

# CONSIDERAÇÕES SOBRE A POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE SUBSIDÊNCIA DEVIDO A SUPEREXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

*Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral*<sup>1</sup>

*Sylvana Melo dos Santos*<sup>2</sup>

*José Geilson Alves Demétrio*<sup>1</sup>

*Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho*<sup>1</sup>

## RESUMO

Os fenômenos de subsidência do solo têm ocorrido em diversos países do mundo devido à extração de água, petróleo ou gás do subsolo. Os processos em geral são lentos e ficam da ordem de alguns centímetros por ano, no entanto a médio e longo prazo os efeitos vão se acumulando e atingem valores significativos.

O presente trabalho descreve o levantamento bibliográfico de casos de subsidência que ocorreram e que estão ocorrendo em diversos países e descreve alguns dos processos físicos de escoamento de fluido e redistribuição de tensões que ocorrem num aquífero devido ao rebaixamento excessivo dos níveis potenciométricos.

## PALAVRAS-CHAVE

SUBSIDÊNCIA, SUPEREXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA, REDISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NO SOLO

## INTRODUÇÃO

Subsidência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo. As causas mais comuns de ocorrência de subsidência estão relacionadas às intervenções humanas e ao uso indiscriminado dos recursos naturais.

Cidades que têm experimentado crescimento populacional acelerado nas últimas décadas têm sido obrigadas a administrar o inevitável dilema que advém do desenvolvimento urbano, promover o abastecimento público sem comprometer os recursos naturais esgotáveis. Neste contexto, verifica-se uma necessidade cada vez maior dos gestores públicos de se recorrer aos recursos subterrâneos para garantir o suprimento das necessidades básicas e a manutenção da qualidade de vida da população. Por esse motivo, a exploração de água, óleo e/ou gás dos reservatórios subterrâneos tem sido a principal causa da ocorrência de subsidência

---

1) Professor do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. [jcabral@npd.ufpe.br](mailto:jcabral@npd.ufpe.br)

2) Aluna de doutorado da Universidade Federal de Pernambuco. [sylinsfran@bol.com.br](mailto:sylinsfran@bol.com.br)

em áreas urbanas e circunvizinhanças. Outras causas, de menor ocorrência em centros urbanos ou típicas de algumas localidades, são o colapso de minas subterrâneas, movimentos tectônicos, hidrocompactação e a drenagem de solos orgânicos, entre outras.

A contabilização de problemas com alterações no nível do terreno e inclinação de taludes de canais, surgimento de desníveis em estradas, surgimento de fissuras em edificações públicas e privadas (Figura 1), ruptura de poços devido a forças geradas com a compactação do material fino existente no aquífero, entre outros, tem apontado áreas “tradicionais” de ocorrência do fenômeno (Figura 2).



Figura 1: Fissura próxima a edificações em Benson Arizona 1981 (S.R. Andreson / U.S. Geological Survey – Leake, 1997)

A subsidência é, portanto, um fenômeno que preocupa pesquisadores e comunidades de todo o mundo, seja pelo grande número de casos registrados em localidades reconhecidamente susceptíveis ao fenômeno, seja pelo surgimento, recente, de indícios do início do processo em outros locais.

Observa-se a utilização de modelos teóricos, métodos analíticos, numéricos e empíricos na previsão da subsidência em cenários futuros.

## CASOS DE SUBSIDÊNCIA NO MUNDO

Uma companhia alemã, preocupada com a possibilidade de ocorrência de subsidência em uma área residencial B.W.S., nordeste da Saxônia, na Alemanha, construída em 1973 conduziu a pesquisa apresentada por Wolkersdorfer e Thiem (1999), que estimaram a superfície de subsidência da área B.W.S. utilizando métodos empírico e analítico em dois cenários, 1994 e 2026. A variação nos valores obtidos de acordo com método utilizado, para um mesmo cenário, foi atribuída aos baixos valores escolhidos para as taxas de subsidência específica e à variação dos parâmetros do solo com o tempo, entre outros. Segundo Wolkersdorfer e Thiem (1999) dados recentes, não oficiais, confirmam os valores previstos pelo método empírico utilizado e prevêem uma subsidência entre 0.2 m e 0.5 m, ao final de 2026.

