

# DIMENSIONAMENTO RACIONAL DE SUPORTES EM MINAS DE CARVÃO

## Rational Design of Supports in Coal Mines

por

C. DINIS DA GAMA\*

C. MENDONÇA ARRAIS\*\*

M. COELHO DOS SANTOS\*\*\*

**RESUMO** — A necessidade de manter estáveis as escavações mineiras subterrâneas durante o período de sua utilização requer uma conjugação de estudos de natureza geomecânica, de métodos de exploração e das respectivas implicações económicas. No caso das minas de carvão, a natureza sedimentar dos terrenos e as suas propriedades geomecânicas tornam esse problema de difícil solução.

Com o objectivo de racionalizar a escolha de suportes para as aberturas da Mina de Germunde foi desenvolvido um extenso programa de investigação, patrocinado pela Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (CECA), o qual permitiu alcançar diversas conclusões de interesse. Verificou-se existir uma correlação importante entre as velocidades de convergência das cavidades, as propriedades geomecânicas da rocha circundante e a densidade de suporte a aplicar.

Em consequência dessas investigações, é descrito um critério de selecção de suportes, para a estabilização de novas galerias e travessas em minas, o qual oferece vantagens sob os pontos de vista de segurança e de economia.

**ABSTRACT** — The need to maintain mine excavations stable during the period of their utilization requires the integration of studies on geomechanical characterization, mining methods, and the corresponding economic implications. For coal mines, the sedimentary type of ground and their poor geomechanical properties complicate the solution of that problem.

In order to implement the selection of supports in the Germunde Coal Mine an extensive research program was developed, under the sponsorship of the European Community of Coal and Steel, which led to several interesting results.

It was found that a good correlation exists between the cavities' velocity of convergence, the geomechanical properties of the surrounding rocks and the density of support to be applied.

In consequence of these investigations, a support selection criterion is described with the purpose of stabilizing new mine excavations, which seems to provide safety and economic benefits.

---

\* Professor do IST.

\*\* Administrador da ECD.

\*\*\* Estudante de pós-graduação do IST.

## 1 — INTRODUÇÃO

É do conhecimento geral que o controlo do comportamento do maciço rochoso na vizinhança das aberturas mineiras constitui um dos mais importantes problemas geomecânicos que se apresentam em qualquer mina subterrânea, principalmente em minas de carvão, onde as propriedades mecânicas das rochas carboníferas e das rochas encaixantes, geralmente pouco competentes e com elevado grau de deformabilidade, obrigam pois as aberturas mineiras a serem objecto de sustimento intensivo, com conservação e reformas muito dispendiosas. Da qualidade desse controlo depende directamente a segurança dos trabalhos mineiros. Indirectamente, na medida em que o mesmo controlo permitir que se domine a estabilidade dos terrenos, conseguir-se-ão também, mercê da aplicação das mais convenientes técnicas de suporte e das mais adequadas soluções para o arranque e para o tratamento dos vazios da exploração, efeitos mais ou menos significativos na economia da lavra.

De acordo com os conhecimentos de Mecânica das Rochas aplicados às escavações subterrâneas sabe-se que a pior qualidade mecânica de uma massa rochosa requer um equilíbrio óptimo de pressões com grandes deformações. Assim, em geral, a condução da escavação em massa rochosa de má qualidade sofrerá grandes deformações antes de alcançar o equilíbrio óptimo de tensões. Por outro lado, aquelas escavações em massa rochosa de boa qualidade admitem somente baixas deformações durante o processo de equilíbrio. Daí a importância que se dá ao controlo geomecânico das aberturas subterrâneas, principalmente em minas de carvão, para a previsão da estabilidade dessas aberturas.

Por outro lado, a estabilidade das escavações subterrâneas, em minas de carvão, só pode ser assegurada se os maciços rochosos tiverem determinadas características de resistência e se os vazios possuírem determinadas formas geométricas, não excedendo determinadas dimensões umas e outras susceptíveis de serem melhoradas com a instalação de sistemas de suportes nas cavidades.

O desafio actual da Mecânica das Rochas é pois o de estabelecer, de forma mais geral possível, os modelos e as leis de comportamento, por um lado, do material que é a rocha e, por outro lado, do ambiente em que se encontra, que é o maciço rochoso.

Neste sentido é sumamente importante fazer uma clara distinção entre rocha (material) que tem localmente uma homogeneidade relativa, em certa escala macroscópica, e pode ser considerada como um corpo contínuo, e o maciço rochoso que apresenta sempre um certo grau de heterogeneidade sobretudo um alto grau de fracturação e com grande número de descontinuidades de todos os tipos, que o torna um corpo altamente descontínuo.

Após a época heróica do empirismo, que pode ser chamada também de “rigidez fundamentalista”, admitiram os especialistas que as deformações das rochas, e por conseguinte dos maciços rochosos, poderiam ser estudadas utilizando-se das leis da elasticidade, ou seja, seriam calculáveis com base em modelos elásticos, supondo que os deslocamentos fossem proporcionais às forças aplicadas e perfeitamente reversíveis. Ao mesmo tempo, em laboratório, estuda-se a deformação e resistência de amostras de rochas, simulando a elasticidade da rocha a grandes profundidades, noção esta que actualmente já se mede experimentalmente sobre amostras de rochas submetidas a pressões elevadas.

Levou bastante tempo para entender que um maciço rochoso, formado somente por rochas elásticas, globalmente pode ter um comportamento não linear e até plástico, devido à ocorrência de deslocamentos diferenciais ao longo de suas superfícies de descontinuidades.

A noção deste tipo de comportamento, que é mais um fenómeno de resistência do que deformação, esteve na origem dos modelos plásticos e de métodos de avaliação chamados de "equilíbrio limite", os quais têm certa similaridade com os métodos clássicos da Mecânica das Rochas.

## 2 — A MINA DE GERMUNDE

A Mina de carvão de Germunde, integrada no couto mineiro do Pejão, situa-se no Norte de Portugal, a cerca de 40 km da cidade do Porto, na bacia carbonífera do Douro.

Nesta bacia, que se desenvolve numa extensão de aproximadamente 50 km com orientação geral NW-SE, a estrutura carbonífera do Estefaniano G. Inf. é constituída por um sistema complexo de escamas subverticais, no qual se encontram representadas, alternadamente, formações xistosas, gresosas e antracíticas, encaixadas entre o Ordovícico e o Câmbrico; ocorre uma importante falha de cavalgamento do Ordovícico sobre o Carbonífero que limita o tecto da estrutura, cujo muro é representado por uma brecha de base, discordante sobre as formações mais antigas do Câmbrico (Fig. 1), segundo Wagner, R. H., Lemos de Sousa, M. J. (1984-1985), Pinto de Jesus, Ary Delmar (1986) e ECD — Relatório para a CECA, parte I (1990).

