SUBSÍDIOS SOBRE ESTUDOS DA SUBSIDÊNCIA DO SOLO COMO REFLEXO DA EXPLORAÇÃO DE SAL-GEMA

SUBSIDIES ON SOIL SUBSIDENCY STUDIES AS A REFLECTION OF ROCK SALT EXPLORATION

Silva, Mateus Evangelista da, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, mateus.evangelista@ufpe.br*
Coutinho, Roberto Quental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, roberto.coutinho@ufpe.br
Lima, Robson Ribeiro, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, robson.rlima@ufpe.br
Alcoforado, Mirella Guedes, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, mirella.alcoforado@ufpe.br
**autor para correspondência*

RESUMO

O processo de subsidência é caracterizado como o movimento, relativamente lento, de afundamento de terrenos. As explorações subterrâneas, de recursos como água, petróleo, gás e depósitos salinos, estão entre as causas antrópicas responsáveis pela ocorrência de subsidência em diversas áreas ao redor do mundo. Com relação a subsidência associada a exploração do sal-gema, existem vários registros, incluindo casos em zonas urbanas. Diversas tecnologias podem ser adotadas com a finalidade de se realizar o monitoramento superficial e subsuperficial dessas áreas. Com este trabalho, foi possível reunir um conjunto de informações, envolvendo o monitoramento de cavidades de salmoura, processos envolvendo as rochas salinas e demais fatores pertinentes, o que pode subsidiar o entendimento da relação entre a evolução dessas e os processos de subsidência. Para isto foi realizada uma pesquisa bibliográfica no tema apontado, buscando priorizar estudos de casos envolvendo a subsidência associada à exploração de sal-gema, especialmente em zonas urbanas. Com os resultados obtidos neste trabalho foi possível levantar três aspectos básicos no que diz respeito ao problema da subsidência em áreas afetadas pela mineração de sal por dissolução: o desenvolvimento correto dos processos durante o período de operação das minas; o monitoramento adequado e o fechamento das minas.

ABSTRACT

The subsidence process is characterized as the relatively slow movement of land sinking. Underground exploration of resources such as water, oil, gas and saline deposits are among the anthropic causes responsible for the occurrence of subsidence in several areas around the world. With regard to subsidence associated with the exploitation of rock salt, there are several records, including cases in urban areas. Several technologies can be adopted in order to carry out surface and subsurface monitoring of these areas. With this work, it was possible to gather a set of information, involving the monitoring of brine cavities, processes involving saline rocks and other relevant factors, which can support the understanding of the relationship between their evolution and subsidence processes. For this, a bibliographical research was carried out on the indicated theme, seeking to prioritize case studies involving subsidence

associated with the exploitation of rock salt, especially in urban areas. With the results obtained in this work, it was possible to raise three basic aspects regarding the problem of subsidence in areas affected by salt mining by dissolution: the correct development of processes during the period of operation of the mines; adequate monitoring and closure of mines.

1. INTRODUÇÃO

O processo de subsidência se caracteriza como a deformação ou deslocamento de direção essencialmente vertical descendente, que se manifesta através de afundamentos de terrenos. (Infanti Junior e Fornasari Filho, 1998).

A subsidência pode decorrer por diversas causas, sejam naturais ou antrópicas. De acordo com Infanti Junior e Fornasari Filho (1998), entre as causas naturais que podem desencadear processos de subsidência estão a dissolução de rochas (carstificação) como calcárias, dolomitos, gipsita, sal; acomodação de camadas do substrato pelo seu peso próprio ou por pequena movimentação segundo planos de falhas, entre outros. Os processos de subsidência podem ainda ser desencadeados ou acelerados devido a ação humana, encontrando-se nesse caso as atividades de exploração de rochas salinas, as quais ocorrem a partir de processos específicos (métodos de lavra).

De acordo com Melo et al (2008) os processos que envolvem a exploração subterrânea de sal se dividem em: mineração subterrânea convencional (onde o sal é extraído a partir de poços verticais que ligam o corpo salino à superfície, permitindo a descida de pessoal, que será responsável pela mineração e posterior retirada do material lavrado); mineração por dissolução subterrânea (através de tubulações específicas, injeta-se água sob pressão no interior da rocha salina, produzindo assim a salmoura, que é direcionada até a superfície, onde é coletada). O método de lavra empregado na extração do sal varia de acordo com a forma em que este está disposto.

