APLICAÇÃO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS E PRINCÍPIOS DE MECÂNICA DAS ROCHAS NO PROJETO E ANÁLISE DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Alvaro Maia Da Costa
Ana Maria Pontes Pereira
Petrobrás Mineração S.A. - Brasil
Nalson Francisco Favilla Ebecken
COPPE/UFRJ - Brasil

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar resumidamente a aplicação do método dos elementos finitos na simulação do comportamento apos escavação de estruturas de lavra subterrâneas.

ABSTRACT

This paper summarise the application of the Finite Element Method on the bahavior of mining underground escavation.

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por finalidade apresentar a aplicação do método dos elementos finitos na simulação do comportamento de estruturas de lavra de minas subterrâneas.

O desenvolvimento dos recursos numéricos descritos neste trabalho, teve como motivação a sua aplicação prática no controle e dimensionamento das escavações destinadas à exploração e lavra do jazimento potassífero de Taquari-Vassouras em Sergipe.

O depósito de minério de potássio de Taquari-Vassouras, compõe-se de duas camadas de silvinita (NaCl.KCl), denominadas de camada superior e inferior. A camada superior encontra-se separada da inferior por uma camada de halita (NaCl) com espessura média de 5m. A camada inferior encontra-se sobrejacente a uma camada de rocha taquidrítica ($CaCl_2.MgCl_2.12H_2O$) altamente higroscópica, de pequena resistência mecânica e com acentuada fluência.

O procedimento adotado resume-se na obtenção de parâmetros geotécnicos dos evaporitos por intermédio de ensaios laboratoriais, simulação do comportamento das estrutruras de escavação e por fim comparação desses resultados com os registrados "in situ" por instrumentação, consistindo no método observacional.

O sistema de computação encontra-se implantado em computadores IBM da série 4381, e através do sistema "NJI", participa do controle sistemático da mina de Taquari-Vassouras permitindo a interação dos dados provenientes das medições de campo, armazenados em arquivos de acesso direto, aos resultados das simulações, conduzindo a tomada de decisão quando à modificações nos projetos geométricos das galerias de desenvolvimento da mina e elaboração de projetos de escoramento dessas estruturas de escavação.

PRINCÍPIOS TEÓRICOS

Utiliza-se para discutização do contínuo de elementos isoparamétricos quadráticos com número variado de pontos nodais, com possibilidade de utilizar elementos infinitos parametrizados. O programa desenvolvido permite também a simulação da evolução com o tempo das etapas de escavação. As deformações por fluência são integradas por método implícito incremental iterativo.

Algoritmo Implícito de Integração das Deformações por Fluência

Neste algoritmo emprega-se o Método "α" de Integração. Entre os instantes t e $t + \Delta t$ ocorre a variação dos tensores de deformações por fluência e tensão. Levando em consideração esta variação o incremento do tensor de deformação por fluência pode ser obtido pelo método "α" de integração.

O incremento do tensor de deformações visco-elásticas baseia-se na formulação de Odqvist, ref. A

$$\Delta \underset{\sim}{\varepsilon}^{t} = \frac{3}{2} \frac{{}^{t+\alpha\Delta t}\dot{\varepsilon}^{\ell}}{{}^{t+\alpha\Delta t}\sigma_e} \cdot {}^{t+\alpha\Delta t}S \cdot \Delta t \qquad (1)$$

A diferença entre os algoritmos implícito e explícito reside no fato de que no algoritmo explícito as variáveis de estado dependem da condição no instante t e no algorítmo implícito dependem da condição em t e t + Δt.

$$^{t+\alpha\Delta t}\dot{\varepsilon}_{\ell}^{f} = a \cdot A\,(t+\alpha\Delta t)^{a-1} \cdot {}^{t+\alpha\Delta t}T^{b} \cdot {}^{t+\alpha\Delta t}\sigma_e^{f} \qquad (2)$$

sendo

$$^{t+\alpha\Delta t}\sigma_e = (1-\alpha)\,{}^{t}\sigma_e + \alpha\,{}^{t+\alpha\Delta t}\sigma_e \qquad (3)$$

$$^{t+\alpha\Delta t}\underset{\sim}{S} = (1-\alpha)\,{}^{t}\underset{\sim}{S} + \alpha\,{}^{t+\alpha\Delta}\underset{\sim}{S} \qquad (4)$$

Com base em 2, 3 e 4, ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}$ é definifo por:

$$^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f} = {}^{t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f} + \Delta t \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{{}^{t+\alpha\Delta t}\sigma_e} \cdot {}^{t+\alpha\Delta t}\dot{\varepsilon}_e^{f} \cdot {}^{t+\alpha\Delta t}\underset{\sim}{S} \qquad (5)$$

Com 5 pode-se escrever a condição de equilíbrio em t + Δt:

$$\underset{\sim}{K}\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U} = \int_S \underset{\sim}{N}^T \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{f}_s\, ds + \int \underset{\sim}{N}^T \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{f}_v\, dV - \int \underset{\sim}{B}^T \cdot \underset{\sim}{\sigma}_o\, dV +$$

$$- \int_V \underset{\sim}{B}^T\, {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}_T\, dV + \int \underset{\sim}{B}^T \cdot \underset{\sim}{C}\, {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}\, dV \qquad (6)$$

