

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

INALDO JOSÉ MINERVINO DA SILVA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO DE CAVIDADES EM
EVAPORITOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

RECIFE – 2015

VIRTUS IMPAVIDA

INALDO JOSÉ MINERVINO DA SILVA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO DE CAVIDADES EM
EVAPORITOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Tese submetida ao Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Geotécnica.

Orientador: Leonardo José do Nascimento Guimarães

Co-orientador: Igor Fernandes Gomes

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE – 2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

S586a Silva, Inaldo José Minervino da.
Análise de estabilidade e deformação de cavidades em evaporitos pelo método dos elementos finitos / Inaldo José Minervino da Silva. – Recife: O Autor, 2015.
156fol. il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.
Co-orientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Evaporito. 3. Lavra subterrânea. 4. Elementos Finitos. 5. Fluência. 6. Dano. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento (Orientador). II. Gomes, Igor Fernandes (Co-orientador). III. Título.

624 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2016/ 11



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO DE CAVIDADES EM EVAPORITOS
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

defendida por

Inaldo José Minervino da Silva

Considera o candidato APROVADO

Recife, 04 de agosto de 2015

Orientadores:

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães - UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes - UFPE
(co-orientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães - UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Nelson Inoue – PUC-Rio
(examinador externo)

Prof. Dr. José Antônio Barbosa – UFPE
(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a Lícia Mouta da Costa – UFPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Ivaldo Dario da Silva Pontes Filho – UFPE
(examinador interno)

A Deus, aos meus amados pais, Inaldo e Maria, aos meus queridos irmãos Temístocles (in memoriam), Aristóteles e Patrícia e a todos os amigos, professores, alunos, irmãos na fé e capoeiristas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu infinito e inefável amor para comigo, pela graça de mais uma vitória, pela salvação dada pelo seu filho Jesus, pela misericórdia e perdão dos erros cometidos e consolo nos momentos de consternação. Assim como disse o salmista nas Escrituras Sagradas: “*Que darei ao Senhor por todos os seus benefícios para comigo?*” (Salmos 116:12- versão RA).

Aos meus pais, Inaldo e Claudecy, por todo o esforço e sacrifício realizados em prol da educação não apenas da minha, como também da de meus irmãos. Pela incansável luta em nos conduzir aos caminhos planos e valorosos da verdade, do respeito e da ética. Pelos nobres valores que nos foram passados em todas as ocasiões e que hoje me permitem olhar para meus semelhantes sem nenhum sentimento de vergonha, medo ou incapacidade (seja ela qual for).

Aos meus irmãos, Temístocles (*in memoriam*), Aristóteles e Patrícia, pelo companheirismo, incentivo e apoio em ocasiões decisivas e por compartilharem juntos nossos sonhos e aprendizados com a grande escola da vida.

Ao meus orientadores Leonardo Guimarães e Igor Gomes por seu exemplo profissional, paciência, disposição e acessibilidade quanto ao esclarecimento de dúvidas oriundas do desenvolvimento do presente trabalho. Pelas palavras de encorajamento e pelas ocasiões que, por seu modo de agir, deixavam transparecer a igualdade e o respeito por seus semelhantes.

Aos amigos do LMCG (Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica), Juliana Valadares, Leila, Marcela, Naira, Vinícius e Débora pelos momentos de descontração e companheirismo, pelo ensino de valores por meio da amizade, pela disposição em compartilhar, pelas conversas sempre construtivas, pelo apoio e disposição em tirar dúvidas, pelos diálogos sinceros e transparência nas relações. Agradeço especialmente a Jonathan por compartilhar sua genialidade, na qual tive o privilégio de usufruir, e ajudou muito nesse trabalho. O André que foi o IC que pedi a Deus e teve uma contribuição impar nas construções dos modelos estruturais discretizados. A Laís pela ajuda no texto. O Marco

George pela revisão do texto e conversas descontraídas. O Rafael pelas discussões filosóficas e revisão do texto. Agradeço ainda aos professores Lícia e Ivaldo.

Aos amigos professores do IFPE e em especial aos revisores desse trabalho, Ronaldo Faustino e Roberto Andrade.

A todos os mestres do saber por sua valiosa contribuição em compartilhar o conhecimento e instigar em nós, seus eternos aprendizes, o espírito aventureiro e ousado de ir mais além.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Geotecnia e a Andréa e Guadiana pelos esclarecimentos relativos a documentações e no trato de questões concernentes ao mestrado, além de proporcionarmos um ambiente mais alegre e convidativo.

Aos irmãos na fé, colegas, amigos, familiares e capoeiristas que tanto me apoiaram e incentivaram, sejam com palavras e/ou orações, para que eu não desistisse de meus sonhos, independentemente dos obstáculos que se apresentassem diante de mim, ensinando-me, assim, que estes são transponíveis. Aos amigos Ademar Eli que mesmo distante tem nos incentivado e Otávio Faustino pelo incentivo.

A CAPES pelo apoio financeiro concedido durante a elaboração deste trabalho.

A Companhia Vale do Rio Doce pelos dados cedidos, no qual viabilizou a continuidade da pesquisa. Em especial ao Engenheiro de Minas, Carlos Wagner, pela sua solicitude em nos ajudar, no qual considero um novo amigo.

A todos aqueles que injustamente não foram mencionados aqui, mas que acreditaram e me apoiaram nessa conquista de mais uma etapa alcançada.

"Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito".

(Apóstolo Paulo em Romanos 8:28)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo simular numericamente via método dos elementos finitos a deformabilidade e estabilidade geomecânica de lavras subterrâneas em evaporitos, considerando cenários de galerias executadas pelo método de câmaras e pilares e de escavação para estocagem de gás natural. Os evaporitos são economicamente importantes por serem fontes de matéria-prima para a fabricação de diversos produtos. A silvita é o mineral mais explorado para a produção de potássio, pois a sua estrutura química de cloreto simples favorece o seu aproveitamento industrial. No Brasil, a produção de potássio é realizada pela CVRD (Companhia Vale do Rio Doce) na mina de Taquari-Vassouras, que está localizada em Sergipe. Foi utilizado o modelo constitutivo mecanismo duplo de deformação com ativação térmica. Para validação do modelo constitutivo foi comparado resultados de simulações com resultados de medições, reais, de convergência de deformação, de câmaras do Painel D1. Foi estudado a possibilidade de influxo de água no Painel I5 e apresentou-se uma modelagem de um pilar 3D. Foi simulado, ainda, queda de blocos laterais e uma câmara para estocagem de gás natural. Para reproduzir os efeitos do processo de formação de fraturas, apresenta-se a técnica de fragmentação, a qual usa os elementos de interface para reproduzi-las. Onde os elementos regulares têm comportamento assumidamente de fluência e o comportamento dos elementos da região de interface é regido por um modelo constitutivo inelástico capaz de simular os fenômenos envolvidos no processo de degradação do material até a formação da fratura, como o modelo de dano. Tanto o modelo de dano como o modelo mecanismo duplo de deformação, de fluência estacionária, encontram-se implementados no programa, *in-house*, de elementos finitos CODE_BRIGHT (*COupled DEformation BRine Gas and Heat Transport*). As análises apresentaram resultados consistentes, possibilitando o conhecimento do comportamento de fluência das rochas salinas, e seus efeitos, como subsidência, influxo de água, formações de choccos. Além disso, as análises demonstraram a viabilidade da aplicação da técnica de fratura em projetos de Engenharia com a aplicação da metodologia proposta.

Palavras-Chave: Evaporito. Lavra subterrânea. Elementos finitos. Fluência. Dano.

ABSTRACT

This study aims to simulate numerically via the finite element method the deformability and geomechanical stability of underground mines in evaporites considering scenarios galleries performed by the method of room and pillar and digging for natural gas storage. The evaporites are economically important because they are sources of raw material for the manufacture of several products. The sylvite is the most explored mineral for potash production because its chemical structure simple chloride favors its industrial use. In Brazil, potash production is carried out by CVRD (Company Vale do Rio Doce) in the Taquari-Vassouras mine, which is located in Sergipe. We used the constitutive model dual mechanism of deformation with thermal activation. To validate the constitutive model was compared simulation results with measurement results, real, deformation convergence of the cameras of Panel D1. It studied the possibility of water inflow in Panel I5 and presented himself a modeling a pillar 3D. Was simulated also down side blocks and a camera for storage of natural gas. To reproduce the effects of the training process fractures, shows the fragmentation technique, which uses the interface elements to play them. Where regular elements have openly creep behavior and the behavior of the interface elements region is governed by an inelastic constitutive model able to simulate the phenomena involved in the material degradation process until the formation of the fracture, as the damage model. Any damage model as the model dual mechanism of deformation, creep stationary, are implemented in software, in-house finite element CODE_BRIGHT (Gas and Brine Deformation Coupled Heat Transport). The analysis showed consistent results, enabling the knowledge of the creep behavior of the salt rock, and its effects, as subsidence, water inflow and falling blocks. Furthermore, the analysis demonstrated the feasibility of applying the fracture technique in engineering projects with the application of the proposed methodology.

keywords: Evaporites. Underground mines. Finite elements. Creep. Damage.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | MOTIVAÇÕES | 11 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 15 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TEXTO | 15 |
| 2 | ASPECTOS GERAIS DA MINERAÇÃO E ESTOCAGEM EM MINAS DE EVAPORITOS | 17 |
| 2.1 | MINERAÇÕES DOS EVAPORITOS | 17 |
| 2.1.1 | Mineração de Lavra Subterrânea mais Empregada em Evaporitos..... | 19 |
| 2.2 | ESTOCAGENS EM MINAS DE SAL | 23 |
| 2.2.1 | Métodos de Corte e Enchimento (<i>Cut and Fill</i>) | 23 |
| 2.2.2 | Estocagem em Minas de Dissolução | 25 |
| 3 | FRATURAMENTO EM EVAPORITOS | 29 |
| 3.1 | TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO | 29 |
| 3.2 | MODELO CONSTITUTIVO DE DANO À TRAÇÃO | 32 |
| 3.3 | MODELO CONSTITUTIVO DE FLUÊNCIA | 41 |
| 4 | ASPECTOS GERAIS DA MINA TAQUARI VASSOURAS | 46 |
| 4.1 | BREVE HISTÓRICO..... | 46 |
| 4.2 | GEOLOGIA DA MINA TAQUARI VASSOURAS | 48 |
| 4.3 | ESTUDO DOS PARÂMETROS DA MINA TAQUARI VASSOURAS | 56 |
| 4.4 | ESTUDOS DO PAINEL I5 | 66 |
| 4.5 | ESTUDOS DA FORMAÇÃO DE QUEDA DE BLOCO..... | 70 |
| 5 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CASOS RELACIONADOS À MINA TAQUARI VASSOURAS | 74 |
| 5.1 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO TRIAXIAL DE FLUÊNCIA..... | 75 |
| 5.2 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÊNCIA EM ESCAVAÇÕES NA MINA TAQUARI VASSOURAS: PAINEL D1 | 78 |
| 5.3 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÊNCIA EM ESCAVAÇÕES NA MINA TAQUARI VASSOURAS: PAINEL I5..... | 101 |
| 5.4 | SIMULAÇÃO DE CHOCOS LATERAIS | 114 |
| 6 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FLUÊNCIA EM UM PILAR 3D | 127 |
| 7 | SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FLUÊNCIA NA ESTOCAGEM DE GÁS EM MINAS DE DISSOLUÇÃO | 134 |
| 8 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 142 |
| 8.1 | CONCLUSÕES | 142 |
| 8.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 143 |
| | REFERÊNCIAS | 145 |

