

Análise de tensões e dimensionamento de cavernas por dissolução de halita da bacia evaporítica no estado de Alagoas no Brasil

RESUMO: Este artigo aborda a aplicação da Mecânica das Rochas e dos Métodos Numéricos na análise de tensão e dimensionamento de cavernas mineradas, por dissolução de halita no estado de Alagoas no Brasil. A análise e o dimensionamento de tensões são conduzidos pela aplicação do método dos elementos finitos. O primeiro dimensionamento das cavernas fez a análise elástico-plástica e as dimensões finais das cavernas e pilares, no caso de uma caverna isolada ou um conjunto, são confirmadas por uma análise quase-estática usando um modelo visco-elástico. Para se aproximar do comportamento atual das cavernas, a evolução do processo de dissolução é simulada pelos elementos de escavação da malha, usando a técnica de rezonamento de malha desenvolvida especialmente por uma análise não linear. Devido à simulação do comportamento de fluência da caverna na época domínio, também são obtidas previsões de subsidência de superfície.

PÁG 4 A 9

2. Geologia dos depósitos de sal

O sal depositado na cidade de Maceió pertence a formação Muribeca, Membro Maceió, datado do Baixo Cretáceo. As camadas de sal sob investigação são confinadas a um graben localizado entre o Horst Maceió e a falha grave. As formações superficiais e quase-superficiais da área de Maceió são as areias, argilas e cascalho do Recente, Barreiras (Quaternário) e Antigo Terciário. A litologia da formação Cretácea de Alagoas e Maceió pode ser resumida em uma sequência de arenitos intercalados, conglomerados, xistos e lamitos (**mudstones**). As camadas de sal da formação Maceió consistem na intercalação de xistos e rochas de sal e calcário. Um estudo detalhado da bacia mostrou uma seção estratigráfica com forte variação lateral da litologia, ref 1. Os resultados dos estudos de mecânica de rochas obtidos para um conjunto ou uma caverna isolada não podem ser usados como padrão para todos os depósitos de sal. Os resultados apresentados neste artigo foram obtidos para um conjunto de cavernas que serão desenvolvidos nos poços 22, 23 e 15 da operação da solução de minas. A seção transversal através desses poços está mostrada na Figura 2.