No sistema de equações em (6) ${}^{t+\Delta t}\varepsilon^{f}$ é função de ${}^{t+\Delta t}\sigma$, que por sua vez é função de ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}$; com esta interdependência entre as variáveis do sistema (não-linearidade), torna-se necessário utilizar-se uma solução do tipo passo-a-passo. Ao mesmo tempo a equação 5 é não linear:

$$^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f} = {}^{t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f} + \Delta t \cdot {}^{t+\alpha\Delta t}\gamma \cdot \underset{\sim}{D} \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma} \qquad (7)$$

$$^{t+\alpha\Delta t}\underset{\sim}{\sigma} = (1-\alpha)\,{}^{t}\underset{\sim}{\sigma} + \alpha\,{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma} \qquad (8)$$

$$^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma} = \underset{\sim}{C}\,({}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon} - {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}) + \sigma_o + {}^{t+\alpha\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}^{T} \qquad (9)$$

$$^{t+\alpha\Delta t}\gamma = \frac{3}{2}\, \frac{1}{{}^{t+\alpha\Delta t}\sigma_e},\ {}^{t+\alpha\Delta t}\dot{\varepsilon}_e^{f} \qquad (10)$$

$$^{t+\alpha\Delta t}\underset{\sim}{S} = \underset{\sim}{D} \cdot {}^{t+\alpha\Delta t} \qquad (11)$$

No algoritmo implementado ambos os sistemas de equações são plenamente satisfeitos incluindo a interdependência entre os mesmos. O sistema de equações em (9) é resolvido pelo Método de Newton-Raphson e o sistema em (6) por método incremental. A solução final do problema é portanto conseguida através de dois processo iterativos simultâneos.

Após a condição "steady-state" ter sido alcançada, o valor de ${}^{t+\Delta t}\varepsilon^{f}_{k+1}$ é substituído na equação recursiva do sistema de equações de equilíbrio em (6) e é calculado mais um passo no campo de deslocamentos ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i+1}$:

$$\underset{\sim}{K}\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i+1} = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{F} - \int \underset{\sim}{B}^{T} \cdot \underset{\sim}{\sigma}_{o}\ dV - \int \underset{\sim}{B}^{T} \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}_{T}\ dV + \int \underset{\sim}{B}^{T} . C\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}_{k+1}\ dV \qquad (11)$$

onde k indica a k-ézima iteração do método de Newton-Raphson para satisfação do sistema não-linear em (9).

A cada passo iterativo na obtenção do campo dos deslocamentos pode-se escrever a seguinte equação:

$${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i+1} = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i} + \Delta \underset{\sim}{U}^{i+1} \qquad (12)$$

Substituindo-se (12) em (11):

$$\underset{\sim}{K}\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i} + K\ \Delta\underset{\sim}{U}^{i+1} = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{F} - \int \underset{\sim}{B}^{T} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \underset{\sim}{\sigma}_{o}\ dV - \int \underset{\sim}{B}^{T} \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}_{T}\ dV + $$
$$+ \int_{V} \underset{\sim}{B}^{T} \cdot \underset{\sim}{C}\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}_{k+1}\ dV \qquad (13)$$

$$\text{Mas}\quad \underset{\sim}{K}\ {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i} = \int \underset{\sim}{B}^{T} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot \underset{\sim}{B} \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{U}^{i}\ dV = \int \underset{\sim}{B}^{T} \cdot \underset{\sim}{C} \cdot {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{i}\ dV \qquad (14)$$

Substituindo (14) em (13), chega-se a seguinte equação recursiva no sistema de equações de equilíbrio:

$$\underset{\sim}{K}\ \Delta\underset{\sim}{U}^{i+1} = {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{F} - \int_{V} \underset{\sim}{B}^{T} \{\underset{\sim}{C}\ |{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{i} - {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}_{k+1}| + \underset{\sim}{\sigma}_{o} + {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}_{T}\}\ dV \qquad (15)$$

O processo para quanto $\Delta\underset{\sim}{U}^{i+1} \rightarrow 0$. Obtendo-se o valor correto ${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}^{i+1}$

$${}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}^{i+1} = \underset{\sim}{C}\ |{}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{i} - {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}_{k+1}| + \underset{\sim}{\sigma}_{o} + {}^{t+\Delta t}\underset{\sim}{\sigma}_{T} \qquad (16)$$

A partir de (16) reinicia-se o próximo incremento no intervalo de tempo.

LEI CONSTITUTIVA DE VISCO-ELASTICIDADE

Emprega-se um modelo de fluência do tipo "time-Hardening" função do tempo e da tensão diferencial. Este modelo reproduz eficazmente a deformação por fluência dos ensaios de laboratório realizados sobre amostras de halita e silvinita.

Equação constitutiva empregada:

$$\varepsilon(t) = A.\ t^{a}\ .\ T^{b}\ .\ \sigma^{c} \qquad (17)$$

onde:

t = tempo
T = temperatura
σ = tensão diferencial

DISCRETIZAÇÃO DE MEIOS INFINITOS E SEMI-INFINITOS

A aplicação de métodos numéricos na simulação do comportamento de meios infinitos e semi-infinitos, quando submetidos a solicitações externas, exige um procedimento especial para a modelagem estrutural do contínuo.

Atualmente tem sido dado grande ênfase a aplicação do método dos elementos finitos pelo emprego de elementos especiais denominados de elementos "infinitos". Diversos são os tipos de elementos infinitos referidos pela literatura técnica e de um modo geral têm sido alcançados bons resultados. Este novo tipo de concepção de discretização minimiza sensivelmente o trabalho do analista estrutural.Este elemento mantém as características próprias dos elementos finitos, como por exemplo, a simetria da matriz, mesmo no caso da análise não linear, o que permite o emprego de métodos eficientes de soluções do sistema de equações.

O presente trabalho apresenta a formulação numérica de um novo tipo de elemento finito, estudado na referência 1. Este elemento faz parte de um sistema de cálculo especialmente desenvolvido para a simulação de escavações subterrâneas sujeitas ao fenômeno de fluência.

