

A SEGURANÇA ESTRUTURAL EM ENGENHARIA DE MINAS*

Structural safety in mining engineering

FERNANDO DE MELLO MENDES**

RESUMO – Refere-se como só em casos particulares a segurança estrutural na exploração mineira subterrânea pode ser considerada recorrendo a factores de segurança estabelecidos a partir das solicitações máximas suportadas pelos maciços rochosos antes da rotura. E salienta-se que, na generalidade das situações de mineração, a segurança estrutural tem que ser considerada tendo em conta a dinâmica da rotura dos maciços e as resistências pós-rotura que estes podem exibir.

SYNOPSIS – Reference is made to how only in particular cases structural safety in underground mining exploitation can build on safety factors based on maximum efforts on the rock mass before rupture. And it is emphasised that, in general mining situations, structural safety has to be considered taking into account the dynamics of rock mass rupture and the post-rupture resistance the mass can exhibit.

Tratando-se da última lição dum curso integrado no ensino da Engenharia de Minas, achei por bem discorrer sobre um tema especificamente mineiro. Pretendi no entanto que, acessoriamente, tal tema permitisse marcar a minha posição, mais uma vez, sobre o que entendo dever ser a Engenharia e, em particular, a Engenharia de Minas. Daqui ter escolhido, para título da lição, “A Segurança Estrutural em Engenharia de Minas”. Trata-se de um assunto que pode considerar-se de Geomecânica aplicada à Exploração de Minas e que abrange matérias que procurei ensinar nos dois grupos de disciplinas de que me ocupei no Instituto Superior Técnico: as de Exploração e as de Geomecânica.

Não é um assunto fácil, se se pretender tratá-lo em termos de aplicação prática, apenas seguindo pelos caminhos, por vezes aliciantes, das especulações teóricas quando estas se afiguram susceptíveis de conduzir a resultados concretos com interesse. O mesmo acontece, no entanto, em relação à maioria dos temas de Engenharia.

Para mim, a melhor definição de Engenharia é a de Física aplicada ao serviço do Homem”. É dentro desta concepção de Engenharia que sinto a necessidade dum bom domínio da Matemática pelos engenheiros. Ela é indispensável para uma interpretação, tão aprofundada quanto possível, dos fenómenos físicos. No entanto, para além deste objectivo de aplicação, a Matemática, no meu entender, é para os matemáticos, já o deverá ser menos para os físicos e menos ainda o deverá ser para os engenheiros. Para estes, a importância da realidade deverá sempre sobrepor-se ao valor das soluções teóricas.

* Última lição, proferida no Instituto Superior Técnico em 9 de Junho de 1995.

** Prof. Cat..

É evidente que o que acabo de dizer, numa primeira visão, muito geral, do que considero Engenharia, exige complementação. Assim, por exemplo, não se me afigura de aceitar que o Homem possa pôr a Física proveitosamente ao seu serviço sem conseguir dominar os condicionalismos, nomeadamente económicos, que o cercam; só fazendo-o poderá planear convenientemente, otimizando os seus processos de actuação. Para isso, também a Matemática é precisa.

No caso especial dos engenheiros de minas, uma particularidade surge, importantíssima. Na sua actuação positiva nos domínios da Matemática, da Física e da Economia, eles movimentam-se obrigatoriamente no campo naturalista das Ciências Geológicas. Aí, para a conveniente quantificação das ocorrências minerais, também alguma Matemática é necessária, mas com conta, peso e medida, como costuma dizer-se, sem nunca esquecer que a indisciplina da Natureza dificilmente se deixa vencer por premeditadas sistematizações teóricas.

Esta minha última afirmação, receio-o bem, pode levar a que se pense que considero que, para a Engenharia de Minas, as Ciências Geológicas são mais importantes que as de índole física e matemática e que as Tecnologias, derivadas de todas elas. Nada disso: para que seja uma Ciência de Minas e não apenas uma arte, como o era não há muitas dezenas de anos, e para que possa utilizar cientificamente, eventualmente desenvolvendo-as, as tecnologias ao seu dispor, a Engenharia de Minas tem que saber combinar, equilibrando-os, o rigor dos conceitos físico-matemáticos de que se serve com o realismo naturalista do meio geológico em que se movimenta.

Qualquer actuação que procure sobrevalorizar a importância quer da Matemática quer das Ciências Geológicas ou que pretenda colocar qualquer delas acima das Tecnologias será, no meu entender, uma actuação *soft* no âmbito da Engenharia de Minas, na acepção de toska e de valor duvidoso que agora correntemente se dá a este adjectivo anglo-saxónico.

No centro da Engenharia de Minas - perdoem-me esta atitude cavalheiresca "para com a minha dama" - coloco a Exploração de Minas. Sem exploração não há minas, há apenas jazigos minerais, e sem minas não é fácil compreender a necessidade dum Engenharia de Minas. É certo que, a montante da Exploração, há variados domínios de valorização dos recursos minerais naturais, domínios esses correntemente englobados no que costuma designar-se por Prospecção e que a Engenharia de Minas também cobre; assim como também os há a juzante, exigidos pelo grau de concentração que é necessário conferir aos produtos minerais extraídos antes de os utilizar ou comercializar. Mas é a Exploração que, pelo menos na minha maneira de ver, constitui o fulcro de todos esses domínios, conferindo à Engenharia de Minas características específicas em relação a todas as outras Engenharias.

Desde longa data que os que se dedicam à Exploração de Minas, ou à Arte de Minas, como esta actividade era ainda designada na Enciclopédia de Diderot e d'Alambert, o fazem ao abrigo de três princípios éticos fundamentais: o da Segurança, o da Economia e o do Bom Aproveitamento dos Jazigos.

