

USO PÓS-MINERAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO PARA ARMAZENAMENTO DE RESÍDUOS

Use of post-mining underground space for waste disposal

C. DINIS DA GAMA*

RESUMO — Até à última década, admitia-se que o crescimento económico estava limitado pela escassez dos recursos da Terra. Hoje começa-se a compreender que a verdadeira limitação é a capacidade do ambiente para absorver os subprodutos e resíduos da actividade industrial.

Na procura de soluções válidas para o problema do armazenamento de resíduos (urbanos, industriais, tóxicos e radioactivos) deve ser dada a devida importância às minas, quer as que se encontram em operação quer as abandonadas, por um conjunto de vantagens que apresentam.

Os métodos geomecânicos para a estabilidade a longo prazo e para a estanquidade dessas escavações são discutidos, assim como várias opções para a sua exploração com vista à possibilidade de armazenarem resíduos.

Propõem-se critérios de projecto de minas subterrâneas que no futuro recebam resíduos tóxicos através de novos processos que podem beneficiar economicamente a indústria mineira.

ABSTRACT — Until the last decade, economic growth was supposed to be limited by the scarcity of earth resources. Today we are understanding that the real constraint is the ability of the environment to absorb waste by-products.

In the pursuit for reliable solutions to the problem of waste storage (of urban, industrial, toxic and radioactive types) appropriate consideration must be attributed to operating and abandoned mines, for a series of advantages.

The geomechanical methods for the long term stability and water containment of those excavations are discussed, and several options are discussed in view of their waste storage capabilities.

Furthermore, design concepts for underground mines that in the future will store waste are proposed, because they may provide an additional economic help for the mining industry.

1 — INTRODUÇÃO

A crescente preocupação social com o armazenamento definitivo de resíduos sólidos e líquidos provenientes das actividades humanas requer o escrutínio de todas as soluções possíveis para o tratamento a longo prazo deste problema. Entre as múltiplas possibilidades, tem sido considerado como alternativa mais promissora o uso do espaço subterrâneo para deposição final de resíduos tóxicos e radioactivos.

Como exemplo, cita-se a decisão do governo norte-americano, tomada em 1987, após vários anos de debates, de seleccionar o depósito subterrâneo de Yucca Mountain (estado de Nevada) como primeiro local para receber com carácter definitivo o lixo radioactivo de alta concentração proveniente das centrais nucleares daquele país. Cerca de 177 km de túneis serão escavados para receber durante 50 anos tais resíduos, após o que serão selados e fechados para sempre. O custo estimado deste projecto é de US\$ 8,4 bilhões e mesmo assim não terá capacidade para armazenar todo o lixo já existente, em particular no que se refere aos sub-produtos de alto conteúdo radioactivo.

* Prof. do IST — Dep. Minas.

Os custos a pagar pela sociedade contemporânea para administrar o problema dos resíduos tóxicos serão cada vez mais elevados e em muitos casos os dispêndios públicos estão sendo e serão efectuados sem qualquer avaliação da sua viabilidade económica, dada a urgência e gravidade das situações.

Esta tendência preocupante sugere que todas as alternativas disponíveis deverão ser encaradas para fins de repositório de sub-produtos perigosos à vida biológica.

Em termos de soluções subterrâneas existem duas alternativas principais: a escavação e preparação de cavidades especificamente projectadas para esse fim, ou o recurso a aberturas pré-existentes (cavernas naturais e minas subterrâneas). É com referência a esta última opção que numerosos estudos deverão ser desenvolvidos pelos engenheiros de Minas e por especialistas de Mecânica de Rochas para proceder à utilização racional de minas abandonadas, ou ao armazenamento de resíduos em simultâneo com a operação de certas minas, de modo a que esta solução seja técnica e economicamente viável.

Os principais aspectos do problema serão abordados a seguir, envolvendo a escolha de métodos de lavra subterrânea, a estabilidade das escavações a longo prazo, o controlo de águas subterrâneas contaminadas e correspondentes implicações económicas.