Elemento Infinito Implementado

O elemento infinito implementado assemelha-se em sua formulação ao elemento finito isoparamétrico, por empregar para geração das funções de interpolação a função "serendipity" usual. A figura 1 ilustra o tipo de elemento e o correspondente "maping" em coordenadas naturais.

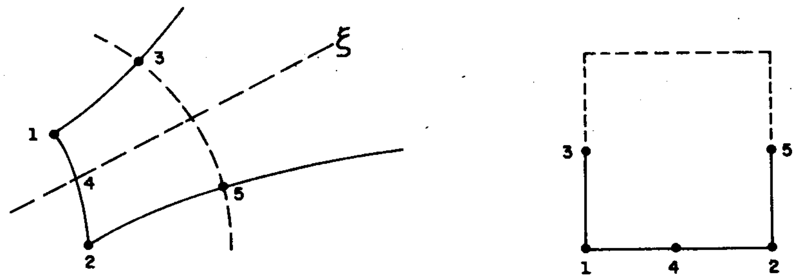

FIG. 01

A descrição geométrica do elemento é conduzida pela associação da função "serendipity" usual multiplicada por um termo com singularidade para $\xi = +1$:

$$\phi = (a_1 + a_2\,\xi + a_3\,\eta + a_4\,\xi\eta + a_5\,\eta^2)\,\frac{1}{1-\xi} \qquad (18)$$

O termo $(\frac{1}{1-\xi})$ na região finita do elemento não induz distorções geométricas em sua descrição. Para se obter as funções de interpolação associadas a cada um dos pontos nodais (N_i, $i = 1,5$) segue-se o procedimento normal, atribuindo-se valores a η e ξ correspondentes à localização de cada ponto nodal em relação ao sistema de coordenadas naturais. As funções assim obtidas descrevem o elemento por:

$$\bar{x} = \bar{N}_1\,x_1 + \bar{N}_2\,x_2 + \bar{N}_3\,x_3 + \bar{N}_4\,x_4 + \bar{N}_5\,x_5 \qquad (19)$$

$$\bar{y} = \bar{N}_1\,y_1 + \bar{N}_2\,y_2 + \bar{N}_3\,y_3 + \bar{N}_4\,y_4 + \bar{N}_5\,y_5 \qquad (20)$$

Para $\xi = +1 \rightarrow (x \text{ e } y \rightarrow \infty)$ onde $\bar{N}_i = N_i \,.\, N_i^{\alpha}$, sendo N_i^{α} o termo de singularidade em $\xi = +1$.

Os deslocamentos induzidos em escavações subterrâneas decrescem como função inversamente proporcional à distância do ponto à cavidade, por este motivo, no presente estudo os deslocamentos são interpolados por:

$$u = H_1 \,.\, f(\frac{r_1}{r}) \,.\, u_1 + H_2\, f(\frac{r_2}{r}) \,.\, u_2 + H_3\, f(\frac{r_3}{r})\, u_3 + $$
$$+ H_4\, f(\frac{r_4}{r})\, u_4 + H_5\, f(\frac{r_5}{r})\, u_5 \qquad (21)$$

$$v = H_1 \,.\, f(\frac{r_1}{r}) \,.\, v_1 + H_2 \,.\, f(\frac{r_2}{r}) \,.\, v_2 + H_3\, f(\frac{r_3}{r})\, v_3 + $$
$$+ H_4\, f(\frac{r_4}{r})\, v_4 + H_5\, f(\frac{r_5}{r})\, v_5 \qquad (22)$$

onde $f\,(\frac{r_i}{r})$ é a função de decaimento do deslocamento, r_i são os raios dos pontos nodais a uma origem qualquer compreendida na cavidade e r o raio em relação a esta mesma origem de um ponto qualquer de coordenadas x e y, localizado no interior do contínuo

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \qquad (23)$$

As funções de interpolação H_i são obtidas pela função "serendipity" sem o termo singular.

$$\phi = a_1 + a_2\,\xi + a_3\,\eta + a_4\,\xi\eta + a_5\,\eta^2 \qquad (24)$$

A matriz de rigidez do elemento é obtida pelo procedimento padrão de elementos parametrizados, tomando-se o cuidado do termo singular na obtenção da matriz jacobiana:

$$x_\xi = \frac{\partial \bar{N}_j}{\partial \xi} x_j \; ; \; x_\eta = \frac{\partial \bar{N}_j}{\partial \eta} x_j$$

$$y_\xi = \frac{\partial \bar{N}_j}{\partial \xi} y_j \; ; \; y_\eta = \frac{\partial \bar{N}_j}{\partial \eta} y_j$$

onde $N_j = N_j \, . \, N_j^\alpha$

$$\frac{\partial N_j}{\partial \xi} = \frac{\partial N_j}{\partial \xi} N_j^\alpha + N_j \, . \, \frac{\partial N_j^\alpha}{\partial \xi}$$

$$\frac{\partial N_j}{\partial} = \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \, . \, N_j^\alpha + 0 \qquad (25)$$

