

A GEOMECÂNICA DA MINA DA PANASQUEIRA, PORTUGAL*

The geomechanics of Panasqueira Mine, Portugal

por

F. MELLO MENDES**

A. CORREIA DE SÁ***

J. FERREIRA E SILVA****

RESUMO — Na Mina da Panasqueira, o método de desmonte dos filões de quartzo sub-horizontais variou de frentes corridas com entulhamento parcial para câmaras e pilares. Para obter, com este último método, a máxima recuperação do jazigo compatível com a segurança tornou-se necessário projectar diversas configurações de desmonte com base no conhecimento das implicações geomecânicas da mineração. Este trabalho descreve o essencial deste conhecimento, para o qual a recolha de dados começou há mais de 25 anos. São referidas as características geológicas e geomecânicas do maciço rochoso, no qual são dominantes filádios pouco deformáveis. Mencionam-se também os comportamentos evidenciados pelos desmontes, tanto pelos de frentes corridas como pelos de câmaras e pilares, e apresentam-se interpretações dos mesmos comportamentos. Finalmente, analisam-se o aluimento e a estabilidade gerais da mina, de acordo com os conhecimentos até agora obtidos e face às variantes de exploração que se consideram aconselháveis.

SYNOPSIS — At Panasqueira mine the mining method for the subhorizontal quartz veins has changed from longwall stopes with partial filling to room and pillar stopes. To obtain with the last referred, under safe conditions, the maximum ore recovery, it became necessary to design different stope patterns based on the knowledge of the geomechanical implications of mining. The paper describes the fundamental part of this knowledge which data collection began more than 25 years ago. The geological and geomechanical characteristics of the rock mass, where low deformable schists are dominant, are referred. The behaviours showed by both the longwall and the room and pillar stopes, as well as its interpretations, are described. The subsidence and also the whole mine stability are analysed on the basis of the actual knowledge and considering the modifications to be implemented on the stoping method.

1 — INTRODUÇÃO

Na Mina da Panasqueira, a maior unidade subterrânea produtora de volframite do Mundo, são explorados filões de quartzo sub-horizontais com algumas dezenas de centímetros de espessura, sendo a distância entre esses filões, em regra, de alguns metros. Numa descrição um pouco mais rigorosa, pode dizer-se que as entidades que, para efeitos de exploração, se

* Trabalho apresentado ao 6.º Congresso de ISRM, Montreal, 1987. A discussão está aberta por um período de três meses.

** Professor, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

*** Director-Geral, Beralt Tin & Wolfram Portugal, S. A.

**** Chefe do Planeamento, Beralt Tin & Wolfram Portugal, S. A.

designam por filões são, na realidade, constituídas por séries de lentilhas quartzosas, geralmente interligadas por veios secundários; tais lentilhas ocorrem, umas a seguir às outras, em faixas do maciço com espessuras relativamente pequenas, o que torna possível desmontá-las com razoável continuidade, em desmontes com configuração tabular sub-horizontal.

Como se mostra na Fig. 1, o jazigo, no seu conjunto, tem tendência para inclinar para SE. A exploração da multiplicidade de filões que o constituem obriga ao desenvolvimento de uma complexa rede de trabalhos de acesso e de traçagem, cuja extensão actual se apresenta na Fig. 2.

O agravamento sempre crescente dos custos de exploração tem obrigado, ao longo dos anos, a uma evolução do método de desmonte utilizado; esta evolução, em parte facilitada pelo progresso no equipamento mineiro aplicável, só pode, todavia, continuar a verificar-se, dentro de aceitáveis condições de segurança, se melhorar o conhecimento geomecânico existente sobre a mina.

Pode afirmar-se que, desde o início da exploração da mina, verificado cerca do princípio deste século, até aos anos 60, as diversas variantes de método de lavra utilizadas não saíram do tipo geral de frente corrida, ou com entulhamento parcial das cavidades por meio de paredes de material estéril dos encontros dos filões ou com utilização de sistemas de sustimento que se pretendeu exercessem as mesmas funções daquelas paredes. Dos anos 60 para cá, os desmontes por frentes corridas foram, por motivos económicos relacionados com o custo incomportável da construção das paredes, substituídos por desmontes por câmaras e pilares, nos quais a mecanização, introduzida por etapas sucessivas, é hoje um facto. Em relação a este último tipo geral de desmonte, a resolução do seu problema fundamental, respeitante à obtenção de uma recuperação final do jazigo aceitável, nunca deixou de ser considerada.

Uma solução que durante algum tempo se apresentou aparentemente satisfatória e que consistia em, numa segunda fase de recuperação e com o auxílio de pilhas de madeira, remover totalmente os pilares abandonados numa primeira fase, cedo se mostrou impraticável, dados os rápidos aumentos do custo da madeira e do custo do pessoal necessário para a aplicar.

Na fase actual, pretende-se evitar totalmente o emprego da madeira, abandonando definitivamente pilares suficientemente pequenos para, simultaneamente, assegurarem um razoável controle dos tectos e permitirem uma boa recuperação global do jazigo: o planeamento desta alternativa de método de desmonte exigiu, porém, um mais aprofundado estudo geomecânico da mina e está conduzindo, por motivos de segurança, à necessidade de se encarar a compartimentação da mina, para efeitos de exploração, por meio de pilares-barreira, se as áreas a desmontar forem muito grandes.

O conhecimento geomecânico actual sobre a Mina da Panasqueira apoia-se num volume já apreciável de dados, que começaram a ser recolhidos há mais de 25 anos. Destes dados, são a seguir apresentados os mais relevantes, de resto indispensáveis para a compreensão dos condicionamentos geomecânicos do projecto do prosseguimento da exploração da mina. Este projecto, que constitui uma das preocupações principais do Departamento de Planeamento da BERALT, obrigou a que se apreciassem globalmente todos os dados geomecânicos existentes sobre a Panasqueira e que se analisasse o estado actual de conhecimentos sobre a respectiva Geomecânica. No presente trabalho pretende-se apresentar o essencial deste estado de conhecimentos.

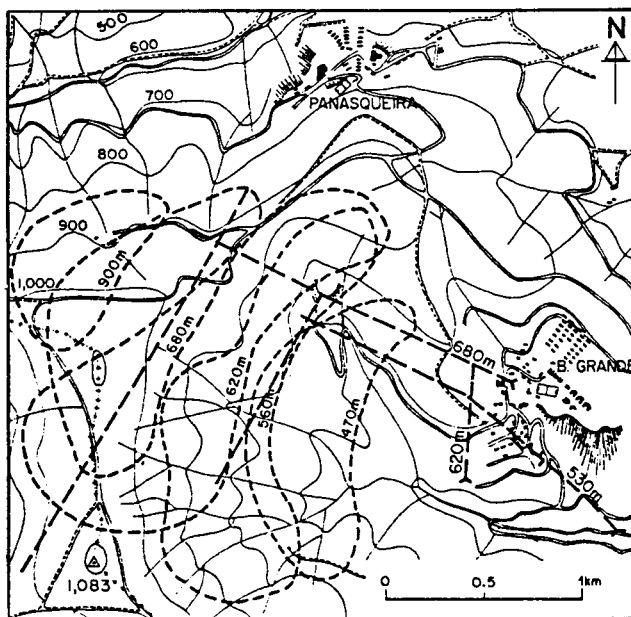


Fig. 1 — Localização da mina e configuração do jazigo

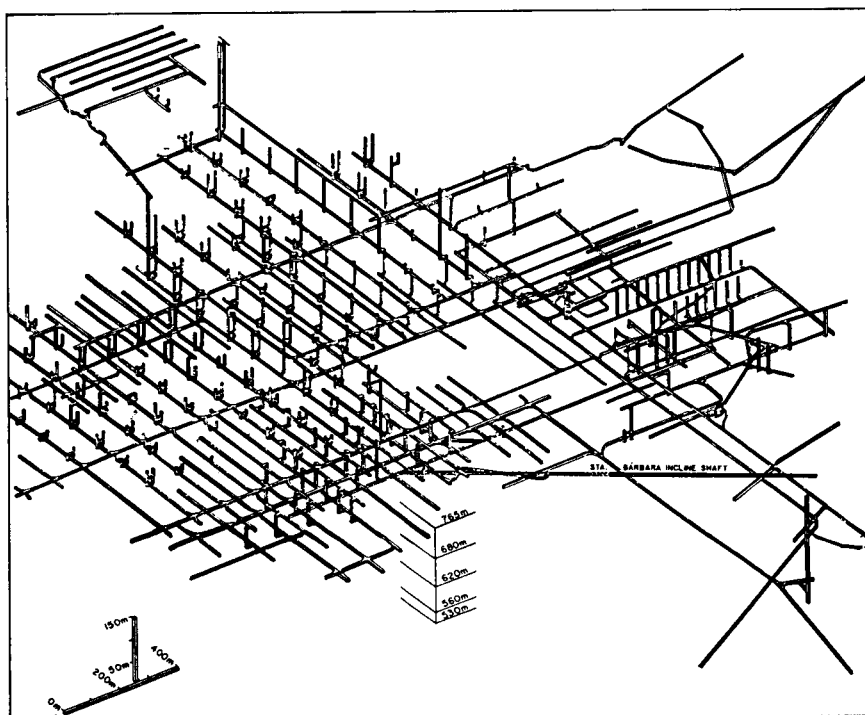


Fig. 2 — Desenvolvimento principal da mina

2 — CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOMECÂNICAS DO MACIÇO ROCHOSO