A norte da área de Germunde, o rio Douro corta a jazida, definindo naturalmente um limite do campo de exploração e conferindo particular importância, sob o ponto de vista da lavra, às características geohidrológicas das formações ocorrentes. Em relação a estas características, pode afirmar-se que existem três unidades distintas, correspondentes às três grandes unidades geológicas presentes: Câmbrico, Silúrico e Carbónico.

O Câmbrico é a mais homogénea, impermeável e seca destas três unidades; à superfície, mostra uma importante capa argilosa de alteração, praticamente impermeável, que drena sobre ela a água das chuvas para fora do respectivo afloramento.

Quanto ao Silúrico, os xistos que, na área da mina, formam a parte mais alta do tecto das formações carbónicas são muito mais resistentes à meteorização que os xistos Câmbricos; por isso, à superfície, a respectiva zona alterada é pequena, não existindo qualquer capa argilosa de cobertura que proteja da entrada da água das chuvas nas juntas mais abertas existentes paralelamente à foliação geral; a anisotropia da permeabilidade nestes xistos, devido à percolação preferencial nas juntas mais abertas, é geralmente grande. Muito diferente do correspondente a estes xistos é, porém, o comportamento geohidrológico dos níveis de quartzito e de conglomerados ocorrentes no mesmo Silúrico, de elevadas permeabilidades, que possuem características de excelentes aquíferos, susceptíveis de importantes capacidades de armazenamento.

No Carbónico, devido à sua litologia e à sua conturbação tectónica, da qual resultou abundância de materiais argilosos em dobras e falhas, a permeabilidade é baixa, não havendo condições para a formação de aquíferos.

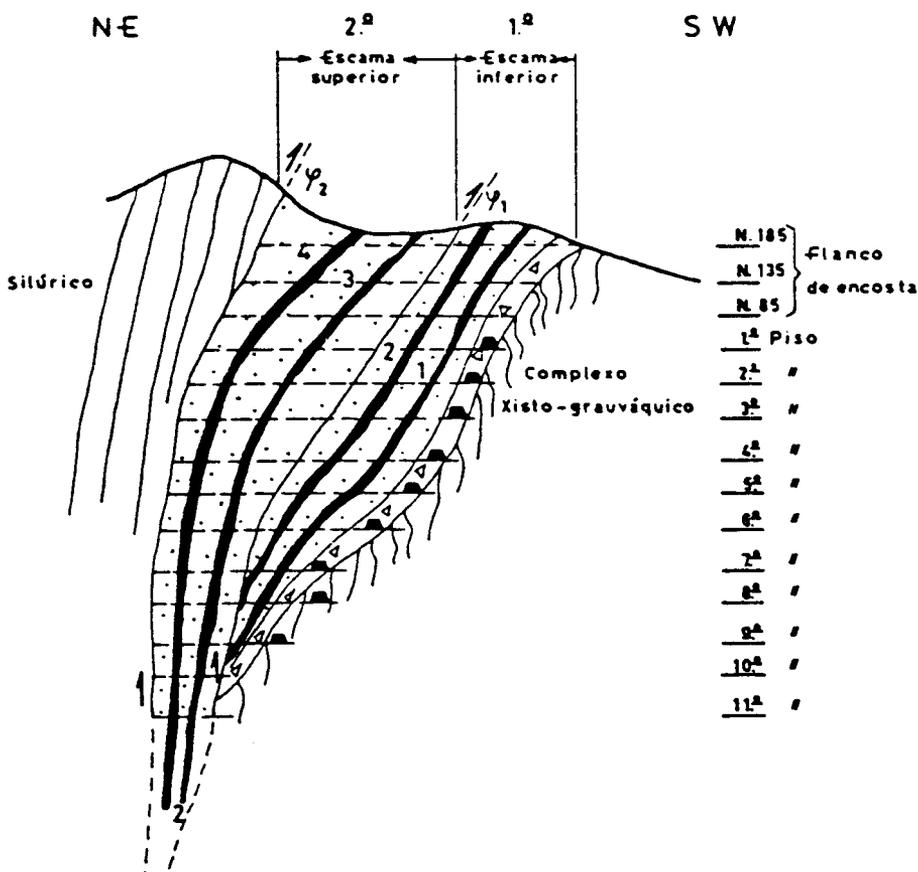


Fig. 1 — Corte estrutural esquemático da jazida de Germunde (ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990)

Posteriormente, gerou-se a sub-bacia, um pouco mais recente, que inclui a sucessão sedimentar da escama superior de Germunde e que abrange um leque aluvial, os conglomerados fluviais provenientes do Paleozóico Inferior de Serrinha e os complexos de carvão 3 e 4.

## 2.1 — Método de lavra utilizado

Na concepção actual, a mina de Germunde é servida por três poços verticais (um poço de serviço e um de extracção localizados a NW, próximos ao rio Douro, e um poço de ventilação no extremo SE da zona trabalhada), e encontram-se definidos pisos de exploração desde o nível + 135 m até ao nível - 480 m (9.º piso), onde os pisos mais profundos, a partir do 6º piso (-300 m), são equidistantes de 60 m. Em cada piso existe uma galeria de rolagem em direcção ao muro do jazigo, da qual partem travessas situadas em planos verticais distanciadas 100 m umas das outras (Fig. 2); as intersecções destas travessas com as várias camadas constituem inícios das preparações de desmontes (ECD, Relatório para a CECA, parte I, 1990).