Para Melo et al (2008), geologicamente, o sal é encontrado na natureza em forma de solução (oceanos, lagos, aquíferos subterrâneos e fontes de salmoura natural) ou em estado sólido (depósitos a céu aberto ou depósitos subterrâneos, que se dividem em forma de camadas ou domos/diapiros). O termo “sal-gema” é comumente empregado para denominar rochas salinas encontradas na natureza sob a forma de camadas ou domos.

A subsidência devido a exploração do sal-gema não se trata de um problema recente e é relatado em diversas áreas ao redor do mundo, no entanto não é comum a sua ocorrência em áreas urbanas, onde os danos causados podem tomar grandes proporções, como ocorrido na cidade de Tuzla (Bósnia e Herzegovina), afetada por processos de subsidência associados à exploração excessiva de sal subterrânea, que resultaram em diversos problemas estruturais, de infraestrutura e ambientais (Mancini et al, 2009).

O objetivo deste trabalho é abordar o método de lavra por dissolução subterrânea, levantando aspectos relativos à correta exploração do sal-gema, monitoramento e controle, visando contribuir para o entendimento da relação desse tipo de mineração com a ocorrência de processos de subsidência. Neste estudo busca-se apontar, a partir da literatura, as boas práticas desde a atividade de mineração até o fechamento

de cavidades de salmoura. Este trabalho integra um projeto/linha de pesquisa e contempla os resultados preliminares de uma dissertação de mestrado em andamento, desenvolvida pelo Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres da Universidade Federal de Pernambuco (GEGEP/UFPE).

2. METODOLOGIA

Com o objetivo de reunir um conjunto de trabalhos que tratam sobre o tema subsidência associada à mineração de sal-gema, com foco para áreas urbanas, foi realizada uma revisão bibliográfica, estruturada a partir de uma metodologia que segue etapas conforme descrito a seguir:

Inicialmente foram elencadas as palavras-chave “salt mine”, “salt dissolution”, “solution mining” e “subsidence” para identificar as publicações mais relevantes que abordam a temática em questão, adotando o conector booleano “AND” para realização das buscas.

A pesquisa e seleção dos trabalhos foi realizada a partir de plataformas digitais de trabalhos científicos e bases relevantes para o meio científico.

Após a leitura dos resumos, foram selecionados os trabalhos que apresentaram maior compatibilidade com a temática proposta.

Foram incluídos aqueles trabalhos, que demonstram de forma concisa as características a respeito do processo de subsidência causado pela mineração de sal-gema, as práticas adotadas para a prevenção do problema, além de medidas de remediação.

As experiências práticas dos autores, obtidas ao longo de projetos técnicos/pesquisa, permitiram uma análise crítica diante do tema em questão, o que garantiu contribuições pertinentes acerca dos resultados obtidos.

3. ASPECTOS IMPORTANTES

3.1. O fenômeno da subsidência

A subsidência pode ser entendida basicamente como um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas em subsuperfície. Nesse aspecto, faz-se necessário o entendimento acerca da distinção entre subsidência e colapso. Conforme Infanti Junior e Fornasari Filho (1998) a subsidência pode ser entendida como a deformação ou deslocamento de direção essencialmente vertical descendente, manifestando-se por afundamentos de terrenos, enquanto o colapso corresponde a um movimento brusco de terreno, podendo ocorrer inclusive após processos de subsidência.

Para Prokopovich (1978), existem dois grandes grupos de subsidência (exogênica e endogênica), que podem ser classificados de acordo com sua origem, sendo a subsidência exogênica o processo que se origina próximo à superfície da Terra e ocorre geralmente influenciada por ações humanas, enquanto a subsidência endogênica é um processo que se origina no interior da crosta terrestre e decorre de causas internas e naturais. No que diz respeito aos fatores que levam à subsidência,

Mingorance (2000) divide a sua ocorrência em cinco grupos: devido à atividade mineira; devido à hidrocompactação; devido à dissolução de rochas e sais; devido à extração de água subterrânea e devido à extração de petróleo e gás.