As derivadas dos deslocamentos em relação às coordenadas naturais se escrevem por:

$$\left.\begin{aligned} u &= H_j \, . \, f \frac{(r_j)}{r} \, . \, u_j \\ v &= H_j \, . \, f \frac{(r_j)}{r} \, . \, v_j \end{aligned}\right\} \qquad (26)$$

então

$$\begin{aligned} u_{,\mu} &= \frac{\partial H_j}{\partial \mu} \, . \, u_j \, . \, f \frac{(r_j)}{r} + \frac{\partial f}{\partial \mu} H_j \, u_j \\ v_{,\mu} &= \frac{\partial H_j}{\partial \mu} \, . \, v_j \, . \, f \frac{(r_j)}{r} + \frac{\partial f}{\partial \mu} H_j \, v_j \end{aligned} \qquad \text{para } \mu = \begin{matrix} \xi \\ \eta \end{matrix} \qquad (27)$$

onde

$$\frac{\partial f}{\partial \mu} = \frac{\partial f}{\partial r} \, . \, \frac{\partial r}{\partial \mu} \qquad (28)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \mu} = \frac{1}{r} \left| (\bar{N}_j \, x_j) \left(\frac{\partial N_j}{\partial \mu} \, x_j\right) + (\bar{N}_j \, y_j) \left(\frac{\partial N_j}{\partial \mu} \, . \, y_j\right) \right| \qquad (28)$$

$$r = \sqrt{(\bar{N}_j \, x_j)^2 + (\bar{N}_j \, Y_j)^2}$$

No presente estudo

$$f = \left(\frac{r_j}{r}\right) = \frac{r_j}{r} \rightarrow \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \, . \, r_j \qquad (29)$$

Substituindo (28) e (29) em (27), chega-se às derivadas dos deslocamentos em relação às coordenadas naturais:

$$u_{,\mu} = \{H_{j,\mu} \, . \, \frac{r_j}{r} - H_j \, . \, \frac{r_j}{r^2} \left| \frac{1}{r} \; \{(\bar{N}_j \, x_j) \; (\bar{N}_{j,\mu} \, . \, x_j) + \right.$$
$$\left. + (\bar{N}_j \, y_j) \; (\bar{N}_{j,\mu} \, . \, y_j)\}\right| \, \mu_j \qquad (30)$$

$$v_{,\mu} = \{H_{j,\mu} \cdot \frac{r_j}{r} - H_j \cdot \frac{r_j}{r^2} \left| \frac{1}{r} \{(\bar{N}_j \; x_j)(\bar{N}_{j,\mu} \cdot x_j) + \right.$$

$$+ (\bar{N}_j \; y_j)(\bar{N}_{j,\mu} \cdot y_j)\}|\} \; v_j \qquad (31)$$

Empregando-se a matriz jacobiana e as derivadas dos deslocamentos em relação às coordenadas naturais obtêm-se a matriz B e a correspondente matriz de rigidez do elemento.

$$\underset{\sim}{K} = \int_{\xi}\int_{\eta} \underset{\sim}{B}^T \cdot \underset{\sim}{D} \cdot \underset{\sim}{B} \; \det \underset{\sim}{J} \; . \; d\xi \; d\eta \qquad (32)$$

O emprego de 4 pontos de integração por elemento (regra 2 x 2) é normalmente suficiente para a integração da matriz de rigidez.

FORMULAÇÃO PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO QUASE-ESTÁTICO DE CAVIDADES SUBTERRÂNEAS INCLUINDO OS EFEITOS DA EVOLUÇÃO COM O TEMPO DA ESCAVAÇÃO

A aplicação prática da simulação Numérica do Comportamento quase-estático de cavidades deve considerar os efeitos da evolução com o tempo da escavação. Quando se utiliza dos resultados numéricos para avaliar as condições de estabilidade das estruturas de escavação, por comparação das deformações medidas "in situ" com os valores previstos numericamente, a influência da posição da frente de escavação em relação ao ponto de medição é de extrema importância.

A frente da escavação atua como suporte parcial inibindo as deformações iniciais do perímetro escavado. No caso de escavações em maciços rochosos sujeitos ao fenômeno de fluência, este efeito é ainda mais pronunciado e complexo de ser considerado na análise de estabilidade da cavidade.

Sabe-se que em escavação em um meio elástico o estado final de tensões e deslocamentos deve ser independente da sequência de escavação, conforme devidamente demonstrado por Ishirara, ref. 1. Nos métodos tradicionais destinados à simulação de escavações pelo método dos elementos finitos procedia-se em determinar o estado de tensões no bordo dos elementos a serem escavados, aplicando com igual módulo e sentido oposto este estado de tensões sobre os elementos do perímetro escavado. Estes métodos, entretanto, introduzem erros, resultando em diferentes valores de tensões e deslocamentos dependendo do número de estágios e sequência em que a escavação é realizada. O principal motivo da ineficiência desses métodos decorre do fato do estado de tensões no contorno entre dois elementos não ser uma função contínua, quando se utiliza do método dos elementos finitos com formulação tendo como incógnitas os deslocamentos.

No presente trabalho adota-se como modelo a formulação desenvolvida por Chandrasekaran e King, ref. 1, adaptada à evolução com o tempo da escavação, considerando o comportamento quase-estático do maciço rochoso.

A formulação tem como princípio básico o equilíbrio de forças nos pontos nodais dos elementos em um instante t qualquer de equilíbrio da estrutura.