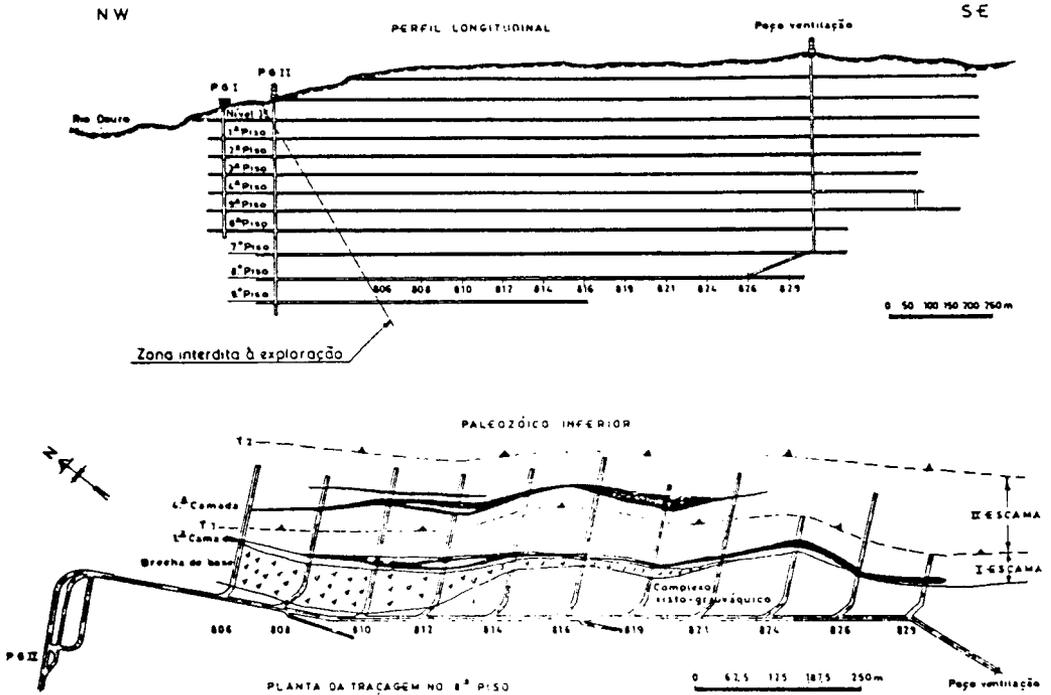


Fig. 2 — Traçagem da Mina de Germunde (ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990)

O método de desmonte utilizado é o do desabamento em retirada a partir de chaminés inclinadas. Neste método, a preparação é feita de modo a que, dentro dos planos dos desmontes, todo o transporte do carvão, até às galerias de piso, possa ser feito por gravidade, sobre canais fixos.

Para que este transporte se processe em boas condições, ou seja, espontaneamente mas sem acelerações exageradas, convém instalar os canais com inclinações entre 25° e 30°. Adopta-se por isso, em Germunde, o declive de transporte de 27°, valor este que está na base não só da preparação dos desmontes mas também da traçagem geral da mina

Para a preparação do desmonte, a partir da intersecção duma travessa com uma camada de carvão abrem-se, sobre o muro desta, em princípio para NW e para SE, chaminés inclinadas a 27°, localmente designadas por "primários" (Fig. 3), uma das quais, pelo menos, se prolonga geralmente até à cota do piso imediatamente superior, 60 m acima. Nota-se que, para a inclinação considerada de 27°, sobre a camada, e um pendor médio da camada de 70°, esse primário atinge o piso superior a uma distância de aproximadamente 100 m do plano da travessa de que partiu; sendo este o motivo por que, na traçagem actual da mina com pisos equidistantes de 60 m, os planos das travessas que intersectam as camadas distam 100 m uns dos outros.

A partir dos primários e sempre, tanto quanto possível, sobre o muro da camada, abrem-se, em sentido contrário, outras chaminés, também a 27° e designadas por "secundários" (Fig. 3), que se prolongam, em princípio, até à zona da camada já desabada. Entre dois secundários consecutivos deixa-se um maciço de carvão com 5 m de espessura. São estes maciços que, posteriormente, se desmontam em retirada, fazendo-os desabar para o secundário inferior, em regra com o auxílio de algum explosivo, aplicado em pegas em leque abertas no tecto daquele secundário (Fig. 4).

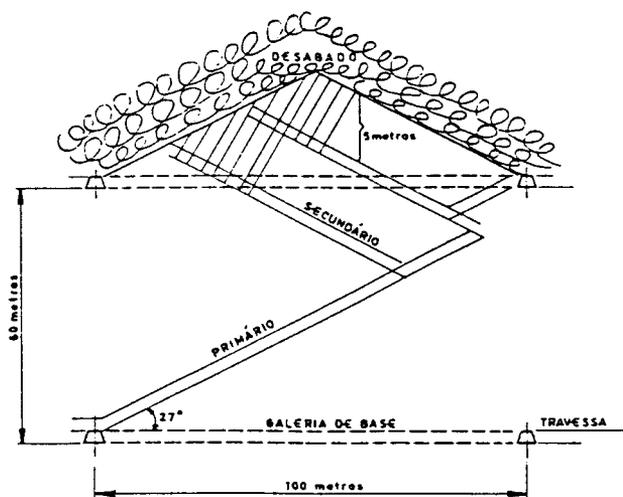


Fig. 3 — Preparação para desmonte na Mina de Germunde (ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990)

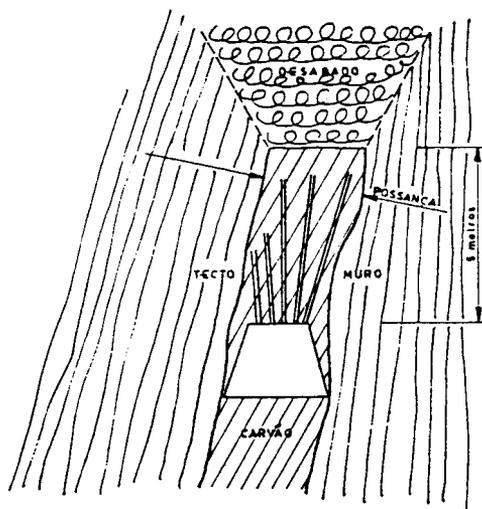


Fig. 4 — Furação em leque, para desabamento, na Mina de Germunde (ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990)

Se, todavia, a espessura local da camada a desmontar é importante, abrem-se ainda outras chaminés, também com 27° de inclinação, chamadas "terciários", partindo dos secundários e do piso para o tecto da camada.

Os maciços de 5 m de espessura, entre secundários consecutivos, proporcionam tectos de carvão "in situ" suficientemente firmes para garantirem a segurança do pessoal e dos equipamentos utilizados na operação de perfuração para o desabamento. Este por seu lado, quando do disparo do explosivo, é controlado por barragens amovíveis de madeira, que se instalam no secundário a que o material afluí (ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990).

## 2.2 — Caracterização geomecânica do maciço de Germunde

Dada a heterogeneidade existente no maciço de Germunde e a dificuldade de avaliação dos estados de tensões nele instalados, devido à sua enorme complexidade e tectonismo muito conturbado, são de se esperar dificuldades praticamente insuperáveis na interpretação de qualquer resultado de medições, que eventualmente com esse objectivo venham a efectuar-se, mesmo que estas medições sejam numerosas e permitam a realização de análise estatística dos resultados.