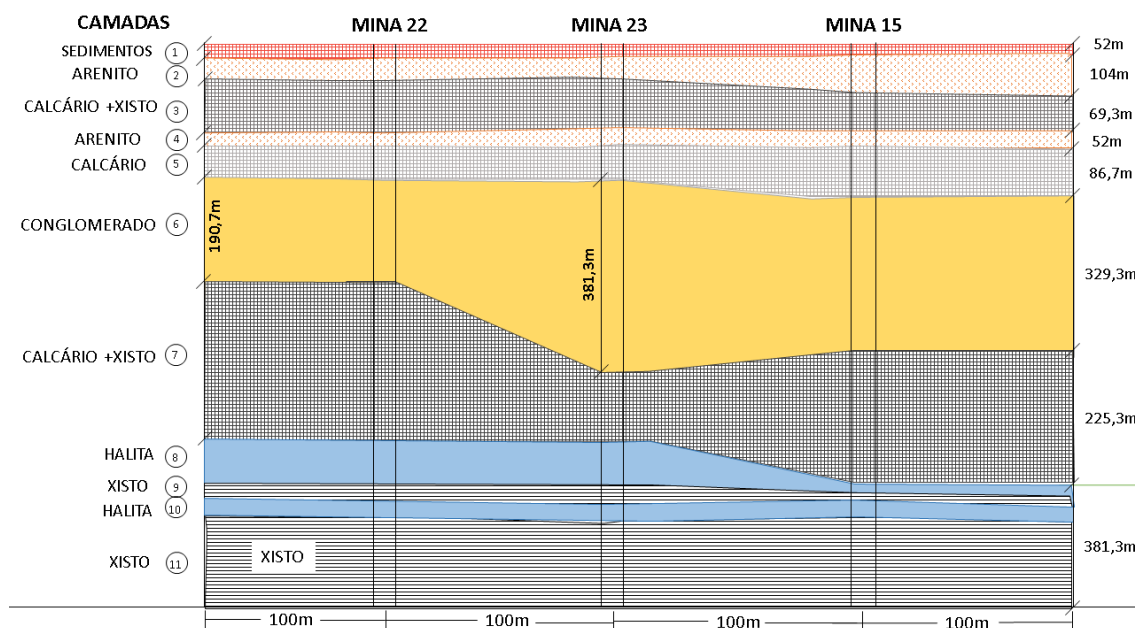


Figura 2 – Seção estratigráfica—Grupo de cavernas 15, 22, 23

Da superfície até a seção de sal podem ser vistos sedimentos superficiais, arenito, calcário e xisto intercalados, conglomerado e halita e xisto intercalados. É importante chamar atenção para a camada de conglomerado. O conglomerado é um colúvio composto por seixos de granito em uma matriz de arenito não consolidado. Esta rocha é muito fraca e na fase de dimensionamento das cavernas não é permitido que a redistribuição das tensões cause danos a essa camada, por causa do perigo de subsidência de superfície. Na seção de halita tem uma intercalação muito persistente de xisto. Por conta do comportamento dependente do tempo entre o xisto e a halita, a evolução com o tempo da fluência (strain) causa a relaxação das tensões (stress) na halita e tensões concentradas na seção de xisto. Esta intercalação define as regras de locação e dimensionamento das cavernas.

3. Propriedades mecânicas das rochas

Além do fato de que a maioria das propriedades rochosas dos evaporitos já foram definidos pela bacia de Sergipe, por conta da diferença de idade e estratigrafia entre os dois depósitos de sal, em Alagoas e Sergipe, um novo conjunto de testes laboratoriais foram conduzidos em espécimes obtidos do “desenvolvimento Well 23” da Mineração Salgema. Os seguintes testes foram realizados:

Tensão indireta
 Compressão Simples
 Compressão Triaxial
 Cisalhamento Direto

Alguns desses testes foram especificados para comparar com os resultados obtidos para os evaporitos da bacia de Sergipe e, como consequência, validar a aplicação dessas constantes para o estudo mecânico das rochas da solução de cavernas de mineração de sal.

Os testes foram realizados em cinco grupos de rochas:

Litologia Teste	Arenito grossoiro	Arenito fino	Xisto	Calcário	Halita
Tensão	3	5	5	5	5
Compressão Simples	--	--	--	--	17
Compressão Triaxial	4	5	6	--	12
Cisalhamento Direto	6	12	19	9	5

Obs: Número de espécimes testadas do 'Well 23'

Para a simulação computacional é necessário fornecer constantes elásticas, resistência ao cisalhamento e parâmetros de fluência. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento são usados na análise estática elástica-plástica. Os parâmetros de fluência são usados na análise visco-elástica.

Para os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram utilizados os resultados obtidos pelos testes de cisalhamento direto. Estes resultados estão apresentados na Tabela 1.

A resistência à tração dos diferentes tipos de rochas foi obtida pelo teste de tensão indireta ou Brazilian test. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Para os parâmetros de fluência e constantes elásticas foi usada a experiência adquirida na mina de potássio da bacia de Sergipe.

3.1 Constantes Elásticas

Várias análises posteriores foram realizadas durante o desenvolvimento e exploração da camada de silvinita da mina de potássio, e verificou-se que as constantes elásticas mais representativas são as dinâmicas. Constantes dinâmicas são obtidas através de correlação com as velocidades de propagação de ondas compressionais (VP) e de corte (VS) da massa de rocha, baseada na formulação da teoria elástica.

Para a halita, as velocidades VP e VS foram obtidas por transmissão sísmica direta realizada no chão e paredes das galerias de desenvolvimento. Para halita foram isoladas as seguintes constantes:

$$VP=405 \text{ m/s}$$

$$VS=1890 \text{ m/s}$$

$$g=0,214 \text{ tf/m}^3$$

$$U= 0,3603$$

$$E=207979,06 \text{ Kgf/cm}^2 = 20.797.906,00 \text{ KPa}$$

Para o caso particular do projeto Mineração Salgema, a constante elástica para as outras rochas foram obtidas pelo perfil das propriedades mecânicas de Schlumberger e são resumidas na Tabela 3.