Su et. Al (1998) propõe um modelo numérico para estudar a deformação causada pelo rebaixamento do nível d'água subterrânea pela exploração através de poços de bombeamento. Foram utilizados valores de campo para avaliação dos resultados obtidos confirmando uma boa aproximação do modelo.



Figura 2: Sinalização para alertar os motoristas sobre o alto risco de subsidência na área, Rodovia Snyder Hill, Arizona, 1981 (S.R. Andreson / U.S. Geological Survey – Leake, 1997)

O sistema de recarga natural do aquífero permite que a exploração de água do meio poroso ocorra de forma contínua, entretanto, quando a quantidade de água subterrânea explorada supera a recarga disponível, para um mesmo período, ocorre rebaixamento do nível dos lençóis d'água subterrâneos. Este rebaixamento do nível potenciométrico dos aquíferos está, normalmente, associado a um processo lento de drenagem do aquífero que resulta na compactação deste. Este conceito constitui a base teórica de muitos estudos exitosos sobre subsidência relacionados com a exploração de água, óleo e gás do subsolo (Sneed e Galloway, 2000)

Na base da Força Aérea Edwards, localizada no Vale Antelope, na Califórnia, a exploração de água subterrânea, para fins de agricultura e abastecimento da população, reduziu o nível do lençol freático em mais de 45 m e provocou um rebaixamento do nível do terreno de aproximadamente 1,22 m (Sneed e Galloway, 2000).

Thu e Fredlund (2000) apresentaram vários exemplos de cidades e países expostos ao fenômeno da subsidência e destacaram a modelagem realizada em Hanoi, Vietnam. O processo de extração de água do aquífero se iniciou em 1909 e, atualmente, com uma população superior a 4 milhões de habitantes, utiliza uma demanda de aproximadamente 450 000 m<sup>3</sup>/dia. Sérios problemas estruturais em edificações locais têm sido observados nos arredores dos poços bombeados como resultado do rebaixamento do solo nessas áreas. A região composta de solo compressível, a grande quantidade de água explorada e a variação horizontal e vertical do coeficiente de permeabilidade compõem características suficiente para justificar a taxa de subsidência determinada no estudo, 20 a 35 mm/ano.

O campo Wairakei, em Nova Zelândia, que já vem sendo monitorado há 45 anos apresenta um grande acervo, de casos registrados na bibliografia, de ocorrência de subsidência. Allis (2000) relatou a história do processo de subsidência na região devido à exploração de água subterrânea a altas temperaturas. Neste estudo verificou-se que os efeitos do fenômeno podem ser atribuídos à compactação das camadas do solo. Os valores apresentados neste estudo podem ser destacados como o maior caso registrado no mundo onde o solo rebaixou 14,0 m ao longo de 45 anos.

O vale San Joaquim, localizado na Califórnia, compreende uma área de intensa atividade agrícola que chegou a apresentar subsidência da ordem de 8,8 m em 1969 (Larson et al., 2001). A área que tem sido objeto de estudo já há algum tempo e continua chamando a atenção de alguns pesquisadores oscila entre momentos muito críticos e outros “apenas” preocupantes. Ao final de 1970, por exemplo, a conclusão de um aqueduto foi responsável por uma redução de 50 a 70% da taxa de subsidência e

estudos recentes apontam para crescente redução nesta taxa nas últimas três décadas, entretanto períodos de seca, casos anteriores de subsidência e vontades políticas conferem à região um alto grau de risco de novas ocorrências do fenômeno.

No Vale Las Vegas, Nevada, o processo que se iniciou em 1935 resultou em rebaixamentos do nível d'água superiores a 90 m e em subsidência da ordem de 2 m (Bell, 1997). Leake (1997) apresentou dados de valores máximos de subsidência, até 1997, para algumas localidades no sudoeste dos Estados Unidos, que variaram de menos de 30 cm em Tucson, Arizona, até 8,84 m no sudoeste de Mendota, na Califórnia (Tabela 1).

Tabela 1: Valores de subsidência observados em vários países do mundo.