Por outro lado, julga-se necessário uma caracterização mecânica individual para os tipos litológicos (carvão, arenitos, conglomerados, etc.) ocorrentes quer nas camadas a explorar quer nos seus tectos e muros, devidamente correlacionada com a correspondente caracterização petrográfica.

Em relação à determinação dos estados de tensão reinantes no maciço e dadas as dificuldades práticas de suas medições, julga-se mais importante tentar avaliá-los pelas suas respectivas consequências, ou seja, pelas deformações a que dão lugar. As propriedades mecânicas das rochas foram medidas em laboratório a partir de provetes obtidos em sondagens dentro da mina, sendo determinados os valores da resistência à compressão uniaxial e os módulos de deformabilidade secantes após se atingirem níveis de carga de 10 MPa. As deformações longitudinais foram obtidas com deflectómetros mecânicos e as extensões transversais com extensómetros eléctricos de resistência. Das amostras de carvão foram talhados provetes paralelepípedicos, cujas deformações longitudinais foram medidas entre topos.

Do conjunto de resultados apresentados pode concluir-se que existe uma diferença marcante entre as características do carvão e as das restantes rochas constituintes do maciço. Considerando os valores médios das propriedades em apreço, obtidas para estas últimas, valores estes com ordens de grandeza análogas às dos valores das mesmas propriedades para cada um dos tipos individuais, pode construir-se o quadro seguinte, onde tal diferença ressalta bem.

TABELA 1  
Propriedades mecânicas do maciço de Germunde

	Módulo de deformabilidade (GPa)	Tensão de rotura à compressão uniaxial (MPa)
Carvão	1.1	10.4
Outras rochas do maciço	40.6	49.2

Com efeito, em relação ao carvão as restantes rochas do maciço apresentam-se, conforme este quadro evidencia, 36,9 vezes (ou seja, aproximadamente 40 vezes) menos deformáveis e 4,7 (ou seja, aproximadamente 5 vezes) mais resistentes.

Esta constatação justifica que, para efeitos de classificação geomecânica do maciço com fins práticos de aplicação de sustimento, se distingam claramente as zonas onde ocorre carvão daquelas em que ocorrem outros tipos de rocha.

### 2.3 — Classificação geomecânica do bloco do maciço estudado

A classificação geomecânica acabada de referir foi realizada nas travessas T-712, T-714 e T-716 do 7.º piso, T-812, T-814 e T-816 do 8.º piso e também nos troços das galerias em direcção aos 7.º e 8.º pisos, compreendidos entre o perfil 12 e o perfil 16 da mina.

Este conjunto de trabalhos mineiros foi considerado como fornecedor dos dados para a caracterização geomecânica do bloco do maciço limitado lateralmente pelos planos verticais dos perfis 12 e 16, distantes entre si 200 m, e verticalmente pelos planos horizontais do 7.º e 8.º pisos, separados de 60 m, constituindo portanto o bloco do maciço estudado. O objectivo era pois, a partir da caracterização deste bloco, prever por extrapolação as características geomecânicas do bloco imediatamente inferior, também limitado pelos mesmos planos laterais e verticais, tendo por base o 9.º piso, 60 m abaixo e, partindo de tal previsão, estimar os tipos de suportes, para o 9.º piso, tanto nos troços da galeria em direcção compreendida entre os referidos perfis como nas travessas T-912, T-914 e T-916. Na Fig. 5 apresentam-se as posições relativas de todas estas aberturas.

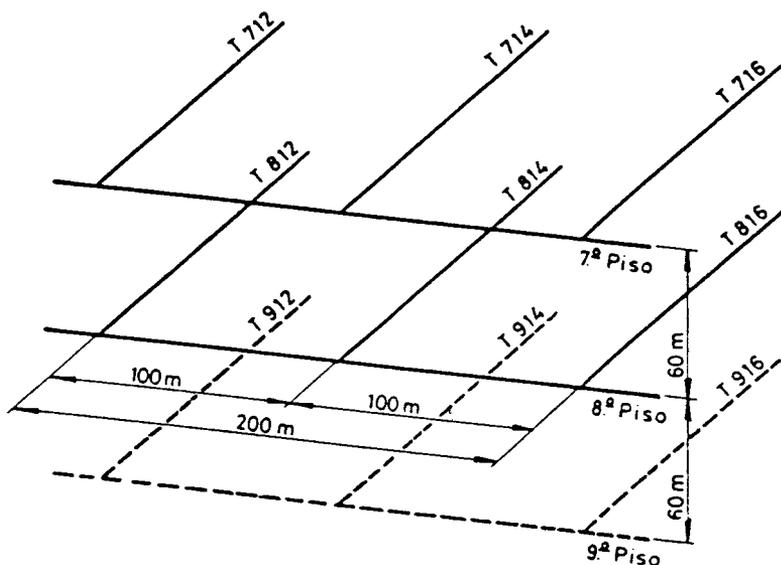


Fig. 5 — Bloco estudado, perfil 12 a perfil 16  
(ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990)

A classificação geomecânica do bloco do maciço estudado, correspondente às galerias dos 7.º e 8.º pisos, envolveu as seguintes determinações:

- a) levantamento geológico
- b) divisão da galeria em trechos geomecanicamente homogêneos
- c) diagramas de Schmidt-Lambert referentes a cada trecho homogêneo e atitudes das famílias detectadas nesses trechos
- d) diagrama Schmidt-Lambert referente ao conjunto da galeria e atitude das famílias determinadas para a mesma
- e) classes do maciço obtidas mediante a metodologia de classificação adoptada, correspondentes aos diversos trechos homogêneos
- f) classes do maciço correspondentes aos sustimentos instalados.

O primeiro facto a que se atribui a maior importância está relacionado com as dificuldades práticas observadas durante o desenvolvimento do método, para fins de classificação geomecânica de zonas homogêneas do maciço na vizinhança de ocorrência de carvão, onde, conforme ressaltado nos levantamentos geológicos e de descontinuidades das galerias estudadas, ocorrem alternâncias de carvão e zonas completamente esmagadas (em que qualquer levantamento de descontinuidades pelo método das linhas exploratórias é impraticável). Para esses locais, em termos de classificação geomecânica, admitiu-se que pertenciam à classe V. Por outro lado, julgou-se também serem esses locais constituídos por zonas de alta concentração de cargas, necessitando, pois, de suporte mais pesado.