Os trabalhos de índole geológica publicados sobre o maciço rochoso da Panasqueira assim como sobre o jazigo estano-volfrâmico nele ocorrente podem hoje em dia considerar-se já numerosos, tendo a grande maioria aparecido após o primeiro trabalho de síntese sobre o assunto (Thadeu 1951). No que respeita à caracterização geomecânica do maciço, referida pela primeira vez um pouco mais tarde (Mello Mendes 1960), a bibliografia é, todavia, muito menos numerosa.

O maciço rochoso da Panasqueira é constituído, fundamentalmente, por filádios, os quais apresentam graus diferentes de metamorfismo, originado por uma intrusão granítica subjacente e pelos filões quartzosos onde reside a mineralização útil. Uma cúpula do granito intrusivo foi já atingida por trabalhos de exploração da mina, realizados nos anos 50, e por diversas sondagens; nas zonas onde actualmente se desenvolve a lavra não foi, todavia, detectado granito, pelo que, de momento, este tipo de rocha não necessita ser considerado nas análises geomecânicas a fazer. No que respeita às formações sedimentares metamorfizadas, assume relevância particular, pela sua abundância na vizinhança dos filões, o tipo litológico "filádio mosqueado", cuja transição para o filádio não-mosqueado é mais ou menos gradual. No maciço rochoso ocorrem ainda, por vezes, diferenciações locais, tais como as correspondentes a zonas com impregnações siliciosas ou a bandas, na vizinhança dos filões, em que aparece rocha grauvacóide silicificada com muita turmalina, que podem ser relevantes para a trabalhabilidade do maciço.

Geomecanicamente e à escala da exploração, o maciço apenas sob aspectos particulares pode ser admitido como contínuo; dum modo geral, tem que ser considerado como um maciço intensamente compartimentado. Entre os sistemas de descontinuidades que contribuem para a sua compartimentação, há que distinguir: *a)* filões e veios quartzosos; *b)* filões doleríticos; *c)* grandes fracturas e falhas com enchimento principalmente carbonatado; *d)* grandes fracturas e falhas com enchimento principalmente argiloso; *e)* diaclases. Todos estes sistemas já foram estudados sob o ponto de vista geológico geral (Thadeu 1951; Mello Mendes 1960), embora, sob o aspecto geomecânico, não tenham ainda merecido a devida atenção.

No que respeita aos filões em exploração, embora mostrem características de sub-horizontalidade, pode afirmar-se que apresentam uma direcção geral média aproximada NNE-SSW, inclinando em maior número para WNW; um mais reduzido número de filões, entre os quais se incluem, porém, os de maior inclinação, pende para ESE. É interessante notar que a zona mineralizada do maciço, que constitui propriamente o jazigo, apresenta uma configuração alongada também na direcção NNE-SSW, mergulhando para ESE (Mello Mendes 1985), tal como pode observar-se na Fig. 1.

Quanto às grandes fracturas e falhas, mostram-se verticais ou bastante inclinadas, parecendo agrupar-se em dois sistemas distintos: um com direcções variando entre N-S e NW-SE, com enchimentos principalmente argilosos; outro com direcções variando entre E-W e NE-SW, com enchimentos principalmente carbonatados (Thadeu 1951; Mello Mendes 1960). Intersectando-se segundo ângulos entre 90° e 45°, as grandes falhas destes dois sistemas parecem definir blocos do maciço com comportamentos geomecânicos mais ou menos independentes, pelo menos desde que a descompressão e a desarticulação do terreno, motivadas pela exploração mineira, permitam que actuem (Mello Mendes 1985).

Relativamente às diaclases, a dispersão das suas atitudes é muito grande, não sendo fácil definir correctamente sistemas de diaclasamento (Mello Mendes 1960). O sistema que mais se evidencia apresenta-se praticamente concordante com a rede filoniana dominante, o que faz levantar a hipótese de origem comum para as diaclases que o compõem e para as fracturas que os filões preencheram; este sistema tem uma importância prática muito grande, pois tende a individualizar "lisos" nos tectos dos desmontes, os quais por vezes exigem sustimento localizado. Parecem também definir-se outros dois sistemas, um com direcções variando à volta de NW-SE e inclinações, para NE, entre 45° e 90° , outro com direcções próximas de ENE-WSW e pendores, para SSE, entre 60° e 90° (Thadeu 1951; Mello Mendes 1960). Nos tectos dos desmontes, a coexistência de diaclases dos dois últimos sistemas referidos com diaclases do sistema sub-horizontal e ainda, eventualmente, com falhas e fracturas subverticais preenchidas origina a definição de blocos poliédricos de rocha susceptíveis de queda por acção de peso, se o confinamento horizontal é suficientemente aliviado. Para a previsão do comportamento dos tectos é também importante conhecer o posicionamento dos filões doleríticos cuja alteração, relativamente fácil, se processa por disjunção esferoidal.

Para além da compartimentação, o maciço de Panasqueira é afectado por acentuada xistosidade, que se reflecte de modo bem marcado no comportamento mecânico do material rochoso ocorrente (Mello Mendes 1960). Esta xistosidade, que parece apresentar uma direcção geral $N50^\circ W-S50^\circ E$ e inclinação de 70° a 90° para $N40^\circ E$ (Thadeu 1951; Mello Mendes 1960), mostra-se independente da sedimentação original, cujos leitos, com atitudes locais muito variadas devido às tectónicas complexas que os afectaram, são geralmente mais difíceis de definir que aquela.

A xistosidade do material rochoso do maciço da Panasqueira já deu lugar a estudos diversos, principalmente baseados em experimentação laboratorial (Mello Mendes 1960). Esta experimentação levou a que fosse proposto, para representação dos comportamentos a que dá lugar nas rochas xistosas, um modelo reológico que, com razoável adaptabilidade, traduz esses comportamentos (Mello Mendes 1960; Mello Mendes 1966).

O aspecto mais importante relacionado com a xistosidade é o das anisotropias mecânicas que esta provoca, as quais se acentuam, de modo muito nítido, à medida que a alteração do material rochoso, processada preferencialmente segundo os planos de xistosidade e favorecida pela descompressão do terreno, aumenta (Mello Mendes 1966). Nas zonas muito alteradas, perto da superfície, a anisotropia é muito grande, chegando a rocha a perder a continuidade, separando-se em "folhas". No interior da mina, a anisotropia não se apresenta como visivelmente importante, embora seja de admitir que tenha influência nos mecanismos de descompressão do maciço e, assim, na definição das zonas descomprimidas que tendem a instalar-se sobre as cavidades da exploração (Mello Mendes 1985). A influência mecânica da xistosidade ressalta também do exame do andamento das sondagens efectuadas no maciço, as quais, iniciando-se verticalmente, encurvam e tendem a orientar-se naturalmente de modo a seguirem segundo planos concordantes com a xistosidade (Mello Mendes 1960).

É de notar que parece não ocorrer qualquer sistema importante de diaclasamento do maciço concordante com a xistosidade. Esta, todavia, quando nas zonas mais alteradas e descomprimidas do maciço começa a "abrir" os seus planos, acaba por funcionar como um importante sistema de compartimentação (Mello Mendes 1985).

No que se refere ao material rochoso constituinte do maciço de Panasqueira, os filádios, mosqueados e não-mosqueados, e também os granitos, foram já objecto de alguma experimentação laboratorial, visando a respectiva caracterização geomecânica (Mello Mendes 1960); foram realizados ensaios de compressão, simples e triaxial (até 120 bar de pressão lateral),

ensaios de tracção por compressão diametral e ensaios de flexão. Em todos estes ensaios, realizados sobre provetes de rocha colhidos a profundidades da ordem da correspondente, em 1960, aos trabalhos de exploração, evidenciou-se bem a anisotropia devida à xistosidade.