Tabela 1

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO		
ROCHA	COESÃO (KPa)	ÂNGULO DE ATRITO (°)
Sedimentos	150,00	20,00
Arenito	1100,00	32,10
Calcário	900,00	37,30
Conglomerado	1100,00	32,10
Halita	3000,00	42,60
Xisto	4800,00	21,60

Tabela 2

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	
ROCHA	TENSÃO (KPa)
Sedimentos	0,00
Arenito	230 -> 2900,00
Calcário	3250,00
Conglomerado	230,00
Halita	1180,00
Xisto	3030,00

Tabela 3

CONSTANTES ELÁSTICAS		
ROCHA	MÓDULO DE YOUNG (KPa)	COEF. POISSON
Sedimentos	5000,00	0,25
Arenito	21.970.000,00	0,15
Calcário	31.645.500,00	0,25
Conglomerado	15.822.700,00	0,25
Halita	20.797.900,00	0,36
Xisto	19.338.900,00	0,15

PÁG 9 A 12

3.2 Parâmetros de Fluência

A equação constitutiva de fluência empregada nas simulações foi primeiramente isolada por T.P. Lomenick, refs. 2 e 3 como parte do programa de pesquisa Norte Americana desenvolvida para o armazenamento de resíduos atômicos convencionais em minas de sal. Esta pesquisa foi chamada {Projeto Cofre de Sal} e foi fundada pela Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos.

Devida à influência de temperatura e pressão no comportamento mecânico do sal, essas variáveis são consideradas como {variáveis de estado} e devem ser parte integrante da equação constitutiva do material. Uma equação constitutiva

semi-empírica incluindo variáveis de estado, temperatura e pressão, e a variável de tempo, foi adotada no Projeto Cofre de Sal. Esta equação tem sido extensivamente usada por muitos grupos de pesquisa nos Estados Unidos (refs.4 a 11).

A equação constitutiva é dada por:

$$\varepsilon = A. \sigma^c. T^b. t^a \quad (3.1)$$

Onde:

σ = tensão diferencial

T = temperatura

t = tempo

A, a, b e c = constantes

A análise dos resultados do teste e o conhecimento da interdependência das variáveis de estado ao controlar o comportamento de fluência do sal permitiu os seguintes valores para as constantes da equação.

$$c = 1,30. 10^{-37}. \sigma^{3,0}. T^{9,5}. t^{0,3} \quad (3.2)$$

Para

[T] = °Kelvin

[σ] = psi

[t] = horas

Estas constantes foram obtidas para um intervalo de variação de pressão de 2000 psi (13,8 Mpa) para 10000 psi (69 Mpa) e para um intervalo de variação de temperatura de 22,5 a 200°C.

Esta equação foi mais tarde usada por W.C. McClain e A.M. Starfield (ref. 11), na simulação para o comportamento de fluência de salas experimentais na mina de sal de Lyons, no Kansas. Os resultados das medidas de fechamento da sala, quando submetidos a aumentos de temperatura induzidos por material radioativo e aquecedores elétricos, foram comparados com aqueles obtidos em simulações numéricas, assim permitindo a calibração da equação constitutiva. Como modelo de simulação numérica, um programa baseado no método do deslocamento contínuo foi desenvolvido (ref. 11). Este método considera que a fluência apenas ocorre em pilares, e que a rocha hospedeira da escavação se comporta em um regime elástico linear. Como a deformação da fluência da sala deriva não somente da deformação dos pilares, alguns dos parâmetros tiveram de ser ajustados com o objetivo de aumentar a velocidade da deformação para compensar pelo fato de que o maciço rochoso é mantido em um regime elástico.