1 INTRODUÇÃO

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”

(Albert Einstein)

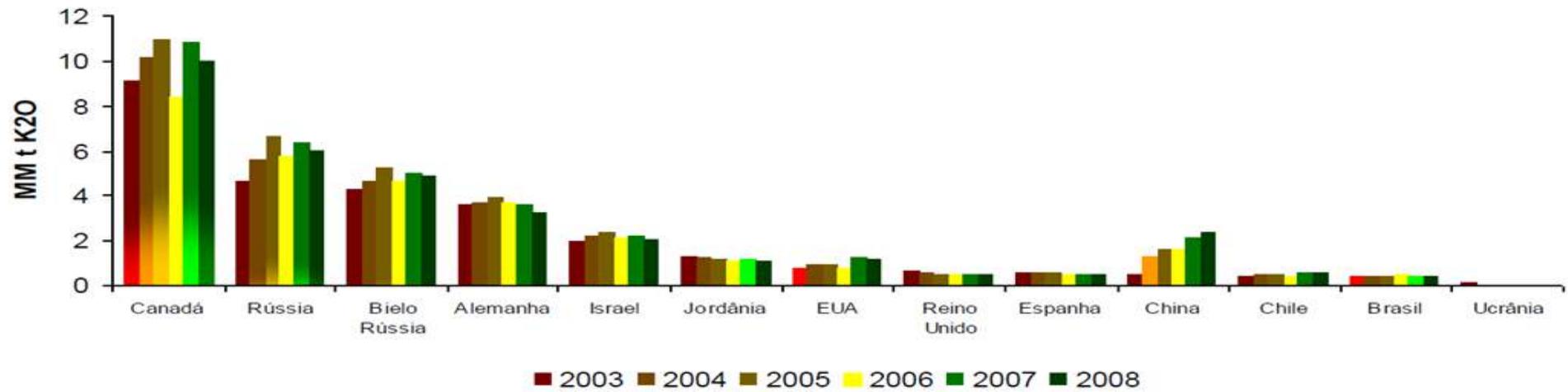
1.1 MOTIVAÇÕES

Os evaporitos são economicamente importantes por serem fontes de matéria prima para a fabricação de diversos produtos. Uma sucessão evaporítica, com salinidade crescente, inclui a deposição de carbonatos, sulfatos, cloreto de sódio, culminando com cloretos de potássio e de magnésio. A silvita é o mineral mais explorado para a produção de potássio, pois a sua estrutura química de cloreto simples favorece o seu aproveitamento industrial (MOHRIAK *et al.*, 2008). Na natureza, a silvita frequentemente pode ocorrer associada à halita, recebendo a denominação de silvinita (KCl+NaCl). Na Figura 1.1 está ilustrada, em forma de gráfico, a distribuição mundial de produção de K₂O (anidrido potássico).

A maior parte do potássio obtido no mundo é utilizada na produção de fertilizantes, principalmente no preparo de NPK através de mistura mecânica, em que a relação percentual dos elementos componentes da mistura (Nitrogênio, Fósforo e Potássio), varia de acordo com as necessidades dos solos e das culturas (Figura 1.2). Outras aplicações são voltadas a fabricação de sabões e detergentes, vidro e cerâmica, medicamentos, corantes químicos e borracha sintética.

No Brasil, a produção de potássio é realizada pela CVRD (Companhia Vale do Rio Doce) na mina de Taquari-Vassouras, que está localizada em Sergipe e atualmente é a única mina de onde se extrai o referido elemento no Brasil. A operação é uma parceria da CVRD com a Petrobras. Todas as vendas de Taquari-Vassouras são direcionadas para o mercado brasileiro, e a capacidade de produção é de 625 mil toneladas por ano. A produção de insumos para fertilizantes está localizada, não só Brasil, mas também no Peru, em Moçambique e no Canadá.

Figura 1.1 – Produção mundial de K₂O do ano de 2003 a 2008



Fonte: Adaptado de Alves (2015).

Figura 1.2 – Esquema didático do uso NKP.



Fonte: Vale (2015a).

A produção de potássio pela CVRD totalizou 492.000 t em 2014, em linha com o ano anterior, e 8,9% abaixo da meta da empresa, de 540.000 t para o ano, fato principalmente devido à exaustão da mina. No quarto trimestre do ano de 2014, a produção de potássio totalizou 147.000 t, 5,1% acima do terceiro trimestre do ano de 2014, como resultado da retomada após uma parada corretiva nas correias transportadoras ocorrida nesse mesmo período. O desempenho ficou 16,4% acima, em relação ao mesmo período do ano anterior, devido a uma parada para manutenção no quarto trimestre do ano de 2013 (VALE, 2015b).

Os minérios de potássio ocorrem em camadas profundas e são extraídos principalmente por métodos convencionais de lavra subterrânea, como, por exemplo, câmaras e pilares e corte e enchimento. A mineração por dissolução é utilizada quando os métodos citados anteriormente não são viáveis, técnica e economicamente, principalmente devido às grandes profundidades em que os depósitos se encontram (superiores a 1200 metros). Outros aspectos relativos à lavra subterrânea são: influxo de água, devido à presença de aquíferos, convergência das câmaras, subsidência, queda de blocos laterais e no teto da câmara. A lavra de pilares em minas já exploradas é uma alternativa para prolongar a

vida útil da mina que resulta na diminuição da secção útil de suporte. Todos esses aspectos colocam em risco a segurança e a estabilidade geomecânica da mina.

O estudo da estabilidade de minas por dissolução em evaporitos. Motiva este trabalho, também, pela singular importância que a estocagem de gás natural tem tomado força no cenário mundial nos últimos anos. A estocagem subterrânea de gás natural em depósitos evaporíticos *offshore* servirá como pulmões contingenciais para manutenção da produção de petróleo, bem como as quantidades e proporções ótimas para atender as perspectivas que estão por vir com o advento do pré-sal (VASSALO, 2013).

Segundo Vassalo (2013) existem várias justificativas favoráveis à utilização de espaços subterrâneos para armazenamento de gás, como:

- Equilibrar o fluxo de gás nos gasodutos, para assegurar que a pressão nos gasodutos se mantenha dentro dos parâmetros de segurança;
- Estocar o gás para nivelar a produção em períodos de flutuação do consumo, o que ocorre nos países de clima temperado (o gás não comercializado de imediato é armazenado, geralmente no verão quando a procura é baixa, e é entregue no inverno com o aumento da procura, ou seja, obter segurança de abastecimento energético);
- Cumprir com os contratos efetuados, mantendo o volume de entrega e evitando qualquer imprevisto que possa levar à aplicação de multas por não cumprimento contratual;
- Antever, como ferramenta de especulação de mercado de capitais, uma alta significativa do preço do gás, e a compra a preços baixos para depois vendê-lo quando o preço subir até o patamar desejado, reduzindo assim a volatilidade do preço;
- Incluir, como seguro de acidentes imprevistos, acidentes naturais como furacões ou problemas de mau funcionamento da produção, etc.;

O conhecimento do comportamento geomecânico desses evaporitos, contudo, são de crucial importância para podermos assim compreender e modelar, de forma mais acurada e fiel às condições de operação de minas subterrâneas e *layouts* de projeto mais otimizados. Comportamentos como o de fluência (SILVA, 2010) e o de fraturamento

(SEIXAS, 2015) devem ser estudados incansavelmente para podemos dimensionar essas cavidades de maneira segura e economicamente viável.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral analisar a deformabilidade e estabilidade geomecânica de cavidades em evaporitos via modelagem computacional em elementos finitos. Este estudo está baseado em dados reais de minas subterrâneas lavradas pelo método câmaras e pilares e por dissolução.

Já os objetivos específicos podem ser listados a seguir:

- Analisar, via modelagem computacional em elementos finitos, o modelo constitutivo de fluência de mecanismo duplo deformação através do ensaio triaxial de fluência.
- Analisar, via modelagem computacional em elementos finitos, a deformabilidade de cavidades do Painel D1 da mina Taquari Vassouras, comparando com dados reais de convergência dessa mina.
- Analisar, via modelagem computacional em elementos finitos, a subsidência e o influxo de água no Painel I5 da mina de Taquari Vassouras.
- Analisar, via modelagem computacional em elementos finitos, a formação de queda de blocos laterais em cavidades típicas da mina de Taquari Vassouras.
- Estudar, via modelagem computacional em elementos finitos, um pilar tridimensional típico de minas subterrâneas lavradas pelo método câmara e pilares.
- Estudar, via modelagem computacional em elementos finitos, uma cavidade típica de estocagem de gás.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, nos quais os Capítulos 2, 3 e 4 foram expostos ingredientes teóricos necessários ao entendimento da modelagem numérica de minas lavradas pelo método de câmaras e pilares e por dissolução. Já nos Capítulos 5, 6 e 7 encontram-se os resultados e discussões. Por fim o Capítulo 8 relatam-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Os conceitos relevantes sobre métodos de lavras subterrâneas e estocagem de gás, a saber, métodos de câmaras e pilares e por dissolução, definição, formação, ocorrência e importância no cenário brasileiro e mundial foram apresentadas, de maneira sucinta no Capítulo 2.

No Capítulo 3 foi elaborada de forma sucinta uma discussão sobre os principais aspectos da técnica de fragmentação, do fenômeno da fluência para evaporitos e do modelo de dano. Foram apresentados os princípios básicos do modelo de dano à tração, modelos de fluência de duplo deformação e modelo LUBBY 2.

Aspectos gerais da mina Taquari Vassouras são descritos no decorrer do Capítulo 4, a saber, breve histórico, estudos dos parâmetros laboratoriais e medidos “*in-situ*” no Painel D1, estudos do Painel I5 e estudos de queda de blocos laterais.

O Capítulo 5 foi descrito de forma sucinta a metodologia empregada nas simulações numéricas, logo após foi simulado numericamente o ensaio triaxial de fluência, validando o modelo de fluência de duplo deformação. Ainda encontra-se nesse capítulo resultados e discussões do Painel D1, fazendo comparações com os dados de convergência medidos “*in-situ*”, no painel I5, com estudos de subsidência e influxo de água na mina, e por fim a simulação de queda de blocos laterais, aplicando o modelo de dano à tração aliado ao de fluência. No Capítulo 6 foi simulado um pilar 3D. No decorrer do Capítulo 7 foi discutido uma possível estocagem de gás em minas por dissolução em uma halita utilizando ciclos de pressão dentro da cavidade.

As conclusões obtidas a partir da análise dos resultados estão reunidas no capítulo 8. Também foram sugeridas algumas diretrizes para futuras investigações com vistas à continuidade e extensão do modelo.

