

DETERMINAÇÃO DA SUBSIDÊNCIA DEVIDA A CAVERNAS NO SAL-GEMA^{*}

Subsidence evaluation above rock salt cavities

J. EDUARDO QUINTANILHA DE MENEZES^{**}
DUC NGUYEN-MINH^{***}

RESUMO - A exploração de grandes cavernas de armazenagem tem sempre a ocorrência de subsidência como consequência a longo prazo. Embora estes deslocamentos superficiais raramente tenham consequências estruturais quando ocorrem em zonas não habitadas, podem dar origem a alterações da topografia do terreno facilitando o aparecimento de zonas alagadas. Depois de rever a fenomenologia da subsidência, referem-se alguns métodos empíricos e analíticos para estimar os valores das deformações. Apresenta-se com mais detalhe uma aplicação numérica que combina a utilização de elementos de fronteira e de elementos finitos para determinar a subsidência devida a cavidades de armazenagem situadas a grande profundidade. Esta característica dá origem a grandes extensões de terreno susceptíveis de terem subsidência. Um caso real de um conjunto de cavidades de armazenagem, no qual foram feitas medidas de subsidência durante mais de 10 anos, é considerado como exemplo de aplicação, sendo feitas algumas previsões em relação a futuros valores de subsidência e de deslocamentos horizontais.

SYNOPSIS - The exploration of large underground cavities has always a long-term consequence, which is the subsidence phenomenon. Although these surface deformations are seldom harmful in the case of desert or unprofitable areas, its consequences can be serious in some specific areas or give rise to unwanted troughs, sometimes creating unpleasant topographic changing. Besides, its evaluation can be a valuable means of accessing the underground mechanical behaviour of unreachable cavities. Beginning with simple analytical solutions, this overview proceeds with some numerical solutions proposed to deal with the subsidence above very deep cavities.

1 - INTRODUÇÃO

As cavernas de armazenagem em formações de sal-gema são usualmente dimensionadas e utilizadas para reservas estratégicas de hidrocarbonetos líquidos e gasosos. O processo de dissolução e criação do volume de armazenagem perturba o equilíbrio inicial do maciço rochoso devido à diferença entre a pressão interna e a pressão geoestática, dando início à convergência da cavidade. A diminuição de volume daqui resultante tem consequências económicas inevitáveis e pode dar origem a estados de deformação, nomeadamente à superfície com subsidência e deslocamentos horizontais.

A utilização de modelos analíticos para o estudo destas cavidades de armazenagem é um instrumento essencial para interpretar o comportamento termo-mecânico observado in situ através de ensaios e medidas locais. Estes fornecem os meios para estimar a evolução futura das estruturas subterrâneas bem como as suas repercussões à superfície como por exemplo a subsidência.

A análise numérica de um grupo de cavernas de armazenagem é um problema tridimensional cujos cálculos podem ser difíceis de executar. A solução pode ser aproximada através da sobreposição dos cálculos de cavernas isoladas em meio semi-infinito se certas restrições em relação à geometria do problema forem satisfeitas. Em consequência a

^{*} Comunicação apresentada ao 9º Congresso da ISRM, Paris, 1999

^{**} Faculdade de Engenharia (FEUP)

^{***} Ecole Polytechnique LMS, França

necessidade de um cálculo rigoroso da subsidência devida a uma só cavidade torna-se essencial. Tal objectivo não é fácil de alcançar com os métodos numéricos clássicos devido às dimensões pequenas da cavidade quando comparadas com a sua profundidade. Com este objectivo utiliza-se um modelo misto de elementos de fronteira e de elementos finitos especialmente desenvolvido e adaptado para o problema (Menezes & Nguyen-Minh, 1996; Menezes, 1996).

Em contraste com as cavidades de armazenagem, a subsidência induzida pelas minas de sal-gema é mais significativa devido às pressões internas nas cavidades terem valores muito menores, eventualmente a pressão atmosférica. Um exemplo expressivo é dado por Van Sambeek (1996) num relatório muito detalhado. Além destes casos, deve-se referir que muitas das cavidades de armazenagem em formações de sal-gema são cheias de salmoura depois do seu fecho definitivo no final da sua exploração.