Ninguém duvida que o primeiro destes princípios seja fundamental, parecendo dever sobrepor-se aos restantes. *Safety first*, como dizem os anglo-saxónicos, a segurança acima de tudo, é uma regra de ouro bem conhecida e que pouco carece de explicação. Com efeito, não há nada que pague a vida de um homem e, por isso, compreende-se facilmente que o trabalho mineiro, como, de resto, qualquer outra actividade, deva ser executado com segurança.

Este, porém, é um aspecto muito particular da noção de Segurança que o primeiro dos Princípios Fundamentais da Exploração de Minas abrange. Na realidade, não é só da morte ou

de injúrias corporais graves que o Homem deve ser protegido quando trabalha em minas. O mineiro sabe bem, de resto, que as chamadas doenças profissionais, como a silicose, por exemplo, facilmente contraíveis a médio ou a longo prazo se as boas condições dos ambientes de trabalho não são convenientemente asseguradas, podem matar muito mais que as bruscas quedas de pedras dos tectos das escavações ou que os rebentamentos intempestivos de explosivos. A garantia de bons ambientes de trabalho deve, pois, ser também abrangida na noção de Segurança Mineira.

A noção de Segurança não pode, porém, ser apenas estendida ao Homem. Cada vez mais há que ter sempre presente que uma mina é um complexo técnico-económico onde trabalham homens, é certo, mas que exige investimentos muito vultosos sob a forma de equipamentos e de estruturas que houve que criar para acesso aos locais onde os minérios são arrancados e para o desenvolvimento desses mesmos trabalhos de arranque. Todos estes investimentos têm que ser a seu tempo recuperados. Deste modo, tanto os equipamentos como as próprias estruturas de apoio não podem estar à mercê de acidentes que comprometam a recuperação dos correspondentes investimentos. Devem, por isso, ser igualmente abrangidos pela noção de Segurança que está a ser referida, mesmo quando não for necessário ter também em conta que os acidentes estruturais facilmente podem dar lugar à morte ou a graves injúrias no pessoal mineiro.

No que até aqui disse, já me referi a Segurança e a Estruturas Mineiras. Já aflorei, assim, o assunto da Segurança Estrutural em Engenharia de Minas, que dá o título a esta lição. Para tratar o tema convenientemente há, todavia, que atender também aos outros dois Princípios Fundamentais da Exploração de Minas.

Quanto ao Princípio da Economia, o seu significado é fácil de apreender. Sendo uma actividade tipicamente industrial, a mineração vive sempre condicionada pela obrigatoriedade de produzir a preços de custo inferiores aos correspondentes às cotações dos seus produtos num mercado cada vez mais de âmbito mundial. Tratando-se, por outro lado, duma indústria pesada dotada de grande inércia, que impõe longos prazos de restituição aos elevados capitais que obriga a investir, a indústria mineira, para ser atractiva para os investidores, tem que oferecer boas ou, pelo menos, razoáveis perspectivas de lucro. Todo este condicionalismo faz com que a produção mineral deva ser conseguida aos preços mais baixos possíveis, o que se reflecte na obrigatoriedade de otimizar o custo do processo produtivo mineiro em todos os seus complexos pormenores. Na Exploração de Minas, o Princípio Fundamental da Economia traduz esta obrigatoriedade.

Em relação ao terceiro Princípio Fundamental, o do Bom Aproveitamento dos Jazigos, o seu significado é igualmente claro. Com efeito, salvo raríssimas excepções, os jazigos minerais não são renováveis à escala temporal da vida humana nem mesmo à escala temporal da Humanidade. Explorá-los representa, por isso, para esta última, a destruição de um capital que não pode ser repostado. Assim, a par de dever tentar-se obter, por reciclagem, produtos minerais anteriormente extraídos e já utilizados, há que minimizar a delapidação dos recursos minerais naturais. Importa, então, otimizar a recuperação das substancias minerais dos seus jazigos, de modo a que fracções destes, que agora não sejam exploradas, não fiquem em condições tais que impossibilitem a respectiva recuperação futura. Este dever justifica o Princípio Fundamental do Bom Aproveitamento dos Jazigos. Não o seguindo, o Homem está criminosamente a comprometer o futuro da Humanidade no que respeita às suas possíveis melhores condições de vida, pelo menos em relação às resultantes de poder beneficiar do aproveitamento dos minérios e, numa óptica local que muito interessa às regiões mineiras, de poder prolongar a actividade industrial da mineração, geralmente promotora importante do desenvolvimento social.

A necessidade de respeitar qualquer dos três Princípios Fundamentais da Exploração de Minas, acabados de referir, parece também, pelo que foi dito, incontroversa. Mas respeitá-los integralmente aos três, simultaneamente, é impossível, dado que são antagónicos, uns em relação aos outros. Com efeito, há sempre possibilidade, pelo menos teórica, de aumentar a segurança geral de uma exploração mineira, mas tal acarretará inevitáveis custos adicionais, indo contra o Princípio da Economia, e dificilmente poderá ser conseguido se se pretender recuperar integralmente o jazigo, mesmo nas suas zonas de exploração mais difícil. Por outro lado, é sempre possível tornar uma exploração mineira mais económica, mas tal só se consegue, em regra, negligenciando a segurança e abandonando, deixando-as em condições de inexplorabilidade futura, as zonas do jazigo mais pobres ou de lavra mais custosa. Finalmente, será sempre possível caminhar no sentido da recuperação integral dum jazigo mas, evidentemente, à custa da diminuição da economia da lavra, consequência imediata da exploração das zonas do jazigo mais pobres, e do agravamento das condições gerais de segurança, devido à exigência de recuperar o minério das zonas de exploração mais perigosa.