2 ASPECTOS GERAIS DA MINERAÇÃO E ESTOCAGEM EM MINAS DE EVAPORITOS

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

2.1 MINERAÇÕES DOS EVAPORITOS

A produção dos sais solúveis ocorreu para o desenvolvimento da civilização humana. A halita era produzida apenas por evaporação solar da água do mar, nas salinas costeiras, e o potássio, das cinzas de várias plantas (do inglês *pot-ash* = cinza em vaso). A produção da halita por mineração subterrânea remonta aos tempos medievais.

No século XIII, já existiam minas operando na Alemanha, na Hungria e na França. A mineração de potássio (silvinita) começou no século passado, com a finalidade de abastecer a indústria química da Alemanha, e expandiu-se para outros países. Os métodos de mineração convencional (sem dissolução) foram desenvolvidos na Bacia de Zechstein na Alemanha, onde a silvinita ocorre em camadas de 1 a 5 metros de espessura, confinadas entre sequências espessas de halita (100 a 500 metros), altamente perturbadas, formando anticlinais com mergulhos fortes. As minas eram lavradas em camadas e apresentavam mergulhos variáveis (semelhante aos de Taquari-Vassouras) (FONTES, 2003; FONTES & PINTO, 2004). A operação é economicamente viável devida à facilidade de se escavar e deixar túneis largos e estáveis nas halitas soto e sobrepostas. Entretanto, nas minas da Alemanha, o tectonismo intenso foi um dos principais fatores limitantes da mineração de silvinitas.

As minas de Saskatchewan, no Canadá, formam o maior depósito de potássio conhecido atualmente no mundo e têm sido um grande desafio no seu aproveitamento econômico. Situado a aproximadamente 1250m de profundidade, o aproveitamento econômico desse depósito apresenta grandes dificuldades relacionadas às características peculiares do comportamento mecânico desse minério, associadas às altas tensões existentes nesta

profundidade. Foram realizados vários estudos em busca de soluções que tornassem viável a mineração subterrânea na região (FONTES, 2003; FONTES & PINTO, 2004).

Nos anos 60, nove minas subterrâneas foram abertas, representando um investimento inicial de mais de um bilhão de dólares. Inicialmente, o método de lavra utilizado em todas as minas foi o método de câmaras e pilares convencional. Devido à grande profundidade do depósito, acreditou-se que deveriam ser utilizados pilares de grandes dimensões e câmaras estreitas para garantir a segurança dos painéis. Com o início do desenvolvimento e da lavra, surgiram os primeiros problemas relacionados à estabilidade das escavações. Aconteceram vários problemas como soerguimento de piso, ruptura de teto, entre outros. Com o objetivo de melhorar as condições de estabilidade das escavações nessas minas, Serata & Schultz (1989) realizou vários estudos em praticamente todas as minas de Saskatchewan. Como resultado destes estudos, Serata & Schultz (1989) propôs a utilização de um método de lavra diferente, denominado alívio de tensão.

Além do problema de instabilidade encontrado a grandes profundidades, existe outro muito frequente e importante relacionado à mineração de potássio: a presença de aquíferos. Como os evaporitos são rochas de alta solubilidade, é imprescindível que a água das formações vizinhas não atinja o horizonte de mineração.

Das nove minas situadas na região de Saskatchewan, seis tiveram problemas com infiltração de água. Em alguns casos, como o da mina de Patience Lake, o volume de água foi tão grande que provocou o encerramento das atividades por um longo período. Posteriormente, esta mina foi reaberta utilizando o método de mineração por dissolução. Durante a operação de aprofundamento do poço da mina de Unity, a escavação foi inundada por água e areia. Após nove anos de luta contra o fluxo de água, o poço foi selado e abandonado (PINTO,1995).

Para evitar as infiltrações de água nas aberturas escavadas na região de Saskatchewan, foram utilizadas várias técnicas, como, por exemplo, o congelamento da água das formações vizinhas, *plugs* de concreto nos locais de infiltrações, entre outras. As mesmas técnicas foram utilizadas durante a escavação dos poços I e II da Mina de

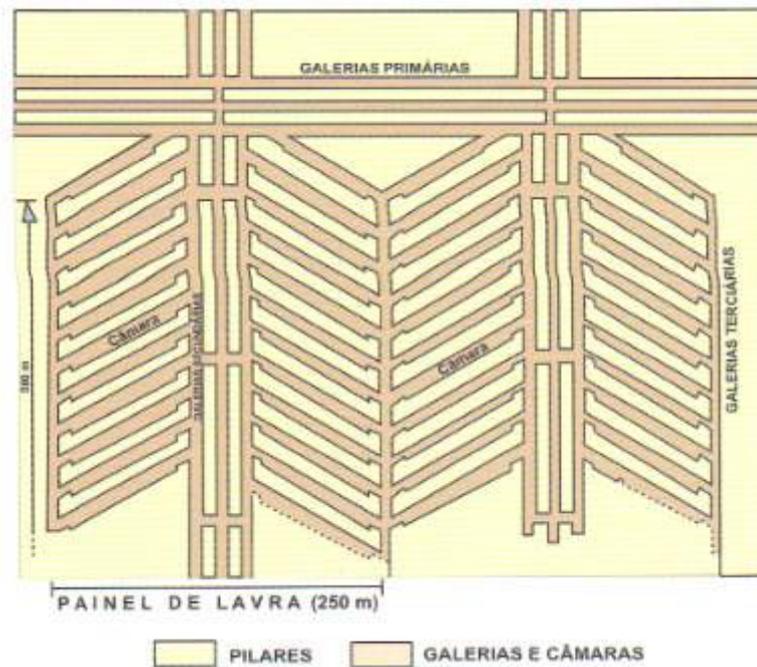
Boulby (MOHRIAK *et al.*, 2008; PINTO, 1995), localizada no nordeste da Inglaterra.

2.1.1 Métodos de Lavra Subterrânea mais Empregada em Evaporitos

A maior parte do potássio produzido atualmente no mundo é lavrada em minas subterrâneas. Os métodos de lavra mais utilizados são: câmaras e pilares (*room and pillar*) e suas variações, corte e enchimento (*cut and fill*) e mineração por dissolução, dentre outros. Existem muitas variações de métodos de lavra com objetivo de adequá-los às peculiaridades dos depósitos minerais. Mais recentemente, o uso intensivo de enchimento (*pastefill, rockfill, backfill*) tem sido apresentado como uma alternativa à viabilidade de vários projetos seja pela recuperação de pilares, seja pela disposição de estéreis e rejeitos.

De acordo com Andrade Júnior (1994), o princípio básico do método de câmaras e pilares é a escavação de galerias com grandes seções (câmaras ou salões), deixando-se parte do minério como suporte natural (pilares), que serve como estruturas de sustentação e estabilização do maciço rochoso, permitindo, assim, a lavra do minério com o nível aceitável de segurança e produtividade, principalmente com o advento dos mineradores contínuos nas rochas brandas. O esquema de operação de lavra mais utilizado em lavras convencionais é o de escama de peixe (Figura 2.1). Fatores geomecânicos como estabilidade do teto e levantamento do piso, fatores geológicos (espessura de minério, mergulho da camada) e do *lay-out*, determinam as dimensões das câmaras e dos pilares.

Figura 2.1 – Esquema de lavra convencional tipo escama de peixe.



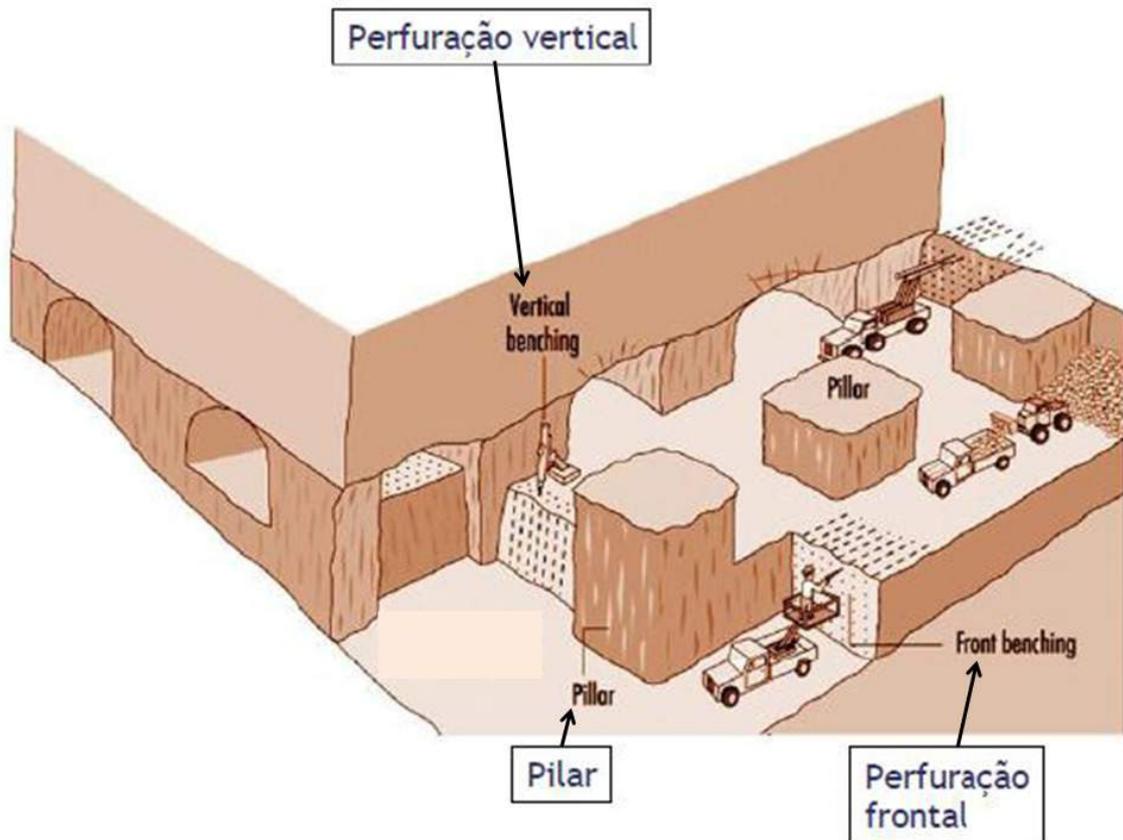
Fonte: Mohriak *et al.*, (2008).

Os pilares são deixados segundo um padrão regular, podendo ser circulares, quadrados ou retangulares. Atualmente, já existem algumas minas que recuperam um percentual razoável dos pilares, normalmente com lavra em recuo, sendo uma tendência da mineração o uso de enchimentos. Este método se aplica a corpos de minérios horizontais ou ligeiramente inclinados (mergulho inferior a 30°). Para aplicação do método de câmaras e pilares, o minério e as rochas encaixantes devem ser relativamente competentes. Por suas características, o método de câmaras e pilares apresenta-se como a opção natural para a lavra de corpos tabulares. Este método, por sua vez, é utilizado para a exploração de depósitos de origem sedimentar tais como carvão, evaporitos, alguns sulfetos etc.