No que respeita à compressão, dentro da gama de confinamentos utilizada nos ensaios, os filádios e os filádios mosqueados exibiram módulos de deformabilidade variando entre 2×10^4 MPa e 10^5 MPa, verificando-se os menores destes valores para a direcção perpendicular à xistosidade e os maiores para direcções paralelas a esta. Em relação aos granitos e dentro de idênticos confinamentos, os módulos de deformabilidade apresentaram-se variando entre 3×10^4 MPa e 6×10^4 MPa, parecendo estas rochas revelar também um comportamento caracterizado por uma certa anisotropia mecânica, embora não visivelmente detectável sob o aspecto estrutural. Para qualquer destes tipos de rocha, o coeficiente de Poisson apresentou-se, mais frequentemente, entre 0,2 e 0,3. Quanto à tracção, os filádios mosqueados apresentaram, paralelamente à xistosidade, módulos de deformabilidade entre 10^4 MPa e 5×10^4 MPa, inferiores, embora da mesma ordem de grandeza, aos correspondentes módulos de deformabilidade à compressão.

No que respeita à compressão simples, os filádios apresentaram, paralelamente à xistosidade, resistências entre 100 e 150 MPa e os granitos resistências entre 65 e 105 MPa. Com a sobreposição de pressões laterais, estas resistências sofreram aumentos espectaculares: de 1,5 a 2 vezes com pressões laterais de 40 bar, de 2,5 a 3 vezes com pressões laterais de 120 bar.

Os filádios mosqueados, ensaiados à compressão simples segundo várias orientações em relação à xistosidade, mostraram que as resistências dependiam dessas orientações. Os maiores valores obtidos, entre 75 e 125 MPa, verificaram-se nos ensaios paralelos à xistosidade e os menores, entre 50 e 70 MPa, nos ensaios fazendo ângulos da ordem de 40° com aquela. Uma exploração mais cuidada dos resultados destes ensaios mostrou mais tarde que as condições de rotura pelos planos de xistosidade apresentaram-se nitidamente diferentes das que se verificaram fora desses planos, isto é, afectando propriamente o material rochoso: enquanto que estas últimas mobilizariam ângulos de atrito interno da ordem de 57° , às que ocorrem pela xistosidade corresponderiam ângulos de atrito bastante mais baixos, da ordem de 38° , relativos ao escorregamento segundo esses planos preferenciais (Mello Mendes 1971a). Por outro lado, constatou-se que a xistosidade só influencia a orientação das superfícies de rotura quando os seus planos, por ausência de confinamento, têm possibilidade física de admitir escorregamentos: quando tal não se verifique, a orientação das superfícies de rotura em relação à direcção da solicitação de compressão aplicada parece concordar com o previsto pela teoria original de Griffith (isto é, sem qualquer fecho de microfissuras antes do início da rotura). A consideração do crescimento de microfissuras no material rochoso e a interrupção desse crescimento pelos planos de xistosidade permitiriam ainda explicar a anisotropia da resistência à compressão uniaxial que estas rochas xistosas exibem (Mello Mendes 1971a).

Como resultado da experimentação cujos resultados se apresentaram, pode afirmar-se que o material rochoso de Panasqueira é, dum modo geral, bastante resistente e muito pouco deformável. O mesmo se passa, igualmente, quanto ao próprio maciço rochoso, desde que a descompressão, que localmente lhe for consentida, não o desarticule, permitindo que as respectivas superfícies de compartimentação joguem, fazendo com que o comportamento do maciço evolua do correspondente a um terreno contínuo para o característico dum terreno compartimentado.

Infortunadamente, não existem ainda quaisquer resultados de medições *in situ* de tensões instaladas no terreno que permitam caracterizar o estado natural de tensão no maciço

rochoso de Panasqueira, antes da abertura dos trabalhos mineiros. Às tentativas de avaliação da importância relativa das tensões horizontais e verticais por meio do comportamento dos contornos de vazios mineiros com diferentes geometrias e orientações opõe-se a intensa compartimentação do terreno, que afasta o seu comportamento do correspondente a um maciço contínuo, para o qual tal avaliação seria eventualmente possível (Mello Mendes 1960). No entanto, a evolução da abóbada de terreno desarticulado e descomprimido sobreposta ao conjunto, de características tabulares sub-horizontais, das zonas desmontadas, evolução essa que em 1960 foi possível estudar (Mello Mendes 1960) e que evidenciou configurações com relações altura/largura da ordem de $1/3$, assim como os grandes vãos sem sustimento possíveis nos desmontes tabulares de frentes corridas, sugerem fortemente a existência de estados de tensão no maciço virgem com componentes horizontais superiores à correspondente componente vertical. Quanto a esta última, não há actualmente argumentos para a considerar diferente da resultante, às várias profundidades, do peso do terreno superjacente.

3 — GEOMECÂNICA DOS DESMONTES POR FRENTES CORRIDAS

Dadas as características do maciço rochoso, não se apresentam na Panasqueira, dum modo geral, problemas no que respeita à abertura de vazios lineares, mesmo que as larguras das secções sejam relativamente grandes. Em regra, os tectos aguentam-se sem qualquer sustimento, apenas se utilizando pregagem ocasional ou qualquer outro tipo de sustimento descontínuo nos locais em que a compartimentação se apresenta desfavorável; constituem excepções as zonas de atravessamento de falhas importantes, em que se utilizam sustimentos contínuos com quadros de madeira revestidos, ou mesmo arcos de betão. Os grandes problemas relativos ao comportamento do contorno de vazios apresentam-se em relação às cavidades dos desmontes, as quais, como foi dito, têm características gerais tabulares sub-horizontais e podem atingir grandes dimensões em área.

Até ao início da década de 60, os métodos de desmonte utilizados foram sempre variantes de frentes corridas, que progrediam muito lentamente (em geral não excedendo, em média, 0,3 m/dia) quer mantendo-se mais ou menos paralelas à sua posição inicial quer rodando em torno dum dos seus extremos; em qualquer dos casos, podia considerar-se que os vazios que se iam criando tinham secções rectangulares bastante alongadas, com alturas variando entre 1,3 e 1,6 m. O controlo dos tectos era, nas variantes mais antigas, realizado por entulhamento parcial das cavidades por meio de paredes, sistema este a que, nos últimos anos do seu emprego, se adicionaram, junto das frentes e paralelamente a estas, barragens de material desmontado, especialmente destinadas à retenção dos finos de volframite.

À medida que as frentes corridas avançavam e as áreas desmontadas aumentavam, os tectos iam-se deformando lentamente, até se atingirem vãos críticos da ordem de 40 a 50 m; então, ocorriam junto das frentes em avanço e paralelamente às mesmas, em zonas correspondentes a extremos desses vãos críticos, fracturações importantes dos tectos, por corte, afastando-se destes, no sentido dos centros dos vãos, segundo ângulos inicialmente inferiores a 45° . Até à ocorrência destas fracturações, as flechas evidenciadas pelos tectos eram bastante pequenas, mesmo nos centros dos vãos, o que se podia constatar pelo pequeno ou mesmo nenhum aperto que as paredes exibiam, comportando-se assim os tectos como placas bastante rígidas, eventualmente sujeitas a importantes compressões horizontais que impediam a respectiva desarticulação pelo diaclasamento; somente após a ocorrência das fracturações junto das

frentes é que se verificava a descida dos tectos, que então assentavam nas paredes, comprimindo-as fortemente, fazendo diminuir de maneira significativa a altura das cavidades dos desmontes.

Tudo se passava, assim, como tratando-se de fenómenos de flexão dos tectos, sobre vãos praticamente abertos, sem quaisquer apoios intermédios significativos. Esses tectos, devido à sua muito pequena deformabilidade, evidenciavam pequenas flechas e, assim, só muito raramente fracturavam verticalmente por tracção, nos centros dos vãos; geralmente antes disso, quando se atingiam os vãos críticos referidos, as tensões de corte instaladas, com os maiores valores situados logicamente junto das frentes, sobre as quais os tectos se encontravam encastrados, levavam a rocha destes tectos à rotura na vizinhança dessas frentes. Nessas zonas, em que as fracturas apresentavam, também logicamente, direcções paralelas às frentes, ou seja, às linhas de encastramento dos tectos, ocorriam, junto das superfícies destes, as maiores situações de compressão, perpendicularmente àquelas linhas, devido às curvaturas negativas que, ali, os tectos manifestavam. À medida que, partindo das frentes, se caminhava para os meios dos vãos, estas zonas muito comprimidas das superfícies dos tectos davam sucessivamente lugar a zonas cada vez menos comprimidas e depois, após ter sido ultrapassada a inflexão de curvatura desses tectos, a zonas submetidas a tracções; todavia, estas nunca chegavam praticamente a ser muito importantes, nunca evidenciando mais do que pequenas flechas, não só devido à rigidez do material rochoso mas também muito possivelmente, como já foi referido, à influência de elevadas tensões horizontais previamente instaladas no maciço.