Nestas condições, a Exploração de Minas viu-se sempre condicionada, em relação a cada um dos seus Princípios Fundamentais, pela necessidade de respeitar os respectivos objectivos contrariando, no mínimo possível, os Princípios a esse antagónicos. Em relação aos três Princípios, no seu conjunto, viu-se sempre obrigada a procurar um ponto óptimo de equilíbrio que permitisse, globalmente, maximizar as vantagens e minimizar os inconvenientes de não seguir integralmente, por tal ser impossível, os ditames de cada um. Foi a aproximação conseguida em relação a esse ponto óptimo de equilíbrio entre vantagens e inconvenientes que sempre constituiu a medida aferidora da perfeição da Arte de Minas. A minimização do afastamento de tal ponto é, ainda hoje, a preocupação primeira da Exploração de Minas.

A situação do ponto óptimo de equilíbrio entre as exigências dos três Princípios Fundamentais da Exploração tem, porém, variado ao longo dos tempos, de acordo com a valorização relativa dada pelo Homem aos diversos factores que foi considerando importantes para si e para a Humanidade. Esta variação do posicionamento da meta a atingir tem obrigado, necessariamente, a mudanças de direcção das correcções a introduzir no modo de considerar a mineração, isto para que a aproximação em relação aquela meta se possa concretizar da melhor maneira.

Fortemente condicionantes desta evolução, dois importantíssimos aspectos merecem especial registo. O primeiro correspondeu à consciência, progressivamente mais esclarecida, que o Homem foi adquirindo dos seus direitos e obrigações em relação aos seus semelhantes. O segundo, que presentemente está a dar lugar a importantes e generalizadas preocupações, assenta na reavaliação dos factores que, no seu conjunto, definem a possibilidade de melhores condições de vida e de bem estar para a Humanidade, tanto agora como no futuro, melhores condições essas, de resto, cuja obtenção sempre constituiu importante objectivo da actividade mineira.

O primeiro dos aspectos acabados de referir teve, como é fácil compreender, fortes implicações no Princípio da Economia das explorações mineiras. A abolição do trabalho do escravo, fonte de energia praticamente única na mineração da antiguidade, obrigou ao emprego de outras formas de energia, então mais caras, tais como a energia animal e a energia hidráulica, mais tarde o vapor e a electricidade, mas impulsionou em contrapartida a mecanização. A este propósito, é de aludir, num pequeno parêntesis, ao orgulho que os mineiros sentem pelo facto de ter sido nas minas que se desenvolveram variados processos tecnológicos, como os cami-

nhos de ferro e, muito depois, a utilização dos equipamentos gigantes de remoção e transporte de terras, mais tarde postos ao serviço de outros sectores da actividade humana. A abolição do trabalho escravo e a progressiva necessidade de melhor atender aos direitos do Homem também influenciaram, em grande parte indirectamente, por intermédio da Economia, o Princípio Fundamental do Bom Aproveitamento dos Jazigos. Com efeito, não só a dificuldade de fazer com máquinas propriamente ditas o trabalho de lavra selectivo que a máquina humana, muito mais flexível, facilmente executa mas também os aumentos de custo resultantes de tal evolução técnica, raras vezes compensados pelas maiores produtividades conseguidas, obrigaram a ir modificando o conceito de minério, fixando, em cada momento, a concentração mínima de substância útil necessária para que uma dada fracção do produto mineral natural, em que essa substância ocorra, tenha condições para ser recuperada em vez de ser abandonada por inexplorável. Mas o facto de um dado produto, pela sua baixa concentração, não poder hoje ser explorado não significa que não possa vir a sê-lo mais tarde, à custa de processos tecnológicos mais evoluídos ou se novas aplicações forem descobertas para as substâncias que contém, fazendo aumentar o respectivo valor. Os aspectos técnicos, económicos e mesmo filosóficos desta problemática, consubstanciados na definição do chamado “teor de corte” do processo mineiro, dariam para longas horas de apreciação. Para a exposição, que está a ser feita, o que foi dito basta, todavia, para que se compreenda com facilidade como o Princípio Fundamental do Bom Aproveitamento dos Jazigos foi afectado.

No que respeita ao segundo dos aspectos condicionantes da definição do objectivo óptimo da exploração mineira são altamente significativas, hoje em dia, as implicações da atenção prestada à noção de “ambiente”, as quais conduziram à definição, pouco reflectida, de políticas ambientais impostas como prioritárias em relação a quaisquer outras por que se deva reger a Humanidade.

A falta de clareza da situação começa por o conceito de “ambiente” ser vago, em muitos casos controverso. Não existe uma distinção nítida entre o ambiente mais ou menos desejável em que se pretende que o Homem viva e o ambiente natural que, de uma forma edénica, existiria sobre a Terra se o Homem nela não tivesse aparecido. O Homem surge, assim, como o grande inimigo de si próprio no que respeita ao ambiente em que pretende viver. Tudo o que faça para melhorar o seu bem-estar constitui uma agressão ao ambiente natural, com “impacto ambiental”, como hoje se diz, sempre indesejável.

Sob a óptica da agressão ambiental, toda a actividade do Homem sobre a Terra passou a ter um valor meramente convencional. Considera-se justificável que o Homem utilize combustíveis minerais para se aquecer e para produzir energia e que utilize metais para com eles desenvolver as tecnologias da sua civilização mas classificam-se já como reprováveis as praticamente inevitáveis escombrelas resultantes das correspondentes explorações mineiras, quanto mais não seja porque agridem o ambiente sob o aspecto paisagístico. Já não se contesta, no entanto, que inumeráveis redes de vias de comunicação interrompam a continuidade das paisagens naturais e que, duma forma ainda muito mais agressiva, os desenvolvimentos urbanos vão substituindo por betão armado as florestas e os campos, modificando radicalmente os correspondentes ambientes naturais.