O processo de simulação da escavação por etapas se desenvolve através do seguinte algoritmo:

a) Cálculo das tensões iniciais nos pontos de integração dos elementos, com consideração de estado de tensões do maciço em repouso

$$^{0}\sigma_{y_{ij}} = \gamma \cdot H_i \qquad (33)$$

$$^{0}\sigma_{x_{ij}} = k_0 \cdot \gamma \cdot H_i \qquad (34)$$

onde:

(ij) - se refere ao i-ézimo ponto de integração do j-ézimo elemento

γ - peso específico médio da coluna litostática

H_i - profundidade do ponto de integração

b) Cálculo das forças nodais equivalentes às tensões iniciais no perímetro a ser escavado, também com consideração do maciço em repouso, Fig 2

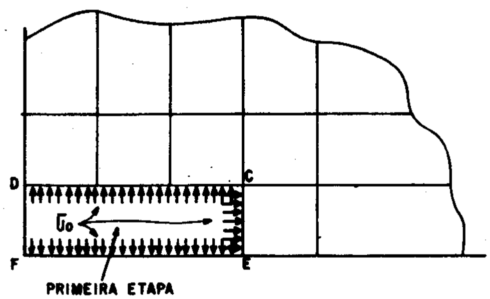

FIG. 02

Forças nodais no contorno escavado

$$ {}^{0}\underset{\sim}{F}^{c} = \int_{S} \underset{\sim}{N}^{T} \cdot {}^{0}\underset{\sim}{\sigma} \; dS \tag{35} $$

c) Aplicação no contorno das forças nodais ${}^{0}F^{c}$ com sinal contrário à reação do Bloco sobre o maciço, de modo a anular a tensão no perímetro escavado, Fig. 3

$$ \underset{\sim}{K} \cdot \Delta\underset{\sim}{U} = -{}^{0}F^{c} \tag{36} $$

(no momento em que são aplicadas as forças de escavação, pode-se admitir o maciço comportar-se segundo o comportamento linear elástico ou elasto-plástico).

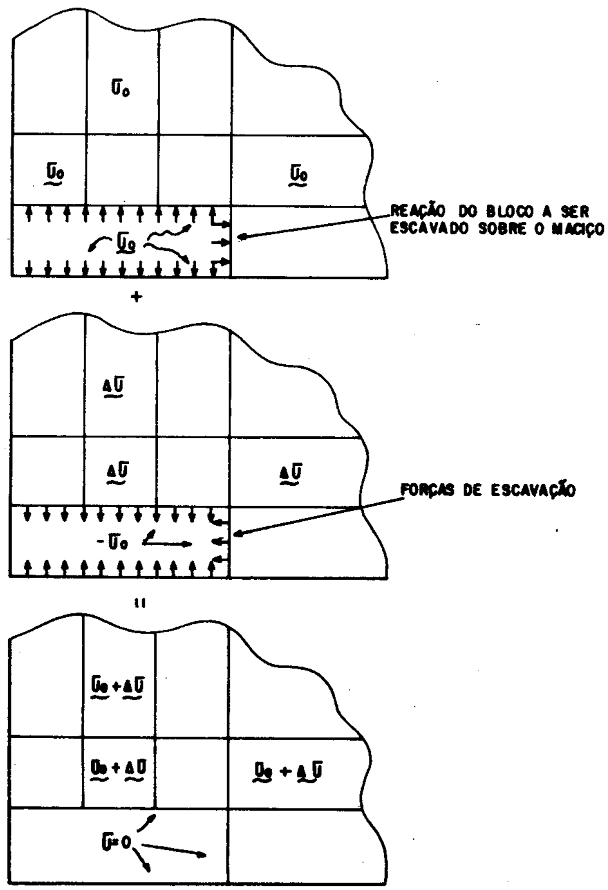

FIG. 03

d) Cálculo dos deslocamentos induzidos ΔU e obtenção dos tensores de deformações e tensões correspondentes, superpondo-se ao estado inicial de tensões, as tensões induzidas pela escavação.

$$\Delta\varepsilon = \underset{\sim}{B} \;.\; \Delta\underset{\sim}{U} \tag{37}$$

$$\Delta\sigma = \underset{\sim}{D} \;.\; \Delta\underset{\sim}{\varepsilon} \tag{38}$$

(D ≅ Dep, elasto-plástico)

$$\underset{\sim}{\sigma}^{t} = {}^{0}\underset{\sim}{\sigma} + \Delta\underset{\sim}{\sigma} \tag{39}$$

A matriz de rigidez K , apresentada na etapa c não inclui a matriz de rigidez dos elementos escavados. Como são eliminados estes elementos, os graus de liberdade associados aos pontos nodais não devem mais participar da matriz de rigidez global da estrutura. Deste modo, no processo de escavação estes pontos nodais são restritos ao deslocamento em ambas direções x e y. Neste ponto todos os graus de liberdade são reordenados sendo gerada uma nova matriz de conectividade por elemento. Este procedimento, adotado no presente trabalho, elimina os erros introduzidos por se reduzir o módulo de rigidez dos elementos escavados, princípio que é adotado por Chandraseharan e King. Este princípio, deve ser evitado tendo em vista que o processo de escavação pode evoluir com o tempo estando o maciço sujeito a deformações permanentes visco-elásticas, ocorrendo acúmulo de erro a cada intervalo de tempo.

Nesta nova configuração de equilíbrio do maciço rochoso, após a 1ª etapa de escavação, o somatório de forças em cada ponto nodal da malha de elementos finitos é igual a zero.

Para um ponto nodal interno qualquer:

$$\sum_{i=1}^{N} \int_{V} \underset{\sim}{B}^{\Gamma} . \; \Delta\underset{\sim}{\sigma} \;\; dV \Big|^{k\ell} = 0 \tag{40}$$

Para um ponto nodal do contorno já escavado:

$$\sum_{i=1}^{N} \left({}^{0}\underset{\sim}{F}^{c} + \int_{V} B^{\Gamma} \; . \; \Delta\underset{\sim}{\sigma} \;\; dV \right)^{k\ell} = 0 \tag{41}$$

Sendo N o número de elementos associados ao ponto nodal e kℓ os graus de liberdade do ponto nodal.

