraponto ao comum início de explorações por via experimental, de modo empírico, geralmente fora de enquadramento legal e que na maior parte dos casos acabam por resultar em situações de lavra abandonada ou de muito baixo rendimento e com elevados impactos negativos a nível paisagístico e de ordenamento do território.
- Permite a planificação adequada da lavra e a diminuição do grau de incerteza associado a esse planeamento.

Outro aspecto importante a considerar nesta vertente relacionada directamente com a actividade industrial tem a ver com a actividade financeira ao nível das participações em Capital de Risco e créditos bancários. Com efeito, sendo cada vez mais comum o recurso a este tipo de operações, é de prever que a seu tempo, os intervenientes credores exijam e avaliem garantias ao nível da quantificação e qualificação dos recursos geológicos em causa. É evidente que sem investimento prévio em actividades de prospecção geológica não será possível dar resposta a tais solicitações.

No que respeita ao papel a desempenhar pela actividade extractiva na sociedade actual, não há dúvida de que a manutenção e mesmo melhoramento das nossas condições de vida está dependente dum contínuo suprimento de recursos minerais. Por outro lado, numa sociedade cada vez mais atenta às questões ambientais, em que a actividade extractiva é, norma geral, considerada como um dos principais agentes agressores em que na maior parte dos casos se confunde, injustamente, impacto visual com impacto ambiental, é cada vez maior a competição pelo uso do território. Urge, assim, que esta actividade seja adequadamente enquadrada em planos de ordenamento territorial por forma a que a exploração dos recursos não fique comprometida e que se realize em termos racionais e no respeito pelas regras de boas práticas ambientais, visando, simultaneamente:

- o suprimento de matéria prima;
- a preservação dos recursos;
- a preservação da qualidade ambiental.

Esta problemática tem sido nos últimos anos alvo de intensa discussão e alerta a nível global, nomeadamente no seio da Comunidade Europeia e em fóruns sob a égide da Organização das Nações Unidas, mas tendo sempre como ponto de partida a actividade extractiva instalada, relegando para segundo plano, ou mesmo omitindo, as acções a montante dessa actividade. Veja-se, a título de exemplo, *Good Environmental Practice In The European Extractive Industry: A Reference Guide* por F. Brodtkom (2000), os diversos textos publicados no livro *La Minería en el Contexto de la Ordenación del Territorio* editado por R. C. Villas Boas e R. Page (Rio de Janeiro: CNPq/CYTED, 2001) e a comunicação da Comissão Europeia Com (2000) 265 - Promoção do desenvolvimento sustentável na indústria extractiva não energética da UE. Esta última é paradigmática pois, embora denunciando o baixo investimento em prospecção geológica a nível dos países da União Europeia (68 milhões de Euros em 1998, de acordo com o *Mining Journal*, Vol. 331), aponta como questões prioritárias a prevenção de acidentes na indústria extractiva, a melhoria do desempenho ambiental e a gestão de resíduos. Em suma, o enquadramento da actividade extractiva nas questões de ordenamento territorial e preservação do bem estar comum é analisado, na maior parte dos casos, unicamente à luz da actividade instalada, deixando como que ao acaso o aparecimento de novas áreas produtoras, em função da actividade e investimentos por parte do sector empresarial.

Ora, para que o ordenamento territorial seja uma ferramenta de base eficaz para o desenvolvimento sustentável das sociedades, nomeadamente no respeitante à necessária integração da actividade extractiva nesse desenvolvimento, nos termos atrás referidos, é imprescindível conhecer as potencialidades intrínsecas a esse mesmo território. Na base deste conhecimento estão, não só as acções de prospecção e reconhecimento geológico realizadas por parte do sector empresarial, mas também as entidades públicas na sua função de promotoras e reguladoras de tais actividades. De realçar aqui o papel que os Serviços Geológicos dos Estados Unidos (USGS) têm vindo a desempenhar na inventariação de recursos, realçando que face à depleção global das jazidas actualmente sujeitas a exploração e face à competitividade pelo uso do território é necessário que se tomem medidas para a implementação de actividades de

investigação que possibilitem a descoberta de novas jazidas. Isto aplica-se tanto ao nível global da indústria extractiva como ao nível sectorial das RO.