Passou assim a ser meramente convencional, como disse, o que constitui e o que não constitui uma agressão ambiental. Tornou-se uma questão de moda o classificar determinadas actividades humanas, sob o ponto de vista do ambiente, em correctas ou incorrectas. Pior do que isso, as regulamentações e mesmo a legislação sobre a matéria passaram a basear-se, em

muitos casos, não na importância real dos objectivos a atingir mas sim na obrigatoriedade de respeitar novas e asfixiantes burocracias, para a sustentação das quais se justificou o aparecimento de novas estruturas geradoras de empregos de utilidade concreta mais que discutível.

Outra vez sinto que estou a entrar em assuntos cuja discussão levaria certamente muito longe. Não pretendo fazê-lo até porque todos os mineiros sempre tiveram consciência de que, na sua actividade exploradora dos recursos minerais naturais, um dos objectivos, para além da preservação possível do capital que esses mesmos recursos constituem, deveria ser o de desenvolver a sua acção de modo a prejudicar minimamente terceiros. As legislações aplicáveis à prática mineira sempre pautaram essa maneira de proceder; simplesmente, pretenderam fazê-lo com o bom senso indispensável para não agredir as actividades extractivas com regulamentações de interesse limitado, impossibilitando-as em grande parte dos casos.

Não me parece defensável, pelo que disse, considerar a preservação ambiental como mais um princípio fundamental da Exploração de Minas. Essa preservação sempre foi tida em conta e foi levada a cabo pelos mineiros dentro duma avaliação geral, ponderada nos seus variados aspectos, dos reais factores condicionantes do bem-estar e do progresso da Humanidade. Se sobre esta matéria dispendi mais tempo do que o que seria desejável tal ficou a dever-se, apenas, à necessidade de mostrar como as novas políticas do ambiente afectaram a actual actividade mineira, relegando para os países mais sub-desenvolvidos as actividades extractivas tradicionais, tornando-as ao mesmo tempo praticamente impossíveis, por excessivamente condicionadas, nos restantes. Em relação a estes últimos, todavia, não podem deixar de ser tidas em consideração quando se aborda o assunto, que pretendo tratar nesta lição, da Segurança Estrutural em Engenharia de Minas.

A Segurança Estrutural, ou seja, a segurança das estruturas, é um dos aspectos segundo os quais, como disse, o Princípio da Segurança tem que ser considerado em Engenharia de Minas. Ora, como é do conhecimento de todos, a segurança das estruturas constitui uma das preocupações básicas de diversos ramos da Engenharia, nomeadamente da Engenharia Civil. Numa primeira abordagem, o tema parece, assim, transcender o âmbito da Engenharia de Minas, apresentando-se como de carácter geral para a Engenharia. Se, todavia, dei a esta lição o título “A Segurança Estrutural em Engenharia de Minas” foi por reconhecer que, neste ramo da Engenharia, a segurança das estruturas apresenta aspectos particulares merecedores de especial consideração.

A especificidade da segurança estrutural em Engenharia de Minas reside, antes de mais, no carácter muito particular que as estruturas mineiras apresentam em relação à generalidade das estruturas. A maneira mais fácil de realçar esse carácter é compará-lo com o das estruturas da Engenharia Civil, tanto de superfície como subterrâneas.

Para a Engenharia Civil, a realização das estruturas constitui, geralmente, o objectivo final da aplicação dos conhecimentos e dos recursos desse ramo da Engenharia. Para a Engenharia de Minas, as estruturas que executa constituem apenas um meio a que recorre para atingir o seu objectivo, completamente diferente, que é extrair minério. Daqui resultam logo ópticas distintas na consideração das estruturas, para a Engenharia Civil, por um lado, e para a Engenharia de Minas, por outro.

As estruturas da Engenharia Civil, tendo em vista o desempenho de finalidades bem definidas, são, dum modo geral, projectadas com base num conhecimento tanto quanto possível perfeito das características dos materiais que vão ser utilizados na respectiva execução; em

contrapartida, as estruturas mineiras têm que aceitar ser construídas nos próprios maciços rochosos naturais que, na maioria das situações que se apresentam na prática, exibem comportamentos que se afastam de modo significativo do de corpos sólidos contínuos para assumirem o de sólidos compartimentados, enfraquecidos por variados sistemas de descontinuidades que os atravessam. Quando as estruturas da Engenharia Civil são subterrâneas, raro é que não sejam construídas em maciços rochosos escolhidos por serem bastante resistentes, não exigindo, por isso, sustimentos ou revestimentos artificiais importantes; além disso, o respectivo projecto só é em regra levado a cabo após pormenorizada prospecção geológica e geotécnica dos maciços em que se situam, de maneira a poderem ser garantidas, em termos de razoável probabilidade, as distribuições espaciais dos valores das características mecânicas desses maciços pertinentes para o futuro comportamento das obras.