A nova equação que foi então obtida, e as constantes seguintes foram encontradas a:

$$c = 0,65 \cdot 10^{-36} \cdot \sigma^{3,0} \cdot T^{9,5} \cdot t^{0,37} \quad (3.3)$$

A constante A foi expandida cinco vezes e o expoente do tempo alterado de 0,3 para 0,37 (=0,4).

Visando ao isolamento uma equação constitutiva que melhor representa o comportamento da mina de sal de potassa em Sergipe, agora por aplicação da F.E.M. (Força Eletromotriz), que considera a fluência em todo o maciço rochoso em diferentes temperaturas, foi decidido que o conjunto abrangente de parâmetros e equações de fluência, (refs. 12 a 16), deveriam ser avaliados, incluindo a equação original determinada por Lomenick.

A equação de fluência isolada por Lomenick:

$$\varepsilon = 1,3 \cdot 10^{37} \cdot \sigma^{3,0} \cdot T^{9,5} t^{0,3} \quad (3.4)$$

[σ] = psi

[T] = °K

[t] = horas

ou

$$\varepsilon = 3,7407 \cdot 10^{-19} \cdot \sigma^{3,0} \cdot T^{9,5} t^{0,3} \quad (3.5)$$

[σ] = tf/mm²

[T] = °K

[t] = horas

Das várias leis constitutivas estudadas, aquela isolada por Lomenick, deu os melhores resultados de simulação quando comparados com as medições de fechamento em diferentes cavidades na mina de potassa na Bacia de Sergipe.

Na simulação computacional é assumido que as cavernas são preenchidas com salmoura com peso específico de 1,2 tf/m³ e o peso específico médio da coluna litoestática é 2,3 tf/m³.

PÁG 22 a 29

5.1 Modelos de análise

Oito modelos foram considerados, fig.4, modificando a altura das cavernas, seus diâmetros, suas posições na seção estratigráfica, e a largura da separação dos pilares entre cavernas. Esses modelos de tentativa foram necessários devido principalmente pela presença das intercalações de xisto. Essas intercalações representam seções fracas nos pilares e na cobertura imediata das cavernas.

O estudo paramétrico de tamanho e forma das cavernas emprega apenas a análise estática elástica-plástica, de acordo com o critério de plasticidade de Mohr-Coulomb. Depois de selecionar a configuração final com segurança adequada para a operação da mineração, deve-se prosseguir com a simulação do comportamento de fluência das cavernas no tempo de domínio.