Se esta problemática está em cima da mesa de debate a nível dos países europeus, não o estará tanto noutros países em que, pela sua dimensão, os problemas respeitantes à acessibilidade aos recursos não são tão prementes, como seja o caso do Brasil, da Índia e da China para o sector das RO. No entanto e considerando os elevados índices de crescimento que se prevêem a curto prazo para estes países e em particular para a China, tal problemática rapidamente estará na ordem do dia, quanto mais não seja, devido à expansão dos centros urbanos e à repercussão mediática, a nível global, das modificações locais induzidas pela indústria extractiva das RO na paisagem.

#### **4. COMO PROMOVER A INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA**

Perante a actual situação de investimentos precários na investigação geológica aplicada às RO, em particular no que respeita a acções e metodologias de prospecção, algo urge mudar. Essa mudança terá que passar por um amadurecimento da actividade empresarial do sector, assente num aumento da respectiva qualificação técnica dos seus técnicos.

Por outro lado e ao nível das entidades com competência para a promoção dos recursos geológicos e do ordenamento do território, terá de haver uma mudança de atitude no sentido de induzir o amadurecimento atrás preconizado. O relacionamento com as empresas do sector extractivo das RO terá que ser mais eficaz, para o que deverá contribuir:

- O fortalecimento das associações industriais de modo a que sejam interlocutores eficazes com os organismos públicos.
- O estabelecimento de contactos institucionais entre grupos reduzidos de empresários sujeitos aos mesmos problemas. O empresário não dispõe de tempo para abordar temáticas muito generalistas nem para abordar problemas dos vizinhos mas que lhe são estranhos.

*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*

- O subsídio parcial ao investimento em acções de investigação estruturantes por parte das empresas, promovendo a criação de hábitos de trabalho que perdurarão após a retirada do subsídio.
- A implementação, em casos extremos, de legislação restritiva à abertura/alargamento de explorações sem os adequados trabalhos prévios de investigação geológica.
- O encetamento de acções de investigação que possam contribuir para um melhor conhecimento dos recursos disponíveis mas que concomitantemente sirvam de exemplos demonstrativos dos benefícios e vantagens que a investigação acarreta.

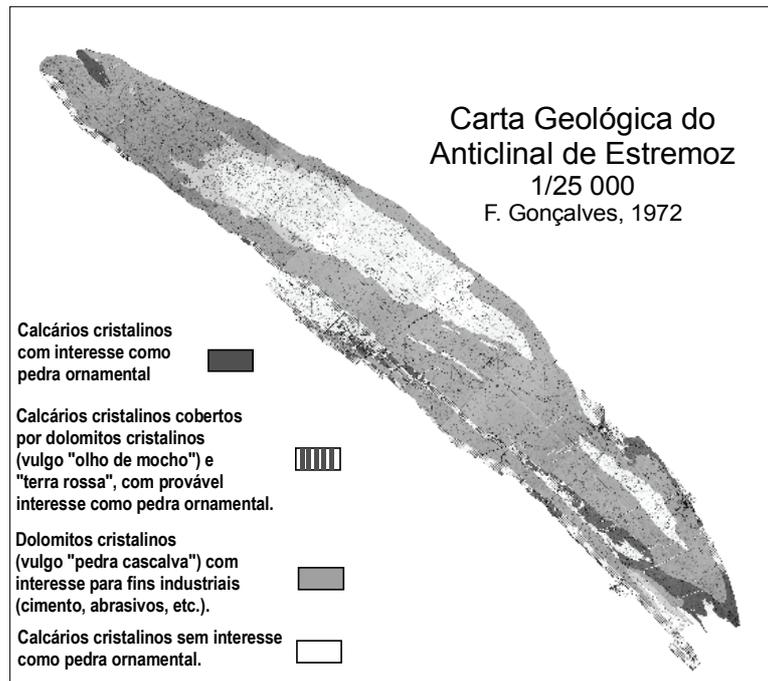
A estes modos de actuação estão subjacentes duas premissas:

- Utilização de linguagem adequada, menos técnica, no relacionamento com os empresários para evitar que ambas as partes não se entendam, como é comum acontecer.
- Melhoria da qualificação científica dos técnicos envolvidos em ambas as partes, o que passa por uma modificação estratégica ao nível da formação académica dos técnicos da área das Ciências da Terra, visando uma adequação às problemáticas em jogo no sector extractivo das rochas e minerais industriais e, em particular, das rochas ornamentais.

## **5. A ACTUAÇÃO DO IGM**

Dada a forte tradição portuguesa na produção de RO, nomeadamente de mármoles, desde os finais dos anos 60 do séc. XX que o Instituto Geológico e Mineiro tem promovido e executado trabalhos de investigação nesse domínio sobre a principal região produtora do país: o Anticlinal de Estremoz. Dessa fase inicial de intervenção resultou a primeira carta geológica temática do Anticlinal de Estremoz que se apresenta na figura 1. No seguimento destes primeiros trabalhos de cartografia geológica temática surgem, também, os primeiros estudos de caracterização muito genérica da fracturação do Anticlinal.

*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*



**Figura 1- Carta geológica do Anticlinal de Estremoz segundo F. Gonçalves, 1972**

Face a crescente importância económica do sector das RO a partir do início dos anos 80, o IGM, como entidade pública responsável pela promoção e valorização dos recursos geológicos portugueses, intensificou a sua actuação neste domínio com a realização de novos trabalhos de investigação aplicada, alargando-a a outras regiões do país e que se prolongaram até final dos anos 90. Merecem aqui destaque os trabalhos de cartografia geológica temática detalhada realizados no Maciço Calcário Estremenho que contribuíram para a forte dinamização da produção de calcários ornamentais e os trabalhos de reconhecimento geológico de maciços graníticos produtores de RO. O mapa apresentado na figura 2 refere-se à área de Pé da Pedreira com cerca de 20 km<sup>2</sup> e nele pode-se constatar o detalhe alcançado em função duma cartografia litoestratigráfica de detalhe à escala 1/2000. Esta área corresponde ao

*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*

principal centro produtor de calcários ornamentais do Maciço Calcário Estremenho em Portugal, onde a actividade extractiva se processava dum modo completamente desordenado face à ausência dum conhecimento prévio da jazida.



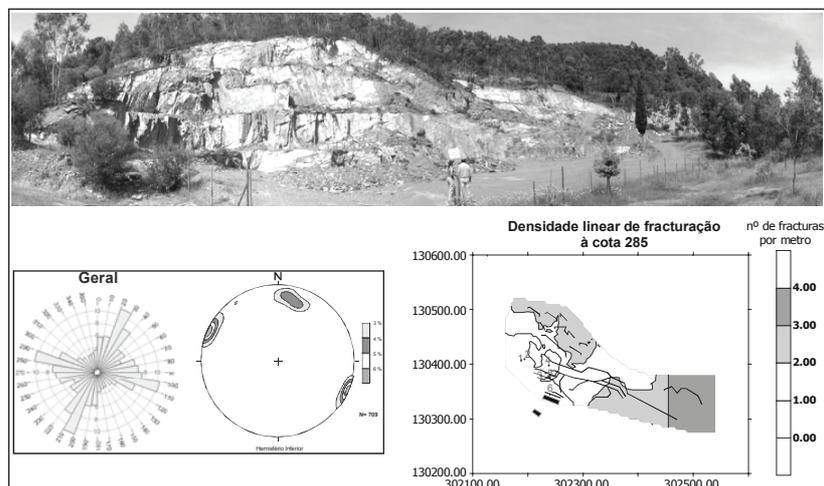
**Figura 2 - Carta geológica temática da área de Pé da Pedreira (MCE - Portugal)**

Na linha de intervenção do IGM para a valorização dos recursos geológicos, a publicação em 1998 da Carta Geológica Temática do Anticlinal de Estremoz à escala 1/10 000 representa um novo e importante marco com forte impacto no apoio à actividade extractiva nessa região produtora de mármore ornamentais.