Com o objectivo de estabelecer correspondências no bloco do maciço e entre zonas que, nas diversas galerias estudadas, exigiam sustimentos com arcos metálicos e estender essa correspondência, com fins de previsão de sustimento, às futuras galerias inferiormente situadas (Fig. 6), julgou-se necessário não individualizar as zonas correspondentes às classes IV e V do maciço e sim considerá-las como treços de galerias individuais em que o sustimento com arcos metálicos deve ser aplicado (Fig. 6). Por outro lado, individualizando-se essas zonas será praticamente impossível estabelecer qualquer correspondência entre os locais das respectivas ocorrências nas galerias consideradas, dessas classes, dadas as distâncias que as separam.

Com esta maneira de proceder e em relação às zonas em que o sustimento com arcos metálicos é indicado (Fig. 6), parecem existir melhores correspondências entre as sucessivas travessas situadas nos planos verticais dos perfis do que em travessas vizinhas do mesmo piso. Este facto deve evidentemente ser considerado com certa ressalva, dado o pequeno volume do maciço estudado e o facto de as distâncias entre perfis serem superiores às distâncias entre pisos.

Referentes às zonas do maciço que segundo a classificação geomecânica, para o bloco estudado, pertencem às classes I e II, como mostra a Fig. 6, parecem ser más as correspondências que se podem estabelecer entre travessas vizinhas, quer vertical quer horizontalmente. Por outro lado, o exame atento na mesma figura dos locais de ocorrência, nas diversas galerias, das zonas classificadas com I e II sugere que, em relação à distinção entre ambas, o método utilizado parece não ser suficientemente sensível.

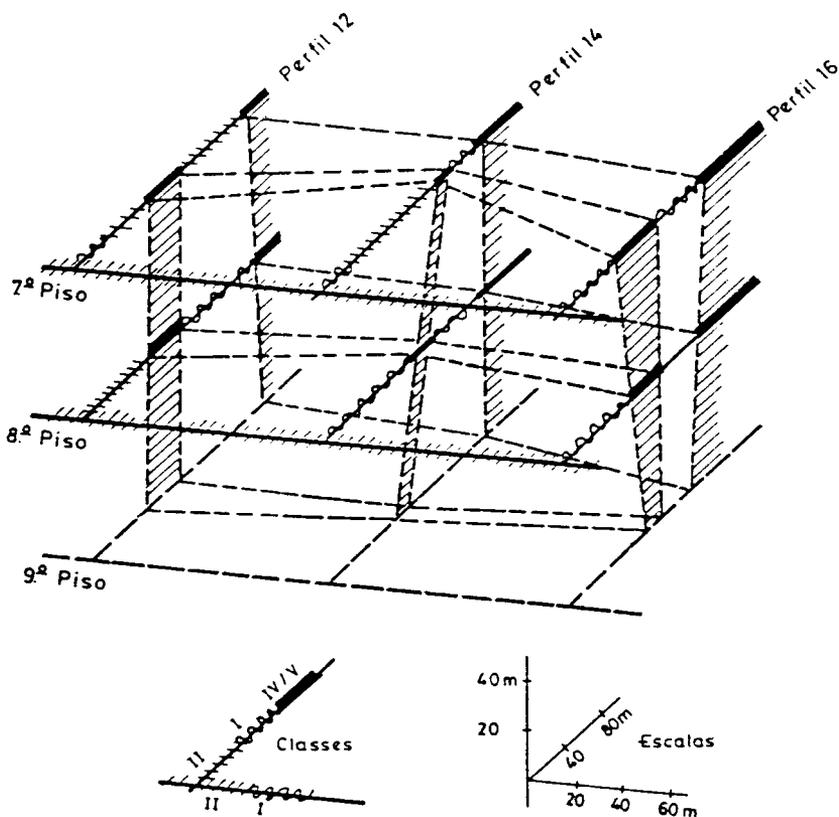


Fig. 6 — Classificação geomecânica do maciço-bloco, perfil 12 a perfil 16  
(ECD — Relatório para a CECA. parte I, 1990)

No que se refere às descontinuidades julga-se importante entender que, sob o aspecto prático, a distinção entre descontinuidades completamente fechadas — não justificando a respectiva consideração como fractura (o que poderá conduzir a menores pontuações e consequentemente a que, por se cair assim na classe I, não se preconize qualquer suporte) — e descontinuidades análogas — porém já um pouco abertas devido à descompressão do maciço, o que aconselharia a sua consideração como fractura (o que dará lugar a pontuação maior, correspondente à classe II, para a qual se aconselharia simples pregagem) — é, no entanto, muito difícil e subjectiva, dependendo muito do critério pessoal de quem a faz.

A atribuição, a um mesmo tipo litológico de terreno, das classes geomecânicas I e II consoante as respectivas descontinuidades são ou não praticamente inexistentes ressalta bem do exame, na Fig. 6, das galerias em direcção aos 7.º e 8.º pisos e da maior parte dos inícios das travessas que começam nessas galerias. Neste caso, a menor ou maior tendência para descompressão do terreno, conforme a estratificação e a xistosidade se situam paralela ou perpendicularmente às galerias, constitui justificativa fácil para o facto de se ter chegado a duas classes diferentes, que na realidade correspondem a dois comportamentos geomecânicos distintos.

Quanto à correspondência entre as classes geomecânicas a que se chegou, para as várias zonas do maciço estudado, pelo emprego da classificação utilizada e as classes, para as mesmas zonas, foram avaliadas pelo sustimento que realmente foi aplicado.

## 2.4 — Convergência das cavidades

As medições sistemáticas de convergências no interior da Mina de Germunde têm como objectivos principais:

- 1) O acompanhamento directo da evolução da estabilidade das escavações.
- 2) A obtenção de critérios racionais para o dimensionamento dos suportes a instalar nas cavidades mineiras.

Se em relação à primeira destas aplicações não existem dúvidas da validade prática do método (quer na previsão antecipada de movimentos que conduzam à substituição dos arcos metálicos, quer na identificação de zonas onde o suporte foi exagerado em face das propriedades locais dos terrenos), conforme descrito no item anterior, já com respeito à segunda aplicação terá de ser demonstrada a sua viabilidade.

Para que tal viabilidade fosse alcançada foi necessário complementar as informações adquiridas no tratamento dos dados de convergência obtidos ao longo de vários anos de medições com informações provenientes de outros factores essenciais à estabilidade das escavações, ou seja, a densidade de suporte real instalada nas imediações das estações de convergência (a qual faz intervir simultaneamente as dimensões da abertura e o peso do elemento de suporte realmente instalado) e a natureza mecânica das rochas na vizinhança das paredes das escavações.