2 —O RECURSO ESPACIAL SUBTERRÂNEO E A CONTRIBUIÇÃO DA INDÚSTRIA MINEIRA

Numerosas vantagens resultam da utilização do espaço subterrâneo, em relação às soluções que preconizam o uso da superfície. Com efeito, basta considerar os seguintes pontos:

- a) A temperatura é aproximadamente constante nos ambientes subterrâneos, sendo da ordem de grandeza do seu valor médio anual ao ar livre, o que é favorável para fins de armazenamento de diversos produtos.
- b) A humidade é facilmente controlável e a qualidade da água subterrânea pode ser mantida sem dificuldades.
- c) A segurança é excelente, seja contra incêndios, enchentes, furacões, fortes chuvas e nevões, etc.
- d) A proliferação de insectos e de bactérias é muito melhor evitada do que em armazéns convencionais.
- e) As perdas de materiais e a deterioração de produtos são consideravelmente reduzidas.
- f) A superfície da terra fica livre de poluição de qualquer tipo (sólido, líquido e gasoso), assim como se impedem as destruições da vegetação e as agressões ao equilíbrio paisagístico.

Devido a tais benefícios, um número crescente de armazéns subterrâneos tem sido desenvolvido recentemente, com as mais diversas finalidades: para combustíveis líquidos, para água destinada ao consumo urbano, para produtos alimentares e farmacêuticos, para material de guerra, para estações de tratamento de resíduos, para centrais nucleares^(*), para refinarias de petróleo, para deposição de resíduos radioactivos, para unidades de reciclagem de lixo urbano, para armazenamento de energia e de ar comprimido, e um vasto conjunto de outras aplicações, tais como museus, piscinas, armazéns para documentos, cofres bancários, centros de pesquisa, etc.

Devido aos crescentes constrangimentos ambientais que presentemente são obrigatórios na maioria dos países desenvolvidos, um número cada vez mais significativo de projectos de estruturas subterrâneas tem sido concluído, enquanto muitos outros estão presentemente em construção e muitos mais em fase de concepção.

(*) Se a central nuclear de Chernobyl tivesse sido construída em subterrâneo, a maior parte dos danos causados pela sua explosão em Abril de 1986 poderia ter sido evitada.

Existe já uma preferência pública significativa por estes tipos de soluções de engenharia e, conseqüentemente, muitos governos passaram a considerar o espaço subterrâneo como um recurso nacional que deve ser cuidadosamente tratado e administrado. Contudo, apenas alguns países decidiram avaliar a importância deste recurso nos seus territórios, designadamente através do levantamento das suas cavernas naturais, das minas abandonadas e outras escavações subterrâneas, de forma a contribuir para o planeamento racional de projectos estratégicos, envolvendo novas soluções e implementando o seu desenvolvimento em espaços cada vez maiores e a ritmos mais velozes.

A Engenharia de Minas desempenha um papel relevante neste processo, não só fornecendo informações confiáveis a respeito da localização e das condições de estabilidade das escavações subterrâneas (quer as antigas quer as recentes), mas também como fonte para a incorporação de conceitos de utilização do espaço aberto após o encerramento das explorações mineiras, e assim contribuindo para a viabilização de soluções mais económicas para a Sociedade em geral.

3 — SELECÇÃO DE MÉTODOS DE LAVRA SUBTERRÂNEA

O processo de escolha dos métodos de desmorte em minas subterrâneas envolve o estudo das múltiplas interacções, sejam eles de natureza geológica, geomecânica, geográfica ou económica.

Boshkov e Wright (1973) descrevem uma sequência de aspectos que influenciam tal escolha, sugerindo a procura da solução inversa, através de um processo de eliminação progressiva de todos os métodos de lavra não compatíveis com aqueles factores.

O método escolhido é então aquele que sobrevive a tal escrutínio e como o minério não ocorre geralmente com geometria regular, tal método é adaptado na prática em relação ao seu padrão teórico.

Para fins de sistematização, a classificação do US Bureau of Mines continua a ser a mais aplicável, devido à sua lógica e simplicidade. Os métodos de lavra subterrânea são divididos em quatro grandes grupos, com oito sub-grupos, tal como se resume na Tabela 1.

TABELA 1 – Classificação dos métodos de lavra subterrânea, segundo o US Bureau of Mines

DESMONTES AUTO-SUPPORTADOS	1) Abertos e sem pilares	a) Para pequenas jazidas b) Desmorte em subníveis c) Desmorte com furos longos
	2) Com pilares	a) Pilares ocasionais b) Câmaras e pilares regulares
DESMONTES SUPPORTADOS ARTIFICIALMENTE	3) Com auto-enchimento temporário	a) Com pilares b) Sem pilares c) Com enchimento subsequente
	4) Corte e enchimento	
	5) Com entivação contínua	
	6) Com entivação reticulada	
DESABAMENTO DOS TECTOS	7) Com desabamento	a) Desabamento por blocos b) Desabamento por subníveis
	8) Por fatias superiores	
MÉTODOS MISTOS	Combinações entre os precedentes	

Os métodos de exploração indicados são recomendados por muitos autores para situações típicas das jazidas minerais. Thomas (1973) sugere que a sua aplicação a minas metálicas depende de quatro características das jazidas: forma geométrica, inclinação, resistências do minério e da rocha encaixante.