Foi durante este período de tempo que a fracturação se revelou como um dos principais factores condicionantes da aptidão dum maciço rochoso para a produção de rochas ornamentais, desencadeando novas linhas de investigação que não unicamente a cartografia temática detalhada. Conduziram ao estabelecimento de parcerias de colaboração com outras entidades, em particular com o Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa no desenvolvimento da aplicação de metodologias de investigação

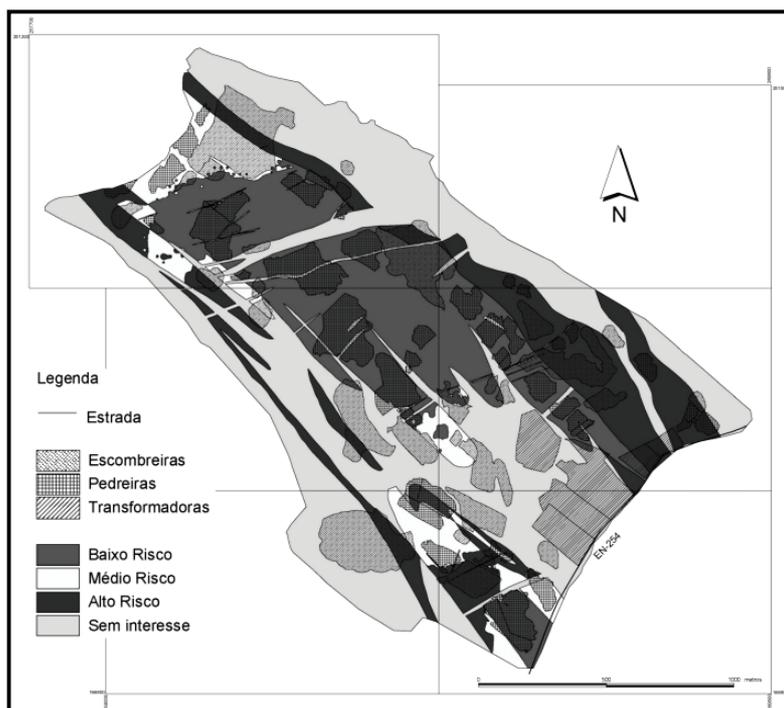
*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*

geoestatística aplicada ao estudo de fracturação dos mármoles do Anticlinal de Estremoz, como ferramenta importante para a selecção de áreas favoráveis à exploração. Neste âmbito, merecem destaque os trabalhos promovidos pelo IGM tendentes à selecção de locais favoráveis à exploração subterrânea de mármoles e à selecção dos locais favoráveis à exploração de xistos ornamentais numa pedreira junto à vila de Barrancos (Alentejo, Portugal).



**Figura 3 - Estudos de fracturação aplicados a uma pedreira de xistos ornamentais em Barrancos (Alentejo - Portugal)**

Concomitantemente e promovendo o enquadramento da actividade extractiva nos planos de ordenamento territorial, a actividade do IGM no domínio das RO tem-se vindo a centrar na investigação de metodologias que permitam não só a valorização e enquadramento desses recursos nos Planos de Ordenamento do Território, como também o apoio directo à actividade extractiva. As cartas de aptidão dos centros produtores de calcários ornamentais no Maciço Calcário e as cartas de Risco Geo-económico de centros de produção no Anticlinal de Estremoz, como a apresentada na figura 4, são o exemplo sintomático deste tipo de actuação.