Durante a escolha dos valores numéricos adequados para as três variáveis depararam-se numerosos problemas, que progressivamente foram ultrapassados através da rejeição de combinações que se revelaram infrutíferas à aplicação prática do método utilizado. As principais características das variáveis intervenientes na correlação são descritas a seguir.

O objectivo fundamental da análise foi pois o de determinar uma variável representativa do universo de dados de convergência medidos em períodos de tempo diferentes, em locais diversos da mina e em condições não uniformes de leituras. Para tal foi necessário equacionar um conjunto de alternativas que possibilitasse alcançar o referido objectivo.

Inicialmente partiu-se do conhecimento dos dados de convergência obtidos nas seis galerias constituintes do bloco de maciço estudado, isto é, as travessas dos perfis 12, 14 e 16 dos 7.º e 8.º pisos situadas a 360 e 420 m de profundidade, respectivamente.

Os bancos de dados de convergência foram reordenados, conforme descrito no ponto anterior, de modo a definir-se para cada estação estudada apenas quatro colunas de dados, ou seja: o tempo (expresso em dias contados após a data de abertura da escavação) e as distâncias AB, AC e BC correspondentes às cordas definidas entre os pernos de cada estação (ver exemplo na Tabela 2).

TABELA 2

Relação de dados de convergência

Tempo (dias)	Distâncias (mm)		
	AB	AC	BC
9	3351.08	2430.55	2306.86
17	3291.07	2363.25	2272.86
24	3264.18	2339.59	2251.66
80	3164.48	2275.54	2191.92
100	3149.46	2267.87	2181.51
182	3109.35	2249.59	2158.01

O primeiro tipo de tratamento de dados que se efectuou foi dirigido para o cálculo de velocidades de convergência (semanais e mensais), conforme descrito anteriormente e cuja aplicabilidade prática foi demonstrada na avaliação de zonas em que teria havido colocação de arcos metálicos subdimensionados bem como aqueles sectores em que os arcos eram compatíveis com a natureza mecânica da rocha presente (ver exemplos na Tabela 2).

Em seguida conduziu-se o processamento com o objectivo de se determinar as velocidades médias de convergência calculadas entre o primeiro e o último dia de leituras disponíveis em cada estação estudada. Para além da enorme condensação de dados que se obteve, conseguiu-se usar uma variável com significado físico indiscutível, ou seja, o ritmo médio com que se vai fechando cada secção instrumentada das travessas, levando em consideração os arcos metálicos que realmente nelas forem instalados.

Entre os dados disponíveis para a determinação das velocidades médias de convergência (cordas AB, AC e BC da Fig. 7) optou-se pela corda AB (horizontal) por apresentar valores sempre superiores às das outras duas.

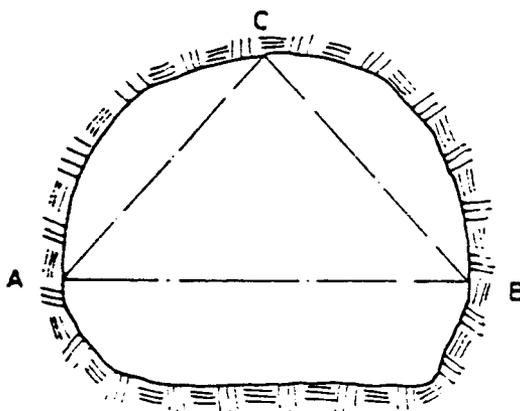


Fig. 7 — Estações de convergência (ECD — Relatório para a CECA, parte I, 1990)

Deste modo a variável  $v$  (velocidade média de convergência) fica definida por:

$$v = \frac{\text{Dist. AB no último dia de leitura} - \text{Dist. AB no primeiro dia}}{\text{N.º total de dias de medições}}$$

constituindo, portanto, uma grandeza característica da estação e do arco a ela associado. Em geral,  $v$  é expressa em mm/dia.

## 2.5 — Classes de rocha

A classificação geomecânica do maciço de Germunde foi descrita e discutida com bastante ênfase nos itens 2.2 e 2.3 deste capítulo.

É importante lembrar aqui que as características principais do critério classificativo adoptado para o maciço da Mina de Germunde reside no facto de podermos agrupar todos os tipos principais de rocha em apenas cinco classes que estão directamente correlacionadas com os tipos de suporte mais recomendados. Por outro lado, não houve qualquer dificuldade na obtenção das classes de rocha que se encontram na vizinhança das estações de convergência estudadas de modo a constituir uma variável fundamental das correlações procuradas. A classe de rocha é expressa em valor numérico compreendido entre 1 e 5, sem dimensões.

## 2.6 — Densidade de suporte

Esta grandeza é de relevante importância para o dimensionamento racional de suportes e é constituída pela relação existente entre o peso de aço contido nos elementos de suporte e o volume de rocha escavada submetida aos mesmos.

Este factor engloba portanto os efeitos conjuntos da geometria da escavação e da importância do suporte nela instalado, o que tem obviamente reflexos significativos na ordem de grandeza das convergências medidas, dependendo também, logicamente, da natureza mecânica das rochas presentes.

A densidade de suporte é indicada em  $\text{kg/m}^3$ , ou seja, o peso de aço dos arcos metálicos instalados a dividir pelo volume de escavação executado, o qual é determinado a partir do conhecimento do espaçamento entre arcos multiplicado pela secção da escavação.

Devido à dificuldade prática para se obter as dimensões reais das secções da escavação, considerou-se inicialmente uma secção  $3,5 \times 3,5 \text{ m}^2$  que em seguida foi ajustada de acordo com as dimensões das cordas das estações de convergência sobre o terreno, imediatamente atrás e à frente do arco considerado.

A densidade de suporte das zonas de pregagens pode também ser determinada pela relação existente entre o peso de aço dos tirantes a dividir pelo volume da escavação a eles associados ou peso total de aço dos tirantes mais a malha a dividir pelo volume da escavação associado (para zonas de pregagem com rede).

## 2.7 — Regressão DCV (densidade de suporte, classe de rocha e velocidade média de convergência)

O objectivo da regressão é definir uma função de convergência representativa do maciço e que permita prever a deformação da escavação em função dos mais significativos parâmetros geotécnicos.

Entre as múltiplas possibilidades de conseguir uma equação matemática que represente adequadamente as variações entre as três grandezas consideradas, foi aplicado ao conjunto de dados um programa de regressão linear múltipla que forneceu resultados aceitáveis.