De acordo com os equipamentos utilizados e as características de sua aplicação, o método de câmaras e pilares pode ser dividido em dois grupos (CRUZ, 2003). Um deles é o de lavra convencional, que utiliza os equipamentos habituais de lavra subterrânea, tais como, jumbos e caminhão rebaixado. O ciclo de produção (perfuração, desmonte, carregamento/transporte, apoio e infraestrutura) é definido de acordo com a necessidade de produção da mina (Figura 2.2) e o outro grupo consiste na lavra contínua, que utiliza os mineradores contínuos e possui um alto nível de produtividade. Nesse método o uso

de transportadores de correia é mais comum fazendo o transporte do material desmontado com maior eficiência, volume e rapidez.

Figura 2.2 – Arranjo típico da lavra por câmaras e pilares.



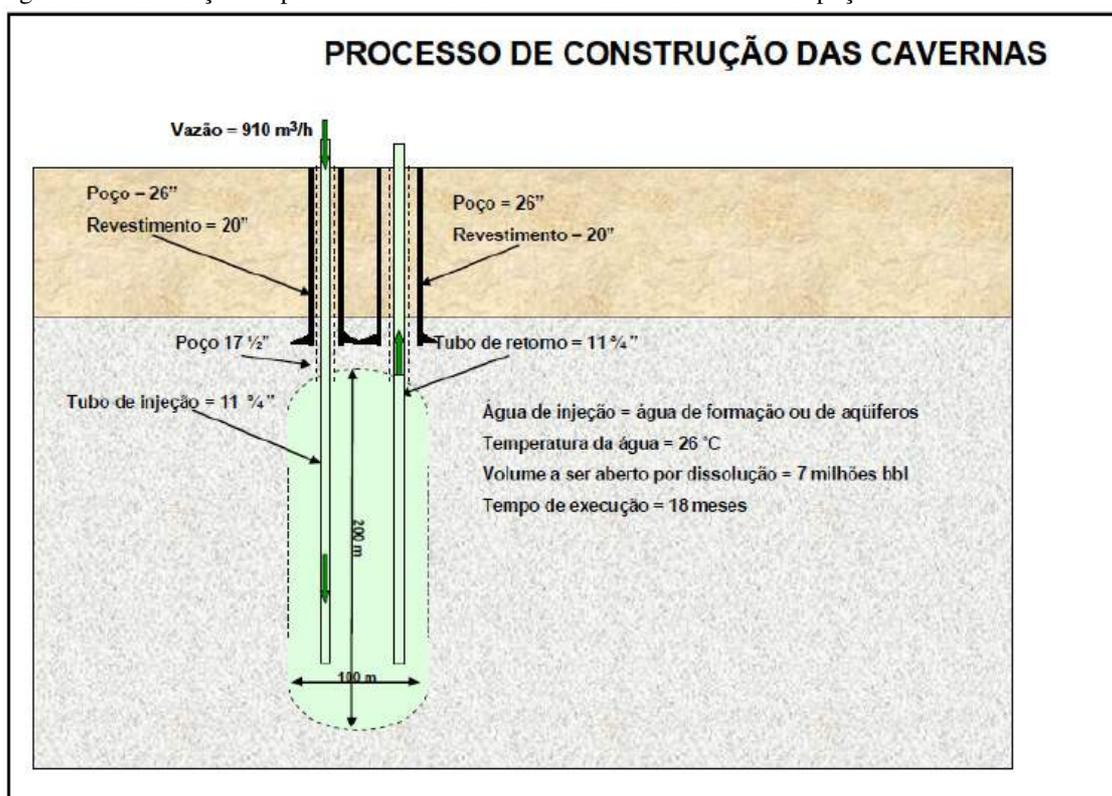
Fonte: Adaptada de Hustrulid & Bullock (2001).

No que concerne ao método de mineração por dissolução, sabe-se que no Brasil são utilizados os métodos de dissolução subterrânea na extração de halita das áreas de Maceió (Bacia de Alagoas) e na Ilha de Matarandiba (Bacia do Recôncavo). Nos sais da fase Paripueira, que ocorrem na sub-bacia evaporítica de Maceió, as camadas mineralizadas em halita são lavradas mediante a técnica de extração por dissolução subterrânea, em decorrência da grande profundidade dos sais existentes nessa área. Essa técnica permite a mineração de jazidas a grandes profundidades, por meio de poços tubulares, com redução substancial dos custos de produção. Com este processo, elimina-se o inconveniente da geração de rejeitos e pode-se obter um produto final de elevada pureza (MOHRIAK *et al.*, 2008).

A mineração por dissolução pode ser executada de duas maneiras: por múltiplos poços

ou por poços concêntricos (SILVA, 2001). No processo de múltiplos poços, a água é bombeada até a formação mineral por poços de injeção e a solução é retornada à superfície por poços coletores adjacentes. O tamanho e o espaçamento entre os poços e o fluxo de água injetado dependem da solubilidade do mineral, da sua profundidade e da sua permeabilidade. Alguns processos substituem a água fria por água aquecida, ou mesmo pelo vapor d'água, assegurando uma dissolução mais eficaz dos minerais (Figura 2.3).

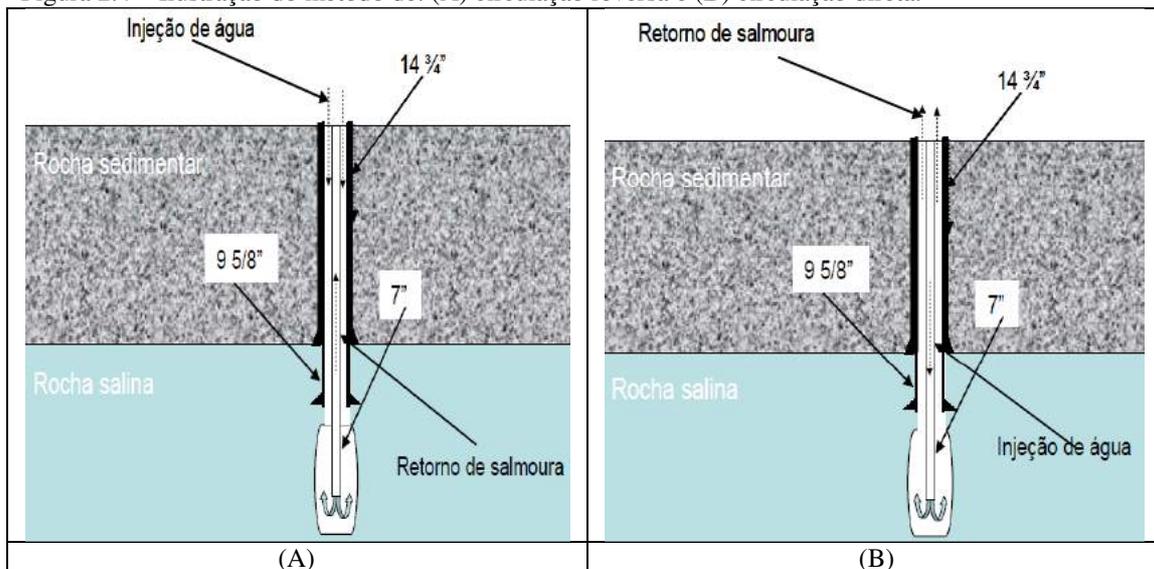
Figura 2.3 – Ilustração do processo de abertura das cavernas através de dois poços



Fonte: Vassalo (2013) Apud Costa *et al.* (2012).

O processo de poços concêntricos tem sido usado na mineração de enxofre. Este processo pode ocorrer através de dois métodos: o método de dissolução por circulação reversa, através do qual a água doce é injetada pelo anular e a salmoura retorna pelo tubo central (Figura 2.4 A), e o método de dissolução por circulação direta, onde a água doce é injetada pelo tubo central e a salmoura retorna pelo anular (Figura 2.4 B).

Figura 2.4 – Ilustração do método de: (A) circulação reversa e (B) circulação direta.



Fonte: Adaptado de Vassalo (2013) Apud Costa *et al.* (2012).

2.2 ESTOCAGENS EM MINAS DE SAL

2.2.1 Métodos de Corte e Enchimento (*Cut and Fill*)

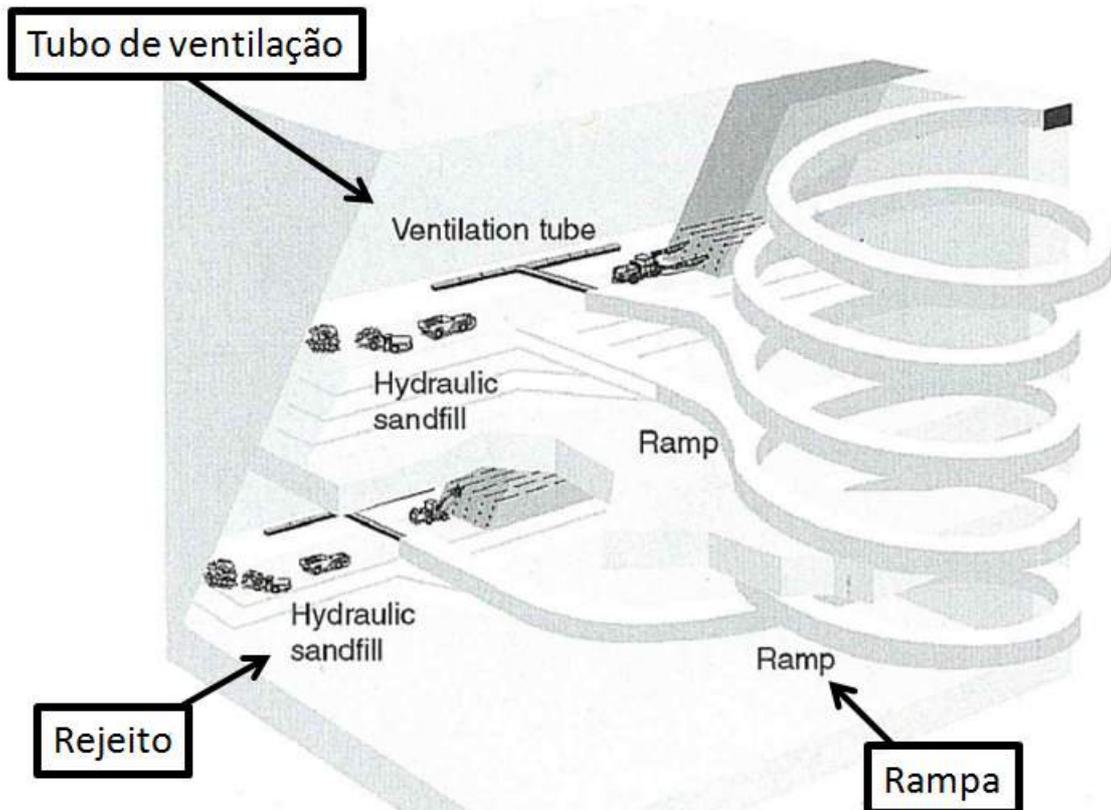
Atualmente, na mineração subterrânea, existe uma tendência cada vez maior de utilização de métodos de enchimento dos painéis já exauridos. Tal perspectiva é ocasionada por diversos motivos que podem ser: a necessidade de estabilização do maciço, a disposição de resíduos sólidos perigosos (material radioativo (Figura 2.5), por exemplo) ou mesmo a disposição de rejeitos oriundos do próprio processo de beneficiamento do minério. Os métodos mais comuns em uso são (MORRISON, 2000): do tipo enchimento com rocha (*rockfill*), subdividida em enchimento hidráulico e disposição de rejeito na forma de pasta (Figura 2.6).