Para minas de carvão, indicação semelhante é fornecida por Cassidy (1973), mas todas estas contribuições revelam que nenhum método é único para um dado conjunto de características das jazidas.

O critério final de escolha é estabelecido geralmente em termos dos parâmetros económicos, em que o custo de produção e o preço de venda do minério desempenham um papel relevante. O “melhor” método de exploração será aquele que minimize os custos de desmonte do minério, levando em consideração todas as regras de segurança e um bom aproveitamento da jazida.

Entre os factores que afectam o custo de produção, Boshkov e Wright (1973) distinguem os seguintes tipos:

- Custo directo de extracção do minério
- Custo de aquisição e de recuperação do investimento inicial
- Capacidade para gerar receitas a fim de assegurar a auto-sustentação da exploração
- Características do mercado onde se irá comercializar o produto.

É dentro do terceiro item acima referido que pode ser enquadrado o uso não convencional do espaço subterrâneo, com o objectivo de estender a vida das minas e de melhorar o seu desempenho, operacional e empresarial.

4 — DEPOSIÇÃO SUBTERRÂNEA DE RESÍDUOS

Existe uma prática bem conhecida na indústria mineira que consiste em introduzir no subsolo areias ou rejeitados das lavarias para preencherem os vazios deixados abertos pelas escavações. No método de lavra por corte e enchimento, seja isoladamente seja por meio de misturas hidráulicas com cimento, tais materiais destinam-se a suportar os tectos e as paredes das aberturas, oferecendo vantagens de vários tipos:

- a) Dispensando a construção de barragens de rejeitados;
- b) Evitando a recuperação ambiental subsequente das áreas dessas barragens;
- c) Não provocando agressões ao equilíbrio paisagístico.

Razões similares justificam a inclusão de rejeitados de lavaria no material de enchimento de minas de carvão exploradas pelo método das frentes longas (“long-wall”), quando o abatimento dos tectos nas áreas já desmontadas não é permitido, face às suas implicações na subsidência da superfície. Também nos desmontes por câmaras e pilares, quando se procede à recuperação dos pilares, é usual efectuar enchimentos com material estéril e agregados cimentados para evitar efeitos à superfície.

A partir destes exemplos é interessante analisar as condições que favorecem a deposição de lixos e resíduos no subsolo, encaradas na fase em que as minas estão sendo projectadas e preparadas.

Os factores fundamentais a considerar neste contexto serão:

- A resistência mecânica do minério e da rocha
- Geometria da jazida (profundidade, forma e inclinação)
- Preparação necessária para o material a ser armazenado
- Meios de transporte até à mina subterrânea.

Os dois primeiros factores são essenciais para a definição do método de lavra, e a regra geral indica que rochas brandas e veios espessos ou muito inclinados sugerem a aplicação de métodos de desabamento dos tectos, enquanto o uso de métodos de corte e enchimento e de câmaras e pilares se aplica na maioria das outras situações. Como atrás foi enfatizado, a decisão de escolha do método mais apropriado para uma dada jazida baseia-se numa longa análise de alternativas, através do chamado processo inverso.

O terceiro factor acima referido envolve o apropriado manuseio, tratamento e fragmentação desses resíduos, assim como a adição de cimentos ligantes, quando necessário. Vários tipos de aditivos existem presentemente^(*) e as quantidades apropriadas de água a serem misturadas possuem considerável importância.

Quanto ao quarto factor (transporte) é essencial reduzir todas as operações de bombeamento e desenvolver sistemas gravíticos de alimentação. Problemas adicionais ocorrem no elevado desgaste das tubagens, que sempre que possível devem ser substituídas por furos de sondagens que atravessem o maciço rochoso até aos locais de deposição.

Embora cada combinação de processos deva ser escolhida em concordância com os constrangimentos económicos de cada caso, é possível sugerir-se um esquema geral de abordagem do problema dos resíduos a serem armazenados em minas subterrâneas. A Tabela 2 indica algumas regras recomendadas para tal fim.