2 - FENOMOLOGIA DA SUBSIDÊNCIA

A engenharia de minas, especialmente das indústrias de extracção de carvão, tem uma vasta experiência sobre os processos de subsidência induzidos pela abertura e abandono das galerias. Contudo estas teorias referem-se ao colapso dos estratos de cobertura das galerias e não são adequados ao caso das cavidades de armazenagem em formações de sal-gema.

Os regulamentos nacionais de alguns países fazem referência aos efeitos da subsidência sobre o meio ambiente. A Norma Europeia EN 1918-3:1998 (NF EN, 1998) recorda que a eventualidade de subsidência e suas consequências devem ser consideradas num projecto de armazenagem subterrânea, o que poderá justificar a necessidade de previsões de deformações à superfície e, se necessário ou imposto pelos regulamentos, estabelecer um programa de observação.

Durante mais de 10 anos a companhia Gaz de France executou observações da subsidência nas instalações de armazenagem subterrânea de gás natural em Tersanne, França, para controle, vigilância e também por razões ambientais, através da monitorização de movimentos verticais e horizontais à superfície (Durup, 1990). Esta informação acumulada ao longo do tempo pode ser usada como exemplo de validação de um modelo numérico.

No caso de uma única cavidade, a subsidência máxima ocorre na vertical do centro de gravidade do volume, podendo ocorrer nalguns casos subsidência negativa devido à migração do vazio em direcção à superfície. Este movimento é devido em parte às tensões geostáticas serem maiores na base e menores na zona do tecto das cavidades. Os deslocamentos horizontais são nulos no centro e aumentam até um máximo situado alguns metros na vertical dos limites da cavidade, limitando uma zona de compressão rodeada por uma zona de tracção (Reitze et al., 1996).

Os efeitos da subsidência à superfície dependem de vários factores tais como a geometria do conjunto subterrâneo, a natureza geológica do maciço rochoso, o processo de escavação e a evolução das pressões nas cavidades ao longo do tempo. A inclusão de todas estas variáveis numa análise teórica é um pouco complexa e tem sido evitada através de vários métodos que associam determinadas funções aos movimentos verticais.

3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO DA SUBSIDÊNCIA

A análise da subsidência de um conjunto de cavidades é um problema tridimensional. Contudo, pode executar-se uma análise simplificada através de um processo de sobreposição de cálculos de cavidades isoladas em meios semi-infinitos. Este procedimento foi validado em estudos anteriores do local de Tersanne (Nguyen Minh et al. 1994). Teoricamente, a sobreposição não deveria ser válida atendendo à natureza não linear do problema. No entanto a

validade deste método assenta em determinadas condições específicas do problema, envolvendo a elasticidade linear dos estratos de cobertura e um espaçamento das cavidades da ordem dos 400-600 m.

A lei de comportamento viscoplástico que representa a reologia do sal-gema corresponde ao modelo de Norton-Hoff (N-H) ou Lemaitre-Menzel-Schreiner (L-M-S) (Langer, 1981; Vouille et al., 1981) consoante o valor dos seus parâmetros (Equação 1):

$$\varepsilon_{vp} = 10^{-6} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t^{\alpha} \quad (1)$$

onde t = tempo em dias; ε_{vp} = deformações viscoplásticas.

A lei de comportamento viscoplástico pode ser expressa de uma forma mais geral através da Equação 2:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = -10^{-6} \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{3J_2}} \frac{d}{dt} (\xi^{\alpha}); \quad \dot{\xi} = \left(\frac{\sqrt{3J_2}}{K} \right)^{\beta/\alpha} \quad (2)$$

Se considerarmos uma cavidade esférica submetida a uma pressão interior constante e localizada num meio infinito homogêneo e isotrópico, a velocidade de variação de volume é dada pela Equação 3:

$$\frac{dV}{V dt} = -10^{-6} \alpha \left(\frac{P_{\infty} - P_i}{A} \right)^{\beta} t^{\alpha-1}; \quad A = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{\beta+1}{\beta}} K \beta \quad (3)$$

onde P_i = pressão interna; P_{∞} = pressão geoestática.