Figura 2.5 Estocagem de material radioativo.



Fonte: Hansen and Leigh (2011).

Figura 2.6 Arranjo típico da lavra por corte e enchimento.



Fonte: Adaptada de Hustrulid & Bullock (2001)

2.2.2 Estocagem em Minas de Dissolução

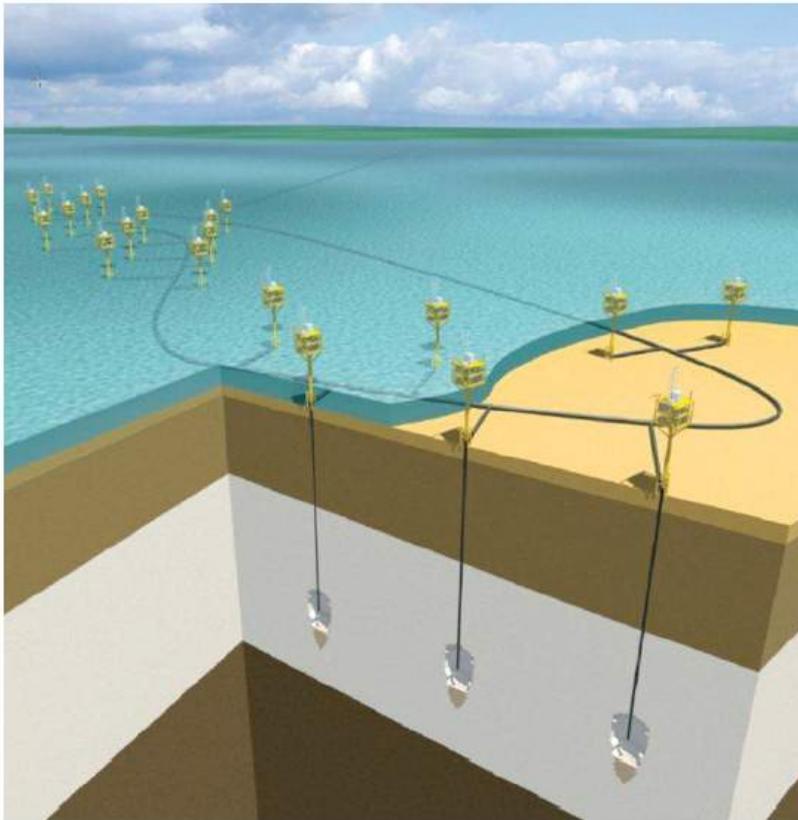
O consumo e a produção de combustíveis gasosos e líquidos exigem medidas estratégicas de armazenamento de petróleo cru, gás e álcool, seja para garantir o controle das variações do mercado, seja por se tratar de um problema de segurança nacional. A estocagem de gás e de petróleo é necessária, uma vez que as reservas desses bens da natureza são mal distribuídas na crosta e não são renováveis. Além disso, sua produção é ditada pela geologia, e seu consumo é de relação geográfica e, por vezes, sazonal, fazendo com que seja necessário realizar estoques de segurança.

O problema de estocagem do gás e petróleo cru é antigo, e uma solução é geológica, pois é possível usar espaços naturais ou artificiais, conforme tem sido feito nos Estados Unidos desde 1915 (VASSALO, 2013). Os locais utilizados para estocagem podem ser jazidas petrolíferas exauridas, aquíferos confinados e delimitados por camadas selantes, ou em cavernas naturais e artificiais. Nestas, a estocagem é feita em minas exauridas ou abandonadas; em cavernas abertas em camadas salinas ou em maciços rochosos preparados para armazenamento de gás natural, gás liquefeito de petróleo GLP ou petróleo cru.

Na atualidade, o problema de estocagem aumentou com as descobertas de petróleo e gás natural nas camadas submarinas do pós e pré-sal. Elas trazem consigo uma previsão de extração de grandes volumes e embarques de óleo cru e gás, exigindo mega depósitos. Porém, é preciso esclarecer que ainda não há solução adequada para realizar essa estocagem. O método tradicional, feito em tanques de aço a céu aberto, é caro e perigoso. Já os métodos de uso de reservatórios exauridos de gás ou óleo têm sido estudados, mas sem resultados conclusivos.

Quanto às cavernas em depósitos de sal por dissolução, por exemplo, estas necessitam ser estudadas e entendidas quanto ao seu comportamento mecânico quando empregadas para o armazenamento de gás, especialmente em casos onde a formação salina é naturalmente fraturada (Barajas & Civan, 2014). A Figura 2.7 apresenta uma ilustração das cavernas do projeto Gateway, que é o primeiro a ser executado offshore.

Figura 2.7 – Estocagem Offshore de Gás Natural – 24 cavernas no mar Irlandês.

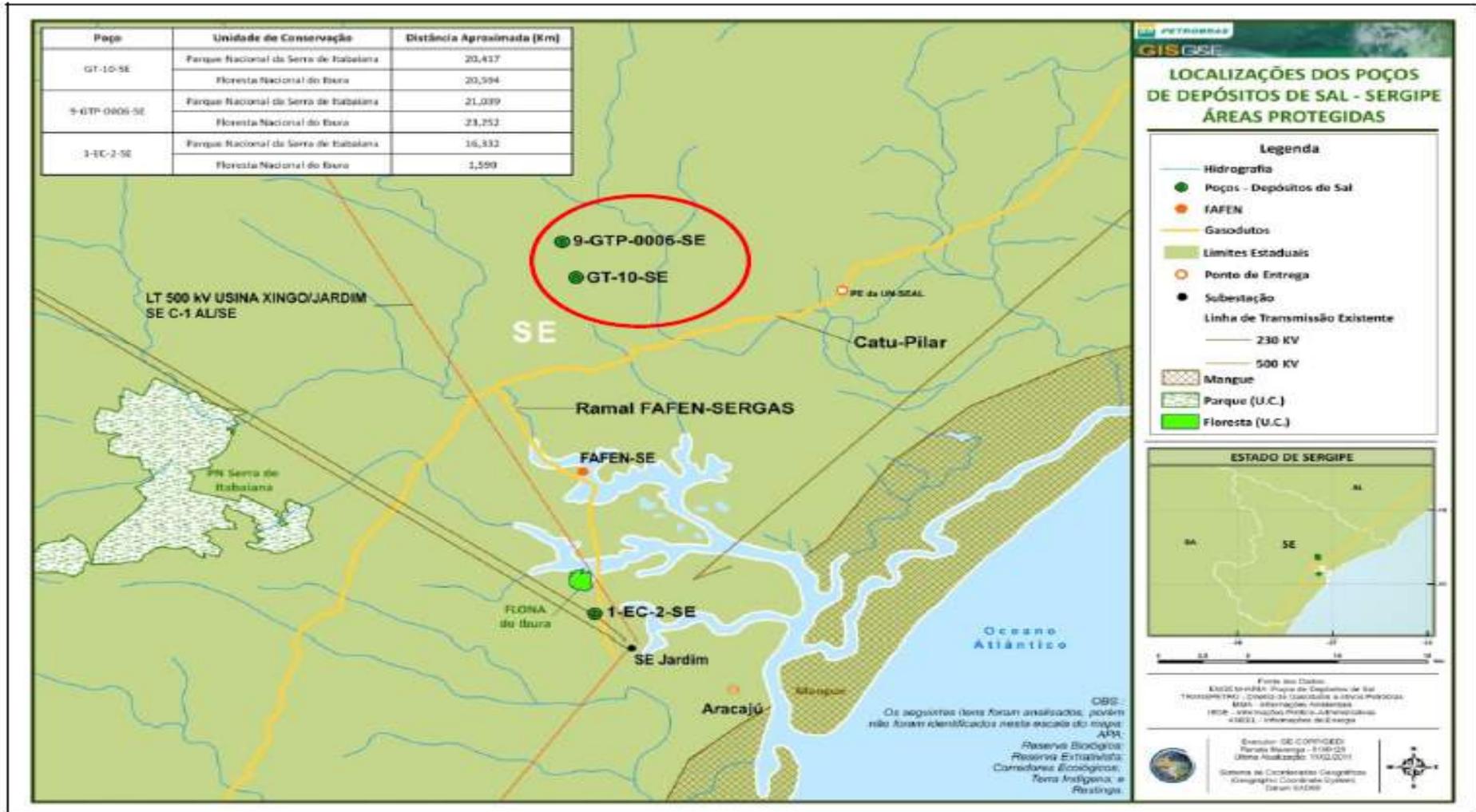


Fonte: Vassalo (2013) Apud *Gateaw Storage Company Limited* (2010).

No Brasil, trabalhos pioneiros, como o de Goraieb *et al.* (2005), discute possibilidades de estocagem de gás natural em estruturas geológicas brasileiras. Mas somente em trabalhos mais recentes, como, por exemplo, o de Vassalo *et al.* (2014), Vassalo (2013), Costa *et al.* (2012) e Costa *et al.* (2011), discute-se, de forma técnico/econômica, porém ainda incipiente, o uso estratégico de espaço subterrâneo para estocagem de gás em cavernas abertas por dissolução de rochas salinas.