A manifestação destes fenómenos de flexão dos tectos nos desmontes por frentes corridas pôde ser razoavelmente acompanhada por meio de medições de convergência tecto-piso. Para além das variações de convergência, traduzindo a evolução das flechas dos tectos, as variações, com o tempo, das velocidades de convergência permitiram prever as localizações das zonas desses tectos em que as tensões de corte se encontravam tendendo para valores susceptíveis de virem a provocar roturas. Tendo sido possível, até, localizar estas zonas por meio da definição de linhas de igual velocidade de convergência, considerou-se em 1960 que, com base na experiência até então adquirida, a velocidade de convergência de 0,1 mm/h representava perigo de futura rotura e a velocidade de 0,7 mm/h a inevitabilidade prática de esta vir a ocorrer (Mello Mendes 1960).

Mais tarde, em 1970, as roturas junto das frentes foram interpretadas à luz do mecanismo de rotura frágil proposto por Bieniawsky, considerando-se que os grandes acréscimos de velocidades de convergência ocorriam por efeito de Poisson quando nos tectos, junto das frentes e perpendicularmente a estas, cresciam rapidamente as compressões, o que, como foi dito, corresponderia também a um rápido aumento das tensões de corte nas mesmas zonas; a velocidade de 0,1 mm/h poderia então significar que o nível de tensão de compressão correspondente ao início da rotura tinha sido ultrapassado e a de 0,7 mm/h que a rotura tinha entrado na sua fase instável, irreversível e conducente à rotura franca (Mello Mendes 1970).

As fracturações dos tectos junto das frentes, que têm vindo a ser descritas, ocorriam, acompanhadas de importantes ruídos e "sopros", por vezes violentos, do ar, em intervalos de tempo da ordem da dezena de horas, podendo ser classificados como "golpes de terreno". Os seus efeitos mecânicos, embora já bastante apreciáveis, não eram, todavia, grandemente destruidores, certamente pelo facto de, não obstante os elevados valores dos vãos críticos a que correspondiam, a flexão dos tectos, sobre estes, ser relativamente pequena e, assim, a energia elástica posta em jogo não ser muito exagerada. Esta baixa propensão do maciço de Panasqueira para dar lugar a golpes de terreno foi, em 1970, notada por Potts, quando este comentou a pequena deformabilidade do material rochoso ocorrente (Potts, Szeki & Patchet 1970-73).

Após a verificação dum dos golpes de terreno referidos e de refeita a frente pelo mesmo afectada, o desmonte podia prosseguir até que, tendo avançado outra distância da ordem da correspondente ao vão crítico atrás indicado, ocorria, com elevada probabilidade, novo golpe de terreno idêntico ao anterior. Em relação a este novo avanço, o material aluído por efeito das fracturações anteriores passava a constituir um apoio de retaguarda do tecto, apoio esse que, pela sua maior compressibilidade em relação à correspondente à frente de ataque, não dava lugar, na sua vizinhança, a novas fracturações decorte que, assim, apenas ocorriam junto daquela frente.

A medição, nos desmontes por frentes corridas com paredes, das convergências tecto-piso não só permitiu que se compreendesse melhor como o maciço rochoso se comportava perante a exploração mas também se apresentou constituindo um bom sistema avisador do comportamento dos tectos, de aplicação muito útil por razões de segurança.

Numa variante do método de desmonte por frentes corridas que, no fim dos anos 50, foi ensaiada para substituição do muito caro tratamento dos vazios pelas paredes, o controlo dos tectos foi feito por aplicação de colunas de pastilhas de betão, ligeiramente armadas; na montagem dessas colunas intercalavam-se, junto ao piso e no tecto, cunhas e outros elementos de madeira, que realizavam um certo atacamento. Não obstante a densidade, relativamente grande, de aplicação destes suportes, o respectivo efeito, como sistema de controlo dos tectos, não foi satisfatório. Com efeito, para vãos críticos com ordens de grandeza dos correspondentes aos dos desmontes com paredes, ocorreram golpes de terreno nas frentes análogos aos verificados naqueles desmontes, o que mostrou que o efeito do sistema, como sustimento actuante contra a flexão dos tectos, era praticamente ineficaz. Por outro lado, quando os tectos actuaram, por acções de peso, após as fracturações nas frentes, as colunas, pouco deformáveis, não aguentaram as cargas e foram totalmente esmagadas, reduzindo-se as alturas dos desmontes, em poucas horas, de cerca de 1,4 m para apenas algumas dezenas de centímetros. Esta variante do método mostrou-se, assim, muito mais perigosa do que a anterior, uma vez que, não assegurando um controlo dos tectos como aquela proporcionava por compactação relativamente lenta das paredes após as roturas nas frentes, permitia em contrapartida, em tempos muito curtos, o fecho quase completo das cavidades dos desmontes.

Foram conseguidos resultados bastante melhores com outra variante, depois utilizada, do método de desmonte por frentes ocorridas, agora realizando o controlo dos tectos, sistematicamente, por meio de pilhas de madeira, tanto quanto possível bem atacadas. Embora também, no que respeita aos seus efeitos propriamente de sustimento, as reacções exercidas contra os tectos fossem relativamente fracas, não fazendo variar significativamente as dimensões dos vãos críticos, o facto é que, quando das roturas dos tectos junto das frentes, com as pilhas, pelas suas boas características de deformabilidade tanto antes de suportarem as cargas máximas como após estas lhes terem sido aplicadas, podem constituir-se sistemas controladores da descida dos tectos dotados de boa flexibilidade quanto à redistribuição das cargas sobre cada uma delas; conseguem-se assim descidas dos tectos razoavelmente lentas e seguras. Sob o aspecto económico, esta variante, consumindo grande quantidade de madeira, exigindo muita mão-de-obra e não possuindo características que permitissem encarar a respectiva mecanização, não se apresentou, todavia, defensável, havendo que abandoná-la. Em sua substituição começaram a ensaiar-se os métodos de desmonte por câmaras e pilares.

4 — GEOMECÂNICA DOS DESMONTES POR CÂMARAS E PILARES

Como é sabido, num desmonte sub-horizontal por câmaras e pilares com configuração geral tabular, a carga vertical actuante apenas numa pequena parte se exerce sobre a bordadura de terreno virgem desse desmonte; na sua maior parte, a carga exerce-se sobre os pilares, com intensidade tanto maior quanto mais esses pilares se encontram próximos do centro da área do desmonte; ali, a carga aproxima-se tanto mais do valor previsto pela chamada Teoria da Área Tributária quanto, para uma dada geometria de câmaras e pilares, maior for a área interessada pelo desmonte. Esta a razão por que aquela teoria, quando usada para a avaliação das cargas actuantes sobre os pilares, pode considerar-se como fazendo intervir, ela própria, um certo coeficiente de segurança, coeficiente esse tanto maior quanto mais os pilares em consideração estão afastados do centro do desmonte (Salamon & Oravecz 1976).

O facto de as maiores cargas se verificarem sobre os pilares situados na parte central do desmonte pode interpretar-se como tratando-se, mais uma vez, da consequência dum fenómeno de flexão geral do tecto, suportado, como nos últimos casos apresentados, por elementos resistentes individualizados; estes elementos são agora, porém, pilares abandonados do próprio maciço, muito menos deformáveis e muito mais resistentes que os elementos artificiais de suporte (colunas de pastilhas de betão ou pilhas de madeira) anteriormente considerados.

Tratando-se dum fenómeno de flexão do tecto do desmonte, embora fortemente contrariado pelos pilares, não pode deixar de considerar-se a possibilidade de esse tecto romper, ou por tracção no centro da respectiva área ou por corte no seu encastramento na bordadura virgem; se qualquer destes tipos de rotura ocorrer, uma vez que o tecto é sustido pelos pilares, tal só se verificará para vãos críticos significativamente maiores que os correspondentes às cavidades abertas dos desmontes por frentes corridas, anteriormente apresentados. Na maior parte dos casos, todavia, em que as secções dos pilares não são muito exageradas, antes de qualquer ruína do tecto inicia-se, também para um certo vão crítico, a ruína dos pilares dos mais deformados e, consequentemente, mais carregados, ocorrentes, como foi dito, no centro da área do desmonte.