Os parâmetros da lei N-H usados nos cálculos com modelos numéricos foram determinados de modo a obter um comportamento equivalente ao de uma cavidade esférica localizada a 1500 m de profundidade num meio viscoplástico durante um período de 10 anos. A pressão interna (P_i) foi determinada de maneira que a perda de volume de uma cavidade esférica fosse a mesma que uma cavidade real com uma variação real de pressões em Tersanne. Segundo a GDF, esta pressão seria de 16,5 MPa com o modelo de L-M-S.

As leis constitutivas do sal-gema validadas para curtos períodos de tempo podem não ser adequadas para uma previsão num intervalo de 100 anos. No entanto podem ser propostos limites que enquadrem os valores da subsidência, nomeadamente escolhendo duas leis alternativas, uma delas admitindo um comportamento estacionário. Os parâmetros reológicos utilizados nos cálculos numéricos, identificados através de períodos de observação de 10 anos, são os seguintes:

- Tersanne à temperatura geotérmica de 70 °C

$\alpha = 0,5$	$\beta = 3,6$	$K = 0,85$	L-M-S
$\alpha = 1,0$	$\beta = 3,0$	$K = 2,60$	N-H

O cálculo principal considera uma cavidade esférica localizada num estrato de sal-gema, tal como representado na Figura 1, com um volume e uma profundidade correspondentes a cada uma das cavidades de Tersanne (Quadro 1).



Figura 1 - Discretização mista do domínio de uma cavidade.

Quadro 1. Cavidades de Tersanne			
Cavidade N.	Ano	Volume (m ³)	Prof. (m)
1	1970	89900	1460
2	1971	123700	1480
3	1977	128800	1470
4	1977	153300	1475
5	1978	209400	1570
6	1979	202800	1510
7	1980	195300	1548
8	1980	195300	1542
9	1981	224500	1635
10	1983	190800	1628
11	1983	196700	1512
12	1986	176900	1623
13	1986	215700	1599
14	1986	222800	1545
15	1986	223000	1550

O modelo numérico utilizado, para além de associar os métodos dos elementos de fronteira e dos elementos finitos, considera ainda elementos infinitos para simular fronteiras a grande

distância. A discretização da superfície deve ser feita ao longo de uma distância muito maior do que ao nível da cavidade de maneira a poder obter-se uma solução precisa do campo de deslocamentos à superfície. Como os estratos de cobertura são discretizados com elementos de fronteira essa distância não constitui um peso excessivo no processo de cálculo. Finalmente obtém-se uma malha mista que se desenvolve segundo uma distância sucessivamente maior à medida que nos aproximamos da superfície.

Se as cavidades salinas não são axissimétricas ou se não forem aplicáveis as condições do procedimento de sobreposição, deverão usar-se modelos numéricos tridimensionais. Estes começam a ser cada vez mais generalizados à medida que se desenvolvem os processos numéricos e gráficos de computação. You et al. (1996) apresentam um programa deste tipo com algumas simulações de vários casos de estudo. Hilbert et al. (1998) também apresentam um modelo 3D para aplicações diferentes, com boas correlações entre os valores medidos e calculados da subsidência.

No desenvolvimento lógico do modelo misto apresentado segue-se a sua extensão a problemas tridimensionais. Actualmente este desenvolvimento encontra-se em fase de progresso com o objectivo de se analisar outro tipo de cavidades com a sua geometria real.

Como exemplo de um método explícito para prever a subsidência sobre cavidades salinas temos o método de Schober (1987). O autor assume que a convergência das cavidades é essencialmente horizontal e fornece expressões para calcular o seu valor. Contudo não tem em conta as características viscoplásticas do sal-gema, isto é, não considera nenhuma influência do tempo nos valores calculados.