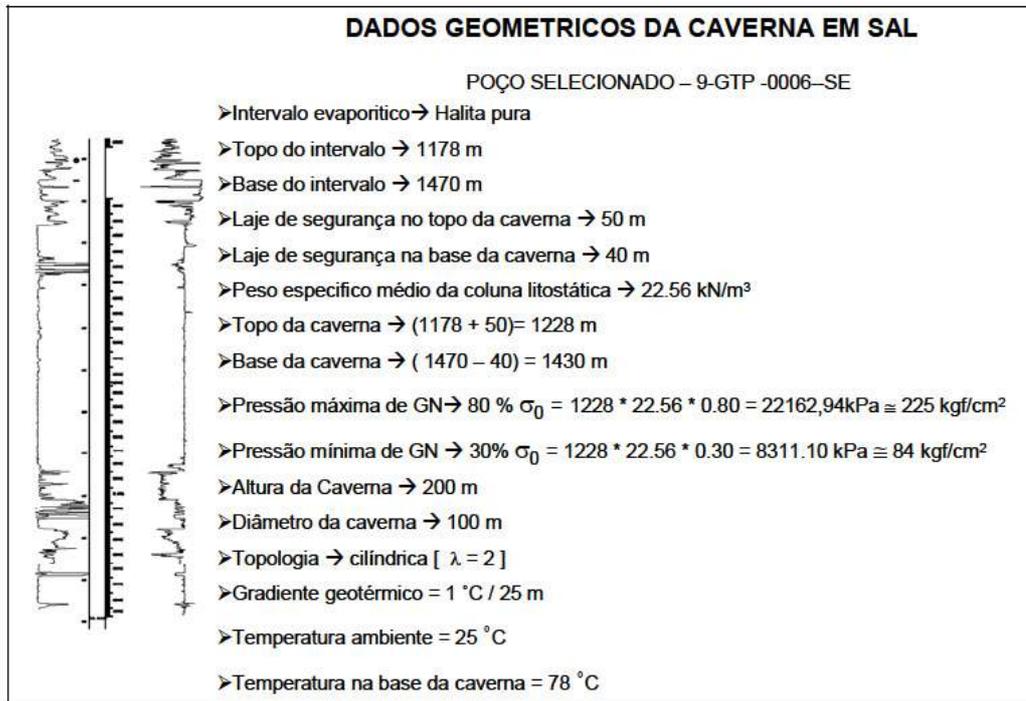
De acordo com Vassalo (2013), na Figura 2.8 apresenta-se um mapa com a localização do poço 9-GTP-0006-SE, de um campo de evaporitos, localizado em Sergipe, que foi utilizado como referência no dimensionamento geomecânico de cavernas para estocagem de gás natural e, na Figura 2.9, apresenta-se o dimensionamento dessas cavidades. Já na Figura 2.10 apresenta-se a seção da cavidade e litológica utilizada por Costa *et al.* (2012) em suas simulações computacionais.

Figura 2.8 – Campo de estocagem de gás natural em Sergipe.



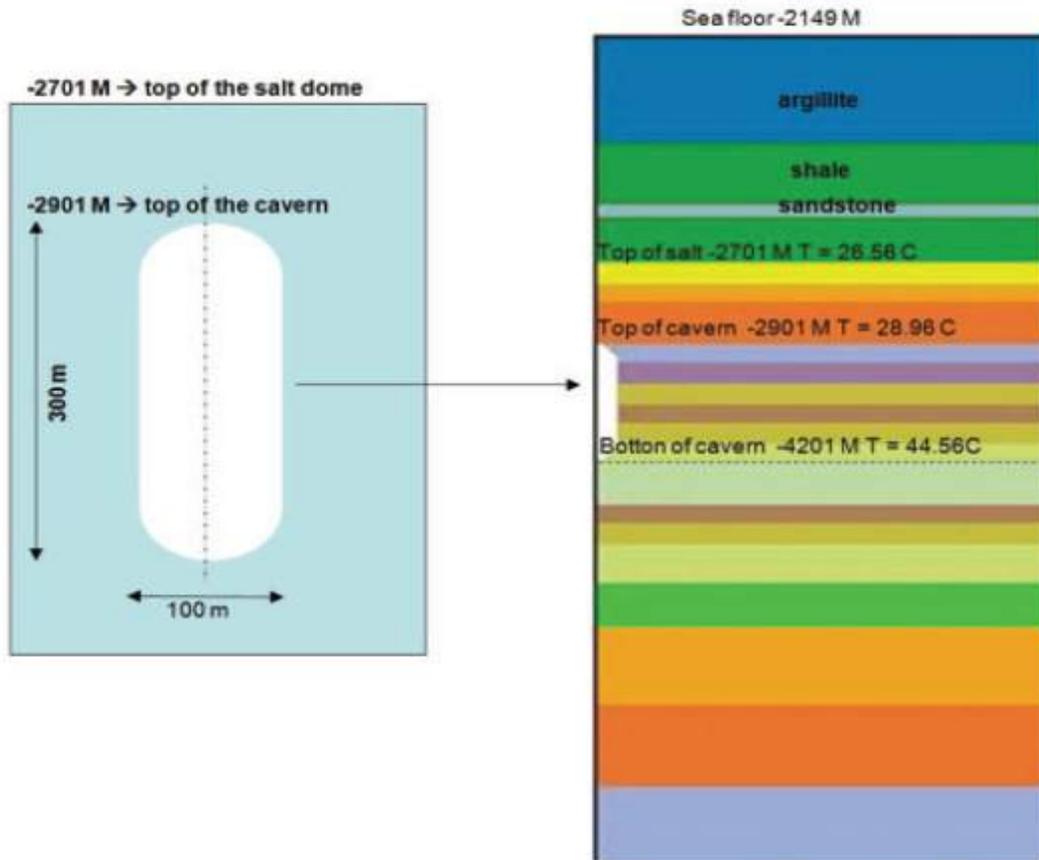
Fonte: Vassalo (2013) Apud Costa *et al.* (2011).

Figura 2.9 – Dimensionamento das cavernas



Fonte: Vassalo (2013) Apud Costa *et al.* (2011)

Figura 2.10 – Seção geométrica da cavidade e litológica.



Fonte: Costa *et al.* (2012).

3 FRATURAMENTO EM EVAPORITOS

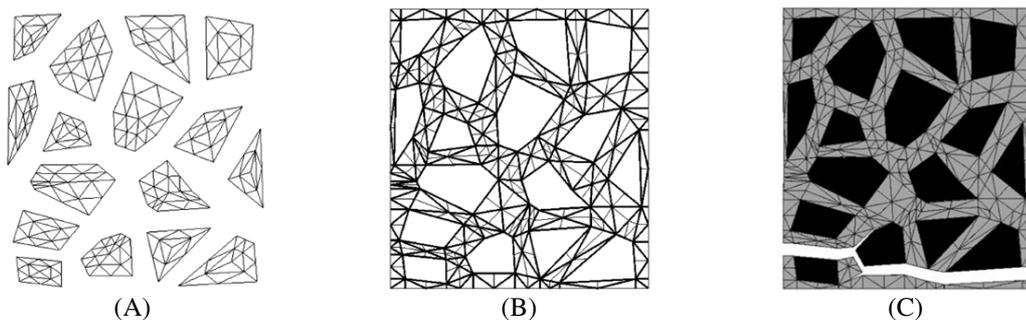
“Adoro a poesia e gosto de descascá-la até a fratura exposta da palavra.”

(**Maria de Queiroz**)

3.1 TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO

Nesta seção apresenta-se a técnica de fragmentação, a qual usa os elementos de interface para reproduzir os efeitos do processo de formação de fraturas. De modo geral, a técnica de fragmentação, usada de maneira similar por Camacho & Ortiz (1996), López *et al.* (2007a,b) e Manzoli *et al.* (2012), entre outros, para estudar o fraturamento em estruturas de concreto, consiste na inserção de elementos finitos especiais de interface entre os elementos regulares de uma malha de elementos finitos, de modo que se reproduza o comportamento da interação entre os diferentes componentes da estrutura. Em López *et al.* (2007a), por exemplo, nos modelos dos espécimes de concreto estudados, os elementos regulares da malha representam os agregados graúdos e a interface representa a matriz constituída por argamassa e agregados menores (Figura 3.1).

Figura 3.1- Espécime de concreto; (A) Discretização dos elementos regulares que representam os agregados; (B) Interface representando a matriz do espécime; (C) Formação da fratura no espécime após a modelagem.

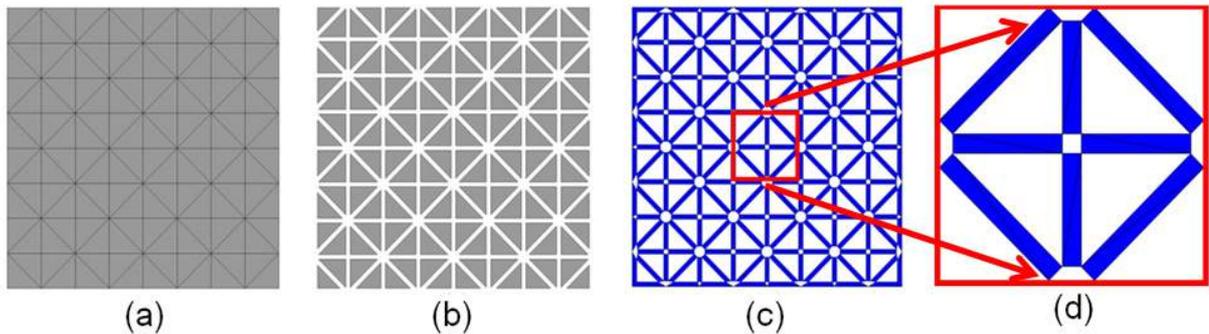


Fonte: (LÓPEZ *et al.*, 2007a).

Neste trabalho, emprega-se, para o estudo de fraturamento em rochas salinas, uma metodologia de fragmentação descrita em Manzoli *et al.* (2012), que inicialmente foi desenvolvida para o estudo da propagação de fraturas em estruturas de concreto armado, e adaptada por Seixas (2015) para o estudo de fraturamento hidráulico em maciços. O tipo de elemento usado para compor a interface é o triângulo linear com alta razão de aspecto, cuja cinemática é comprovadamente equiparada à cinemática da aproximação de descontinuidades

fortes em modelagens de problemas mecânicos. A Figura 3.2 esquematiza os passos da fragmentação de uma malha convencional de elementos finitos.

Figura 3.2 - Desenhos (não em escala) ilustrando os passos da técnica de fragmentação: (a) Malha convencional de elementos finitos; (b) Espaçamento entre elementos regulares onde serão inseridos elementos de interface; (c) Inserção dos elementos com alta razão de aspecto (discretização da região de interface); e (d) Detalhe da discretização da região de interface.

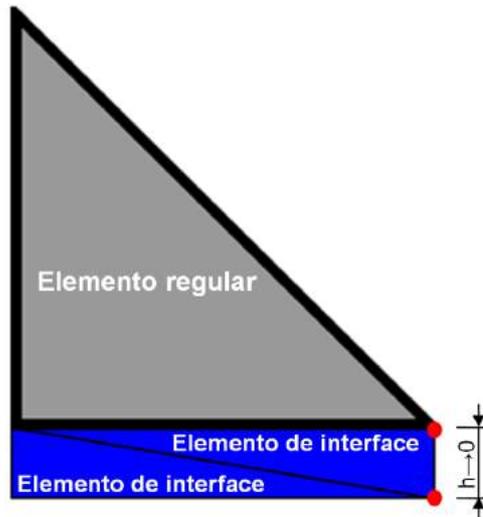


Fonte: (SÁNCHEZ *et al.*, 2014).

A menor dimensão dos elementos especiais com elevada razão de aspecto corresponde à espessura da região de interface (h), como mostra a Figura 3.3. O fundamento da técnica de fragmentação é usar uma espessura bem pequena, pois, à medida que h diminui e a razão de aspecto aumenta, a cinemática dos elementos de interface se torna similar à cinemática da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes, sendo a estrutura do campo de deformações do elemento finito triangular (elemento de interface) similar à do regime de descontinuidades fortes nos pontos dentro da banda de localização (SEIXAS, 2015).

Em resumo, a malha fragmentada é composta de elementos finitos regulares representando o contínuo ou o material não fraturado, e de elementos de interface que representam as descontinuidades ou os caminhos possíveis para a abertura de fraturas no meio.