As estruturas da Engenharia Civil são também, em regra, projectadas e construídas para desempenhar as respectivas funções durante períodos de tempo longos, os quais muitas vezes chegam a ser fixados tendo em conta o número de anos durante os quais é possível prever as consequências do envelhecimento dos materiais utilizados na respectiva execução; tratando-se de obras subterrâneas, estes longos tempos de serviço permitem, de resto, uma relativamente fácil amortização dos gastos com os reconhecimentos geológico e geotécnico dos maciços rochosos, possibilitando assim que essas prospecções sejam suficientemente exaustivas para que a caracterização mecânica desses maciços resulte adequada aos fins em vista. O que se passa com as estruturas mineiras, tirando casos particulares de poços e de galerias principais, destinados a servir durante toda a vida das minas, vida esta que, todavia, modernamente raras vezes ultrapassa poucas dezenas de anos, é completamente diferente. A vida útil de tais estruturas apenas, dum modo geral, tem que ser assegurada enquanto as mesmas são necessárias para manter acessíveis os locais de extracção do minério a que estão associadas; variando estes locais, dentro dos jazigos, à medida que é feita a respectiva recuperação, às estruturas que os servem apenas são exigidos, por via de regra, curtos tempos de vida em boas condições de resistência; estes tempos que, geralmente, não ultrapassam poucos anos, contrastam assim, largamente, com os de muitas dezenas de anos, correspondentes às durações previstas para as estruturas da Engenharia Civil. É de notar, todavia, que exigências de protecção ambiental, nomeadamente as relacionadas com a obrigatoriedade de impedir repercussões superficiais de aluimento, podem obrigar algumas estruturas mineiras a serem projectadas para se manterem perfeitamente estáveis durante períodos de tempo muito longos ou mesmo, teoricamente, para todo o sempre.

Um outro aspecto importantíssimo é o de as estruturas da Engenharia Civil terem, por via de regra, características dimensionais imutáveis no tempo e serem projectadas, atendendo a essas dimensões, de maneira a que não fique comprometida a resistência dos materiais que as constituem, mesmo que tais materiais sejam os componentes dum maciço rochoso, se se trata duma obra subterrânea. A grande maioria das estruturas mineiras, em contrapartida, tem dimensões que variam ao longo do tempo, aumentando, dum modo geral, à medida que os correspondentes vazios se vão alargando por efeito do arranque das substâncias úteis dos jazigos, que constitui o objectivo da exploração. Nestas condições, a estabilidade das estruturas mineiras subterrâneas é grandemente afectada não só por essa variação de dimensões como pela velocidade com que a mesma se processa; como consequência última, só em casos muito particulares é possível evitar roturas nos maciços rochosos em que as estruturas mineiras são abertas. Atendendo a estes diversos aspectos, bem pode dizer-se, como o fez Talobre, que, no

que respeita às estruturas subterrâneas que executam, a Engenharia Civil é predominantemente estática ao passo que a Engenharia de Minas é essencialmente dinâmica.

A adicionar aos aspectos referidos que, de resto, já bem distinguem as estruturas da Engenharia Civil das estruturas subterrâneas mineiras, há que ter em conta os importantíssimos condicionalismos a que estas últimas estão sujeitas pelo facto de se integrarem na Exploração de Minas. Com efeito, como atrás frisei, esta não pode atender unicamente ao Princípio da Segurança, tendo que, simultaneamente, satisfazer o do Bom Aproveitamento dos Jazigos e o da Economia, principalmente este último.

Na quase generalidade das situações em que a exploração mineira é feita, a Economia cria-lhe condições muito marginais de trabalho, incompatíveis com o respeito pelos critérios de estabilidade que são aplicados à maioria das estruturas de carácter civil. Para respeitar esses critérios, as estruturas civis são, por via de regra, sobredimensionadas quanto ao aproveitamento das respectivas características de resistência, donde resulta trabalharem, durante todas as suas vidas úteis, com relações razoavelmente elevadas entre valores que caracterizam essas resistências e os valores correspondentes às solicitações a que são sujeitas. O respeito por factores de segurança mínimos, correspondentes a essas relações, é geralmente, de resto, uma imposição no projecto das estruturas da Engenharia Civil.

Nas estruturas mineiras, nomeadamente nas resultantes da criação de vazios pelas operações de arranque das substâncias úteis dos jazigos, estruturas essas que, como já disse, são em regra caracterizadas por importante variação de dimensões à medida que a mineração progide, as condições de estabilidade estática facilmente deixam de poder ser respeitadas; então, como igualmente já referi, as roturas do material rochoso que, circundando os vazios, constitui tais estruturas tornam-se praticamente inevitáveis. Para que assim não seja, é necessário limitar muito as dimensões das cavidades, deixando, em consequência, importantes fracções dos jazigos por recuperar, prática a que se opõe o Princípio do Bom Aproveitamento dos Jazigos e, principalmente, o da Economia. Por estas razões, a fixação, para as estruturas mineiras, de factores de segurança análogos aos que são utilizados nos projectos de Engenharia Civil carece, por via de regra, de significado. Principalmente pelas imposições da Economia, a resistência das estruturas da exploração mineira subterrânea tem que ser tida em conta integralmente e não apenas parcialmente, como se torna possível em relação às estruturas civis.

Como consequência do que acabo de expor, as preocupações da Engenharia de Minas em relação ao conhecimento do comportamento dos materiais com que lida são, na generalidade dos casos, muito diferentes das da Engenharia Civil. Esta última, devido aos razoavelmente elevados factores de segurança que utiliza, obriga os seus materiais a trabalharem em condições geralmente afastadas das correspondentes à respectiva rotura; pode assim, igualmente nas situações mais correntes, admitir que esses materiais obedecem a comportamentos simples, facilmente controláveis pelo recurso a modelos físico-matemáticos como o da Elasticidade. A Engenharia de Minas, por seu lado, preocupa-se principalmente com o comportamento dos seus materiais em situações próximas da respectiva rotura e, muito frequentemente, abrangendo essa mesma rotura. Trata-se duma maneira bastante diferente de considerar a resistência dos materiais, o que conduz, logicamente, a ópticas também muito diferentes quanto à segurança das estruturas que com esses materiais são executadas. É frequente poder afirmar-se, em Engenharia de Minas, quanto a preocupações sobre segurança estrutural, que, se toda uma estrutura se comporta dum modo praticamente elástico, tais preocupações não existem, dado que esse comportamento pode ser facilmente dominado, quando muito, pela aplicação dum conveniente sistema de sustimento.