Esta ruína dos pilares, a partir dos mais carregados, tende, por sucessivas redistribuições de carga devidas à transferência de cargas de pilar para pilar, a dar lugar a um vazio no centro do desmonte, vazio esse a que correspondem vãos cujos extremos não são, agora, bordaduras de terreno virgem mas sim apoios mais deformáveis constituídos por pilares. Há assim tendência para que se verifique uma flexão ondulada do tecto, com possibilidade de ocorrência de divergências para além daqueles apoios, em zonas ainda sustidas por pilares; neste caso, as roturas por corte do tecto, a ocorrerem, podem deslocar-se da bordadura virgem para o interior do desmonte, para os locais em que se verificam aquelas divergências.

Ruínas de pilares e ruínas de tecto, estas eventualmente originadas por aquelas, são dois tipos de ocorrências que, nos desmontes por câmaras e pilares, devem ser consideradas como fenómenos distintos e por vezes independentes. Com efeito, uma vez postas em jogo discontinuidades criadas por roturas, está-se fora das situações em que, francamente ao abrigo de regimes predominantemente elásticos, é possível admitir interacções dos comportamentos do tecto e dos pilares. De resto, as consequências dos dois tipos de ruína podem ser muito diferentes, as dos pilares geralmente limitadas, com relativamente pequena tendência para darem lugar a golpes de terreno, as do tecto, correspondendo a grandes vãos e

mobilizando, por isso, grandes quantidades de energia elástica armazenada, sendo muito mais de reacar sob aquele ponto de vista.

Por outro lado, dentro dos critérios técnico-económicos que norteiam a exploração de minas, à adopção dum método de desmonte por câmaras e pilares está sempre associado o grau de recuperação do jazigo que com o mesmo se consegue, recuperação essa que se pretende a maior possível. Por razões de segurança e também, geralmente, pelo interesse em jogar da melhor maneira com um grau de confiança crescente no que respeita ao reconhecimento do jazigo, a recuperação máxima raras vezes é pretendida numa única fase de mineração: partindo duma fase com recuperação baixa, correspondente a pilares superdimensionados quanto à sua necessária resistência, aumenta-se progressivamente a recuperação subdividindo aqueles pilares ou reduzindo-lhes a secção à custa dum aumento de largura das câmaras. Este último processo não é em geral aconselhável a não ser com tectos excepcionalmente autoportantes, uma vez que a largura das câmaras iniciais, estabelecida atendendo à economia da respectiva abertura, é em regra a máxima possível sem dispendioso sustimento adicional. A recuperação final, se não for possível consegui-la total, deverá aproximar-se tanto da recuperação total quanto a segurança o permitir, o que corresponde a abandonar-se definitivamente uma fracção mínima do jazigo, sob a forma de pilares residuais ou de pilares de controlo. Em qualquer dos casos, o compromisso entre recuperação e segurança está sempre presente.

Quando, a partir duma dada fase de recuperação, se procede à remoção total dos pilares então existentes, o tecto do vazio que se vai criando, em geral limitado por apoios constituídos por pilares de início suficientemente resistentes, tem em regra um comportamento intermédio em relação aos já referidos do vazio do desmonte aberto por frente corrida e do vazio resultante da ruína progressiva dos pilares centrais dum desmonte em que tais pilares eram inicialmente subdimensionados.

Na Mina da Panasqueira, a experiência mostrou a conveniência de, no caso geral, limitar superiormente a largura das câmaras a 5,0 m (Potts, Szeki & Patchet 1970-73; Streets 1968-69), embora o estabelecimento de larguras um pouco maiores, mediante a adopção de cuidados adicionais na respectiva abertura, não esteja fora de questão. Quanto aos pilares, pode dizer-se que, arbitrando uma malha ortogonal regular, com largura de câmara de 5,0 m e pilares quadrados (à falta de argumentos a favor de qualquer outra geometria), as dimensões destes foram evoluindo à medida que foi aumentando a confiança na respectiva utilização e consoante os condicionalismos particulares que se foram apresentando.

Quando, no início da década de 60, os desmontes por câmaras e pilares começaram a ser ensaiados, atrasos na traçagem e preparação da mina e consequentes dificuldades de acesso a filões que, dentro duma correcta sequência mineira, importaria então trabalhar, obrigaram a desrespeitar tal sequência, iniciando desmontes em filões mais baixos, sob filões ainda por explorar; isto obrigou a prever que os pilares que naqueles se definissem fossem perfeitamente estáveis, para não impossibilitar depois a mineração destes últimos. Dentro deste condicionalismo, acabou por se assentar no estabelecimento de pilares de 15 m × 15 m separados por câmaras de 5 m; esses pilares foram mais tarde, numa sequência descendente, recortados de modo a dar lugar a pilares de 5 m × 5 m. Foram também efectuados alguns ensaios com pilares de 6 m × 6 m com câmaras tanto de 6 m como de 5 m (Potts, Szeki & Patchet 1970-73).

É interessante notar que, embora não existindo experiência anterior sobre o comportamento de configurações de câmaras e pilares na Mina da Panasqueira, é possível encontrar

suporte para, nas condições referidas, estabelecer configurações com pilares de 5,0 m x 5,0 m e câmaras de 5,0 m de largura; para tal, basta por exemplo tentar extrapolar, para o maciço rochoso de Panasqueira, os critérios de dimensionamento de pilares estabelecidos por Salamon e Oravecz para as minas de carvão sul-africanas (Mello Mendes 1985).

Para estas minas, esses autores admitem que configurações com pilares quadrados com lado W e altura H e câmara de largura B (estas dimensões em m) se manterão estáveis, sem quaisquer restrições nem quanto ao tempo durante o qual tal estabilidade estará assegurada nem quanto à área global do desmonte considerado, se for pelo menos igual a 1,6 o coeficiente de segurança S , quociente entre a resistência dos pilares, avaliável pela fórmula $\sigma_r = 7.3 W^{0.46} H^{-0.66}$ (em MPa), e a tensão média a que os pilares se encontram submetidos, esta última, de acordo com a Teoria da Área Tributária e admitindo uma tensão média vertical preexistente devida apenas ao peso dos terrenos superjacentes, dada (igualmente em MPa) por $\sigma_p = 10^{-2} (W+B)^2 W^{-2} \gamma h$, sendo γ e h , respectivamente, o peso específico médio (em t.m⁻³) do terreno e a espessura (em m) do recobrimento dos trabalhos mineiros em consideração (Salamon & Oravecz 1976).

Tratando-se dum maciço rochoso diferente e à falta de mais dados, não repugna, numa primeira aproximação, admitir que se mantêm as influências das dimensões da secção dos pilares e da respectiva relação largura/altura, o que implica conservar os expoentes de W e de H na expressão que Salamon e Oravecz estabeleceram para σ_r , e que o factor numérico desta mesma expressão (que representa a resistência à compressão de um cubo do material rochoso com 1 m de aresta, como se conclui fazendo $W=H=1$) seja corrigido proporcionalmente às resistências à compressão uniaxial, determinadas em laboratório, do carvão e do material rochoso em apreço (Mello Mendes 1985). Aceitando esta aproximação, pode então considerar-se, para avaliação da resistência (em MPa) dos pilares da Mina da Panasqueira, a expressão $\sigma_r = 62 W^{0.46} H^{-0.66}$.

Para $W=5,0$ m e $H=2,3$ m (altura média dos pilares em consideração) esta última expressão fornece $\sigma_r = 75,12$ MPa e, para $B=5,0$ m, $\gamma = 2.75$ t.m⁻³ (peso específico médio do terreno) e $h=300$ m (recobrimento médio dos trabalhos mineiros em apreço), a Teoria da Área Tributária permite calcular, pela expressão acima referida, $\sigma_p = 33$ MPa. Para estes valores vem $S = 2,28$, bastante superior ao indicado mínimo $S = 1,6$ que, segundo Salamon e Oravecz, garante ao longo do tempo a estabilidade dos pilares abandonados num desmonte horizontal, independentemente da área desse desmonte.

Esta justificação para o dimensionamento dos pilares a abandonar, numa primeira fase de recuperação dos filões de Panasqueira nas condições referidas, encontrou plena comprovação prática, dado que na mina se dispõe já de exemplos de diversos desmontes com esta configuração de câmaras e pilares, ligados lateralmente uns aos outros ao longo de áreas muito extensas, mantendo-se perfeitamente durante bastantes anos sem quaisquer ruínas não explicáveis por influência preferencial de outras circunstâncias (por exemplo, devidas a sobreposição de desmontes). A não-existência, nestes casos, de ruínas quer de pilares quer dos tectos dos desmontes leva assim a que se possa admitir que a possibilidade de existir, na Mina da Panasqueira, um vão crítico que condicione o desenvolvimento lateral de desmontes em que se abandonem pilares segundo esta geometria carece de interesse prático.