Figura 3.3 - Detalhe do posicionamento dos elementos de interface entre elementos regulares da malha de elemento finitos; espessura da região de interface.



Fonte: (SEIXAS, 2015).

Neste trabalho, os elementos regulares têm comportamento assumidamente de fluência, e o comportamento dos elementos da região de interface é regido por um modelo constitutivo inelástico capaz de simular os fenômenos envolvidos no processo de degradação do material até a formação da fratura, como o modelo de dano.

Trata-se de uma contribuição original onde se mostrou que esta técnica de fragmentação é viável para reproduzir diferentes comportamentos em um mesmo material (exemplo: comportamentos de tração e fluência no sal) de maneira desacoplada aplicando os modelos constitutivos adequados para cada subdomínio discretizado do meio (fratura e contínuo).

3.2 MODELO CONSTITUTIVO DE DANO À TRAÇÃO

Os modelos constitutivos de dano são usados como um importante elemento na simulação da degradação mecânica de materiais *quasi*-frágeis, tais como concreto e rochas. Nesta seção, será apresentado o modelo constitutivo de dano à tração compatível com a ACDF (Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes) (SEIXAS, 2015; BESERRA, 2015; OLIVELLA *et al.*, 1994; OLIVER *et al.*, 2002; OLIVER *et al.*, 2004; Oller, 2001) usado neste trabalho para representar os fenômenos degradativos que precedem a formação de fraturas, na chamada zona de processo de fratura.

Portanto, o dano pode ser definido como uma grandeza física que avalia o nível de integridade de um corpo. Como no presente trabalho admite-se o modelo de dano isotrópico, segundo o qual o material se degrada igualmente em todas as direções, d é considerado uma entidade física escalar. Para o caso unidimensional e homogêneo, o dano é calculado com base na redução da área da seção transversal devido às micro-fissuras e vazios existentes. Logo, define-se a variável interna de dano como:

$$d = \frac{A_D}{A} \quad (3.1)$$

sendo

$$\bar{A} = A - A_D \quad (3.2)$$

e reescrevendo a Equação 3.1 temos

$$d = 1 - \frac{\bar{A}}{A} \quad ; \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (3.3)$$

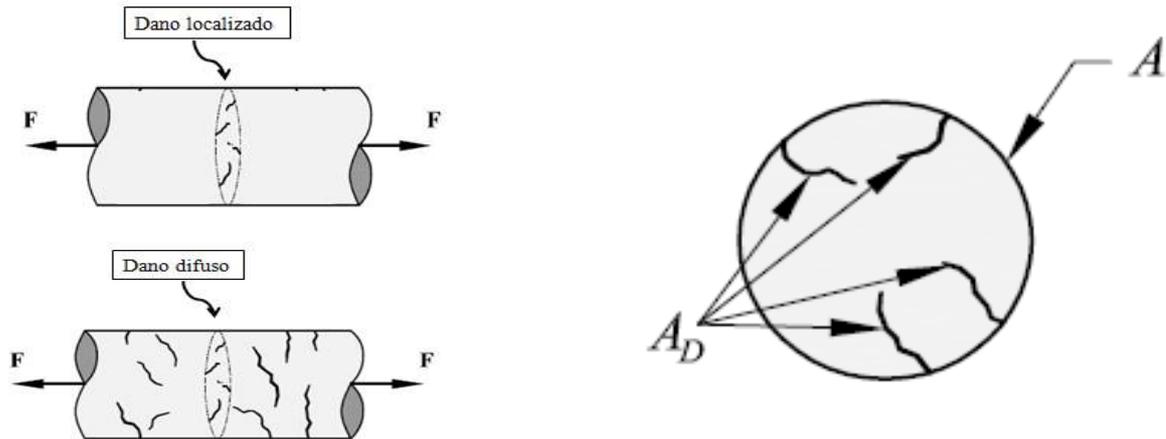
onde A , A_D e \bar{A} são as áreas da total seção transversal, dos defeitos e efetiva respectivamente. Então, se d for igual a zero, o corpo está sem defeito com A_D igual a zero e, caso d seja igual a um o corpo está degradado completamente com A_D igual a A (Figura 3.4).

Ressalte-se que o meio contínuo não pode mais retornar ao seu estado íntegro após sofrer degradação, ou seja, ele não pode ser reparado. Desse modo, a área degradada permanecerá neste estado podendo, inclusive, crescer, degradando ainda mais o material ao longo do tempo. Portanto, como a variação da área dos defeitos ao longo do tempo é $\dot{A}_D \geq 0$, obtém-se:

$$\dot{d} = \frac{\dot{A}_D}{A} \geq 0 \tag{3.4}$$

onde \dot{d} é a taxa de variação da variável de dano.

Figura 3.4 - Secções transversais degradada e nominal.



Fonte: Adaptado de Maedo (2015) apud Adaptado de Lemaitre (1983).

Já a tensão efetiva $\bar{\sigma}$ é aquela associada à área que efetivamente resiste aos esforços, enquanto a tensão aparente (nominal) σ expressa a força que está sendo aplicada sobre a área total da seção transversal. Desse modo,

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.5}$$

e

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\bar{A}} \tag{3.6}$$

Se fizermos $\sigma/\bar{\sigma}$, pode-se escrever a tensão aparente em função da tensão efetiva e das variáveis de dano. Logo, com base nas Eqs (3.3), (3.5) e (3.6), obtém-se

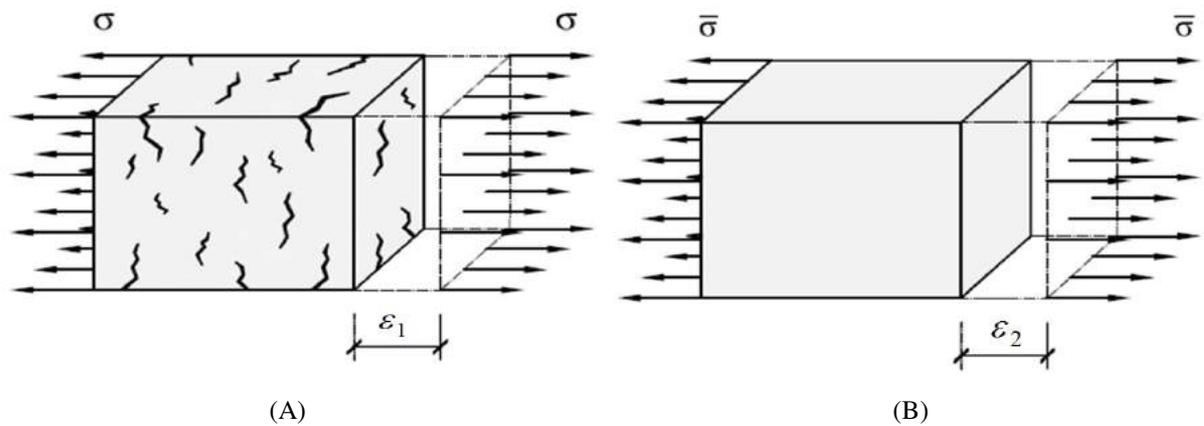
$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = \frac{\bar{A}}{A} = 1 - d \Rightarrow \sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \tag{3.7}$$

A Equação 3.7 descreve a relação entre as tensões aparente e efetiva com base na variável de dano. Assim, quando o material ainda não sofre dano, $d = 0 \Rightarrow \sigma = \bar{\sigma}$. Por outro lado,

$d = 1 \Rightarrow \bar{\sigma} \rightarrow \infty$, ou seja, para o material completamente degradado, a tensão efetiva tende ao infinito.

No que concerne à hipótese da equivalência de deformações (LEMAITRE, 1983) a deformação do material danificado solicitado pela tensão aparente (σ) é equivalente à deformação do material íntegro submetido à tensão efetiva ($\bar{\sigma}$). Com base na hipótese anteriormente exposta e na Figura 3.5, pode-se escrever:

Figura 3.5 Esquema ilustrativo da hipótese da deformação equivalente: (A) Espaço Físico e (B) Espaço efetivo.



Fonte: Adaptado de Oller, (2001).

$$\varepsilon_1 = \varepsilon = \frac{\sigma}{E_D} \tag{3.8}$$

e

$$\varepsilon_2 = \varepsilon = \frac{\bar{\sigma}}{E} \tag{3.9}$$

onde

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \Rightarrow \frac{\sigma}{E_D} = \frac{\bar{\sigma}}{E} \tag{3.10}$$

sendo ε_1 a deformação do material degradado, ε_2 a deformação do material íntegro, E o módulo de elasticidade intacto e E_D o módulo de Young degradado. Dessa forma, a partir da Equação 3.11 é possível estabelecer uma relação entre o módulo de Young íntegro e degradado. Assim,

$$E_D = (1 - d)E \tag{3.11}$$

Finalmente, a partir da Equação 3.11 pode-se reescrever as Eqs. (3.8) e (3.10) da seguinte forma:

$$\sigma = (E_D)\varepsilon_1 = (1 - d)E\varepsilon_1 \tag{3.12}$$

e

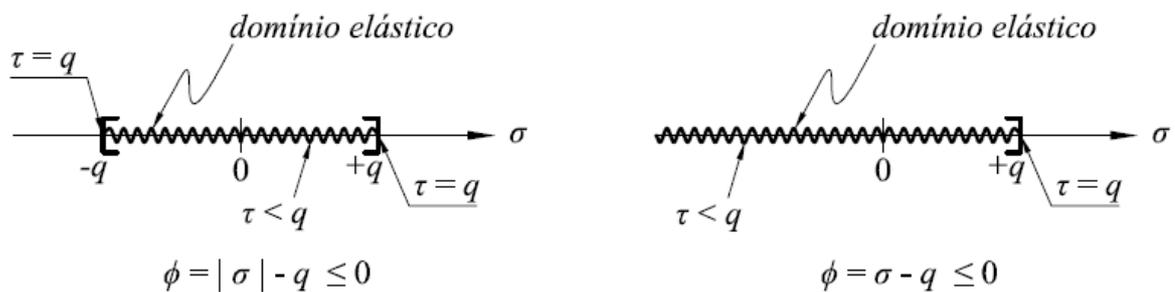
$$\bar{\sigma} = E\varepsilon_2 \tag{3.13}$$

e, ainda, para estabelecer as condições de carga, descarga e recarga, define-se o critério de dano,

$$\phi(\tau, q) = \tau(\sigma) - q \leq 0 \tag{3.14}$$

onde τ é a tensão equivalente que define a forma do domínio elástico. A variável q estabelece o limite de dano, controlando a dimensão do domínio elástico no espaço das tensões efetivas. Para o caso unidimensional, a relação entre a norma de σ e a variável q pode ser representada graficamente como mostra Figura 3.6. Estas representações são apenas exemplos, pois a adoção de uma determinada norma dependerá da análise realizada.

Figura 3.6 - Espaço de tensões aparentes para o problema 1D.



Fonte: Maedo (2015).

