

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

ESTUDOS SOBRE A INSTABILIDADE DO TERRENO NOS BAIRROS PINHEIRO, MUTANGE E BEBEDOURO, MACEIÓ (AL)

Volume II

RELATÓRIOS TÉCNICOS

N. Integração de dados geológicos e de extração
de sal em ambiente 3D

Rio de Janeiro, maio de 2019



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Albuquerque

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Alexandre Vidigal de Oliveira

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Antônio Carlos Bacelar Nunes

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

José Leonardo Silva Andriotti

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Fernando Pereira de Carvalho

Diretor de Administração e Finanças

Juliano de Souza Oliveira

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

ESTUDOS SOBRE A INSTABILIDADE DO TERRENO NOS BAIRROS PINHEIRO, MUTANGE E BEBEDOURO, MACEIÓ (AL)

Volume II
RELATÓRIOS TÉCNICOS
**N. Integração de dados geológicos e de extração
de sal em ambiente 3D**

Autoria

Ricardo Wosniak
Eduardo Grissolia

Colaboração

Loury Bastos Mello

Rio de Janeiro, maio de 2019

COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT): Antônio Carlos Bacelar Nunes

COORDENAÇÃO TÉCNICA-EXECUTIVA

Coordenador-Geral: Thales de Queiroz Sampaio

Coordenação técnica: Maria Adelaide Mansini Maia e Jorge Pimentel, Departamento de Gestão Territorial (DEGET)

Assessoria: Helion França Moreira e Ricardo Moacyr de Vasconcellos, Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT)

Estudos de geologia aplicada: Sandra Fernandes da Silva, Divisão de Geologia Aplicada (DIGEAP)

Estudos de geomorfológicos e historicidade da ocupação: Marcelo Eduardo Dantas, Divisão de Gestão Territorial (DIGATE)

Estudos hidrogeológicos: Fernando Antônio Carneiro Feitosa, Departamento de Hidrologia (DEHID)

Estudos geofísicos: Lucia Maria da Costa e Silva, Gerência de Geologia e Recursos Minerais/Sup. Reg.de Belém (GEREMI/SUREG-BE), e Luiz Gustavo Rodrigues Pinto, Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE)

Estudos batimétricos: Hortência Assis, Divisão de Geologia Marinha (DIGEOM)

Estudos cartográficos: Fabio Costa, Divisão de Cartografia (DICART)

Modelagem geológica em ambiente 3D: Ricardo Wosniak e Eduardo Grissolia, Divisão de Economia Mineral e Geologia Exploratória (DIEMGE)

Geoprocessamento: Denilson de Jesus, Divisão de Geoprocessamento (DIGEOP)

EQUIPE TÉCNICA

Alexandre Borba (Geólogo)

Alexandre Lago (Geólogo)

Amaro Luiz Ferreira (Geólogo)

Bruce Fabini Franco Chiba (Geofísico)

Bruno Elldorf (Geólogo)

Cipriano Gomes de Oliveira (Téc. em Geociências)

Daniel Moreira (Eng. Cartógrafo)

Dario Dias Peixoto (Geólogo)

Denilson de Jesus (Eng. Cartógrafo)

Eduardo Moussalle Grissolia (Geólogo)

Eugênio Pires Frazão (Geólogo)

Fábio Silva da Costa (Eng. Cartógrafo)

Fernando Antônio Carneiro Feitosa (Geólogo)

Fernando Lúcio Borges Cunha (Geólogo)

Giana Grupioni Rezende (Eng. Cartógrafo)

Gilmar Pauli Dias (Geólogo)

Heródoto Goes (Geólogo)

Hiran Silva Dias (Analista de sistemas)

Hortência Maria Barboza de Assis (Geóloga)

Ítalo Prata de Menezes (Geólogo)

Ivan Soares dos Santos (Téc. em Geociências)

Jairo Jamerson Correia de Andrade (Geofísico)

João Batista Freitas de Andrade (Geólogo)

Jorge Pimentel (Geólogo)

Jose Antônio da Silva (Geólogo)

Juliana Moraes (Geóloga)

Júlio Cesar Lana (Geólogo)

Larissa Flávia Montandon Silva (Geóloga)

Leandro Galvanese Kuhlmann (Geólogo)

Loury Bastos Mello (Geóloga)

Lúcia Maria da Costa e Silva (Geóloga)

Luiz Antônio R. Almendra (Téc. em Geociências)

Luiz Gustavo Rodriguez Pinto (Geofísico)

Marcelo Ambrósio Ferrassoli (Geólogo)

Marcelo de Queiroz Jorge (Geólogo)

Marcelo Eduardo Dantas (Geógrafo)

Marcio Junger Ribeiro (Téc. em Geociências)

Márcio Martins Valle (Oceanógrafo)

Maria Adelaide Mansini Maia (Geóloga)

Marília de Araújo Costa Rodrigues (Geofísica)

Nilo Costa Pedrosa Júnior (Geólogo)

Patrícia Durringer Jacques (Geóloga)

Pedro Augusto dos Santos Pfaltzgraff (Geólogo)

Rafael Corrêa de Melo (Geólogo)

Ricardo Cavalcanti Santiago (Geofísico)

Ricardo Duarte de Oliveira (Eng. Cartógrafo)

Ricardo Wosniak (Geólogo)

Roberto Gusmão de Oliveira (Geólogo)

Rodrigo Luiz Gallo Fernandes (Geólogo)

Ronaldo Gomes Bezerra (Geólogo)

Rubens Esteves Kenup (Eng. Cartógrafo)

Rubens Pereira Dias (Geólogo)

Sandra Fernandes da Silva (Geóloga)

Thales de Queiroz Sampaio (Geólogo)

Thiago Dutra dos Santos (Geólogo)

Tiago Antonelli (Geólogo)

Valter José Marques (Geólogo)

Vanildo Almeida Mendes (Geólogo)

Victor Augusto Hilquias Silva Alves (Geólogo)

ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO

Warley Aparecido Pereira (Jornalista)
Letícia de Barros Alves Peixoto (Jornalista)
Pedro Henrique Pereira dos Santos (Comunicador Organizacional)

ASSESSORIA JURÍDICA

Vilmar Medeiros Simões (Consultor Jurídico)

COLABORAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Prof. Dr. Aderson Farias do Nascimento, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
Prof. Dr. André Etienne Ferraz, Universidade Federal Fluminense (UFF)
Prof. Dr. André Ferrari, Universidade Federal Fluminense (UFF)
Prof. Dr. Emanuel Jardim de Sá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
Geólogo Guilherme Estrela, Ex-diretor de Exploração e Produção da Petrobras
Prof. Dr. Luiz Antônio Pierantoni Gamboa, Universidade Federal Fluminense (UFF)
Geólogo Ricardo Latgé Milwart de Azevedo, Conselho-Diretor do Clube de Eng. e Conselheiro do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio de Janeiro (CREA-RJ)
Prof. Me. Abel Galindo Marques, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Profa. Dra. Regla Toujaguez La Rosa Massahud, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Prof. Me. Nagib Charone, Universidade Federal do Pará (UFPA)
Governo do Estado de Alagoas
Prefeitura de Maceió
Defesa Civil Nacional
Defesa Civil do Estado de Alagoas
Defesa Civil de Maceió
59º Batalhão de Infantaria Motorizada
Equatorial Energia Alagoas
United States Geological Survey (USGS)

APOIO CPRM

Coordenação de Eventos e Cerimonial (DIG)	Divisão de Cartografia (DICART)
Departamento de Gestão Territorial (DEGET)	Divisão de Informática (DIINFO)
Departamento de Hidrologia (DEHID)	Superintendência Regional de Belém (SUREG-BE)
Departamento de Administração de Material e Patrimônio (DEAMP)	Superintendência Regional de Belo Horizonte (SUREG-BH)
Departamento de Contabilidade, Orçamento e Finanças (DECOF)	Superintendência Regional de Goiânia (SUREG-GO)
Departamento de Informações Institucionais (DEINF)	Superintendência Regional de Manaus (SUREG-MA)
Divisão de Editoração Geral (DIEDIG)	Superintendência Regional de Recife (SUREG-RE)
Divisão de Gestão Territorial (DIGATE)	Superintendência Regional de Salvador (SUREG-SA)
Divisão de Geologia Aplicada (DIGEAP)	Superintendência Regional de São Paulo (SUREG-SP)
Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE)	Residência de Fortaleza (REFO)
Divisão de Geologia Marinha (DIGEOM)	Residência de Porto Velho (REPO)
Divisão de Economia Mineral e Geologia Exploratória (DIEMGE)	Residência de Teresina (RETE)
Divisão de Geoprocessamento (DIGEOP)	Escritório do Rio de Janeiro
	Sede Administrativa Brasília/DF

APRESENTAÇÃO

Historicamente, o bairro Pinheiro, localizado no município de Maceió (AL), vem apresentando inúmeras fissuras, trincas, rachaduras e afundamentos em moradias e vias públicas. O fenômeno se intensificou com a forte chuva de verão de 15 fevereiro de 2018 e o evento sísmico de magnitude regional igual a 2,4 de 3 de março de 2018 ocorridos na região, que levaram inclusive à interdição de diversas moradias.

Em decorrência, foi solicitada a presença de técnicos do Serviço Geológico do Brasil - CPRM por meio dos ofícios nº 044/2018 – CEDEC-AL e nº 34/2018 – PJC/MPE/AL para auxiliar na investigação das causas do fenômeno responsável pelos danos gerados a alguns imóveis e vias públicas localizados no bairro Pinheiro, posteriormente identificados também nos bairros vizinhos do Mutange e Bebedouro, o que levou à extensão da investigação.

Os resultados obtidos até a presente data pelos diversos métodos investigativos utilizados pela CPRM no período de junho de 2018 a abril de 2019 estão organizados nos seguintes três volumes, com pormenores sobre a metodologia utilizada, de modo a responder a portaria MME nº 20 de 11 de janeiro de 2019, que se refere à designação do Serviço Geológico do Brasil para elucidar as causas do fenômeno.

➤ **Volume I – Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): relatório síntese dos resultados nº 1.**

Apresenta os principais resultados obtidos nas investigações de forma resumida e adequada ao público não especialista.

➤ **Volume II – Relatórios Técnicos**

Compreende os seguintes relatórios que embasaram o volume I, que poderão sofrer seja atualização, seja aprofundamento, com o avanço dos trabalhos ou aquisição de novas informações:

- A. Mapa de feições de instabilidade do terreno
- B. Levantamento interferométrico
- C. Levantamento cartográfico
- D. Aspecto geológico e estrutural
- E. Aspecto geomorfológico e do histórico de ocupação do bairro
- F. Caracterização geológico-geotécnica
- G. Geofísica – Radar de Penetração do Solo (GPR) em residências e em vias públicas
- H. Geofísica – Batimetria na lagoa Mundaú
- I. Geofísica – Eletrorresistividade

- J. Geofísica – Gravimetria
- K. Geofísica – Audiomagnetotelúrico (AMT)
- L. Geofísica – Sismologia
- M. Hidrogeologia
- N. Integração de dados geológicos e de extração de sal em ambiente 3D

➤ **Volume III – Sistema de Informações Geográficas**

Reúne as informações vetoriais e matriciais georreferenciadas (geoinformação) utilizadas ou geradas pelo presente estudo, organizadas no Sistema de Informação Geográfica (SIG), para uso em *softwares* de geoprocessamento. Os dados estão no formato *shapefile*, com projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) 25S, Datum SIRGAS2000.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
CAVIDADES (MINAS).....	10
COMPARATIVO DOS VOLUMES E POSIÇÃO ESPACIAL.....	10
CONCLUSÕES	17

INTRODUÇÃO

O presente relatório busca caracterizar as atividades de extração de sal ocorridas durante as últimas décadas na região de estudo, bem como a evolução de suas cavidades ao longo do tempo, com a finalidade de verificar indícios que teriam alterado o estado de tensão *in situ* do maciço rochoso no bairro Pinheiro no município de Maceió (AL).