TABELA 2 – Correlação entre processos de deposição de resíduos e métodos de lavra

APLICAÇÃO	UTILIZAÇÃO	MÉTODOS DE LAVRA
DURANTE A LAVRA	Resíduos como material de enchimento	Corte e enchimento Auto-enchimento temporário Entivação contínua (em veios pouco espessos) Entivação reticulada
	Para deposição definitiva de resíduos	Frentes longas (após desmonte) Trabalhos abandonados Galerias desactivadas
APÓS A LAVRA		Em desmontes auto-suportados: – Abertos sem pilares – Abertos com pilares ocasionais

Em complemento aos métodos de lavra típicos existem outras possibilidades de armazenar resíduos nas minas, tais como após as operações de retirada de pilares, quer integradas no ciclo de produção quer depois do abandono dos trabalhos de desmonte. Criatividade e tecnologia adequada permitirão o desenvolvimento de novos métodos de deposição ordenada de resíduos nas minas, em especial sob a pressão dos regulamentos ambientais.

^(*) Por exemplo, o sistema Warbreat (na Inglaterra), o método Thyssen (na Alemanha) e o sistema Tekpak (na África do Sul).

5 — PROBLEMAS GEOMECÂNICOS

No domínio da Mecânica de Rochas, o armazenamento subterrâneo de resíduos pode levantar problemas relacionados com a estabilidade a longo prazo das cavidades e com a preservação da qualidade das águas subterrâneas.

Em relação ao primeiro aspecto, é essencial distinguir entre a colocação de resíduos durante a vida das minas ou a deposição pós-operatória. As condições para avaliação das capacidades de suporte de materiais de enchimento dos vazios são hoje um dos problemas mais controversos da geomecânica mineira, como indicado por exemplo pelas contribuições apresentadas ao 4.º Simpósio Internacional de Mineração com Enchimento (Montreal, Outubro de 1989).

Se uma síntese é possível, pode-se concluir que o comportamento dos enchimentos depende da rigorosa escolha dos componentes das misturas, de modo a possibilitar a sua hidratação rápida, antes que a convergência das aberturas possa destruir as suas ligações, e isso requer bons suportes temporários, assim como um bom contacto com os tectos. Além destes aspectos fundamentais, a geometria da área afectada pelo enchimento deve garantir uma elevada relação entre a sua largura e a sua altura (superior a 10), para aumentar a sollicitação reactiva criada pela convergência da cavidade.

É ainda recomendado pelos especialistas que deve ser conseguida uma rigidez inicial elevada no material de enchimento, com pequenas perdas de água e de sólidos, e com reduzida contracção de volume.

São necessários ensaios de laboratório e de campo para caracterizar as propriedades mecânicas dos enchimentos, com referência especial à determinação das suas resistências de suporte local e de suporte regional, definidas em termos de deformações, através das respectivas curvas de tensão-deformação.

Um exemplo destas é apresentado na Fig. 1.

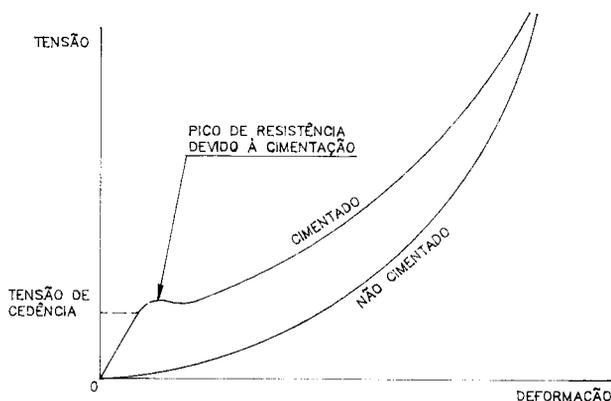


Fig. 1 — Gráfico tensão-deformação típico para enchimentos cimentados e não cimentados

Outro aspecto importante deste processo é o estabelecimento de velocidades adequadas para o avanço das escavações mineiras e para as operações de enchimento. É essencial manter as concentrações de tensões em níveis baixos enquanto a mistura dos componentes, cimentados ou não, não alcançar a sua máxima resistência. A Fig. 2 mostra uma sequência de trabalhos

para efectuar simultaneamente a mineração e o enchimento, necessitando do controlo cuidadoso da estabilidade, tanto ao nível local como regional, e utilizando geralmente instrumentação geomecânica para monitorar as tensões e deformações induzidas.