Na segunda etapa de escavação devem ser consideradas as forças nodais de equilíbrio induzidas na etapa anterior quando se aplica a 2ª etapa de forças de escavação. O mesmo processo se repete até que todas as etapas tenham sido realizadas.

Com relação ao reequilíbrio estrutural induzido pela escavação realizada por etapas ao longo do tempo, deve-se, ainda, tomar os seguintes cuidados especiais:

1 - O estado de tensões inicial integra o tensor de tensões através do qual são calculados os tensor de deformações visco-elásticas. Por este motivo as tensões iniciais participam do equilíbrio estrutural e

devem ser consideradas do mesmo modo no reequilíbrio dos pontos nodais existentes no contorno, correspondente ao período a ser escavado. No presente trabalho, para um instante t qualquer, diferente de zero, as tensões iniciais já estão incluídas no tensor de tensões final da última configuração em equilíbrio atualizada.

$$\sum_{i=1}^{n} \left[\iint \underset{\sim}{B}^{\Gamma} \cdot {}^{\tau}\underset{\sim}{\sigma}\, dV \right] = 0 \qquad {}^{\tau}\underset{\sim}{\sigma} = {}^{0}\underset{\sim}{\sigma} + D\,({}^{\tau}\underset{\sim}{\varepsilon} - {}^{\tau}\underset{\sim}{\varepsilon}^{f}) \qquad (42)$$

${}^{\tau}\underset{\sim}{\varepsilon}$ = tensor de deformação total

${}^{\tau}\varepsilon^{f}$ = tensor de deformações por fluência

2 - As forças de escavação aplicadas em um instante t devem ser mantidas constantes ao longo de toda história de deformações do maciço rochoso, para que se evite destruir o equilíbrio quase-estático da estrutura, iniciado com a escavação ocorrida em t > 0.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Controle do Comportamento de fluência de Estruturas de Escavação de Galerias

O controle de estabilidade das galerias da mina é conduzido pela medição "in situ" de grandezas físicas que caracterizam os efeitos induzidos pela escavação sobre as condições de equilíbrio do maciço, e a comparação desses resultados medidos com os obtidos por previsão numérica, constituindo-se no método observacional.

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros elásticos e de fluência adotados para o maciço rochoso e para a rocha ao nível de escavação.

Tabela 1

Parâmetros da Silvinita

$E = 1.629\ t/mm^2$

$\nu = 0,307$

Parâmetros da Halita

$E = 2.07979\ t/mm^2$

$\nu = 0.36$

Fluência

$$\varepsilon = A\ \sigma^{c}\ T^{b}\ t^{a}$$

$a = 0.4$
$b = 9.5$
$c = 3.0$
$A = 0.6606\ E\text{-}11$

O módulo de elasticidade utilizado para a halita, foi inicialmente isolado a partir dos resultados de ensaios de compressão simples igual a 14290 kgf/cm^2. Este valor foi posteriormente ajustado, por retro-análise pela aplicação do método dos elementos finitos para 214100 kgf/cm^2, de tal modo que a deformação inicial calculada, em regime elástico, se igualasse ao valor medido na galeria piloto da mina com 4m de largura e 2.7m de altura. Este valor foi então empregado nas simulações do comportamento de galerias com outras dimensões, fornecendo excelentes resultados.

Com o avanço das galerias de exploração da mina atingiu-se zonas com presença de minério de silvinita com alto teor de KCl, verificando-se uma dispersão entre os resultados medidos e os simulados, fato este contrário a experiência observada nas demais regiões da mina junto a área de contorno dos poços. Esta dispersão demonstrava valores de convergência medidos superiores aos obtidos por simulação. A análise dos resultados medidos mostrava alteração nas propriedades mecânicas da silvinita de alto teor.

Os parâmetros elásticos dos evaporitos são também isolados por levantamento sísmico, tratamento este que já havia sido feito no início do desenvolvimento da mina, confirmando os módulos de elasticidade obtidos por retro-análise.

O levantamento sísmico das velocidades de propagação de onda compressional e cisalhante no maciço evaporítico valores médios fornecem os seguintes resultados:

Silvinita	Halita
V_p = 3225 m/s	V_p = 4045 m/s
V_s = 1702 m/s	V_s = 1890 m/s
ρ = 0.214	ρ = 0.214
ν = 0.307	ν = 0.3603
E = 162943.33 kgf/cm^2	E = 207.979,06 kgf/cm^2
G = 61991.60 kgf/cm^2	G = 76442,94 kgf/cm^2

Sendo,

V_p = velocidade de propagação de onda longitudinal

V_s = velocidade de propagação de onda cisalhante

ρ = massa específica

ν = coeficiente de Poisson

E = módulo de elasticidade

G = módulo de deformação cisalhante

Como parâmetros de fluência para ambos os evaporitos empregam-se inicialmente os encontrados na literatura técnica internacional, que estavam sendo usados habitualmente com sucesso para as demais cavidades escavadas na mina, em outras regiões do maciço evaporítico.

Em face da mudança de comportamento devido a presença de silvinita de alto teor, decidiu-se por isolar novos parâmetros de fluência, por retro-análise, utilizando os resultados de convergência de uma galeria experimental com pequenas dimensões (2.7 x 2.7m), cujo comportamento caracterizasse a fluência da silvinita, livre de deslocamentos induzidos por desplacamento e micro-fissuração, minimizados pela pequena dimensão da galeria. Estes parâmetros associados aos isolados por levantamento sísmico foram então aplicados com êxito na simulação de galerias de desenvolvimento com diferentes geometrias escavadas na silvinita de alto teor, permitindo redução sensível no custo operacional de escoramento e maximização na segurança das escavações.