Considerando-se a reologia dos depósitos de sal, que na área se situam entre as cotas de 900 e 1.230 metros, suas deformações esperadas na fase primária e secundária são lentas e contínuas. Prevalecendo sobre regimes rúpteis, essas cavidades tendem no tempo geológico a serem fechadas devido à capacidade de cura do sal.

Durante a fase de deformação terciária dos depósitos salíferos, contudo, estudos recentes relatam que ocorrem rupturas desse material, descrevendo um comportamento geomecânico com tendência a se dilatar, aumentando seu volume através do micro fraturamento, seguido de seu rompimento brusco, que pode gerar falhas e fraturas, bem como a reativação de estruturas pré-existentes na região, o que poderia comprometer a estabilidade de todo sistema que envolve o bairro Pinheiro.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração da modelagem geológica 3D utilizou-se os programas Strat3D e Studio3, os quais permitiram a correlação das camadas sedimentares, geração dos sólidos de todos os pacotes sedimentares e cavidades onde houve extração de sal por dissolução.

As correlações entre as camadas sedimentares são balizadas através de seções verticais, utilizando como base os dados de litologia, estratigrafia e propriedades físico-químicas. Após elaboram-se códigos para designar cada padrão, conforme objetivos específicos e para um melhor diagnóstico da estratigrafia da bacia (Fig. 1).

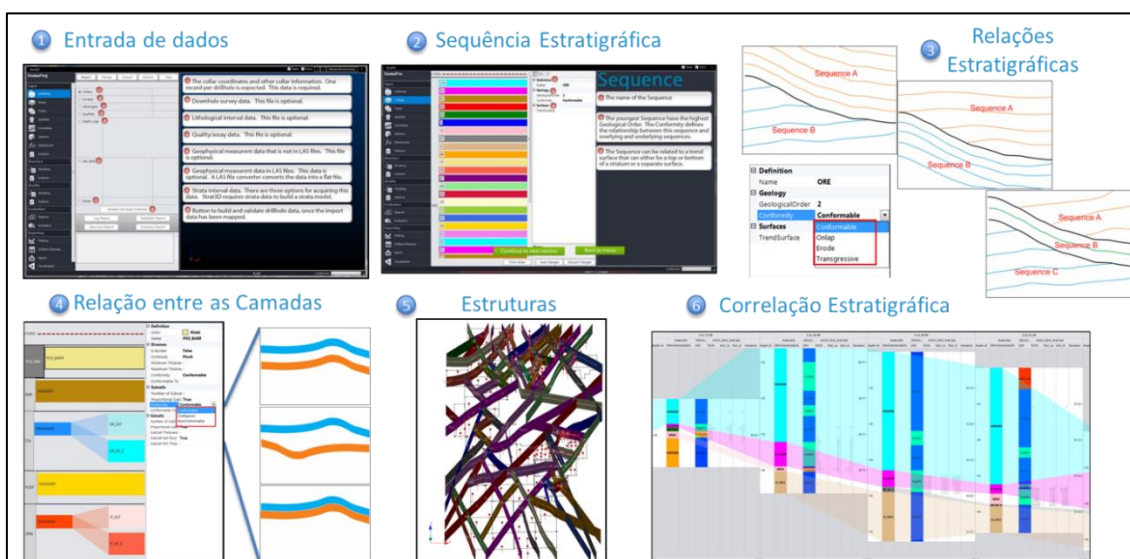


Figura 1. Sequência das atividades para modelagem geológica 3D.

O arranjo estrutural foi definido a partir dos dados estruturais de superfície, lineamentos obtidos através do relevo sombreado e mapeamento das evidências do evento de subsidência no bairro Pinheiro (trincas e rachaduras). A partir daí foi feita a projeção das estruturas em subsuperfície, inserindo os mergulhos e valores de rejeitos das falhas, através da disposição das camadas e furos de sondagem.

A definição da ordem estratigráfica do modelo é feita a partir do reconhecimento geológico da área de estudo e das litologias descritas pelos furos de sondagem. Posteriormente, as unidades litoestratigráficas são agrupadas em sequências e dispostas conforme as idades relativas.

Para modelagem da área de estudo foram utilizados 62 poços, totalizando 52.692,76 metros de perfuração, sendo 45 poços verticais e 17 poços direcionais. Sendo assim, primeiramente foram validadas as informações disponíveis: poços estratigráficos, poços de extração de sal gema, poços de extração de água e poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). A validação do banco de dados contemplou a verificação de dados duplicados ou com erros de digitação, informações ausentes e a consistência dos intervalos (“de” (*from*) e “até” (*to*), com eliminação de *gaps* e *overlaps*). Nenhum problema maior de validação foi encontrado, ficando os dados prontos para exportação e uso nos programas. As tabelas construídas foram mescladas e convertidas em um único arquivo: *drillholes*.

Para melhorar a resolução espacial foram realizados novos levantamentos topográficos, utilizando estação total e GPS diferencial, em todas as bocas dos poços e furos de sonda utilizados no modelo. Durante este levantamento verificou-se algumas inconsistências com relação ao posicionamento e precisão de alguns furos nos mapas e perfis disponibilizados.

O modelo tridimensional (3D) mostrado na figura 2 é uma aproximação da real forma das características geológicas, considerando diversos parâmetros distribuídos espacialmente na bacia Sergipe-Alagoas, sub bacia de Maceió, mais especificamente na região do depósito de sal gema.