Acontece todavia que esta geometria com câmaras de largura $B=5,0$ m e pilares com lados $W=5,0$ m corresponde a uma recuperação dos filões de, apenas, $R = 1 - W^2/(W+B)^2 = 0,75$, valor este que, por ser relativamente baixo para uma exploração de volframite, é desejável aumentar. Tentou-se por isso, em relação a esta configuração de abandono de pilares, ensaiar

uma segunda fase de recuperação, por remoção total desses pilares nas zonas mais ricas dos desmontes. Esta remoção dos pilares de $5,0\text{ m} \times 5,0\text{ m}$, separados por câmaras também de $5,0\text{ m}$, foi feita recorrendo à instalação de pilhas de madeira de $1,8\text{ m} \times 1,8\text{ m}$, colocadas de maneira a constituírem, após a remoção dos pilares naturais, um sistema ortogonal de pilares artificiais com um passo de $5,0\text{ m}$.

Num destes ensaios, após a criação dum vão de remoção total de pilares da ordem de 120 m , verificou-se a ruína do tecto do desmonte, iniciada por roturas de corte numa zona, com pilhas, em que a remoção já tinha sido feita, zona essa próxima dos pilares que estavam a ser removidos. Entre este extremo do vão sem pilares e a bordadura do desmonte tinham-se notado zonas com pequenas divergências tecto-piso. Antes da ocorrência das primeiras roturas do tecto ouviram-se, durante intervalos de tempo da ordem da dezena de horas, fortes ruídos, espaçados, parecendo provenientes do tecto. Às primeiras roturas outras se seguiram, de corte e de tracção, acusando o tecto uma descida grande, da ordem de várias dezenas de centímetros, esmagando significativamente os pilares vizinhos ainda por recuperar e as pilhas de madeira, mas de maneira gradual, sem características de golpe de terreno, o que permitiu que o trabalho do desmonte não chegasse a ser interrompido. Foi manifesto o bom controlo conseguido em relação ao fenómeno, eventualmente graças a uma influência importante da acção retardadora introduzida pelas pilhas.

É de assinalar que, no caso em referência, pouco antes de se iniciar a rotura do tecto, as maiores velocidades de convergência observavam-se não nos locais onde seria de prever maiores tensões de compressão na face desse tecto mas sim em torno dum ponto que se localizava na vizinhança da frente de remoção total dos pilares, mas já em zona apenas sustida por pilhas. Não repugna acreditar que, numa fase de importantes transferências de carga de pilares já bastante arruinados para pilhas, estas momentaneamente oferecessem maiores reacções que aqueles; e que, por outro lado, nas zonas em que seria de esperar as maiores compressões na superfície do tecto, as divergências ocorrentes não permitissem que ali se evidenciassem aumentos de velocidade de convergência por efeito de crescimento do coeficiente de Poisson na fase pré-rotura (Mello Mendes 1986). Nota-se este aspecto (sobre o qual, de resto, não se pretende especular aqui) por ser nitidamente diferente, no que respeita à configuração das linhas de igual velocidade de convergência, do que se verificava antecedendo as roturas (aquelas com as características de golpes de terreno) nos desmontes por frentes corridas; ali, as linhas de igual velocidade de convergência apresentavam-se abertas ou, melhor, fechando já através do maciço virgem, para além da zona onde eram de prever as maiores tensões de compressão na face do tecto. Por outro lado, nesta operação de recuperação de pilares, determinaram-se, com uma ruína de tecto mais controlada, velocidades de convergência ultrapassando $1,2\text{ mm/h}$, ao passo que, para as frentes corridas, o máximo determinado fora de $0,7\text{ mm/h}$.

O bom controlo conseguido, em operações de recuperação de pilares como a acabada de descrever, tanto em relação a ruínas de pilares, com as consequentes transferências de carga de pilares para outros pilares e para pilhas, como no referente a ruínas de tectos, abriu boas perspectivas para a evolução do projecto do método de desmonte, que se pretende cada vez mais económico mas também mais seguro. Com efeito, ficou patente que, pelo menos com a utilização das pilhas de madeira, era possível, nas transferências de carga de pilar para pilar, utilizar bem as resistências residuais destes, evitando que as ruínas de conjuntos de pilares assumissem características de golpes de terreno. Por outro lado, em relação às ruínas dos tectos, constatou-se que, mantendo a respectiva flexão controlada pelas reacções exercidas

pelas pilhas e por pilares em avançado estado de fracturação, era possível aumentar bastante os vãos críticos correspondentes a essas ruínas e, não obstante esses maiores vãos, retirar a tais ruínas as características de golpes de terreno, que apresentavam nos desmontes, praticamente abertos, de frentes corridas; tal facto, possivelmente devido à maior deformabilidade que apresentam os apoios nos extremos dos vãos dos tectos (vãos agora limitados por zonas de pilares abandonados, em vez de o serem por maciço virgem, como nos casos das frentes corridas) é talvez o mais significativo quanto às possibilidades de melhoria do método de desmonte.

Em face da importância que, todavia, pode ter, num desmonte, uma eventual rotura em cadeia de pilares ou uma rotura de tecto, já com grande vão, em que se alterem mais ou menos bruscamente as condições de suporte intermédio, têm-se desenvolvido na Mina da Panasqueira intensos esforços no sentido de controlar, quantitativamente, os fenómenos de transferências de carga de pilares para outros pilares ou para pilhas, que qualitativamente se descreveram; tal controlo quantitativo exige, logicamente, que se consigam dados sobre as deformações e sobre as cargas (ou, pelo menos, sobre as variações das cargas) exercidas sobre os pilares. No que respeita às deformações, mostrou-se perfeitamente possível avaliá-las à custa das medições das convergências tecto-piso que, conforme já referido, se efectuam sistematicamente, por motivos de segurança, utilizando convergenciómetros mecânicos de hastes; quando houve que medir grandes deformações, como no caso do exemplo, atrás referido, de remoção de pilares, foi mesmo possível controlar as convergências por meio de medições, à fita, das variações de altura de pilhas. No que respeita à determinação das cargas, ou das variações de carga, sobre os pilares, as dificuldades têm, no entanto, sido grandes. O emprego de células extensométricas, coladas em furos praticados nos pilares e nos apoios de bordadura dos desmontes, não se tem mostrado satisfatório. Uma outra tentativa, que se iniciou com vista a obter dados sobre o estado carga-deformação dos pilares, baseia-se na realização, em prensa rígida de laboratório, de ensaios com modelos reduzidos de pilares, com forma de haltere, conforme descrito noutros locais (Mello Mendes 1971b; Mello Mendes & Dinis da Gama 1973), para obtenção das respectivas curvas completas carga-deformação; o objectivo último destes ensaios é o de determinar, à custa da observação visual da situação de ruína dos pilares reais e por comparação com situações semelhantes observadas nos modelos, quais os valores relativos, em face das cargas máximas, das cargas a que aqueles se encontram submetidos. Embora ainda não convincentes, os resultados conseguidos por esta última via apresentam-se promissores (Barroso & Mello Mendes 1985).

Entretanto, a utilização de pilhas de madeira para a remoção de pilares, abandonados numa primeira fase de recuperação dos filões, tornou-se impraticável por razões de custo, não só da própria madeira como da mão-de-obra necessária para a aplicar. Foi por isso decidido, atendendo ao que se tinha observado quanto ao comportamento de pilares, eliminar completamente o emprego da madeira, optando por abandonar definitivamente pilares de menor secção que os anteriormente adoptados na primeira fase de recuperação.

Por conveniência de aperfeiçoar o reconhecimento da distribuição de valores dos filões, nos desmontes em que até agora se aplicou esta decisão começou-se por definir uma geometria ortogonal regular de pilares de 11,0 m × 11,0 m, separados por câmaras de 5,0 m de largura, tal como anteriormente, o que corresponde a uma recuperação inicial $R = 1 - W^2/(W+B)^2 = 0,53$; numa segunda fase, estes pilares são subdivididos, a meio das suas faces, por recortes igualmente com 5,0 m de largura, de maneira a dar lugar, cada um, a quatro pilares de 3,0 m × 3,0 m, resultando uma geometria final de câmaras com largura

$B = 5,0$ m e pilares quadrados, regularmente dispostos, com $W = 3,0$; estes são destinados a ser definitivamente abandonados, uma vez que a recuperação global assim conseguida é já $R = 1 - W^2/(W + B)^2 = 0,86$, valor este difícil de ultrapassar, na prática, com um desmonte por câmaras e pilares, mesmo que se encare a possibilidade duma remoção final destes.