A rotura das rochas e dos maciços rochosos e os mecanismos nessa rotura envolvidos estão, de resto, sempre bem presentes na actuação dos engenheiros de minas. Extrair substâncias úteis dos seus jazigos implica, necessariamente, arrancar blocos de rocha, que contenham essas substâncias, dos maciços de que fazem parte; esse arranque corresponde, por seu lado, à necessidade de se provocar a rotura para separação de tais blocos. Não é assim de estranhar que uma das preocupações fundamentais da Engenharia de Minas seja o aprofundamento dos conhecimentos existentes sobre a rotura dos materiais, nomeadamente das rochas, tanto nos seus aspectos teóricos como no respeitante às tecnologias que os aplicam.

Também no emprego dos seus métodos de exploração subterrânea o engenheiro de minas reconheceu há muito ser conveniente deixar que os maciços rochosos, envolventes das cavidades que vai criando, vão libertando a pouco e pouco, por meio de sucessivas e devidamente controladas roturas, os excessos de energia que tendem a acumular-se em torno dessas cavidades, à medida que vão aumentando as respectivas dimensões; com este modo de proceder reduzem-se os riscos de a libertação de tais excessos de energia vir a ocorrer de forma brusca e violenta, com fracturação do terreno quando e onde tal não seja esperado. Daqui o terem-se desenvolvido variados métodos de exploração em que a rotura dos maciços rochosos é procurada ou, mesmo, artificialmente provocada, métodos esses que, como é sabido, vão até ao ponto de permitir utilizar energia armazenada nos maciços rochosos para fracturar e fragmentar a rocha constituinte desses maciços, em substituição do emprego de outras formas de energia.

Compreende-se, assim, que a rotura dos maciços rochosos, desde que possa ser controlada, não assuste os engenheiros de minas, sendo-lhes antes familiar companheira na sua actividade profissional. Talvez por isso a Engenharia de Minas, em oposição à Engenharia Civil, ou Engenharia da Construção, seja por vezes considerada como a Engenharia da Destruição.

Não admira pois que, em Engenharia de Minas, a noção de Segurança Estrutural seja aceite, sem qualquer repugnância, já próximo ou mesmo dentro dos domínios da rotura dos maciços rochosos.

No Método de Exploração por Abandono de Pilares em camadas ou em filões que, se fossem completamente arrancados, dariam lugar a cavidades de tipo tabular sub-horizontal, encontram-se, por vezes, bons exemplos da necessidade de, por razões de economia e de bom aproveitamento do jazigo, ser necessário encarar a segurança estrutural mineira já dentro dos domínios da rotura dos materiais rochosos. Não possuindo os tectos das cavidades a abrir resistência para se auto-sustentarem para além da criação de determinados vãos livres, aquele método consiste, como é sabido, no abandono, no interior das cavidades, de pilares do maciço natural, subdividindo aqueles vãos e actuando como elementos de sustimento que se opõem à flexão do tecto global da área em exploração.

Numa primeira abordagem, pode parecer fácil quer o avaliar em que condições de segurança se encontram trabalhando os pilares numa exploração deste tipo quer o dimensionar os pilares e a respectiva distribuição numa nova exploração, de modo a que a estrutura subterrânea correspondente se mantenha em boas condições de estabilidade: bastará, para tal, jogar convenientemente com as cargas actuantes sobre os pilares, com as resistências que estes podem oferecer antes do início das respectivas roturas e com a ordem de grandeza dos factores de segurança que deverão ser respeitados, constituindo relações mínimas admissíveis entre estas e aquelas. Todavia, as realidades geológicas e geomecânicas que é necessário ter em consideração fazem com que não seja fácil avaliar as cargas sobre os pilares e as correspon-

dentos resistências, nem seja igualmente fácil fixar os valores mínimos dos factores de segurança que deverão ser adoptados. Muitas vezes, por isso, estes três tipos de grandezas acabam por ser considerados em conjunto, a partir de retroanálises com significado estatístico, adoptando determinados procesos para avaliação das cargas e determinadas fórmulas para ter em linha de conta as variações das resistências com as características estruturais e dimensionais dos pilares; os factores de segurança mínimos resultantes destas retroanálises correspondem, então, à separação entre as situações em que será de prever que a segurança estrutural fique garantida e aquelas em que não o será.

Foi seguindo uma metodologia deste tipo que Salamon e Oravec estabelecera, para as minas de carvão sul-africanas, a sua conhecida fórmula para cálculo da resistência de pilares de secção quadrada, a qual assegura que pilares, segundo ela dimensionados, não entrarão em rotura se oferecerem factores de segurança mínimos de 1,6 sobre cargas calculadas tendo em conta as áreas do tecto tributárias desses pilares e os correspondentes pesos dos terrenos de recobrimento.

O maior inconveniente da utilização de fórmulas deste tipo é o de apenas terem validade para jazigos análogos aqueles sobre que foram feitas as retroanálises que permitiram, por via estatística, determinar os valores das constantes que incluem. Por outro lado, processos como o acabado de referir correspondem a uma atitude pessimista no que respeita à resistência dos pilares. Com efeito, a consideração das cargas sobre os pilares à custa das respectivas áreas tributárias equivale a admitir que, na zona dum pilar, a descida do tecto do desmonte apenas é contrariada por esse pilar e não, igualmente, pelos restantes pilares e pelo terreno circundante. Sendo assim, o exigir-se, para o conjunto de pilares dum exploração, um dado factor de segurança mínimo equivale, em termos práticos, a admitir-se que todos os pilares se encontram a trabalhar em condições análogas às daqueles que se apresentam mais carregados, o que em regra só se passa com os pilares centrais das áreas em consideração.