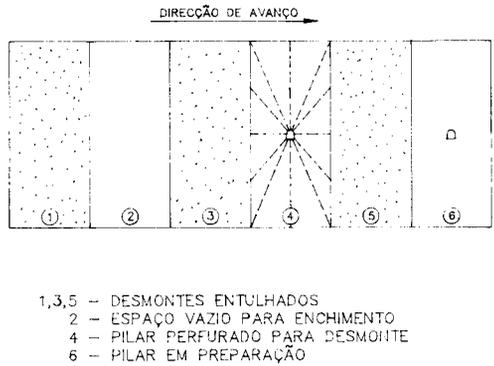


Fig. 2 — Sequência das operações mineiras com enchimento simultâneo

Quanto ao problema da percolação da água através dos maciços rochosos que circundam um reservatório de resíduos tóxicos, deverão ser considerados os sistemas de fracturas presentes, especialmente quando existem contaminantes.

Um maciço praticamente impermeável pode ser preparado em certos casos, quando os produtos tóxicos são previamente isolados e quando a própria rocha possui baixa permeabilidade. Como este não é geralmente o caso da maioria das minas subterrâneas, outras técnicas são aplicadas para atingir aquele objectivo, tais como o uso de aberturas sem revestimento para o armazenamento de combustíveis líquidos abaixo do nível freático. Se a pressão da água circundante é superior à do reservatório, o escoamento será na direcção das cavidades preenchidas por resíduos e não ocorrerão problemas complexos em termos de contaminação de aquíferos, a não ser que se trate de uma região sísmica.

Em certas situações, a instalação de sistemas apropriados de bombeamento da água pode auxiliar o controlo permanente do nível freático, e assim manter o reservatório de resíduos isolado da biosfera, como é desejável e como esquematiza a Fig. 3.

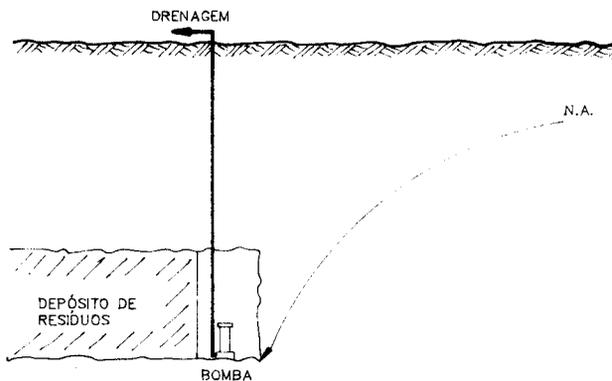


Fig. 3 — Controlo hidrogeológico da contaminação de aquíferos por resíduos

Entretanto, nos casos de maciços rochosos fracturados, como é frequente em torno de minas abandonadas, o comportamento da água subterrânea em termos de escoamento e de pressões de percolação não é geralmente bem entendido, conduzindo a outras soluções, como sejam a estudos especializados dos regimes de fluxo da água, ou a dispendiosos processos de tratamento impermeabilizante com injecções efectuadas através de furos de sondagem realizados em torno do perímetro a proteger. Tais trabalhos podem ser executados a partir de pontos do subsolo, de modo a reduzir o comprimento dos furos e a quantidade dos produtos selantes (argamassa, resinas epoxídicas, etc.).

Se ocorrerem problemas mais complexos de transporte de contaminantes e modificações químicas da água que entra em contacto com os resíduos, particularmente se forem do tipo radioactivo, poderá ser conveniente rejeitar o local da mina para esse fim. O recurso a técnicas mais sofisticadas, como a instalação de barreiras múltiplas para o escoamento da água contaminada ou os tratamentos globais de maciços rochosos, poderá aumentar consideravelmente os custos do armazenamento de resíduos em minas, até ao ponto em que será mais económico projectar, construir e operar um reservatório especificamente preparado para tal objectivo.

6 — IMPLICAÇÕES ECONÓMICAS

Embora numerosos factores técnicos influam na utilização do espaço subterrâneo resultante da operação de minas, a decisão final é normalmente adoptada em função das implicações económicas globais de cada situação. Os principais aspectos a ter em conta devem ser cuidadosamente avaliados, não só em termos dos planos de mineração mas também da política de gestão de resíduos. Várias alternativas deverão ser analisadas em pormenor, de modo a permitir seleccionar a mais favorável, que será naturalmente aquela que satisfaz os dois tipos de critérios acima referidos.

Do ponto de vista da indústria mineira parece óbvio que diversas vantagens resultam da utilização do espaço subterrâneo para armazenar resíduos, desde que sejam tomadas medidas apropriadas na etapa de planeamento das minas (para a incorporação desses resíduos na composição dos materiais de enchimento), ou na fase final do período de vida da mina, conforme os casos.