4 - CONJUNTO DE CAVIDADES DE TERSANNE

As observações da subsidência executadas pela Gaz de France no campo de armazenagem de gás natural de Tersanne foram objecto de vários relatórios e publicações anteriores (Durup, 1990, 1991; Nguyen-Minh et al., 1994). Foi demonstrado que o sal-gema tem um papel principal no fenómeno da subsidência, enquanto que o comportamento mecânico dos estratos de cobertura, cujas características são mal conhecidas, é de importância secundária.

O campo de armazenagem de Tersanne tem as suas cavidades distribuídas segundo o esquema representado na Figura 2. As primeiras cavidades foram escavadas pelo processo de dissolução do sal-gema com um espaçamento médio de 400 m, valor que passou a ser maior no final dos anos 80. O Quadro 1 apresenta uma lista das características principais de cada cavidade.

Na Figura 3 os valores medidos da subsidência durante o período de 1985-1995 são comparados com as curvas de subsidência calculadas para 5, 10 anos, e a diferença entre os dois últimos períodos.

Observa-se uma boa correspondência entre os valores medidos e os valores calculados da subsidência em Tersanne. Chama-se a atenção para o facto de se supôr que todas as cavidades tem a mesma pressão interior, constante ao longo do tempo, mas cada uma tem o seu volume real com início de exploração em anos específicos (Quadro 1).

5 - PREVISÕES DA SUBSIDÊNCIA

Com tempos de cálculo longos (100 anos) os deslocamentos podem ficar demasiado grandes para poder admitir-se a hipótese das pequenas deformações. Por este motivo, para cada cavidade procedeu-se a uma análise numérica com geometria variável através da assemblagem de uma rigidez global da estrutura cada vez que se devia considerar uma nova topologia.

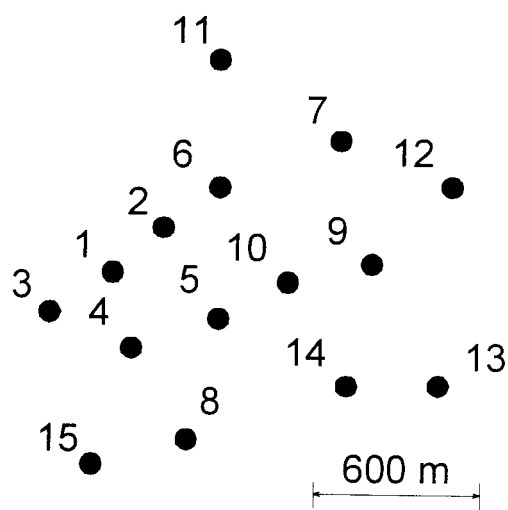


Figura 2 - Distribuição superficial das cavidades de armazenagem em Tersanne.

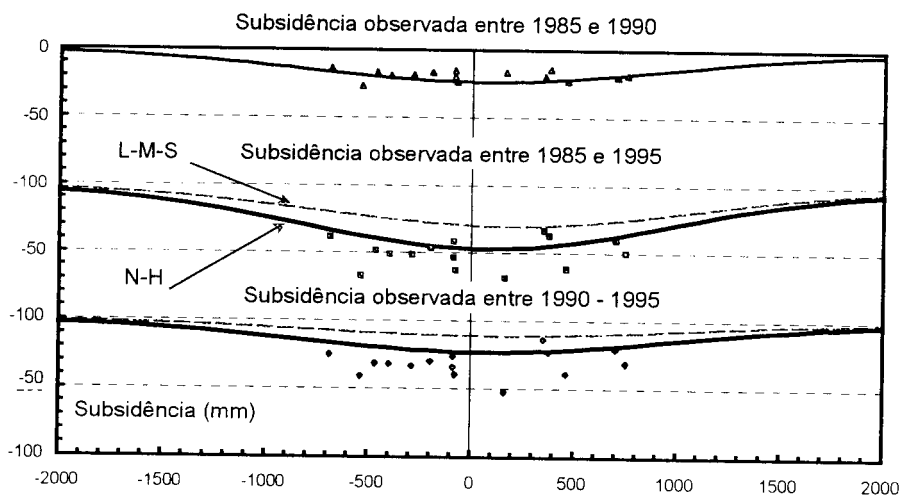


Figura 3 - Comparação entre a subsidência medida em Tersanne e os valores calculados.