3.2. Método de lavra por dissoluçã do sal

O formato de um poço de uma mina de solução salina consiste em duas ou mais colunas de tubos de aço com diferentes diâmetros, (estruturas de revestimento) de modo que a tubulação menor está dentro da maior e a partir dessas tubulações, água ou salmoura sub-saturada (solvente de alimentação), a qual é necessário para impulsionar o processo de solução, é bombeada por esse poço para criar uma cavidade dentro do sal e a partir desse processo, a salmoura produzida é então devolvida à superfície para processamento e recuperação (Johson, 2005).

Warren (2016) destaca a existência de vários métodos para desenvolver e modelar essas cavernas. No método de circulação direta (Figura 1a), o solvente de alimentação é injetado através da estrutura de tubulação de menor diâmetro e a salmoura é retirada através do espaço anular entre essa estrutura de tubulação e a estrutura de revestimento final. Já no método de circulação reversa (Figura 1b), o processo é inverso, onde o solvente de alimentação é injetado através da tubulação de maior diâmetro e a salmoura é retirada através da estrutura de tubulação menor.

Diante disso, dois formatos de cavidades podem ser obtidos a depender do método utilizado no desenvolvimento da cavidade. Conforme destaca Warren (2016), como a água possui menor densidade dentro da cavidade, esta tende a flutuar sobre uma salmoura saturada, assim uma cavidade com uma parte superior muito mais larga do que a base é provável de ser formada pelo método de circulação reversa, por outro lado, uma cavidade cilíndrica é formada pelo método de circulação direta.

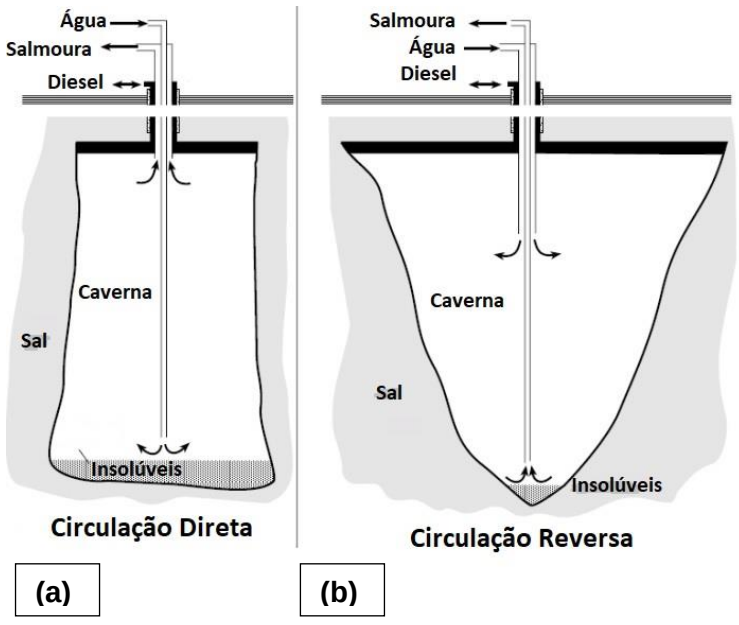

Figura 1 - Desenvolvimento de cavidades em minas de sal por dissolução: (a) método de circulação direta, (b) método de circulação reversa. Fonte: adaptado de Warren (2016)

Conforme destacado por Melo (1977), o problema da estabilidade das cavidades envolve uma série de fatores que atuam diretamente na vida útil de cada mina. Com

relação a isto, este autor relata que a proteção do teto da caverna é feita através de uma almofada de óleo diesel (banklet) que impede que a dissolução eleve descontroladamente o teto da caverna. Devido ao fato de o óleo diesel possuir densidade inferior à da salmoura o mesmo tende a permanecer na parte superior da salmoura que se encontra na cavidade, impedindo a dissolução do sal existente naquela região.

Melo (1997) destaca ainda a importância de se acompanhar a evolução do formato e geometria dessas cavidades durante todo o período de operação da atividade mineração, o que pode ser realizado através da realização de exames de sonar de forma periódica.

3.3. Subsidência devido a atividade de mineração de sal por dissolução

Na atividade de mineração por dissolução da rocha salina, a subsidência ocorre devido a perda de estabilidade do teto das cavidades geradas pelo processo. As cavernas de salmoura estão sujeitas ao desmoronamento do teto, o que acarreta na migração ascendente dessas cavidades, tornando, difícil o controle e a manutenção da estabilidade, uma vez que estas podem atingir formações sobrejacentes à rocha salina, dessa forma a perda de suporte de materiais em profundidade acaba refletindo em processos de subsidência na superfície.