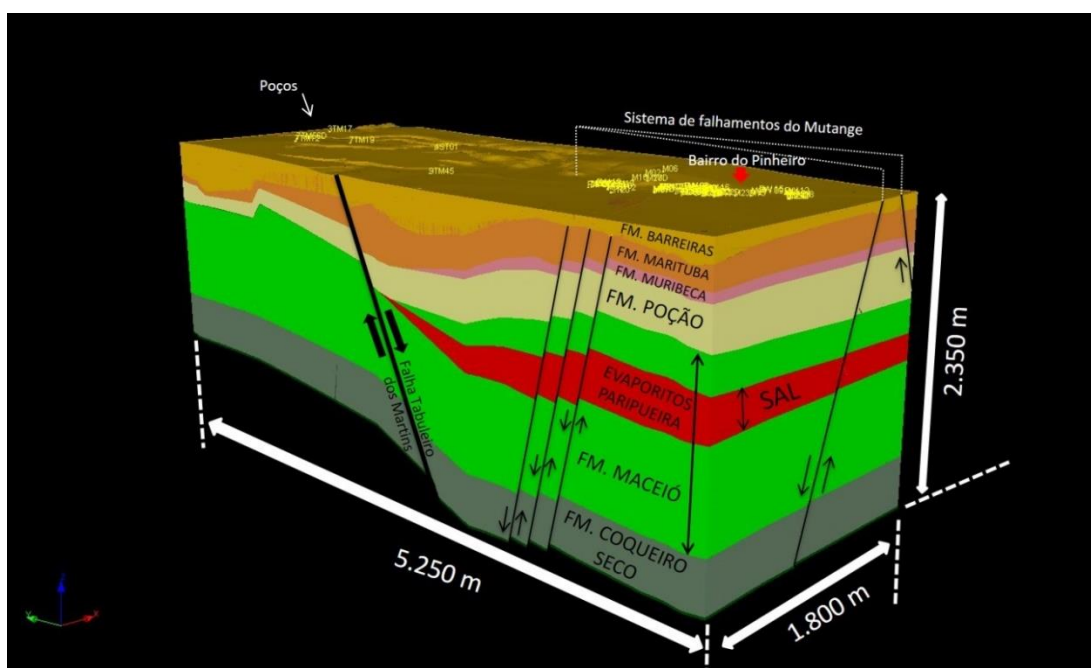


Figura 2. Vista em perspectiva do modelo 3D.

CAVIDADES (MINAS)

A modelagem tridimensional das cavidades é uma ferramenta eficaz para avaliação da estabilidade e comportamento do maciço rochoso, tendo como fim a obtenção de parâmetros volumétricos e espaciais que permitam melhor avaliar as condições e alterações na região de extração do sal gema.

Os sólidos tridimensionais das cavidades foram construídos por meio de triangulações, correlacionando as *strings* interpretadas nas seções verticais do sonar às seguintes direções 0°-180°, 45°-225°, 90°-270° e 135°-315°. O processo de triangulação gera dois arquivos distintos para cada superfície (*wireframe*): um de pontos e outro de triângulos representados pelas letras finais dos nomes dos arquivos – .pt para pontos e .tr para triângulos. Esses sólidos (*wireframes*) foram revisados por ferramentas de validação do próprio *software*, que checam triângulos duplicados, arestas duplicadas, faces vazias e abertas, interseções entre triângulos, entre outros.

COMPARATIVO DOS VOLUMES E POSIÇÃO ESPACIAL

A validação dos modelos baseia-se na comparação entre o volume medido nos sólidos das 8 cavidades obtidas através de levantamentos por sonar nas diversas fases de extração do sal gema e períodos de tempo (Figs. 3 a 7), visando estabelecer um critério de eficiência na estabilização desses espaços vazios e verificando suas aderências no sequenciamento de lavra e produção.

Conforme o quadro 1, conclui-se que ocorreram diferenças significativas nos volumes das cavidades que estavam com a atividade de operação paralisada, chegando até ao aumento 71% no caso da mina 07D e à redução de 92% na mina 19D.

Quadro 1. Análise comparativa entre os volumes dos sólidos nas cavidades avaliadas.

Comparativo volumétrico das cavidades			
Poço	Sonar	Vol. m3	Tonelagem (d= 2,17)
Mina 07D	1989	194122.49	421245.80
	2019	332552.05	721637.95
	Diferença	138429.56	300392.15
	Diferença %	71%	
Mina 19D	2005	72724.59	157812.36
	2019	5835.8	12663.69
	Diferença	-66888.79	-145148.67
	Diferença %	-92%	
Mina 27D	Sem dados anteriores		
	2019	296058.76	642447.51
	Diferença	-	-
	Diferença %	-	
Mina 30D	2015	285611.53	619777.02
	2018	442610	960463.70
	Diferença	156998.47	340686.68
	Diferença %	55%	
Mina 31D	2015	424054.45	920198.16
	2018	495503.99	1075243.66
	Diferença	71449.54	155045.50
	Diferença %	17%	
Mina 32D (Poço ativo)	2017	85823.52	186237.04
	2018	198192.25	430077.18
	Diferença	112368.73	243840.14
	Diferença %	131%	
Mina 34D (Poço ativo)	Operação 2	132059.22	286568.51
	2015	195221.85	423631.41
	Diferença	63162.63	137062.91
	Diferença %	48%	
	2019	356418.32	773427.75
	Diferença	161196.47	349796.34
Diferença %	83%		
Mina 35D (Poço ativo)	Operação 2	23355.06	50680.48
	2014	67131.13	145674.55
	Diferença	43776.07	94994.07
	Diferença %	187%	
	2019	201787.53	437878.94
	Diferença	134656.4	292204.39
Diferença %	201%		