Neste trabalho apresenta-se resumidamente o ajuste dos parâmetros de fluência para a rocha silvinítica a partir dos resultados de convergência de uma galeria experimental NWE. É apresentado também a curva de convergência admissível que foi adotada para análise de estabilidade das medições de convergência de outras galerias de desenvolvimento da mina, no caso RNW1, RNW2, RSW1 e RSW2 as quais são escavadas em parte no pacote com silvinita de alto teor.

Descrição geométrica das galerias em estudo:

- NWE – galeria experimental com dimensão especial de 2.7m de largura e 2.7m de altura.
- RSW1 e RSW2 – galerias paralelas com mesmas dimensões de 5,5m de largura e 2.7m de altura, separadas entre si por pilar de 14,0m correspondentes as galerias de desenvolvimento e exploração sudoeste.
- RNW1 e RNW2 – galerias paralelas com 5,5m e 7,2m de largura respectivamente e 2.7m de altura, separadas por um pilar de 10,0m, correspondentes ao eixo de desenvolvimento secundário do primeiro painel de lavra.

Foi utilizado como previsão do comportamento quase-estático destas aberturas o programa Coves Versão 2, baseado no método dos elementos finitos, com aplicação de lei constitutiva termo-elasto/visco-elástica. A evolução no tempo dos deslocamentos induzidos pela escavação é determinada utilizando-se de algoritmo implícito incremental iterativo de integração das deformações por fluência.

Os modelos estruturais representando as mencionadas galerias são discretizados em malhas de elementos finitos com 156 elementos e 421 pontos nodais e 236 elementos e 653 pontos nodais conforme ilustrado na Fig 4.

Empregando-se as curvas de convergência medidas na galeria experimental NWE, foram feitos ajustes por retro-análise alterando-se a constante "A" e expoente do tempo da equação de fluência e adotando-se como parâmetros elásticos aqueles isolados por levantamento sísmico.

Na Fig. 5 são mostradas as curvas de convergência medidas "in situ" comparadas com as obtidas pelas diversas tentativas de ajuste por simulação com aplicação da malha ilustrada na Fig. 4. O exame dessas curvas permitiu isolar o conjunto de parâmetros mais representativos do comportamento da galeria NWE, curva nº 9.

Verificou-se que a constante "A" utilizada para a halita, admitindo-se fluência em todo maciço foi representativo para galeria NWE, usando-se entretanto os parâmetros elásticos isolados por levantamento geofísico.

Adotando-se os parâmetros ajustados para a galeria NWE, foram simulados o comportamento de fluência das galerias RNW1, RNW2, RSW1, RSW2, empregando-se as malhas ilustradas na Fig. 4. A comparação das curvas simuladas com as medidas "in situ" estão ilustrados na Fig. 5, verificando-se concordância entre os resultados. As seções com maiores deformações, 9 e 10 das galerias RNW1 e RNW2 respectivamente, foram escoradas por aparafusamento e o restante permaneceu sem escoramento, com redução de custo operacional. Estes parâmetros têm sido também utilizados no dimensionamento das estruturas de lavra do painel de produção.

CONCLUSÃO

O método observacional quando devidamente calcado em formulações numéricas adequadas à simulação do comportamento de escavações subterrâneas, método dos elementos finitos, representa uma ferramenta de grande importância tanto para segurança do empreendimento como na redução de custos operacional e de investimento.

Na verdade os resultados de simulação quando analisados comparativamente aos de instrumentação permitem desenvolver no engenheiro geotécnico maior sensibilidade na interpretação dos fenômenos detectados, "in situ", garantindo desde modo projetos mais econômicos e seguros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - CHANDRASEHARAN, V.S. & King, G.J.W.: Simulation of Excavation Using Finite Elements. Journal of the Geotechnical Engineering. Procedings of the American Society of Civil Engineers . 100 (GT9) September 1974.

2 - COSTA, A.M.: "Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de Escavações Destinadas à Mineração Subterrânea" Tese Doutorado,COPPE/UFRJ, 1984.

3 - CROUCH, S.L. : Analysis of Stresses and Displacements Around Underground Excavations: An Application of the Displacement Discontinuity Method. Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, November 1976.