Destaca-se que a perda de estabilidade do teto de cavidades de salmoura está diretamente relacionada com processos de fluência na rocha salina.

Para Baar (1977), as rochas salinas são materiais altamente dúcteis e exibem comportamento plástico, apresentam resistência relativamente baixa, estão próximas à transição entre rochas brandas e duras e exibem alta mobilidade devido ao comportamento viscoso associado aos regimes elástico e plástico.

Firme (2015) afirma que diferentemente da maioria das rochas, onde a estabilidade das intervenções é avaliada com base em um determinado critério de ruptura, nas rochas salinas, o mecanismo de fluência torna-se uma condicionante mais relevante para essas análises do que a possibilidade de ruptura, uma vez que as deformações lentas e contínuas prevalecem sobre as trincas e fraturas, as quais tendem a ser fechadas devido à capacidade de cura do sal.

Nesse sentido, o comportamento de fluência do sal se torna fator dominante no processo de ascensão de cavidades dentro de rochas salinas e consequentemente influencia nos processos de subsidência ocorridos em superfície.

Um exemplo de problema de afundamento do solo devido a mineração de sal por dissolução ocorreu na cidade de Grand Saline, Texas em 27 de abril de 1976, onde desenvolveu-se um grande sumidouro repentinamente. De acordo com Dunrud e Nevins (1981), o problema ocorreu na área de um poço que produziu sal pelo método de mineração por solução de 1924 a 1949 (Figura 2). Este autor destaca que a falha ocorreu em dois estágios, primeiro abriu-se um sumidouro de cerca de 4 a 6m de diâmetro e mais de 15m de profundidade e em seguida esta cratera progrediu rapidamente à medida que o material no entorno da borda caiu na bacia formada, atingindo um diâmetro de 15m algumas horas após o colapso inicial.

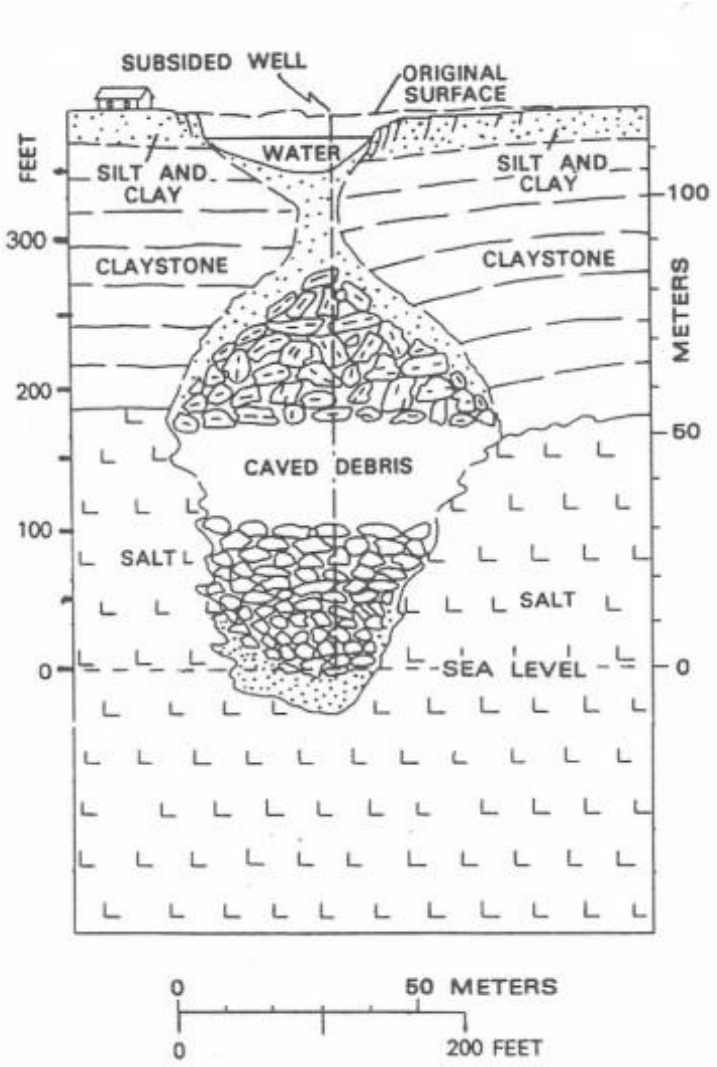

Figura 2 - Modelo esquemático do processo de subsidência ocorrido em Grand Saline, Texas. Fonte: Johnson (2005)

.