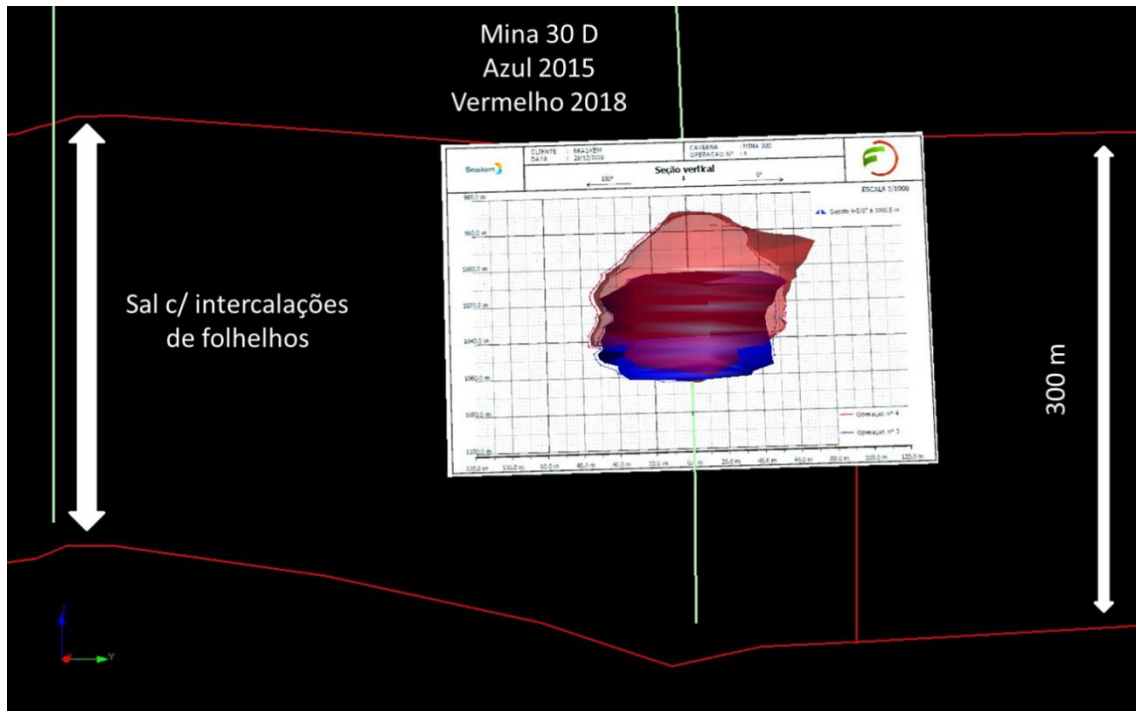


Figura 3. Modelo 3D da mina 30D. Cavidade em azul: obtida com o sonar em 2015. Cavidade em vermelho: sonar 2018.

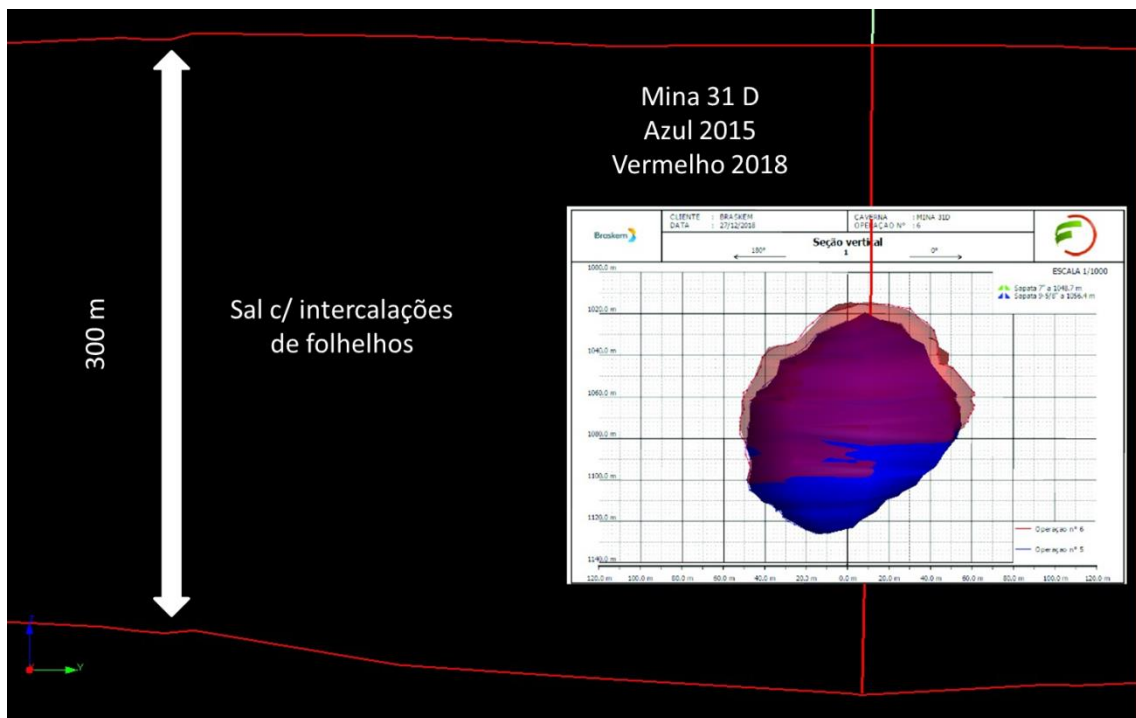


Figura 4. Modelo 3D da mina 31D. Cavidade em azul: 2015. Cavidade em vermelho: 2018.