**Figura 4 - Carta de Risco Geo-económico da Unidade de Ordenamento 3 - Vigária (Anticlinal de Estremoz - Portugal)**

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os planos de ordenamento do território são uma das ferramentas fundamentais ao desenvolvimento sustentável das sociedades. Não se podendo pôr em causa a necessidade dum suprimento contínuo de matérias primas minerais por forma a manter e melhorar o actual padrão de vida duma população global em crescimento, verifica-se, contudo, dificuldade em enquadrar a indústria extractiva em tais planos de ordenamento. A problemática da disponibilidade de recursos tem vindo a ser suplantada pela problemática da acessibilidade a esses mesmos recursos, pelo que é necessária uma aposta no melhoramento do desempenho ambiental da indústria extractiva e na descoberta de novas fontes de matéria

*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*

prima. Enquanto que ao nível da melhoria do desempenho ambiental da indústria extractiva têm sido dados passos importantes, fruto de fortes investimentos na investigação de novas metodologias e processos, o mesmo não se verifica no que concerne à prospecção geológica. Com efeito, face aos problemas de acessibilidade aos recursos e à depleção das actuais fontes de matéria prima, urge encetar esforços em acções de investigação tendentes à descoberta de novas jazidas.

Se esta problemática se faz sentir de modo global em toda a indústria extractiva, faz-se sentir de modo mais pertinente ao nível das rochas e minerais industriais e particularmente, no sector das rochas ornamentais, onde é potenciada pela tipologia das empresas do sector, pelas condições dum mercado em crescimento mas muito concorrencial e ainda fornecedor de elevados dividendos e pelo reduzido número de técnicos com formação específica na área.

A experiência do IGM neste domínio mostra que a implementação de acções de investigação estruturantes a médio e longo prazo no sector das rochas ornamentais, em particular a montante da actividade extractiva propriamente dita, permite um melhor aproveitamento dos recursos, com óbvias vantagens do ponto de vista económico. Concomitantemente, a implementação destas acções tem despoletado uma melhoria do desempenho ambiental por parte das empresas, facilitando o enquadramento desta actividade nos planos de ordenamento do território, o que contribui para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

- BRODKOM, F. (2000) - Good Environmental Practice In The European Extractive Industry: A Reference Guide. Centre Terre Et Pierre - Belgium.
- GONÇALVES, F. (1970)- Contribuição para o conhecimento geológico dos mármoles de Estremoz. Est. Notas e Trabalhos do SFM, Porto, Vol. 20, Fasc. 1-2.
- LADEIRA, F. L. (1981) - Relação das fracturas dos mármoles alentejanos com outras estruturas. Boletim Soc. Geol. De Portugal, 22, pp. 227-232.

*Roberto Villas Boas, Benjamin Calvo y Carlos Peiter, Editores*

- PÉREZ, B. C. (2001) - As rochas e os minerais industriais como elemento de desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 37 p.. Série Rochas e Minerais Industriais, 3.
- PÉREZ, B. C. (2001) - Avanços e transferência tecnológica em rocha ornamental. Benjamín C. Pérez e Mario M. Sánchez (eds.). Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Série Rochas e Minerais Industriais, 4. 200 p..
- SINGER, D.; MENZIE, W.; SUTPHIN, D.; MOSIER, D. and BLISS, J. (2001) - Mineral Deposit Density – An Update. U.S. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 1640-A (Contributions to global mineral resource assessment research).
- VILLAS BÔAS, R. C.; PAGE, R. (2001) - La Minería en el contexto de la ordenación del territorio. Roberto C. Villas Bôas, Roberto Page (eds.). Rio de Janeiro: CNPq/CYTED, 416 p..
- WALTON, G.; LEE, M. (2001) - Geology for our Diverse Economy - Report on the Programme Development Group for Onshore Geological Surveys. British Geological Survey. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- WELLMER, F.-W.; BECKER-PLATEN, J. D. (2002) - Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 91: 723-745.