Localidade	Tempo de monitoramento	Subsidência	Fonte
Porto Corsini, Itália	1970-1993 (23 anos)	0,37 m*	Bitelli et al (2000)
Bologna, Itália	1983 - 1992 (9 anos)	0,77 m*	Bitelli et al (2000)
Vale San Joaquim, Califórnia, Estados Unidos	- 1969	8,80 m	Larson et al (2001)
Wairakei, Nova Zelândia	1952 - 1997 (45 anos)	14,00 m	Allis (2000)
Hanoi Vietnam	1989 - 1995 (6 anos)	0,30 m	Thu e Fredlund (2000)
Vale Antelope, Califórnia, Estados Unidos	1926 - 1992 (66 anos)	1,83 m	Sneed e Galloway (2000)
Campo Wilmington, Califórnia, Estados Unidos	1940 -	8,84 m	Phillips et al (1996)
Vale Las Vegas, Nevada, Estados Unidos	1935 - 1992 (57 anos)	2,00 m	Bell (1997)
Eloy, Arizona, Estados Unidos	-	4,57 m	Leake (1997)
Oeste de Phoenix, Arizona, Estados Unidos	-	5,49 m	Leake (1997)
Tucson, Arizona, Estados Unidos	-	0,30 m*	Leake (1997)
Albuquerque, Novo México, Estados Unidos	-	0,30 m	Leake (1997)
Bacia Mimbres, Novo México, Estados Unidos	-	0,61 m	Leake (1997)
Lancaster, Califórnia, Estados Unidos	-	1,83 m	Leake (1997)
Sudoeste de Mendota, Califórnia, Estados Unidos	-	8,84 m	Leake (1997)
Davis, Califórnia, Estados Unidos	-	1,22 m	Leake (1997)
Vale Santa Clara, Califórnia, Estados Unidos	-	3,66 m	Leake (1997)
Ventura, Califórnia, Estados Unidos	-	0,61 m	Leake (1997)
El Paso, Texas, Estados Unidos	-	0,30 m	Leake (1997)
Houston, Texas, Estados Unidos	-	2,74 m	Leake (1997)

\* valores aproximados

## MODELO DE SUBSIDÊNCIA

A relação entre alterações na pressão neutra e compressão do aquífero baseia-se no Princípio das Tensões Efetivas de acordo com a teoria de Terzaghi:

$$\sigma' = \sigma - u$$

onde:

$\sigma'$  é a tensão efetiva;

$\sigma$  é a tensão total e

$u$  é a pressão neutra.

A tensão total representa a carga geostática, ou seja, o peso por unidade de área do conjunto matriz sólida e fluido.

O Princípio das Tensões Efetivas constitui o elo entre a exploração de água subterrânea e o fenômeno de subsidência. Dentro do aquífero a pressão neutra equivale à carga hidráulica. Quando a água é explotada do aquífero, a carga piezométrica diminui e a tensão efetiva no

aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante. Este aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e conseqüente subsidência. As Figuras 3 e 4 mostram duas situações onde ocorre o rebaixamento do nível do terreno devido à redistribuição de tensões.

Os solos de granulação fina registram “na memória” as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação. A tensão de pré-consolidação,  $\sigma_p$ , constitui o fator condicionante do comportamento da estrutura sólida do solo em resposta às sollicitações de carga. Neste contexto, quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta o solo expande elasticamente. Por outro lado, quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui duas situações podem ser esperadas: a tensão efetiva é inferior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou elástico, ou, ao contrário, a tensão efetiva é superior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um significativo re-arranjo que resulta num deslocamento vertical irreversível ou inelástico.

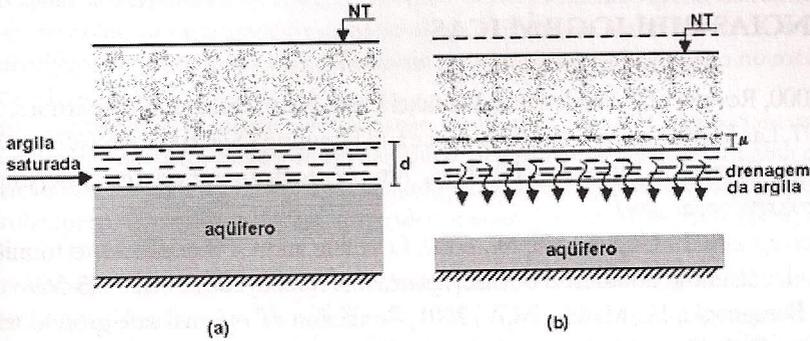


Figura 3: (a) situação antes do bombeamento; (b) ao rebaixar o nível do aquífero inferior, a camada de argila de espessura “d” sofre um processo de drenagem, sofre um recalque, m, e verifica-se um rebaixamento do nível do terreno, NT.