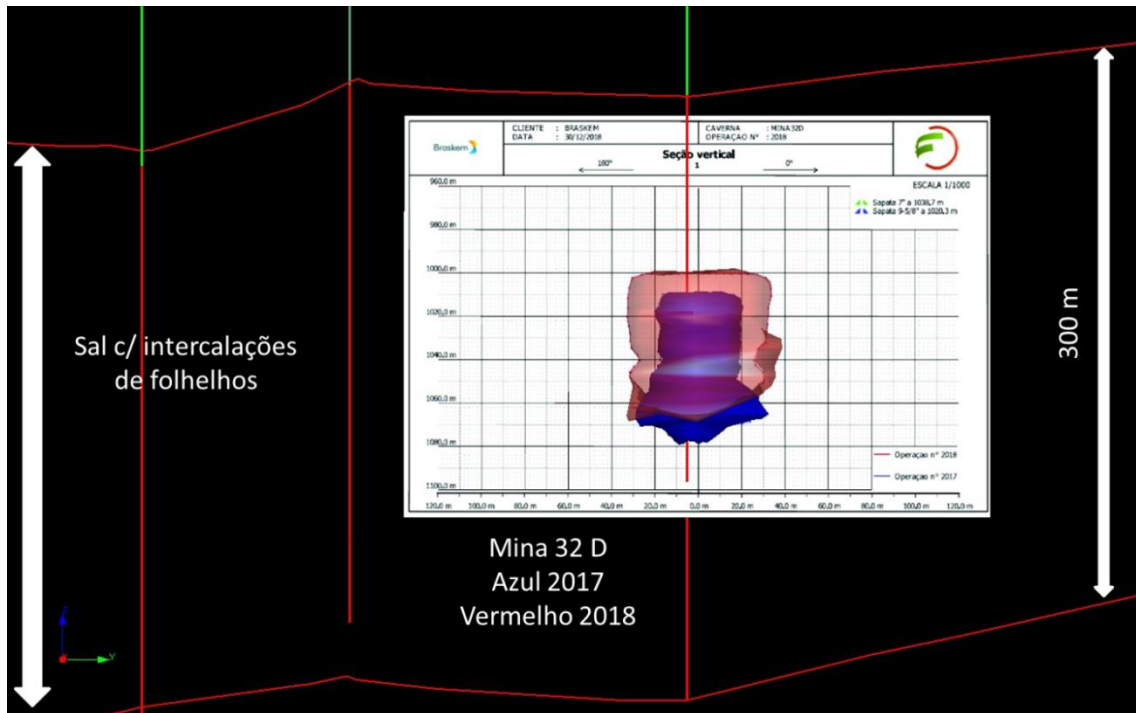


Figura 5. Modelo 3D da mina 32D. Caverna em azul: 2017. Caverna em vermelho: 2018.

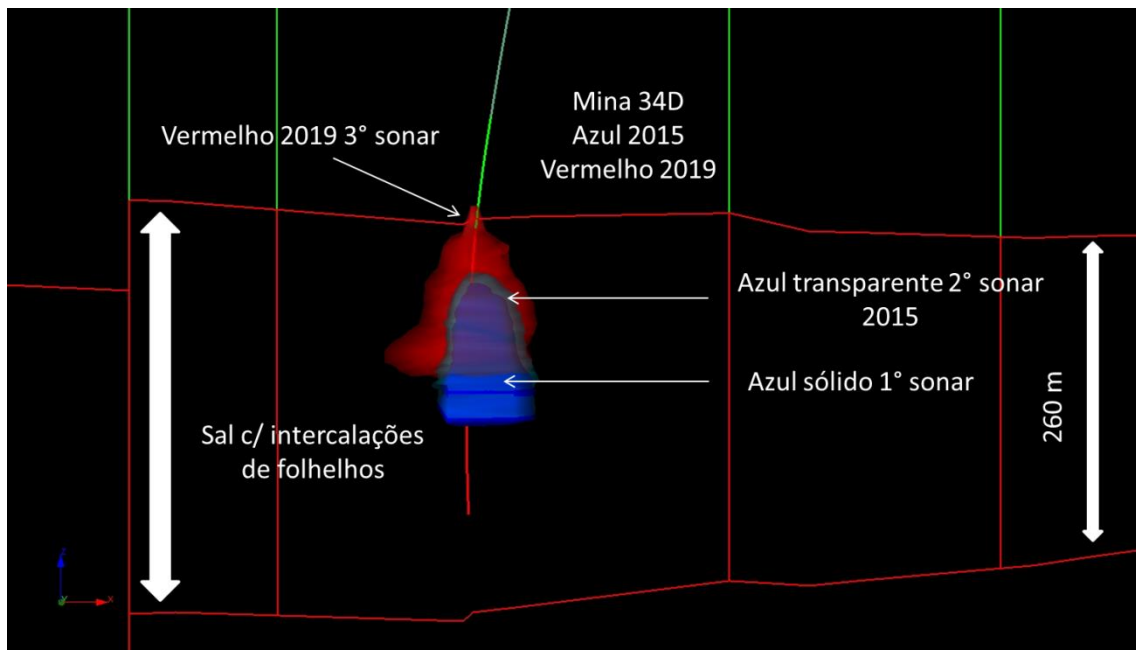


Figura 6. Modelo 3D da mina 34D. Caverna em azul sólido e azul transparente: 1° sonar e 2° sonar realizado em 2015. Caverna em vermelho: 2019.