A atitude pessimista acabada de descrever é, porém, a que, à falta de outra mais segura, se adopta para o dimensionamento de configurações de pilares a abandonar em explorações mineiras tabulares sub-horizontais, quando se pretende que sobre essas explorações não se verifiquem aluimentos de terreno significativos. Tal só pode garantir-se, com efeito, se nenhum dos pilares entrar em ruína. Exigências deste género são, como já referi, cada vez mais frequentes por razões de carácter ambiental.

Estes critérios de dimensionamento e os factores mínimos de segurança que exigem não são, todavia, compatíveis com a economia exigida a grande parte das explorações mineiras. Com efeito, garantir factores de segurança mínimos da ordem do recomendado por Salamon e Oravec obriga à consideração, num número muito elevado de situações, de pequenas áreas tributárias dos pilares, o que conduz a rendimentos de recuperação insuficientes para a satisfação mínima dos Princípios da Economia e do Bom Aproveitamento dos Jazigos. Em tais casos, a actividade mineira só pode ser encarada se se admitir a segurança estrutural das explorações em moldes diferentes. Para isso, há que aproveitar melhor a resistência global que pode ser oferecida pelas estruturas mineiras e, para o fazer, há que dominar melhor a fenomenologia envolvida na deformação e na rotura de tais estruturas.

Na realidade, numa exploração mineira por abandono de pilares, a carga a que um destes está submetido, por efeito da flexão global do tecto, depende não só das suas dimensões e da deformabilidade do material que o constitui mas também das dimensões e deformabilidades dos restantes pilares e, ainda, da deformabilidade do maciço rochoso que constitui o tecto e do

esforço total que este exerce. Trata-se duma situação hiperestática, para a qual, embora se possa admitir a obtenção de soluções graças às potencialidades de cálculo actuais, não pode haver a veleidade de se pretender conseguir, por essa via, mais do que toscos retratos da realidade, quanto mais não seja devido ao elevado número de dados, de difícil determinação, que seria necessário obter para alimentar os cálculos. Acresce que, se, por aumento da área em exploração, a carga global sobre o conjunto de pilares também aumenta e alguns deles começam a romper, fraccionando as respectivas secções rectas, deixam de fazer sentido, para eles, as dimensões das áreas iniciais dessas secções, que suportavam as cargas; estas, por seu lado, começam a transferir-se para os pilares vizinhos, fazendo-os também abandonar, a breve trecho, comportamentos a que possam aplicar-se modelos físico-matemáticos simples, como o modelo elástico. Por via matemática cai-se assim, facilmente, em problemas de solução praticamente impossível.

A experiência mostra porém que muito para além da situação correspondente às primeiras roturas num dos pilares duma exploração não só esse como os pilares vizinhos continuam a resistir, fornecendo trabalho, opondo-se à deformação dos tectos, durante períodos por vezes bastante longos, até aqueles acusarem flechas muito grandes ou mesmo entrarem, por seu lado, em rotura. Em situações deste tipo, todavia, não é fácil o estabelecimento duma noção de segurança estrutural, a qual deixa claramente de poder basear-se, duma maneira estática, em cargas aplicadas e resistências até inícios de rotura para passar também a envolver aspectos dinâmicos do comportamento da estrutura. Apresenta-se então, como de importância muito significativa, a rigidez relativa dos pilares, que se opõem à deformação do maciço circundante da exploração, e deste maciço, que carrega os pilares.

Como exemplo dum caso em que só a consideração duma noção dinâmica de segurança estrutural permitiu dar resposta às exigências económicas da lavra posso referir o duma mina metálica portuguesa, trabalhada, a poucas centenas de metros de profundidade, pelo referido método de abandono de pilares em desmontes sub-horizontais. Nesta mina, os factores de segurança dos pilares foram determinados por método adaptado do, atrás referido, de Salamon e Oravecz, isto para ter em consideração a grande diferença entre o respectivo material rochoso e o carvão sul-africano das minas em que aqueles autores efectuaram os seus estudos. Após ter sido estabelecido experimentalmente que a mais conveniente largura para os vazios entre pilares era de 5 m, abandonavam-se, na mina em questão, configurações ortogonais regulares de pilares quadrados com, igualmente, 5 m de lado. Estes pilares, consoante o processo de avaliação exposto, apresentavam um factor de segurança de 2,28, bastante superior, pois, ao valor 1,6 recomendado por Salamon e Oravecz; mantinham-se, de resto, ao longo do tempo e em grandes áreas de exploração, em condições de perfeita estabilidade, sem quaisquer indícios de início de fracturação. A correspondente recuperação do jazigo era, porém, apenas de 75%, o que se revelou insuficiente, por razões económicas, para o prosseguimento da exploração.

Procedeu-se então, com os devidos cuidados, após vários estágios experimentais e com controlo permanente das velocidades de deformação, ao redimensionamento das configurações de pilares a abandonar: passaram a adoptar-se pilares quadrados com 3 m de lado, dispostos ainda segundo uma malha ortogonal regular, mantendo a distância, já anteriormente usada, de 5 m entre faces dos pilares. Com esta nova configuração conseguiu-se uma recuperação da ordem de 86%, já economicamente aceitável e mesmo difícil de ultrapassar, na prática, em desmontes por abandono de pilares. O factor de segurança dos pilares, calculado como anteriormente, desceu, porém, para um valor muito próximo da unidade, desaparecendo pois,

praticamente, o significado de tal factor como aferidor da segurança estrutural, isto tanto mais quanto não podia ser desprezada a heterogeneidade do maciço rochoso e, consequentemente, a heterogeneidade de resistência desses pilares.