Após várias tentativas de melhorar a regressão, em que várias expressões foram utilizadas para a função de convergência, a expressão definitiva foi descrita como:

$$D = - 0,12 + 4,84 C - 3,37 V$$

com um coeficiente de correlação  $r = 0,844$ .

Na expressão,  $D$  é a densidade de suporte expressa em kg de aço por metro cúbico escavado,  $C$  é a classe de rocha obtida com a classificação geomecânica e que varia de 1 a 5 e  $V$  é a velocidade média de convergência (mm/dia) obtida entre o primeiro e o último dia de leituras na estação estudada.

Com a expressão acima é possível determinar a densidade de suporte em kg de aço por metro cúbico escavado que é necessária para suportar um certo troço de escavação com uma classe de rocha onde a velocidade média de convergência esperada seja previamente definida.

Para facilitar o entendimento do sentido prático da correlação, anteriormente definida, foi feita a sua representação gráfica. Observado atentamente este gráfico podemos definir, claramente, zonas que delimitam as cinco classes de rocha e, o que é mais importante, as classes de rocha de valores numéricos mais elevados, correspondentes a maciços de má qualidade, que estão situadas em zonas consideradas instáveis, isto é, zonas onde as velocidades médias de convergência e a densidade de suporte são elevadas, o que teoricamente é esperado.

## 2.8 — Previsão de suporte nas aberturas em novas zonas da mina

Para se projectar com segurança o suporte em novas aberturas na Mina de Germunde, será necessário realizar, inicialmente, a prospecção geológica com auxílio de sondagens para determinar as classes de rocha em zonas homogéneas do maciço.

Conhecendo-se as classes de rocha e avaliando convenientemente a velocidade média de convergência admissível para as zonas onde se efectua a classificação do maciço, pode-se determinar a densidade de suporte ( $\text{kg/m}^3$ ), para essas zonas, pela expressão já deduzida anteriormente.

Por outro lado, podemos admitir que a velocidade média de convergência varia com a classe de rocha, com o tempo de abertura e com a densidade de suporte, ou seja:

$$V = f(C, \text{ tempo de abertura}, D)$$

Com o grande volume de dados de convergência disponíveis para o tratamento foi possível determinar os seguintes valores para a velocidade média de convergência que correspondem à situação de rotura (da rocha ou dos arcos metálicos, conforme os casos):

Classe de rocha (C)	Velocidade média de convergência até à rotura ( $V_r$ )
V	$\leq 0.6$ mm/dia
IV	$\leq 0.18$ mm/dia
III	$\leq 0.05$ mm/dia
II	$\leq 0.028$ mm/dia
I	$\leq 0.0075$ mm/dia

Por razões de segurança, e com o objectivo de garantir a estabilidade da escavação admite-se um factor de segurança conveniente para as velocidades médias de convergência admissíveis na fase de projecto ( $V_{\text{projecto}}$ ). Sendo assim, a velocidade média de convergência de projecto ( $V_{\text{projecto}}$ ) é igual à velocidade média de convergência até à rotura ( $V_r$ ) dividida pelo factor de segurança, ou seja:

$$V_{\text{projecto}} = \frac{V_r}{F_s}$$

onde  $V_r$  é a velocidade média de convergência até à rotura acima indicada e  $F_s$  o factor de segurança.

Este factor de segurança pode ser determinado com os dados sobre a velocidade  $V_r$  mínima da Tabela 3 e com os valores da velocidade média de convergência até à rotura anteriormente determinada, ou seja:

**TABELA 3**  
Valores máximos e mínimos da velocidade média de convergência até à rotura

Travessa	Classe de rocha	Tempo até à rotura (dias)	$V_r$ máxima	$V_r$ mínima
812	5	1026	1.1160	
816	5	1106		0.0949
816	4	842	0.2976	
816	4	868		0.0604
812	2	544	0.0726	
814	2	1021		0.0075
814	1	1226	0.0130	
816	1	1221		0.0042

$$\text{CLASSE V: } F_s = \frac{V_r \text{ média}}{V_r \text{ min}} = \frac{0,6}{0,0949} = 6,3$$

$$\text{CLASSE IV: } F_s = \frac{V_r \text{ média}}{V_r \text{ min}} = \frac{0,18}{0,0604} = 2,9$$

$$\text{CLASSE II: } F_s = \frac{V_r \text{ média}}{V_r \text{ min}} = \frac{0,028}{0,0075} = 3,7$$

$$\text{CLASSE I: } F_s = \frac{V_r \text{ média}}{V_r \text{ min}} = \frac{0,0075}{0,0042} = 1,7$$

Para a classe III não é possível definir um factor de segurança, visto que o valor da velocidade média de convergência até à rotura para essa classe foi estimado.

Este modelo geomecânico foi determinado com base nos dados extraídos da Mina de Germunde e não deverá ser extrapolado para outras situações, sem cuidados apropriados à especificidade de cada caso.

### 3 — CONCLUSÃO

O presente trabalho foi realizado com base nos dados obtidos na Mina de Germunde, onde um exaustivo e necessário trabalho tem sido realizado com o objectivo de estabelecer um critério prático e simplificado para o dimensionamento racional de suportes das escavações subterrâneas.

Os resultados obtidos mostram claramente que o método poderá ser utilizado com razoável exactidão em outras zonas da Mina de Germunde onde as características geotécnicas e os trabalhos mineiros são semelhantes àqueles do bloco objecto do estudo detalhado.

Os resultados alcançados com a caracterização geomecânica do maciço de Germunde indicam claramente que a metodologia utilizada para o dimensionamento racional de suportes, na Mina de Germunde, poderá traduzir-se em uma substancial economia na lavra.

Por outro lado, uma estimativa da repercussão económica da aplicação do critério do dimensionamento racional de suporte pode ser efectuada. O método a ser utilizado para o cálculo dos benefícios económicos será a comparação de uma situação presente com uma que pode ser analisada no futuro, se os resultados produzidos pelo uso dessa metodologia forem consolidados.

Julga-se importante a continuação da pesquisa com o objectivo de se obter novas informações que venham complementar o método.