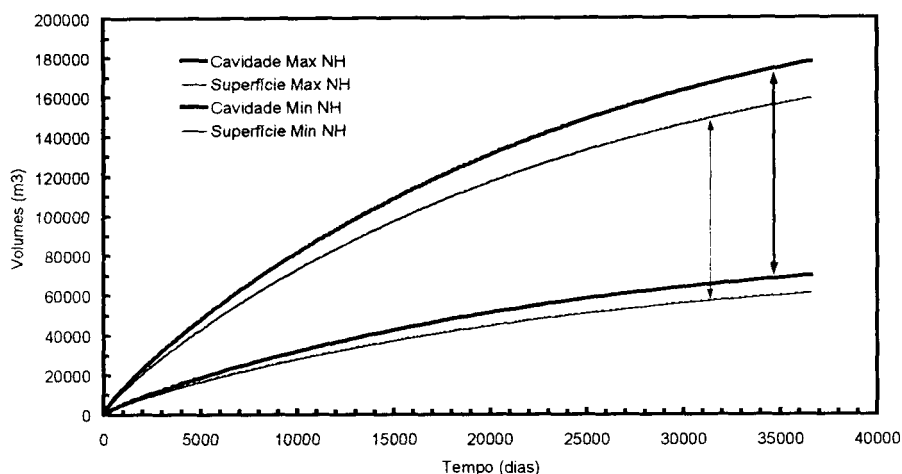


Figura 4 - Intervalos de variação das perdas de volume nas cavidades e na superfície.

No procedimento de sobreposição todas as cavidades foram discretizadas com o seu volume e profundidade reais. As coordenadas de localização à superfície assim como a data de início de operação foram também consideradas. Na Figura 4 representam-se as evoluções máxima e mínima da perda acumulada de volume, em profundidade e à superfície, entre as 15 cavidades consideradas.

A consideração das modificações geométricas permite evitar ou reduzir alguns erros numéricos importantes tais como a perda de volume à superfície ultrapassar a perda de volume da cavidade após um determinado período de tempo.

Depois de se proceder à sobreposição dos campos de deslocamentos das 15 cavidades distribuídas segundo o esquema da Figura 2, obtêm-se as curvas de subsidência representadas na Figura 5. Indicam-se os pontos de inflexão que separam as zonas de compressão e de tracção.

As previsões dos movimentos horizontais estão representadas na Figura 6. Os valores positivos são considerados no sentido de Oeste para Este, por uma razão de conveniência gráfica. Os sinais positivos e negativos mostram a extensão das zonas de tracção e compressão e não o sentido dos deslocamentos. Verifica-se que a extensão dessas zonas parece não variar de forma significativa com o tempo.

No caso de uma cavidade isolada os movimentos horizontais são nulos na vertical do centro de gravidade e máximos a uma certa distância do eixo de axissimetria, coincidindo praticamente com a posição dos pontos de inflexão da curva de subsidência. No caso em estudo trata-se de um conjunto de cavidades mas verificam-se aproximadamente as mesmas características.

Após 50 e 100 anos a geometria das curvas de subsidência mantêm-se praticamente a mesma. A zona de compressão sobre o campo de armazenagem não aumenta de forma significativa depois de 50 anos. A zona de tracção combinada com assentamentos diferenciais deverá ser a zona mais crítica para a estabilidade estrutural de edifícios e suas fundações.