No que respeita a estabilidades conseguidas com as configurações com pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$ e $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$, as primeiras apresentam, como é fácil de conjecturar, pilares muito superdimensionados; utilizando as expressões atrás apresentadas, confirma-se, com efeito, que a tensão média a que se encontram submetidos, para o recobrimento de 300 m, é aproximadamente $\sigma_p = 18$ MPa e a sua resistência $\sigma_r = 108$ MPa, donde resulta um coeficiente de segurança $S = 6$, elevadíssimo. Quanto às configurações com pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$, porém, as mesmas fórmulas fornecem, aproximadamente, $\sigma_p = 58,9$ MPa e $\sigma_r = 59,4$ Ma, donde se tira um coeficiente de segurança $S = 1,01$. Este último valor, não só é praticamente o mínimo que se pode admitir em relação a qualquer coeficiente de segurança, como é bastante inferior ao valor $S = 1,6$ que Salamon e Oravecz recomendam como mínimo para que a estabilidade das configurações de câmaras e pilares se mantenha indefinidamente e qualquer que seja a área dos desmontes.

Atendendo porém à metodologia adoptada por aqueles autores, em especial quanto à maneira de obter σ_p (pela Teoria da Área Tributária, sem qualquer consideração da fracção da carga total suportada pela bordadura virgem, ou constituída por pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$) o valor determinado $S = 1,01$ não significa, de modo algum, iminência de rotura; mas deve ser interpretado, por ser inferior a $S = 1,6$, como correspondendo a uma configuração para a qual a estabilidade já não se mantém indefinidamente quaisquer que sejam as dimensões do desmonte; por outras palavras, haverá que considerar um vão crítico, correspondente a uma área de pilares já recortados a $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$, ultrapassado o qual será de prever o início da rotura dos pilares em situação de carga mais desfavorável.

Conforme a experiência até agora conseguida em desmontes em que se adoptaram estas configurações de câmaras e pilares, as ruínas dos pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ iniciam-se quando estes ocupam já áreas a que correspondem vãos maiores que 120 m. As transferências de carga, de pilar para pilar, à medida que a sua ruína se vai verificando, parecem efectuar-se progressivamente e de maneira gradual, revelando uma boa mobilização da resistência residual dos pilares; num caso em que as convergências tecto-piso, na zona dos pilares mais afectados, eram já da ordem de algumas dezenas de milímetros, o tecto apresentava-se dum modo geral são, sem sintomas de roturas.

Não havendo, por toda a experiência já adquirida, motivos para recear um colapso em cadeia dos pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$, com características de golpe de terreno, não pode todavia ser posta de lado, de momento, a eventualidade da ocorrência de roturas do tecto. Estas, pelos grandes vãos interessados, pela rigidez relativamente grande dos apoios desse tecto (agora constituídos por pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$ quando, nos casos em que se removiam completamente os pilares, eram constituídos por pilares de $5,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ m}$) e pela ausência de pilhas de madeira (cuja influência, nos casos anteriormente observados, não pôde ser completamente esclarecida, mas é de admitir que tenha sido grande) poderão eventualmente assumir características de golpes de terreno, com indesejáveis efeitos dinâmicos. No estado actual dos conhecimentos sobre a geomecânica da Mina da Panasqueira, considerou-se prudente limitar a importância de qualquer ocorrência deste tipo que venha a verificar-se. Para tal, encarou-se o abandono de pilares-barreira, limitadores dos possíveis vãos a criar com o desenvolvimento das áreas com pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$. Admite-se todavia desde já que, se se respeitar uma

rigorosa disciplina de exploração, nomeadamente quanto ao sentido descendente da sequência da lavra dos diversos filões, os pilares-barreira a abandonar num dado filão poderão vir a ser parcialmente recuperados no fim da exploração desse filão.

Para a compartimentação, pelos pilares-barreira, dos campos de exploração correspondentes aos vários filões, para a localização desses pilares e para a determinação das respectivas dimensões, diversos aspectos foram simultaneamente considerados: i) a vantagem de que os pilares-barreira, abandonados em determinada fase de exploração dum filão, possam mais tarde vir a ser subdivididos e parcialmente recuperados após o desmonte desse filão, o que recomenda que tenham as dimensões de $11,0 \times 11,0$ m e que se integrem na malha geral de estabelecimento destes pilares; ii) o interesse em utilizar os pilares-barreira, na medida do possível, como pilares de protecção de galerias de traçagem que convenha conservar a cota superior às correspondentes a um dado filão, durante ou após o desmonte deste; iii) a necessidade de respeitar a geometria e a localização da traçagem geral da mina, com as respectivas grandes malhas moduladas a 100 m; iv) a vantagem de aproveitar como pilares-barreira, ao nível dos diversos filões, zonas estéreis ou de baixo valor. Assentou-se por isso que, ao nível de cada filão, os pilares-barreira seriam pilares das configurações gerais de pilares de $11,0 \times 11,0$ m, que se abandonariam, exercendo as funções de barreiras, pelo menos durante a exploração desse filão. Tais pilares, também ao nível de cada filão, localizar-se-iam, em princípio, segundo duplos alinhamentos, com os eixos das barreiras assim constituídas equidistantes de 200 m; entre estas barreiras, os pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$ seriam, no caso geral, recortados, abandonando-se, como atrás referido, pilares de $3,0 \times 3,0$ m, separados por câmaras com 5,0 m de largo.

Admitindo que, à profundidade de exploração que tem estado a ser considerada, numa fase final de ruína dum desmonte, entre duas das duplas fiadas de pilares-barreira, distantes de 200 m entre eixos, todos os pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ tinham sido completamente esmagados, os pilares-barreira existentes dum e doutro lado desse desmonte teriam, por si sós, que aguentar, cada um, uma carga máxima correspondente a uma tensão média de compressão $\sigma_p = (0,01 \times 2,75 \times 300) \times (11 + 5) \times 200 / 2 \times 11 \times 11 = 109 \text{ MPa}$; sendo a correspondente resistência, como já atrás foi referido, $\sigma_r = 108 \text{ MPa}$, o coeficiente de segurança respectivo seria aproximadamente $S = 1$. O esmagamento total de todos os pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ situados entre as duas barreiras apresenta-se, todavia, como uma situação irrealista muito pessimista, que só se poderia verificar se o tecto fosse praticamente cortado dum lado e doutro, junto aos pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$, com superfícies de corte aproximadamente verticais que, se não atingissem a superfície do terreno, dessem pelo menos lugar a uma abóbada de carga com um intradorso de muito grande altura; e, nessas condições, o peso a descarregar sobre os pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$ seria já muito menor, o que lhes garantiria um confortável coeficiente de segurança; acresce ainda que, não sendo de prever ruínas simultâneas de zonas com pilares de $3,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ dum e doutro lado duma mesma barreira, como em cada uma destas se prevêem duas linhas de pilares de $11,0 \text{ m} \times 11,0 \text{ m}$, cada uma destas linhas poderá ser considerada, pelo menos temporariamente, como constituindo uma segurança suplementar em relação à outra.

Sendo assim, dentro duma sequência descendente de exploração, não será demais admitir que, em termos realistas, barreiras com um passo de 200 m, abandonadas num filão, cada uma delas constituída por duas linhas de pilares de $11,0 \times 11,0$ m, como acabado de referir, garantirão, com suficiente segurança sob o aspecto estático, a estabilidade geral ao nível desse filão, não permitindo a propagação, através delas, de eventuais ruínas dos desmontes. Sob o aspecto dinâmico, porém, há sempre que admitir a possibilidade de os golpes de terreno, provenientes da rotura de zonas de tectos flectidas sobre grandes áreas de desmontes já apenas

ocupadas por pilares de 3,0 m × 3,0 m, poderem originar ondas de choque com consequências actualmente desconhecidas. No entanto, o que já se sabe sobre comportamentos de desmontes no que respeita a transferências de carga de pilar para pilar e simultânea flexão progressiva dos tectos e ainda quanto a roturas de tectos já após fases adiantadas de rotura de pilares leva a que se admita que a ocorrência de golpes de terreno importantes daquele tipo será pouco provável; mesmo assim, se tal ocorrência eventualmente tiver lugar, os pilares-barreira referidos certamente contribuirão para dificultar a propagação dos seus efeitos.