Como as autoridades responsáveis pela gestão dos resíduos terão em qualquer caso de pagar pelo espaço que ocuparão, e desde que tais custos sejam inferiores aos de um reservatório especialmente preparado para tal fim (seja superficial ou subterrâneo), é óbvio que a empresa mineira poderá obter uma receita adicional com essa utilização. A Fig. 4 ilustra o perfil do fluxo de capitais do projecto mineiro naquelas circunstâncias.



Fig. 4 — Evolução do fluxo de capitais de um empreendimento mineiro com possibilidades de armazenamento de resíduos

Deste modo, certos projectos mineiros marginais poderão tornar-se viáveis, o que proporcionará vantagem à indústria extractiva, ao ponto de tornar exploráveis certos recursos minerais até agora não atractivos do ponto de vista económico. Isto é bem um exemplo de que a gestão racional de resíduos e o controlo ambiental em geral não constituem um inimigo da mineração, podendo transformar-se em aliado, para benefício da Sociedade como um todo.

7 — CONCLUSÕES

“Se não reciclarmos, estamos a deixar tudo fora”. Este anúncio, publicado em muitos jornais e revistas, contém o aviso a toda a Humanidade de que cada dia que passa se torna mais difícil controlar o lixo produzido pela civilização contemporânea. Constitui uma matéria de preocupação das populações e da própria indústria, em cuja solução devem ser procuradas novas alternativas para conviver com este sério problema que cada vez mais afecta a qualidade de vida, e no futuro poderá ameaçá-la até. Todas as contribuições válidas devem ser procuradas e a indústria mineira terá certamente um papel relevante neste contexto.

Como a utilização do espaço subterrâneo tem sido reconhecida como uma das possibilidades mais promissoras para resolver problemas de armazenamento de resíduos, e como a indústria mineira possui íntima ligação com o ambiente subterrâneo, a participação desta será certamente relevante na procura de processos sistemáticos para manuseio e para armazenagem destes resíduos.

Novos e diferentes métodos de exploração mineira deverão aparecer em consequência desta tendência, e espera-se que os engenheiros de Minas e os especialistas de Mecânica de Rochas devam os seus esforços a contribuir para a solução desta grande ameaça para a Humanidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTLE, R. and KNIGHT G.C. (1990) — *Underground Disposal of Mine Waste*. Proc. Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes. AIME, pp. 197-202.
- BOSHKOV, S.H. and WRIGHT, F.D. (1973) — *Basic and Parametric Criteria in the Selection, Design and Development of Underground Mining Systems*. Chapt. 12.1 of SME Mining Engineering Handbook, Ed. Cummins and Given. AIME, New York.
- CASSIDY, S.M. (1973) — *Elements of Practical Coal Mining*, AIME, New York.
- GAMA, C.D. (1990) — *Mine Planning Concepts for Environmental Protection*. XXII International Symposium on Computer Applications in Mining (APCOM). Berlin, Vol. III, pp. 553-565.
- GAMA, C.D. (1990) — *Reduction of Costs and Environmental Impacts in Quarry Rock Blasting*. 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Brisbane. pp. 5-8.
- GASPARINI, C. (1989) — *The Road to Yucca Mountain*. World Tunnelling, August 1989, pp. 306-309.
- HILMAN, B.A. and TONEY, J. (1990) — *Current Waste Management Practices — Mine Reclamation Using On-site Mine Waste and Reclaimed Asbestos from Demolition Projects-Case Study: Calaveras Asbestos*. Proc. Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes. AIME, pp. 175-180.

- KIM, K. and McCABE, W.M. (1984) — *Geomechanics Characterization of a Proposed Nuclear Waste Repository Site in Basalt*. Proc. 25th U.S. Symp. on Rock Mechanics, AIME, pp. 1126-1135.
- REMSON, I. (1984) — *Hydrogeologic Overview of the Nuclear Waste Isolation Program*. Proc. 25th U.S. Symp. on Rock Mechanics. AIME, pp. 1177-1187.
- THOMAS, L.J. (1973) — *An Introduction to Mining — Exploration, Feasibility, Extraction, Rock Mechanics*. Hicks Smith Sons, Sydney.
- TONG, G. and HAN, M. (1983) — *Assessment on Support Ability of the Fill Mass*. Proc. Int. Symp. on Mining with Backfill., Lulea, pp. 433-442.
- WOODLEY, J.N.L. and OSBORNE, B.A. (1980) — *MRDE Experience with Pump Packing*. The Mining Engineer. December 1980, pp. 33-38.