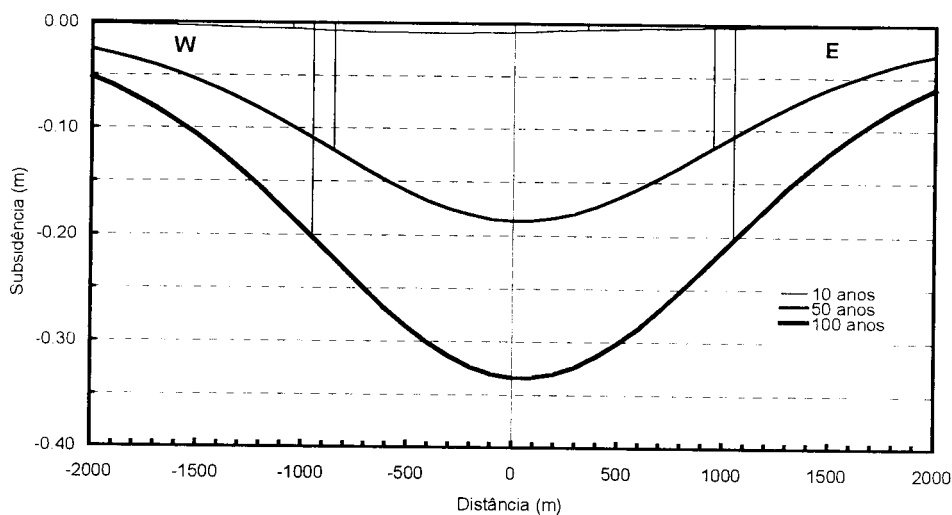


Figura 5 - Previsões da subsidência em Tersanne.

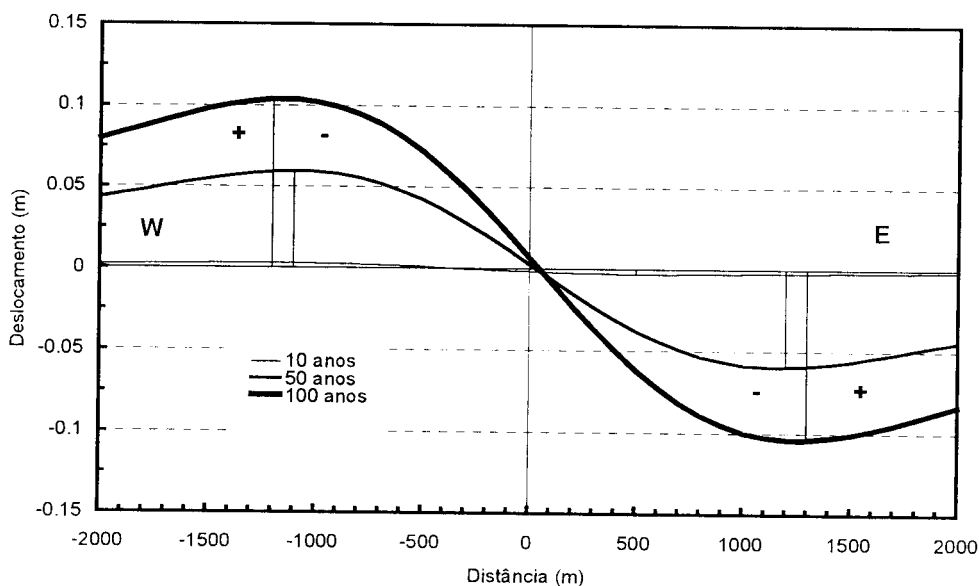


Figura 6 - Previsões dos deslocamentos horizontais em Tersanne.

6 - CONCLUSÕES

Verifica-se uma correspondência entre os resultados dos modelos numéricos e os valores observados da subsidência, mesmo com o desconhecimento das características mecânicas dos estratos de cobertura que foram considerados elásticos e com parâmetros de valores mais ou menos arbitrários.

A previsão para 100 anos induziu-nos a considerar no modelo numérico uma lei de comportamento com fluência estacionária (Norton-Hoff) de modo a obter-se um limite superior

aceitável. Os seus parâmetros foram determinados a partir da observação *in situ* da evolução da estrutura até à actualidade e da equivalência com um modelo de L-M-S previamente validado *in situ*.