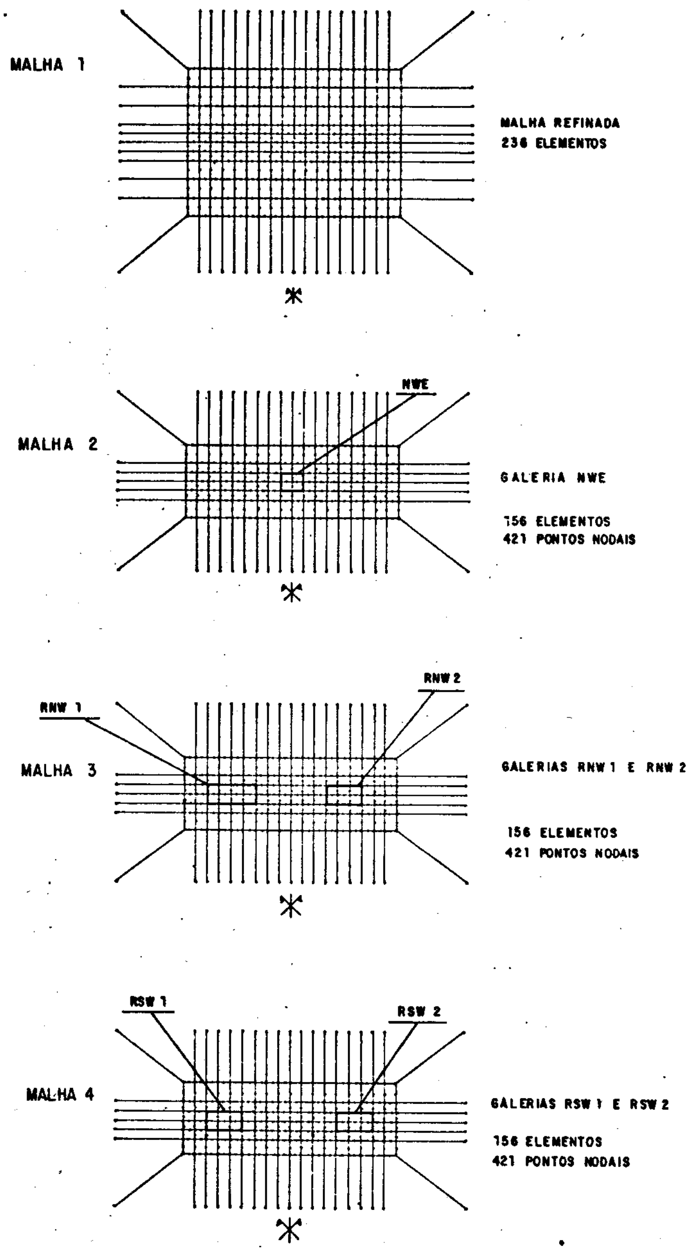
MALHA 1
MALHA REFINADA
236 ELEMENTOS
MALHA 2
NWE
GALERIA NWE
156 ELEMENTOS
421 PONTOS NODAIS
MALHA 3
RNW 1
RNW 2
GALERIAS RNW 1 E RNW 2
156 ELEMENTOS
421 PONTOS NODAIS
MALHA 4
RSW 1
RSW 2
GALERIAS RSW 1 E RSW 2
156 ELEMENTOS
421 PONTOS NODAIS

FIG. 04

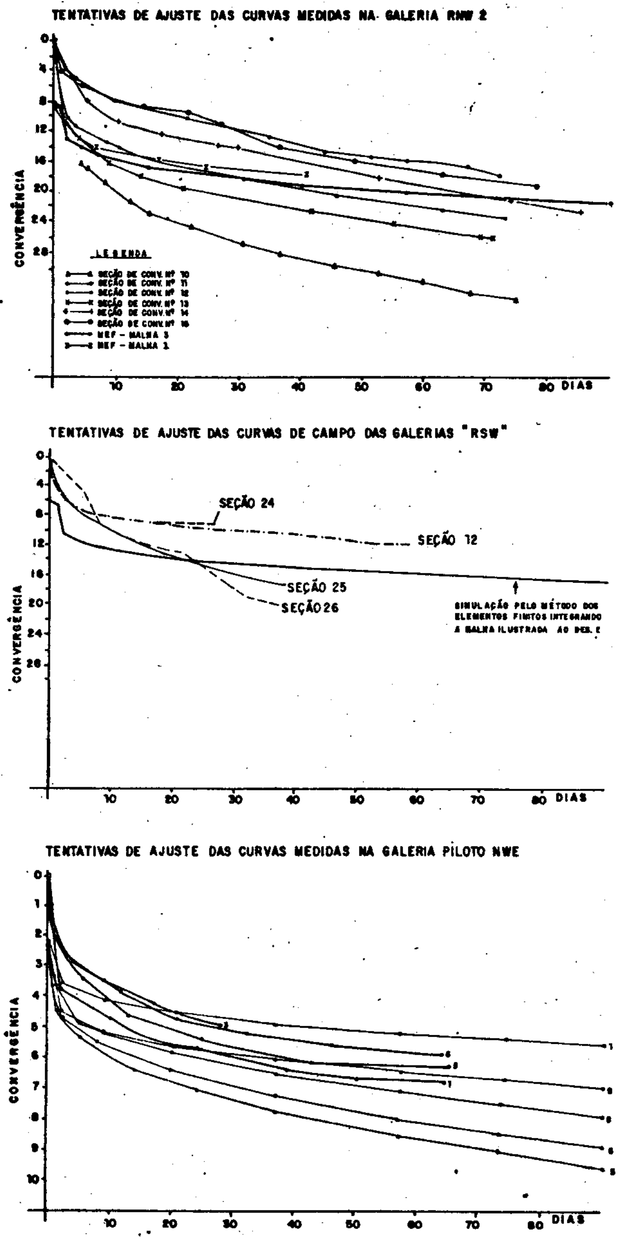
TENTATIVAS DE AJUSTE DAS CURVAS MEDIDAS NA GALERIA RNW 2
CONVERGÊNCIA
0
4
8
12
16
20
24
28
LEGENDA
SEÇÃO DE CONV. Nº 10
SEÇÃO DE CONV. Nº 11
SEÇÃO DE CONV. Nº 12
SEÇÃO DE CONV. Nº 13
SEÇÃO DE CONV. Nº 14
SEÇÃO DE CONV. Nº 15
MEF - MALHA 3
MEF - MALHA 1
10
20
30
40
50
60
70
80
DIAS
TENTATIVAS DE AJUSTE DAS CURVAS DE CAMPO DAS GALERIAS "RSW"
CONVERGÊNCIA
SEÇÃO 24
SEÇÃO 12
SEÇÃO 25
SEÇÃO 26
SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS INTEGRANDO A MALHA ILUSTRADA AO DES. 2
DIAS
TENTATIVAS DE AJUSTE DAS CURVAS MEDIDAS NA GALERIA PILOTO NWE
CONVERGÊNCIA
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
DIAS

FIG. 05