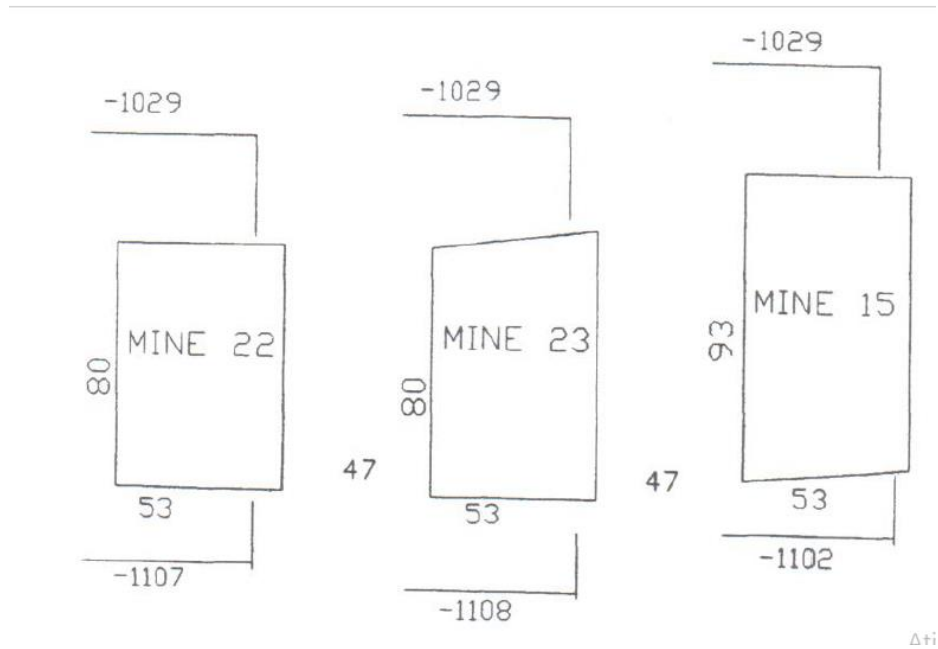


Figura 4- Modelos de análise

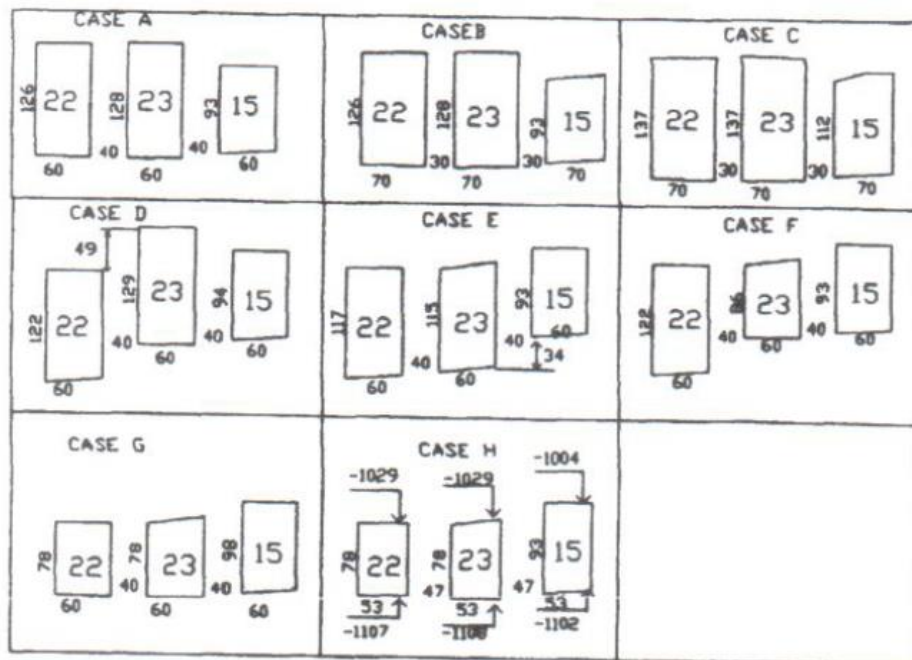


Figura 5 – Modelos de Análise – Caso H

5.2 Modelo discreto de análise – Malha de elementos finitos

O modelo estrutural é mesclado em elementos lineares isoparamétricos de quarto nós, respeitando as diferentes camadas de rocha, mesmo aquelas com menor espessura, o que pode afetar a redistribuição da tensão após a dissolução das cavernas. 1564 elementos finitos lineares isoparamétricos e 1710 nós são implementados no modelo. A fronteira do modelo é mesclada por elementos infinitos paramétricos especiais, Fig. 6.