O procedimento de sobreposição, cuja validade pode ser demonstrada e que foi usado de uma maneira global, deve estar sujeito a condições específicas: o espaçamento entre as cavidades e a sua profundidade devem assegurar que não haverá uma sobreposição significativa das zonas plásticas em volta de cada cavidade.

O modelo numérico apresentado pode ser considerado como um meio específico de análise da subsidência, especialmente com os melhoramentos introduzidos com a utilização de elementos de fronteira e de elementos infinitos na representação de estratos elásticos semi-infinitos. O modelo é especialmente apropriado para o caso de existirem várias camadas de sal-gema intercaladas com estratos de natureza não viscosa.

A utilização de elementos de fronteira torna-se particularmente útil nos cálculos de subsidência. Os deslocamentos à superfície podem ser calculados sobre grandes distâncias sem perda de precisão e evitando custos excessivos de tempo de cálculo.

Novas soluções para a armazenagem subterrânea de hidrocarbonetos exigem o suporte de modelos numéricos adequados. As características tridimensionais de muitas cavidades mais recentes impõem o uso de cálculos 3D. A generalização do modelo misto apresentado a cálculos tridimensionais não axissimétricos será aplicada em breve com cálculos de casos reais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de J.G. Durup e C. Rollin da Gaz de France com as medições *in situ*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DURUP, J.G. - *Surface subsidence measurements on Tersanne cavern field*. In Solution Mining Research Institute SMRI Meeting Papers Fall 1990, Paris, 14-19 de Outubro, 1990.
- DURUP, J.G. - *Relationship between subsidence and cavern convergence at Tersanne (France)*. In SMRI Meeting Papers Spring 1991, Atlanta, 28-30 de Abril, 1991.
- HILBERT, L.B. et al. - *Three-Dimensional Analysis of Belridge Oil Reservoir Well Failures Due to Rock-Structure Interactions*. Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 35 Nos. 4-5, Paper No. 82, 1998.
- LANGER, M. - *The rheological behaviour of rock salt*. Mechanical Behavior of Salt. Trans. Tech. Pub., I: 201-240, 1981.
- MENEZES, J.E.T.Q. e NGUYEN-MINH, D. - *Long term subsidence prediction above storage cavity fields in salt layers*. In SMRI Meeting Papers Fall, Cleveland, Ohio, USA, 20-23 de Outubro, 1996.
- MENEZES, J.E.T.Q. - *Méthodes analytiques et numériques pour l'étude des cavités salines profondes. Application au stockage du gaz naturel*. Tese de Doutoramento, Ecole Polytechnique, Paris, França, 1996.
- NF EN 1918-3 - *Norme Européene, Norme Française, Stockage souterrain de gaz*. Association Française de Normalisation (AFNOR), 1998.
- NGUYEN-MINH et al. - *Prévision à long terme des effets de la subsidence dans le but de définir les sollicitations possibles sur la construction des infrastructures de surface*. Contrat GDF N. 0289, Laboratoire de Mécanique des Solides, E.P., 1994.

- REITZE, A.J. e VON TRYLLER, H. - *Subsidence above cavities -- theoretical principles and practical experience*. In SMRI Meeting Papers Fall 1996, Cleveland, Ohio, USA, 20-23 de Outubro, 1996.
- SHOBER, F. 1987. *Ein Konzept zur Senkungsvorausberechnung über Kavernenfeldern*. In Kali u. Steinsalz 9, No. 11, Pag. 374-379, 1996.
- VAN SAMBEEK, L.L. - *Dissolution-induced mine subsidence at the retsof salt mine*. In SMRI Meeting Papers Fall 1996, Cleveland, Ohio, USA, 20-23 de Outubro, 1996.
- VOUILLE, G. et al. - *Experimental determination of the rheological behavior of Tersanne rock salt*. Mechanical Behavior of Salt, Trans. Tech. Pub., I: 407-420, 1981.
- YOU, T. et al. - *3D geomechanical simulations of leached cavern: Are they mandatory?* In G.Barla (ed.), Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering, Proc. Inter. Symp. Eurock' 96, Torino, Italy, 2-5 de Setembro, Rotterdam, Balkema, 1996.