3.4. Medidas para assegurar a boa exploração

É importante salientar que tanto o período de operação de uma mina como o período pós atividade de mineração, consistem de etapas importantes e requerem cuidados, avaliação e planejamento, o que propiciará a boa exploração. Nesse sentido, um aspecto importante está em seguir as recomendações dos órgãos competentes reguladores. Um exemplo importante de norma estabelecida por órgãos reguladores no que diz respeito ao monitoramento e fechamento de minas de sal por dissolução está em documento emitido pelo Serviço Geológico Holandês no ano de 2003, onde são estabelecidas diretrizes quanto à operação e finalização deste tipo de atividade de mineração.

No geral duas etapas importantes devem ser destacadas: o monitoramento (durante e pós atividade de mineração) e o fechamento de poços e cavidades.

3.4.1. Monitoramento

O objetivo do monitoramento é fornecer informações a respeito das condições e o comportamento das cavidades e de processos que ocasionalmente possam estar ocorrendo em superfície. Vários dispositivos e procedimentos podem ser adotados para tal fim, na Tabela 1 são destacados tipos de monitoramento que podem ser adotados para o acompanhamento desses processos.

Tabela 1 - Descrição dos monitoramentos aplicáveis à mineração de sal por dissolução elaborado a partir de TNO (2003)

Tipo de Monitoramento	Características
Configuração da cavidade	Prática de acompanhar a configuração da caverna usando equipamentos de monitoramento como sonar, raios gama ou radar de penetração no solo.
Pressão na cavidade	Medida do interior da cavidade utilizando equipamentos de monitoramento de pressão e/ou fluxo.
Pressão na cabeça do poço	Prática de medir a pressão da salmoura na cabeça do poço usando equipamentos de medida de pressão.
Temperatura da salmoura em profundidade	Medida através da instalação de sensores detemperatura no interior da cavidade.
Temperatura da salmoura na cabeça do poço	Prática de medir a temperatura da salmoura na cabeça do poço usando equipamentos de monitoramento.
Produção de Salmoura	Prática de medir o volume de salmoura produzida na cabeça do poço.
Composição da salmoura	Prática de medir a composição da salmoura produzida na cabeça do poço.
Integridade do poço	Prática de monitorar a integridade do poço realizando-se inspeções periódicas.
Micro sismicidade	Medido através da instalação de componentes geofones.
Salinidade da água subterrânea	Prática de medir a saturação de cloro nas águas subterrâneas pela resistividade convencional, condutividade ou de tempo de decaimento térmico (TDT).
Movimentos de superfície	Pode ser verificado através de técnicas como nivelamento óptico, GPS, InSAR ou medidores de inclinação.

3.4.2. Fechamento de poços e cavidades

O fechamento dos poços e cavidades, consiste no processo final na atividade de mineração de sal por dissolução e objetiva a manutenção da estabilidade destes, visando evitar eventuais problemas como a contaminação de águas subterrâneas, subsidência e/ou colapso do terreno. Existem diferentes métodos que podem ser empregados para o fechamento de minas de sal, como pode-se citar o o tamponamento dos poços e o preenchimento das cavidades com material sólido “backfilling” (Gonet et al, 2022).

O tamponamento de poços consiste no preenchimento das tubulações com material como pasta de cimento e é uma técnica que visa isolar os poços e suas respectivas cavidades, o que garantirá a estabilidade da caverna a medida que for possível garantir o controle da pressão e temperatura no seu interior, mitigando os processos decorrentes da fluência da rocha salina.

No processo de “backfilling”, o preenchimento da cavidade através da injeção de material sólido objetiva a sua estabilização evitando processos como de migração da cavidade em direção à superfície, consequentemente reduzindo a probabilidade de ocorrência de problemas como a subsidência.