Para contribuírem para que se mantenham em serviço trabalhos de traçagem situados a níveis superiores, as linhas de pilares-barreira a abandonar nos sucessivos filões deveriam sobrepor-se e os eixos de tais barreiras deveriam situar-se nos planos verticais em que se localizassem aquelas traçagens. Encarar deste modo o conjunto dos pilares-barreira, a considerar nos diversos filões, é, no entanto, irrealista, dado que as áreas valiosas a desmontar em cada filão de modo algum se sobrepõem; sendo assim, para manter as barreiras todas sobrepostas para protecção de algumas traçagens e havendo outras barreiras naturais nos planos dos diversos filões, devidas à ocorrência de zonas pobres ou mesmo à inexistência de filão (barreiras naturais estas só por mero acaso sobrepostas), resultaria, para a maioria dos filões e para o conjunto da exploração, uma recuperação global incomportável, por muito baixa. A compartimentação da exploração, por pilares-barreira, deverá assim ser considerada filão por filão, sem sujeições de sobreposições. Os maiores inconvenientes desta maneira de proceder reduzir-se-ão logo que, como se espera, se reconheça exequível, do ponto de vista da segurança, a subdivisão dos pilares-barreira de um dado filão antes de se passar à exploração, por baixo deles, do filão seguinte; eliminar-se-ão assim, na medida do possível, as situações de anormais concentrações localizadas de carga nos desmontes situados inferiormente, situações essas, todavia, que haverá que analisar caso por caso. Quanto aos trabalhos de traçagem a proteger, será aconselhável que o seu número seja o menor possível, havendo que encarar a sua protecção por meio de soluções temporárias.

A consideração da compartimentação da exploração filão por filão permitirá ainda, na grande maioria das situações, reduzir o número ou mesmo dispensar a definição de pilares-barreira, devido a poderem aproveitar-se, para o mesmo fim, zonas do maciço que, por motivos do seu fraco ou nenhum valor, haverá naturalmente que abandonar. Em termos práticos, tal corresponderá a aumentar a recuperação global do jazigo.

5 — ALUIMENTO DO MACIÇO E ESTABILIDADE GERAL DA MINA

Dadas as características do jazigo de Panasqueira, os vazios correspondentes aos desmontes tabulares vão-se adicionando uns aos outros nos níveis dos vários filões e vão-se rasgando, se a sequência da exploração for respeitada, sob os correspondentes aos filões já desmontados. As situações relativas a comportamentos do maciço em torno de cavidades individuais de desmonte, tendendo localmente a dar origem a zonas descomprimidas sob abóbadas de terreno comprimido sobrepostas aos respectivos vazios, vão assim degenerando, por adição sucessiva, umas às outras, numa situação correspondente à criação dum extenso tecto global sobre o qual se estabelece uma grande abóbada de pressões, envolvendo, uma zona já muito importante de maciço mais ou menos desarticulado e aluído, num fenómeno progressivo susceptível de atingir a superfície do terreno. Esta progressão do aluimento global é evidentemente facilitada sempre que o mesmo for atingindo e integrando zonas superjacentes, localmente já aluídas, correspondentes a filões anteriormente desmontados.

Quanto à forma das abóbadas de pressão que vão sendo criadas, forma essa condicionada pela importância das tensões horizontais que previamente se encontravam instaladas no maciço, ainda relativamente pouco está averiguado. À escala dos desmontes, a utilização de extensómetros de fita, introduzida nos anos 70 (Potts, Szeki & Patchet 1970-73) e retomada há poucos anos, para controlo de deformações diferenciais nos tectos a partir de furos, não conduziu a resultados concludentes. Melhores informações, embora em número reduzido, foram obtidas quanto à abóbada de carga que globalmente se sobrepõe à zona explorada do jazigo; conforme observações realizadas em 1960 (Mello Mendes 1960), tal abóbada apresentaria relações altura/largura da ordem de $1/3$, o que poderia traduzir a existência, no maciço virgem, de tensões horizontais superiores às verticais, reforçando os efeitos duma muito pequena deformabilidade dos terrenos.

A existência, no maciço, de significativas compressões horizontais é, sem dúvida, um factor de importância relevante para a estabilidade geral da mina, o qual também não se encontra ainda convenientemente estudado. Para além de influenciar, certamente, as flexões dos tectos dos desmontes, contrariando-as, as compressões horizontais opõem-se aos escorregamentos segundo os planos das falhas e das diaclases verticais ou bastante inclinadas que, às várias escalas, compartimentam o maciço.

À escala dos desmontes, a criação de zonas descomprimidas sobre os respectivos tectos facilita, sem dúvida, a manifestação das consequências das acções de peso dos blocos, definidos pela compartimentação, que nesses tectos se situem; sendo a criação de tais zonas descomprimidas um fenómeno progressivo, cuja importância se vai acentuando com o tempo, há logicamente todo o interesse em que, para não agravar desnecessariamente os problemas relacionados com o comportamento dos tectos das câmaras, as várias fases de recuperação nos desmontes por câmaras e pilares se desenvolvam tanto quanto possível umas logo a seguir às outras, com um mínimo de tempo entre elas.

À escala do conjunto da mina, a descompressão facilitará certamente o jogo das grandes falhas que cruzam o maciço, contribuindo para que os grandes blocos que definem se comportem, quanto ao aluimento geral, de maneira diferente, criando também condições de carga diferentes sobre as zonas dos desmontes que sob os mesmos se situem; a esta escala, a possibilidade de manifestações destes efeitos da descompressão é argumento condenatório de qualquer sistema geral de ordenação da lavra que considere a recuperação do jazigo por painéis verticais, em vez de tal recuperação ser feita segundo uma sequência descendente, por fatias que abranjam todo o jazigo.

Todos estes aspectos complementares, que importa estudar, podem ser altamente significativos para a estabilidade geral da mina. Esta, por seu lado, tem que ser atentamente considerada quando do ensaio de aperfeiçoamentos não só do método de desmonte como da sequência dos desmontes dos vários filões; a recuperação parcial dos pilares-barreira, atrás referida, é uma das possibilidades em relação às quais esta consideração se impõe. Mas esta recuperação parcial dos pilares-barreira não será, com certeza, o último aperfeiçoamento que um mais completo conhecimento geomecânico permitirá introduzir na exploração da mina: a obtenção de aumentos de recuperação por remoção total de pilares de $3,0\text{ m} \times 3,0\text{ m}$ em determinadas áreas de desmontes em que tais pilares tenham sido abandonados e, até, a remoção total sistemática destes pilares, num processo geral de desabamento controlado feito ao abrigo de pilares de $11,0\text{ m} \times 11,0\text{ m}$ são possibilidades que, já neste momento, não se afiguram fantasiosas nem comprometedoras da segurança da mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROSO, M. J. G. & F. MELLO MENDES 1985 — *Estudo do comportamento de pilares da mina da Panasqueira*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (relatório não publicado).
- MELLO MENDES, F. 1960 — *Comportamento mecânico de rochas xistosas; contribuição para o estudo da influência da pressão do terreno na exploração do campo filoneano de Panasqueira*. Porto, Imprensa Portuguesa.
- MELLO MENDES, F. 1966 — *About the anisotropy of schistose rocks*. Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mechanics, I, 607-611. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- MELLO MENDES, F. 1970 — *Application of the Bieniawsky brittle fracture mechanism to the interpretation of rockbursts in tabular stopes*. Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mechanics, 2, 3-44. Beograd.
- MELLO MENDES, F. 1971a — *About the anisotropy of uniaxial compressive strength in schistose rocks*. Rock Frature, Proc. Int. Symp. Rock Mechanics, I, II-3, Nancy.
- MELLO MENDES, F. 1971b. — *Acerca da previsão da resistência de pilares de mina*. 1.º Cong. Hispano-Luso-Americano Geol. Econ., 5:307-319. Madrid-Lisboa.
- MELLO MENDES, F. 1985 — *A geomecânica das minas da Panasqueira, estado dos conhecimentos em 31 de Dezembro de 1985* (relatório não publicado).
- MELLO MENDES, F. 1986 — *Acompanhamento geomecânico da exploração das minas da Panasqueira, 1.º Semestre de 1986* (Anexo). Lisboa, Hidromineira - Consultores de Minas e Geomecânica, Lda. (relatório não publicado).
- MELLO MENDES, F. & C. DINIS DA GAMA 1973 — *Laboratory simulation of mine pillar behaviour*. New Horizons in Rock Mechanics, Proc. 14th Symp. Rock Mechanics (Pennsylvania, 1972) ed. by H. R. Hardy & R. Stefanko. New York.
- POTTS, E. L. J., A. SZEKI & S. J. PATCHET 1970-1973 — *Several reports on geomechanics of Panasqueira mine* (não publicado).
- SALAMON, M. D. G. & K. I. ORAVECZ 1976 — *Rock Mechanics in Coal Mining*. Johannesburg, Chamber of Mines of South Africa.
- STREETS, C. G. 1968-1969 — *Several reports on geomechanics of Panasqueira mine* (não publicado).
- THADEU, D. 1951 — *Geologia do Couto Mineiro da Panasqueira*. Com. Serv. Geol. Portugal XXXII, 5-64. Lisboa.