A implantação cuidadosa da nova configuração de pilares a abandonar evidenciou, no entanto, que, quando as áreas das zonas em exploração se alargavam de maneira a permitirem a definição de vãos críticos globais superiores a 120 m, os pilares abandonados nas partes centrais dessas áreas começavam a entrar em ruína; esta, todavia, processava-se dum modo progressivo mas perfeitamente estável, evidenciando graduais transferências de carga dos pilares em ruína para os pilares vizinhos, com boa mobilização das resistências residuais de todos os pilares, ou seja, da capacidade destes para, após terem atingido as deformações correspondentes às suas resistências máximas, continuarem a deformar-se suportando cargas cada vez menores, até à sua destruição completa.

Tendo deixado, é certo, de assegurar a estabilidade global do maciço rochoso e de evitar o correspondente aluimento, o processo mostrou-se, no entanto, perfeitamente exequível e seguro do ponto de vista mineiro, permitindo o alargamento da exploração a vastas áreas do jazigo e contemplando, simultaneamente, os Princípios Fundamentais da Segurança, da Economia e do Bom Aproveitamento do Jazigo. Não existindo à superfície, sobre as zonas em exploração, quaisquer instalações passíveis de sofrer prejuízos significativos, também não houve que ter em conta quaisquer prováveis agressões ambientais.

No exemplo acabado de relatar a segurança estrutural inerente à exploração mineira deixou de poder ser avaliada à custa de clássicos factores de segurança, estabelecidos para os vários elementos das estruturas em apreço, elementos esses constituídos pelos pilares, tendo em conta as cargas sobre eles actuantes e as respectivas resistências, estas estabelecidas em termos de cargas máximas suportáveis. A segurança estrutural passou a ter que ser considerada já claramente dentro dos domínios da rotura do material rochoso, ultrapassando os critérios simplistas e conservativos baseados unicamente nas cargas máximas susceptíveis de serem suportadas até aos inícios das roturas dos pilares. Mais do que tais cargas máximas, passou a ter significado a consideração do trabalho resistente total susceptível de ser oferecido pelos mesmos pilares até à respectiva destruição completa. Simultaneamente, foi também necessário passar a ter em conta, incluindo-as dentro do conceito de segurança estrutural, diversas outras características de carácter geológico e geotécnico, nomeadamente a constituição e a rigidez relativa dos pilares abandonados e das zonas circundantes do maciço rochoso, que carregam esses pilares. Garantiu-se, assim, poder beneficiar, pelo menos em grande parte, da resistência residual destes, dentro dum processo de mineração controlado e estável, sem riscos de libertações bruscas da energia armazenada no maciço rochoso na vizinhança da zona em exploração e, inclusivamente, nos próprios pilares.

A caracterização da segurança estrutural em situações mineiras como esta não é, evidentemente, fácil. Consegui-la tem sido, de resto, uma das preocupações da investigação aplicada levada a cabo pela Secção de Exploração do Departamento de Engenharia de Minas do Instituto Superior Técnico, nos sucessivos estágios de acompanhamento geomecânico da exploração mineira em causa, que tem realizado. Por outro lado, diversos outros aspectos, visando possibilitar mais elevadas recuperações dos jazigos sem quebra das condições de segurança, em explorações do tipo das referidas, estão também a ser objecto de investigação na mesma Secção.

Muitos outros exemplos poderiam ser dados de situações em que, na exploração mineira subterrânea, a segurança estrutural tem que estender-se, por exigências económicas da lavra, a domínios de aproveitamento da resistência dos maciços rochosos situados muito para além dos domínios conservativos clássicos, em que tal resistência é considerada tendo apenas em conta cargas máximas admissíveis antes dos primeiros indícios de rotura. Em todos esses exemplos, para a obtenção das melhores soluções técnico-económicas para os problemas que se apresentam, importa dominar da melhor maneira possível, como já notei, os mecanismos envolvidos nos fenómenos da rotura das rochas e dos maciços rochosos. O conhecimento destes mecanismos é também, como igualmente referi, indispensável para a prática e para o aperfeiçoamento de todas as tecnologias que envolvem o arranque e a fragmentação dos materiais rochosos, tecnologias essas cobertas ainda pela Exploração de Minas.

Os domínios da rotura das rochas e dos maciços rochosos são, porém, mais uma vez o afirmo, bastante complexos e, em relação a eles, muita investigação aplicada há a fazer. Contribuir para essa investigação é, também, uma das obrigações do engenheiro de minas.

A complexidade da fenomenologia em causa e o facto de a enorme diversidade de características das rochas e dos maciços levantar quase sempre novos problemas específicos em todas as situações que é preciso encarar fazem com que, na minha opinião, seja em regra mais proveitoso, nas investigações a efectuar, caminhar no sentido duma maior pormenorização dos conhecimentos existentes, embora tal possa, em regra, apenas fazer-se dum modo qualitativo, do que tentar obter soluções quantitativas à custa da utilização das modernas potencialidades de cálculo, todavia geralmente só aplicáveis a modelos de comportamento dos materiais relativamente simples, muito distantes, portanto, dos comportamentos complexos reais envolvidos na rotura das rochas e dos maciços rochosos. Para tal, a par da preparação físico-matemática, necessária para a interpretação dos fenómenos em apreço, é também imprescindível uma boa formação naturalista em ciências geológicas, sem a qual a compreensão dos mesmos fenómenos se torna impossível por falta de enquadramento no meio em que se desenvolvem. Volto assim ao que disse, no início desta lição, sobre a necessidade, para o engenheiro de minas, de uma boa formação físico-matemática e de uma não inferior formação geológica.

É no ter que jogar duma forma equilibrada com estes dois tipos de formação, orientando-os sempre para a Tecnologia, que reside, a meu ver, um dos maiores atractivos da profissão de engenheiro de minas.