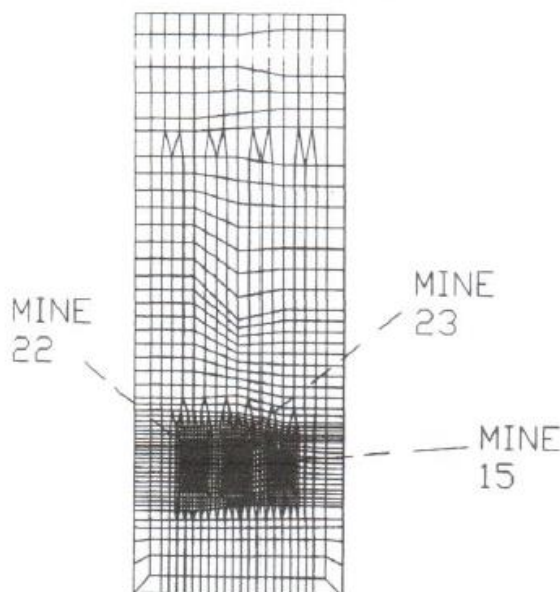


Figura 6 - . Malha de Elementos finitos do Grupo de Cavernas

5.3 Análise dos resultados

5.3.1 Análise estática elástica-plástica

Depois da análise estática-plástica de cada modelo, traça-se o mapa das linhas de contorno da variável “razão de plastificação”, que mede o quão perto do estado de ruptura o ponto do maciço está. Esta razão varia de 0 a 1. O valor 0 significa que não há tensão diferencial aplicada no ponto. O valor 1 significa que o ponto atingiu a superfície de escoamento do critério de Mohr-Coulomb. Apenas dois casos extremos serão examinados neste artigo. “Caso C” com a maior taxa de extração mas a mais instável e “Caso H”, selecionado como o dimensionamento final do conjunto de cavernas.

No “Caso C”, fig. 7, ambos os pilares estão em processo de ruptura, tornando também instável o teto imediato das cavernas. A “razão de plastificação” nos pilares entre as minas 22, 23 e 15 varia de 0,80 a 1,0, o que significa um fator de segurança menor do que 1,00.

No teto imediato das cavernas 22 e 23 a razão atinge 0,8, e na mina 15 há uma ruptura local. Neste caso diminuiu a estabilidade do topo ainda mais, uma vez que a espessura da camada de halita que recobre as cavernas é reduzida.

No “Caso H”, Figura 8, as linhas de contorno em ambos os pilares atingem o valor máximo de 0,6 (FS=1,7) e tem uma boa condição de estabilidade no teto imediato. Este é o modelo selecionado como dimensionamento final.

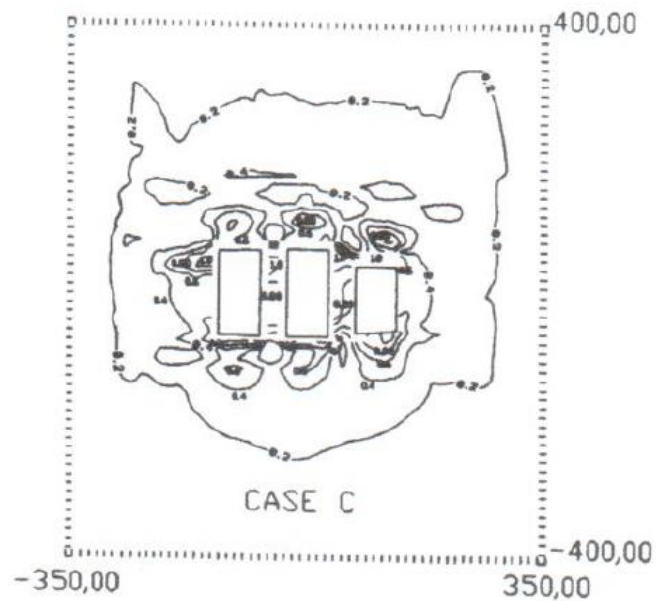


Figura 7 – Análise Eslato-Plástica (Proporção de Plastificação – Caso C)

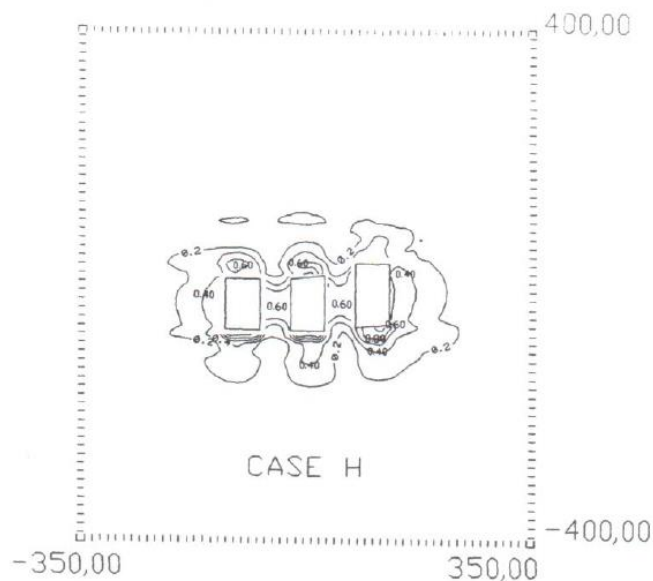


Figura 8 – Análise Eslato-Plástica (Proporção de Plastificação – Caso H)

As figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, as linhas de contorno das tensões efetivas de plasticidade e a tensão média esférica obtidas durante a análise estática elástica-plástica conduzidas no modelo do Caso H. Nos dois pilares as tensões efetivas se instalam no valor de 16000 KPa. No pilar entre as minas 22 e 23 a tensão esférica se instala em -26000 KPa e no pilar entre as minas 23 e 15 a tensão esférica varia entre -20000 KPa e -26000 KPa. A relação entre essas duas variáveis determina se o ponto está ou não no escoamento plástico.

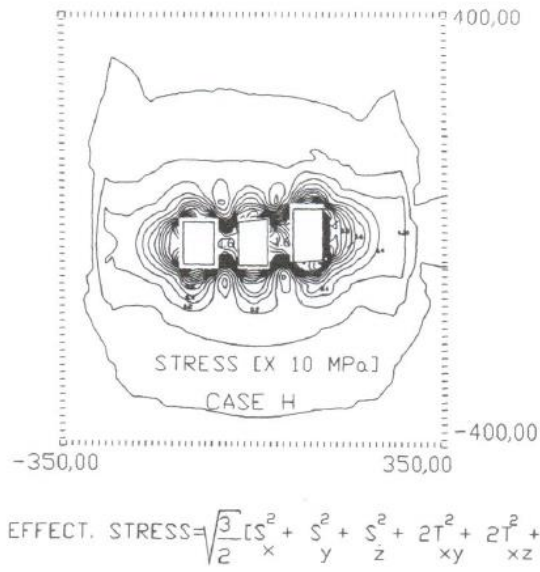


Figura 9 – Análise Elasto-Plástica (Tensão Efetiva – Caso H)

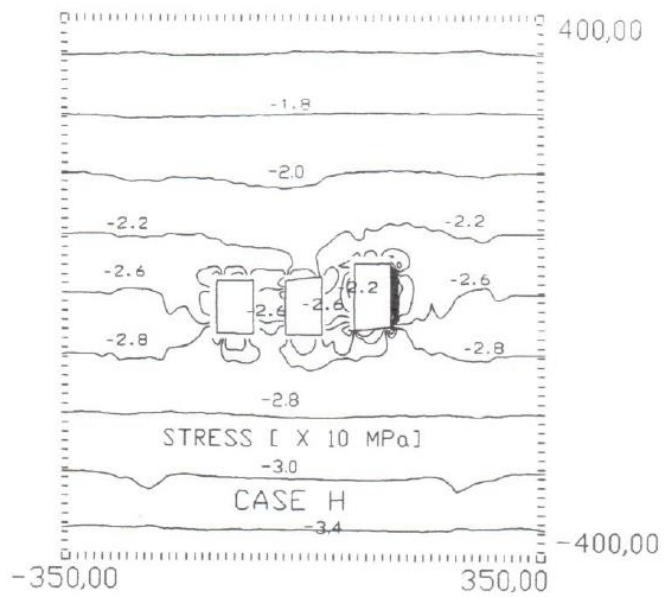


Figura 10 - Análise Elasto-Plástica (Tensão Média – Caso H)

Conclusão

A modelagem numérica do comportamento da solução de cavernas minadas de sal apresentadas neste artigo provou ser uma ferramenta confiável e eficiente para o dimensionamento de cavernas de sal.

Apesar do fato de outras leis constitutivas poderem ser usadas na simulação, incluindo visco-plasticidade, a dificuldade em isolar confiavelmente os parâmetros de fluência e cisalhamento e o backup experiência acumulada pelos autores neste artigo tornam seguro apresentar as abordagens como foram apresentadas.

É sempre importante reforçar que simulações computacionais devem ser usadas como ferramentas de engenharia conjugadas com o conhecimento e experiência do engenheiro, garantindo o dimensionamento seguro e econômico da caverna de sal.