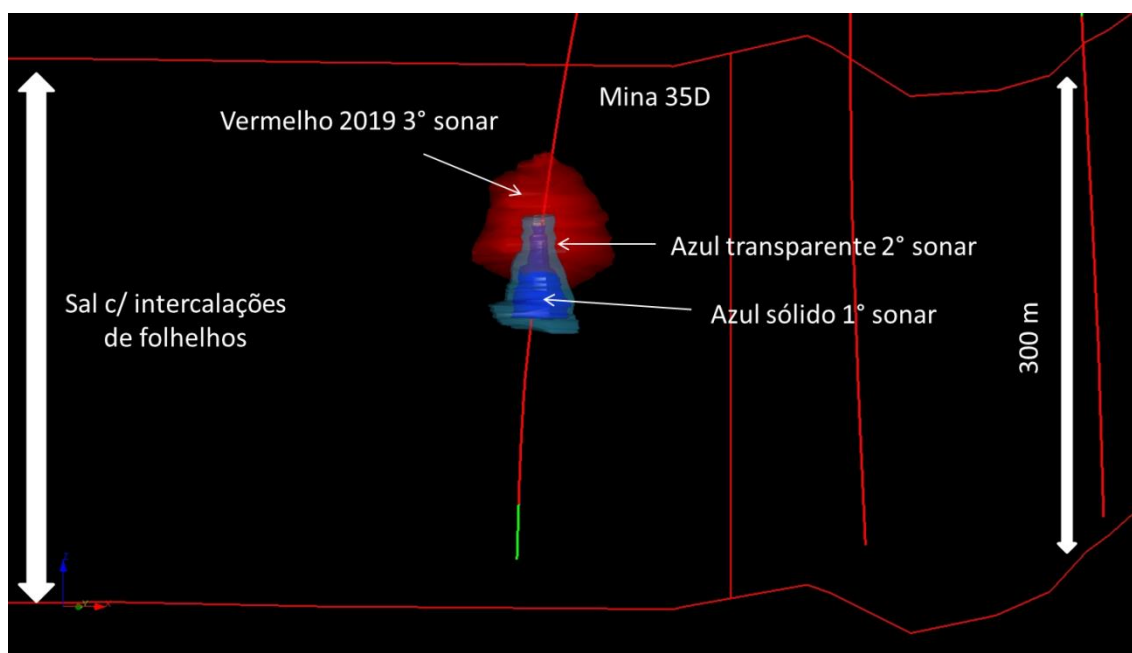


Figura 7. Modelo 3D da mina 35D. Cavidade em azul sólido e azul transparente: 1º sonar e 2º sonar realizado em 2015. Cavidade em vermelho: 2019.

Na região das minas 07D e 19D, ocorre a intersecção de um sistema de falhas e/ou fraturas com direções preferenciais NE-SW e NW-SE. Tais estruturas possivelmente estão sendo reativadas por movimentos de acomodações gravitacionais locais e/ou pela inflação das camadas salíferas (soerguimentos e afinamentos), ocasionados pela extração de sal, gerando colapso das cavidades e aumentando a instabilidade do maciço rochoso (Fig. 8). O levantamento por sonar permitiu interpretar um alinhamento dessas cavidades (07D e 19D), com possível caimento de baixo ângulo (plano de falha e/ou fratura). O observado ainda não é bem explicado, já que ainda não é conhecida estrutura com este mergulho no local.

Na mina 19D, a forma geométrica irregular da cavidade, parecendo encaixada em zona de fraqueza, bem como o reduzido volume se comparada ao levantamento do sonar anterior, leva à hipótese de colapso quase total dessa cavidade, que poderia estar relacionado à intersecção de sistema de falhas e/ou fraturas com perda da integridade estrutural dos pilares (Fig. 9).

A mina 07 parou de ser operada em junho de 1997. A comparação do resultado obtido com o sonar em 1989 com o obtido em 2019 mostra um grande deslocamento do teto com mais de 200 metros de altura, que também estaria relacionado ao sistema de falhas e/ou fraturas no maciço (Fig. 10).

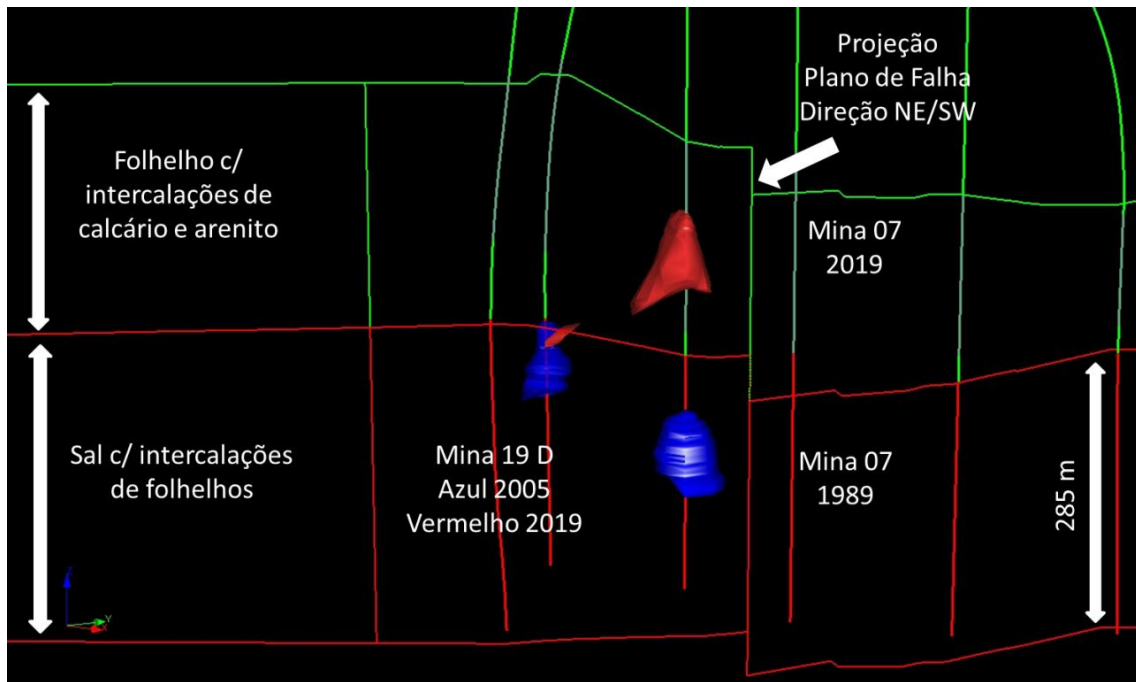


Figura 8. Seção geológica e localização das cavidades 07D e 19 D em relação a possível sistema de falha.