Cabe salientar que o preenchimento de uma cavidade com mateiral sólido configura-se como uma solução mais complexa e onerosa frente ao tamponamento por exemplo, sendo esta solução adotada quando as demais medidas já não são mais suficientes para mitigar o problema.

4. CASOS DE SUBSIDÊNCIA DEVIDO A EXPLORAÇÃO DE SAL SUBTERRÂNEA

Diversos casos de subsidência associados à exploração de sal são relatados ao redor do mundo. Esse tipo de problema pode variar sua magnitude a depender de aspectos como o período de operação da atividade de mineração, a grandeza ou localização das minas, podendo ser agravado quando sua ocorrência se dá em zonas urbanas (Figura 3).

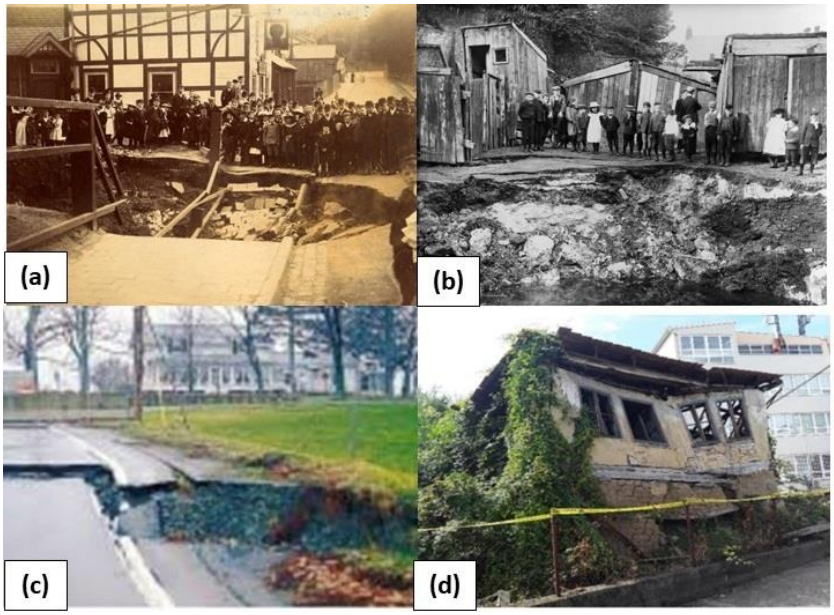

Figura 3 - Problema de subsidência associada à mineração em área urbana: (a) e (b) Northwich – UK, 1870; (c) Livingston – USA, 1994; (d) Tuzla – BA, 2020. Fonte: Google (2023).

4.1. Mina de Wieliczka

A Mina de Sal de Wieliczka, localizada na cidade de Wieliczka, no sul da Polônia. A mina tem uma profundidade total de mais de 327 metros e compreende uma complexa rede de túneis e câmaras. Na década de 1990, a Mina de Sal de Wieliczka enfrentou uma crise de subsidência devido à extração excessiva de sal, que ocasionou em afundamentos do solo superficial causando danos a prédios e infraestrutura no entorno da mina (Gonet et al, 2022). Para solucionar o problema da subsidência, os

operadores da mina implementaram uma série de medidas, incluindo a redução da quantidade de sal extraída e o bombeamento de água na mina para estabilizar o solo e além disso iniciou-se o monitoramento regular da subsidência. Outro fator importante nesse caso está na colaboração dos operadores da mina com as autoridades locais para compensar os danos causados pelo e desenvolver um plano para o futuro desenvolvimento da área afetada (Zuber, 2000).

4.2. Mina de Tuzla

No final dos anos 1990 e início dos anos 2000, a cidade de Tuzla Saltworks enfrentou uma crise de subsidência devido à extração excessiva de sal, que era operada a partir do método de dissolução. O fenômeno causou danos a edificações e infraestruturas do entorno, além de colocar em risco a segurança dos trabalhadores e da população local. Para resolver a questão da subsidência, foram implementadas uma série de medidas, incluindo a redução da quantidade de sal extraída. Além disso foi adotado como medida mitigadora, a realização do monitoramento regular da área afetada pela subsidência. Por outro lado, semelhante ao ocorrido em Wieliczka, foi importante a cooperação ente as autoridades locais e os operadores da mina. O caso de Tuzla é considerado um exemplo grave dos impactos negativos da mineração de sal e de como a falta de regulamentação e gestão adequada pode levar a graves consequências para o meio ambiente e a população local (Mancini et al, 2009)