As localidades que sofrem subsidência devido à exploração de fluido deverão, portanto, reduzir as atividades humanas no sentido de diminuir o crescimento do fenômeno na região e/ou utilizar poços injetores para recarregar o lençol e freático e reduzir a pressão no fluido ou, se for o caso, re-hidratar argilas que sofreram hidrocompactação. Bons resultados têm sido observados com a utilização de poços de controle da subsidência. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos existem 28 poços de controle de subsidência registrados nos Estados Unidos, mas estima-se que exista, realmente, cerca de 158 poços (USEPA, 1999).

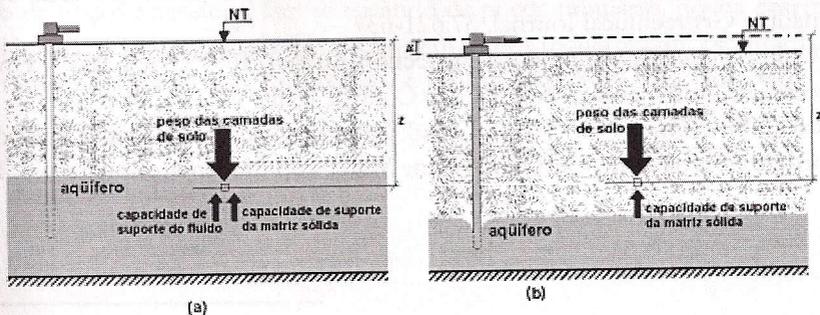


Figura 4: (a) antes do bombeamento: peso das camadas de solo @ capacidade de carga da matriz sólida + capacidade de carga do fluido; (b) redistribuição de tensões após o bombeamento: peso das camadas de solo @ capacidade de carga da matriz sólida.

## COMENTÁRIOS FINAIS

Processos de subsidência têm ocorrido em diversos países do mundo devido à exploração de água subterrânea ou outros fluidos. São processos, em geral lentos, da ordem de alguns centímetros por ano mas que, em certos locais, chegou a atingir alguns metros ao longo de várias décadas.

Rebaixamentos excessivos, muito superiores à capacidade de recarga do aquífero podem dar origem a processos lentos de drenagem, redistribuição de esforços e subsidência do solo.

Em diversas regiões urbanas do Brasil tem havido um aumento desordenado de perfuração de poços para complementar ou substituir o abastecimento de concessionária pública de água e, se a situação continuar sem controle, pode iniciar um processo de subsidência difícil de ser revertido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allis, R.G., 2000, Review of Subsidence at Wairakei Field, New Zealand: *Geothermics*, 29:455-478
- Bell, J.W., 1997, Las Vegas Valley: Land Subsidence and Fissuring Due to Ground-Water Withdrawal: Nevada Bureau of Mines and Geology, [http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/vegas\\_gw/](http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/vegas_gw/)
- Bitelli, G., Bonsignore, F., Unguendoli, M., 2000, Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley: *Journal of Geodynamics*, 30: 355-369
- Larson, K.J., Basagaoglu, H., Mariño, M.A., 2001, Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model: *Journal of Hydrology*, 242: 79-102
- Leake, S.A., 1997, Land Subsidence from Ground-Water Pumping: U.S.Geological Survey, <http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside/>
- Phillips, C.C., Clarke, D.D. e An, L.Y., 1996, Give New Life to Aging Fields: *American Oil & Gas Reporter*, <http://www.dgi.com/earthvision/topko.shtml>
- Sneed, M. e Galloway, D.L., 2000, Aquifer-System Compaction: Analyses and Simulations-the Holly Site, Edwards Air Force Base, Antelope Valley, California: U.S.Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4015, 64 p.
- Su, M., Su, C., Chang, C., Chen, Y., 1998, A Numerical Model of Ground Deformation Induced by Single Well Pumping: *Computers and Geotechnics*, 23: 39-60.
- Thu, T.M. e Fredlund, D.G., 2000, Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam: *Canadian Geotechnical Journal*, 37:621-637
- USEPA – United States Environmental Protection Agency, 1999, The Class Y Underground Injection Control Study - Subsidence Control Wells, Vol. 23, 16 p.
- Wolkersdorfer, Ch. e Thiem, G., 1999, Ground Water Withdrawal and Land Subsidence in Northeastern Saxony (Germany): *Mine Water and the Environment*, vol. 18, nº 1