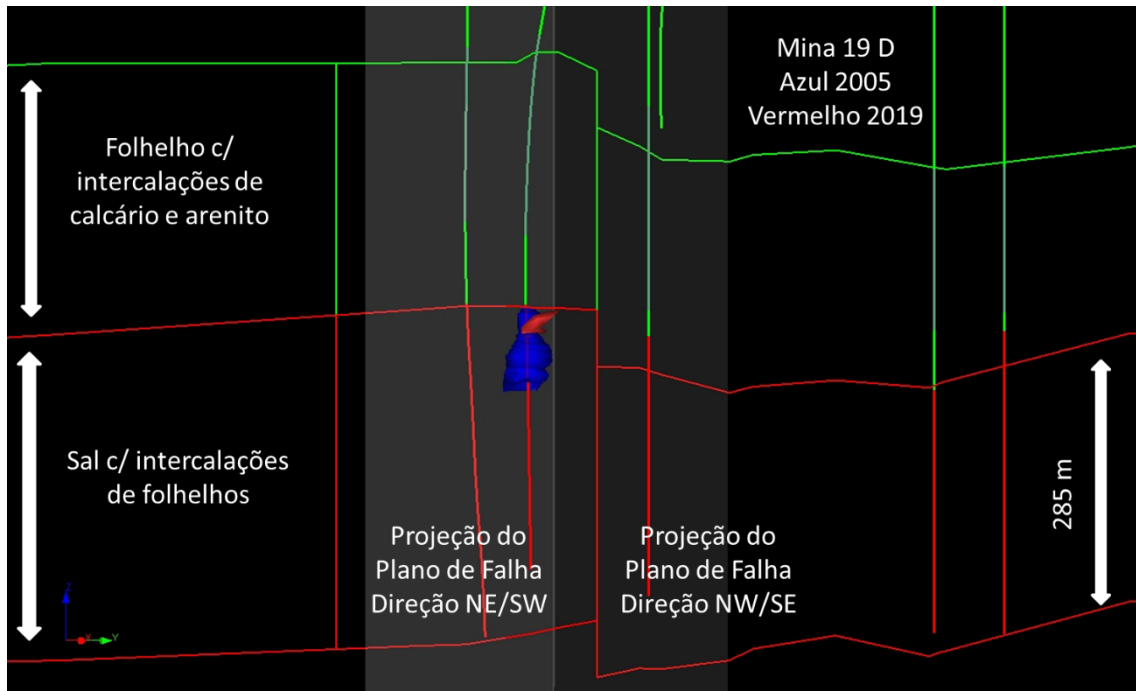


Figura 9. Morfologia da Mina 19, a cavidade em azul representa o sonar realizado em 2005 e vermelho em 2019.

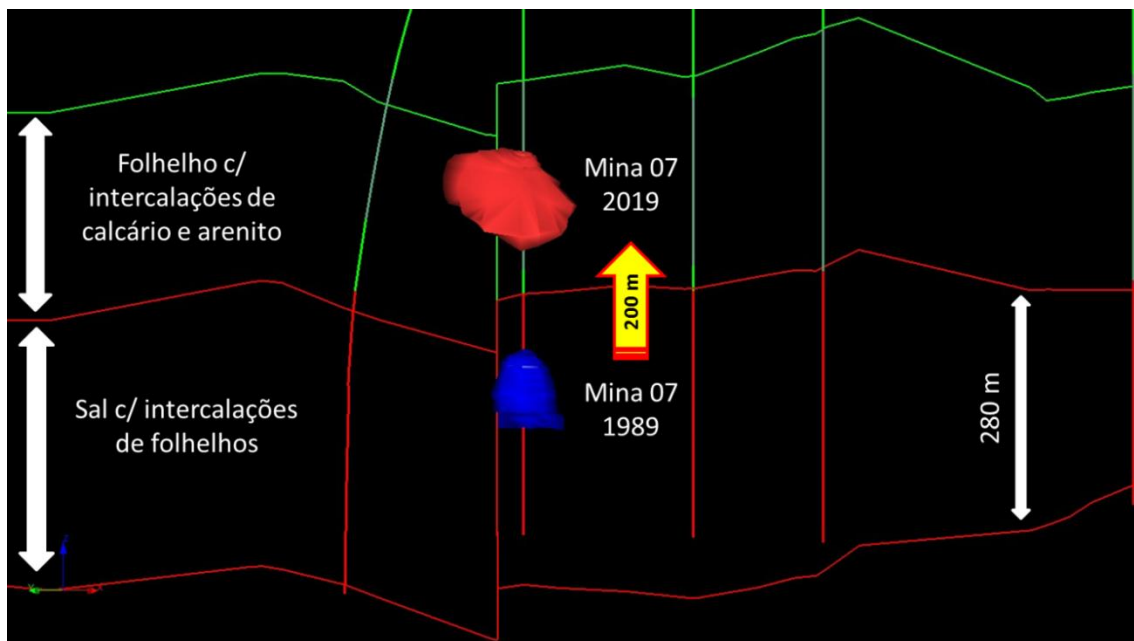


Figura 10. Posição espacial da mina 07, com registro de sua localização espacial e acompanhamento desse deslocamento.

CONCLUSÕES

Há dados suficientes para afirmar que a extração de sal gema no município de Maceió (AL) alterou o estado de tensão *in situ* do maciço rochoso, reativando zonas de falhas e/ou fraturas, causando os processos de subsidência no bairro do Pinheiro.

Ocorreram diferenças significativas nos volumes das cavidades analisadas, principalmente nas que estão próximas às falhas e/ou fraturas evidenciadas no presente estudo.

As modificações nas tensões do maciço durante a lavra de sal gema implicam na instabilidade de cunhas (intersecção de falhas e/ou fraturas) que outrora estavam submetidas a regime de compressão e que, com a mudança para tração ou com a forte relaxação, podem desabar sob o próprio peso, acarretando no colapso do teto dessas cavidades, como no caso da mina 07.

Para devido controle e monitoramento da estabilidade dessas cavidades, instalou-se uma rede de sismógrafos, os quais permitem perceber alterações no comportamento do maciço rochoso.

A localização de zonas de fraqueza nas regiões de extração de sal gema foram corroboradas pelos levantamentos geofísicos terrestres (gravimétrico e audiomagnetotelúrico), o que poderia explicar uma tensão acumulada maior nos maciços rochosos, tendo essa energia dissipada pelas zonas de falha e/ou fraturas, possivelmente por novos colapsos que estão ocorrendo nas cavidades.

Uma análise mais aprofundada poderá ser realizada a partir da obtenção dos resultados de sonar das demais 27 cavidades a serem entregues pela empresa que explora o sal gema na região.