4.3. Mina de Detroit

A subsidência causada pela mineração de sal na área de Windsor-Detroit é caracterizada pela formação de sumidouros e bacias de subsidência, que se apresentam com dimensões da ordem de milhares de metros de diâmetro e profundidade. A subsidência nessa área também provocou calhas de subsidência linear que têm dimensões da ordem de quilômetros de comprimento e largura, com profundidade de até vários metros. Este fenômeno afetou edifícios e infraestrutura local, como estradas e pontes, o que levou a cidade de Detroit a tomar medidas para solucionar o problema, dentre as quais destaca-se o reforço de edifícios afetados e o monitoraramento do solo. É importante salientar que a mineração de sal nessa área não está mais ativa e as minas de sal estão fechadas há décadas, no entanto o problema da subsidência ainda é uma preocupação constante e o monitoramento permanece, visando a tomada de medidas para solução de quaisquer problemas que possam surgir (Johnson, 2005).

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, buscou-se apresentar aspectos relevantes acerca dos processos de subsidência em áreas de mineração de sal por dissolução. Buscou-se elencar os procedimentos adequados para prática deste tipo de atividade de mineração, de modo essas intervenções que ocorrem em subsuperfície não venham a ocasionar problemas em terrenos próximos.

Destaca-se que além do entendimento dos processos que levam até a subsidência em áreas de mineração de sal por dissolução, a correta condução dessas atividades, tanto no período de operação como após sua finalização, são fatores fundamentais que podem auxiliar ao se traçar estratégias para evitar ou lidar com o problema.

Constata-se a partir do estudo realizado, que o monitoramento de áreas afetadas por esse tipo de atividade de mineração é de grande importância para o entendimento e acompanhamento de todos os processos envolvidos. Esse monitoramento envolve ações em superfície e subsuperfície, dentre as quais pode-se destacar o monitoramento de cavidades e da salmoura produzida, além do monitoramento de movimentos do terreno.

Destaca-se por fim que ações mitigadoras são essenciais em áreas onde o monitoramento por si só não será suficiente para controlar o problema. Nesse caso as medidas a serem tomadas incluem, além da continuidade do monitoramento, o planejamento adequado para ocupação da área, o que pode envolver, inclusive, a restrição da ocupação.

REFERÊNCIAS

Baar, C. (1977). Applied Salt Rock Mechanics. Amsterdam: Elservier Scientific.

Dunrud, C. R. and Nevins, B. B. (1981). Solution mining and subsidence in evaporite rocks in the United States. Department of the Interior United States Geological Survey.

Firme, P. A. L. P. (2015). Modelagem constitutiva e análise probabilística aplicadas a poços em zonas de sal. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Gonet, A. Stryczek, S. Kremieniewski, M. (2022). Modern Methods of Strengthening and Sealing Salt Mines. Energies.

Infanti Junior, N. e Fornasari Filho, N. (1998). Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE).

Johnson, K. (2005). Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States. In: Environmental Earth Sciences. 2005.

Mancini, F. Stecchi, F. Zanni, M. (2009). Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina), Environ Geol.

Melo, P. R. C. (1977). Método de Lavra por Dissolução Subterrânea Empregado pela SALGEMA MINERAÇÃO LTDA. In: VII Simpósio Brasileiro de Mineração, p 276-285. Porto Alegre, Brasil.

Melo, P. R. C.; Carvalho, R. S.; Pinto, D. C. (2008). Rochas e os minerais industriais usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

Mingorance, F. (2000). Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina. Em: Revista de la Facultad de Ingeniería, Argentina 41, p.5-16.

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO - National Geological Survey. (2003). Abandonment of solution mined salt caverns in the Netherlands.

Prokopovich, N.P. (1978). Genetic classification of land subsidence. In: Evaluation and rediction of Subsidence. Em: Engineering Foundation Conference in Pensacola Beach, Florida. Proc.Am.Soc. Civil Engrs., New York, N.Y., p 389 –399.

Warren, J. K. (2016). Solution Mining and Salt Cavern Usage. In: Evaporites: A Geological Compendium. Springer.

Zuber, J. (2000). Subsidence in the Wieliczka Salt Mine, Poland. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.