Devido à importância prática dos resultados obtidos julga-se essencial a aplicação desta metodologia a outras minas subterrâneas, porém é necessário realizar um exaustivo trabalho de campo, como o realizado na Mina de Germunde.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANON, G. J. F. — *Bases da computação gráfica*. Ed. Campos Ltda., Rio de Janeiro 1989, 141 p.
- BARAS, E. M. — *Symphony (guia do usuário)*. Osborne/McGraw-Hill, Rio de Janeiro 1987, 284 p.
- BARTON, N. — *Previsão do comportamento de aberturas subterrâneas em maciços rochosos*. Geotecnica nº 53, Julho 1988, pp. 7-49.
- BIENIAWSKI, Z. T. — *Rock mechanics design in mining and tunneling*. A.A. Balkema, Rotterdam 1984, 272 p.
- BIRÖN, C.; ARIOGLU, E. — *Design of supports of mines*. John Wiley & Sons, New York 1983, 248 p.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. — *Rock mechanics for underground mining*. Gorge Allen & Unwin, London 1985, 527 p.
- BUREAU OF MINES — *Eastern coal mine geomechanics*. Bureau of Mines Technology Transfer Seminars. Pittsburgh 1986, information circular 9137, 89 p.
- CELADA, B. T.; GUTIERREZ, V. P. — *Gateways support design with yielding arches*. Five years of experience with the "IGME-83" Index. International Society for Rock Mechanics Symposium. R. Sanchez Tryo & R. de La Plata, Zacatecas 1985, pp. 273-281.
- COATES, D. F. — *Rock mechanics principles*. Mines Branch Monograph 874 (revised 1967), Canada, 1967. Computer methods for the 80's in the mineral industry, SME 1979, 975 p.
- E. C. D., Empresa Carbonífera do Douro, S.A. — *Geomecânica e sustimento de galerias em jazigos de carvão com estrutura geológica complexa*. Relatório para CECA (parte 1), 1990.
- EMERE, G. T. G. — *The applications of rock mechanics principles to strata control in the Anglo American Gold Mines in the Orange Free State*. Divisional rock mechanics engineer (A.A.C. gold division), Rock Mechanics Departement, 1972.
- FARMER, I. — *Engineering behaviour of rock*. Second edition, Chapman and Hall, London 1983, 208 p.
- FEIRE, J. L. S. — *Bacia carbonífera do Norte de Portugal*. Separata do tomo XXXI, de estudos, notas e trabalhos do Laboratório e Serviço de Formento Mineiro 1986, pp. 11-27.
- FRUSH, C. G. — *Mine surveying*. Mining Engineering Handbook, SME, vol. 2, 1973, pp. 22-29.
- GAMA, C. D.; ESTON, M. — *Comparação entre os métodos numéricos de discretização total e de discretização de contorno de análise de escavações subterrâneas*. Simpósio sobre sistemas computacionais em engenharia civil, COPPE-UFRJ, Out. 1977.
- GAMA, C. D. — *Métodos computacionais de projectos de taludes em mineração*. Tese de livre docência, USP, São Paulo 1984, 171 p.
- GAMA, C. D. — *Análise da compressão uniaxial de provetes de rocha pelo método dos elementos finitos*. AEIST, IST, Lisboa, 1970.
- GAMA, C. D. — *Modelo computacional de uma exploração mineira*. Universidade de Luanda, Angola 1974, 39 p.
- GOODMAN, R. E. — *Introduction to rock mechanics*. Second edition, John Wiley & Sons, New York 1989, 562 p.
- GOODMAN, R. E.; SHI, G. H. — *Block theory and its application to rock engineering*. William J. Hall, Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, New Jersey 1985, 338 p.
- HEARN, D.; BAKER, M. P. — *Computer graphics*. Prentice-Hall International, USA 1986, 351 p.
- HOEK, E. — *Progressive caving induced by mining an inclined orebody*. Transactions Institution of Mining and Metallurgy (Sect. A: Min. Industry), vol. 83, 1974 pp. A133-A139.
- HOEK, E.; BRAY, J. W. — *Rock slope engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, London 1977, 402 p.
- JAEGER, J.C.; COOK, N. G. W. — *Fundamentals of rock mechanics*. Second edition, Chapman and Hall, London 1976, 585 p.
- JAEGER, J. C. — *Friction of rock and stability of rock slopes*. Géotechnique 21, No. 2, 1971, pp. 97-134.
- JUMIKIS, A. R. — *Rock mechanics*. Second edition. Trans. Tech. Publications, Clausthal, 613 p.
- KNECHT, K. — *Quickbasic avançado*. Trad. GRADIZZI, R.H., Ed. Ciência Moderna Ltda, Rio de Janeiro 1989, 364 p.

- KREYSZIG, E. — *Matemática superior*. Tradução de Carlos Campos de Oliveira. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro 1974, 4 vol.
- LEME, R. A. S. — *Dicionário de engenharia geotécnica*. Câmara Brasileira do Livro, São Paulo 1980, 159 p.
- LOMBARDI, G. — *La roca y el macizo rocoso — Leyes constitutivas*. Anales de la Academia Nacional de Ciências Exactas, Físicas y Naturais, Buenos Aires 1989, pp. 309-356.
- MACHADO, A. C. D. — *As Minas de Carvão do Pejão*. Bol. Minas, Lisboa, 7(4), Out.-Dez. 1970, pp. 259-281.
- MENDES, F. M. — *Comportamento mecânico de rochas xistosas*. Dissertação para concurso de catedrático do IST, 1960 243 p.
- MENDES, F. M. — *Apontamentos do curso de exploração de minas*. Cap. X, Ventilação, IST, UTL, Lisboa 1961-1964.
- MENDES, F. M. — *Geomecânica aplicada à exploração mineira subterrânea*. IST, UTL, Lisboa 1985, 346 p.
- OBERT, L.; DUVALL, W. I. — *Rock mechanics and the design of structures in rock*. John Wiley & Sons, Inc., New York 1967, 650 p.
- OYANGÜREN, P. R.; IRIZAR, L. C.; HUERTA, R. L.; OBESO, E. G. — *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid 1984, 361 p.
- PENG, S. S. — *Coal mine ground control*. John Wiley & Sons, New York 1978.
- PINTO DE JESUS, A. D. — *Estratigrafia e estrutura da bacia do Douro*. (Estefaniano C Inferior), Relatório não publicado, 1986
- PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. — *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys*. International Journal Rock Mechanics Min. Sci. & Geomechanics Abstr., vol. 18, pp. 183-197, 1981.
- ROCHA, M. — *Mecânica das rochas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa 1981, 445 p.
- RODRIGUES, F. P. — *Introdução à geomecânica*. Curso de Minas, 2º ano, IST, UTL, Lisboa 1984, 117 p.
- SALAMON, M. D. G. — *Rock mechanics of underground excavations*. Third Congress ISRM, vol. I, part B, Theme 4, Denver, Sept. 1-7, 1974, pp. 943-1099.
- SANTO, H. P. — *Métodos gráficos e geometria computacionais*. Dinalivro, vol. 1, Lisboa 1984, 299 p.