O critério de degradação pode ser reescrito no espaço de tensões efetivas da seguinte forma:

$$\bar{\phi}(\bar{\tau}, r) = \bar{\tau}(\bar{\sigma}) - r \leq 0 \tag{3.15}$$

sendo r a variável interna no domínio elástico no espaço de tensões efetivas expressa por:

$$r = \frac{q}{1-d} \tag{3.16}$$

A variável de dano pode ser expressa reorganizando a Equação (3.16). Desse modo:

$$d = d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r} \tag{3.17}$$

pertence ao intervalo $0 > d > 1$. As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram possíveis funções de evolução da variável interna $q(r)$, as quais definem a lei de endurecimento/ amolecimento(ou abrandamento) das tensões (lei linear ou lei exponencial).

A lei linear pode ser expressa por

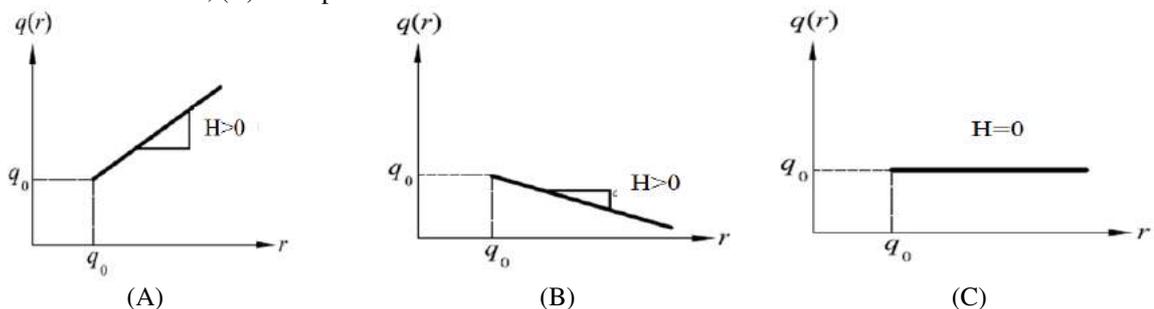
$$q(r) = q_0 + H(r - q_0) \tag{3.18}$$

onde a taxa de variação da lei linear é dada por:

$$\dot{q} = H \dot{r} \tag{3.19}$$

O parâmetro H é denominado módulo de abrandamento/endurecimento para a lei linear, e rege o comportamento da evolução do dano após o limite elástico linear (Figura 3.7).

Figura 3.7 Comportamentos distintos de endurecimento/abrandamento: (A) lei de endurecimento linear; (B) lei de abrandamento linear; (C) dano perfeito.



Fonte: Adaptado de Maedo (2015).

Já a lei exponencial pode ser expressa como

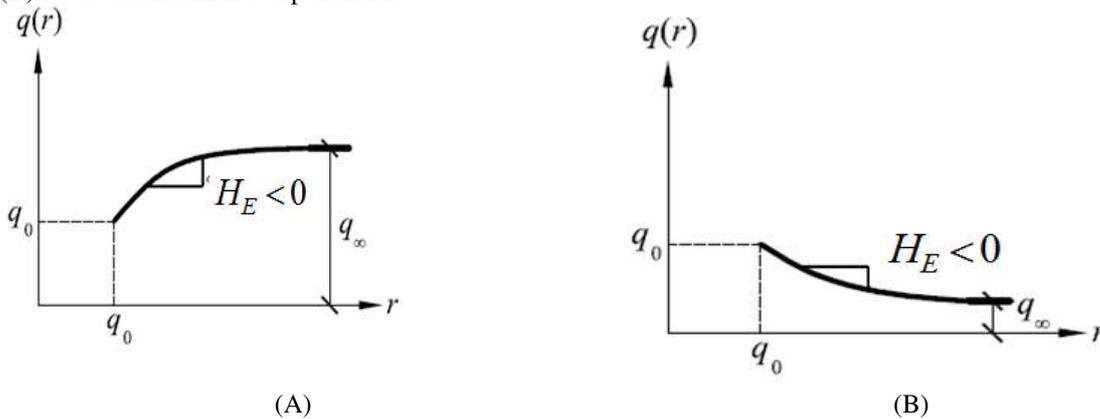
$$q(r) = q_0 \cdot e^{B\left(1 - \frac{r}{q_0}\right)}, \tag{3.20}$$

onde B é um parâmetro que controla a concavidade da lei exponencial e depende da energia de fratura do material. A taxa de variação da lei linear é dada por:

$$\dot{q} = \underbrace{-B \cdot e^{\frac{B}{q_0} \left(1 - \frac{r}{q_0}\right)}}_{H_E} \cdot r \Rightarrow \dot{q} = H_E \cdot r \quad (3.21)$$

O parâmetro H_E é denominado módulo de abrandamento/endurecimento para a lei exponencial e rege o comportamento da evolução do dano após o limite elástico linear (Figura 3.8).

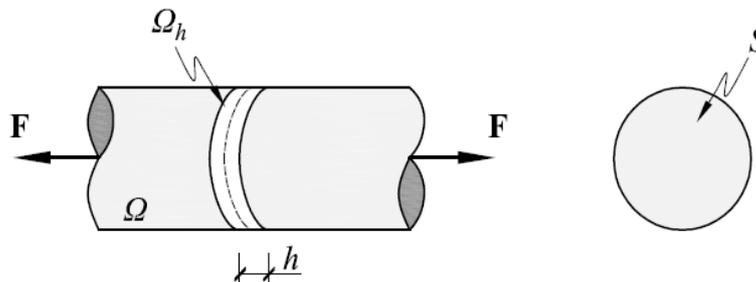
Figura 3.8 Comportamentos distintos de endurecimento/abrandamento: (A) lei de endurecimento exponencial; (B) lei de abrandamento exponencial.



Fonte: Adaptado de Maedo (2015).

Já para se definir o conceito de energia de fratura, considere-se um corpo sólido submetido a uma carga de tração monotônica crescente em regime inelástico (Figura 3.9).

Figura 3.9 Sólido submetido a uma carga de tração monotônica crescente.



Fonte: Maedo (2015).

Portanto, a energia de fratura é dada por:

$$G_f = \frac{h \cdot q_0^2}{EB} \tag{3.22}$$

onde G_f é a energia de fratura que representa a energia consumida na formação de uma unidade de área de fratura, e é uma propriedade intrínseca do material que pode ser caracterizada a partir das propriedades mecânicas q_0 (resistência à tração), B (parâmetro que controla a concavidade da lei exponencial) e E (tensor elástico de zero ordem). Já o termo h é a espessura da região de interface, definida na Seção 3.1. A Tabela 3.1 resume todas as equações constitutivas do modelo de dano à tração.

Tabela 3.1. Resumo das equações constitutivas do modelo de dano à tração para caso unidimensional.

| Modelo de Dano à tração | |
|-----------------------------------|---|
| Relação Constitutiva | $\sigma = (1-d)\bar{\sigma}, \text{ se } \bar{\sigma} > 0$ $\sigma = \bar{\sigma}, \text{ se } \bar{\sigma} \leq 0$ |
| Tensões efetivas | $\bar{\sigma} = E\varepsilon$ |
| Tensão equivalente | $\bar{\tau}(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}$ |
| Critério de dano | $\bar{\phi}(\bar{\tau}, r) = \bar{\tau}(\bar{\sigma}) - r \leq 0$ |
| Evolução da variável r | $r = \text{Max}[q_0, \bar{\tau}]$ |
| Evolução do dano | $d = d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r}, \quad d = [0,1]$ |
| Lei de endurecimento/amolecimento | $q(r) = q_0 + H(r - q_0) \text{ ou } q(r) = q_0 \cdot e^{B\left(1 - \frac{r}{q_0}\right)}$ |

Fonte: Adaptado de Maedo (2015) e Sánchez *et al.* (2014).

A resistência à tração, que pode ser obtida pelo ensaio de compressão diametral (Figura 3.10), foi calculada através da Equação 3.23 (POIATE, 2012):

$$q_0 = \left(\frac{2 \cdot F_r}{\pi \cdot L \cdot D} \right) \tag{3.23}$$

no qual:

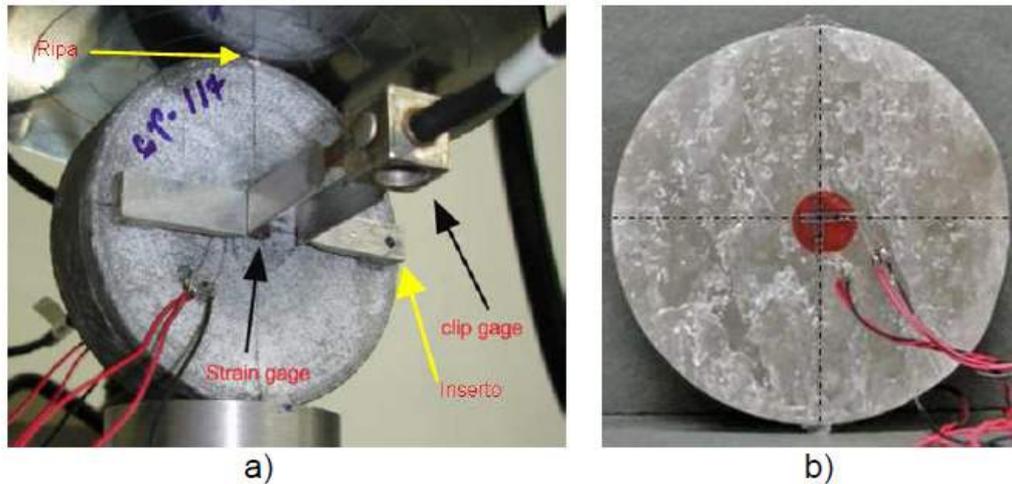
q_0 : resistência à tração (Nmm² ou MPa);

F_r : força de ruptura do corpo de prova (N);

L : espessura do corpo de prova (mm);

D : diâmetro do CP (mm).

Figura 3.10 – a) Corpo de prova de anidrita e b) halita instrumentados, preparados para ensaio de compressão diametral.

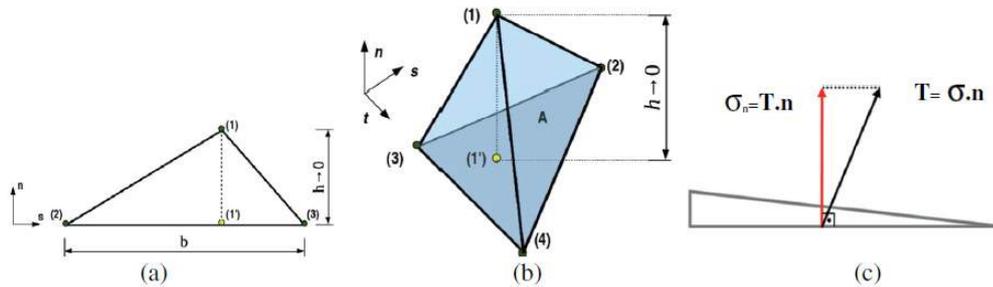


Fonte: Poiate (2012).

O modelo de dano apresentado pode ser utilizado para o estudo de problemas unidimensionais com aplicação de passos de deformação axial em um determinado ponto. Tal modelo pode ser generalizado para problemas de mais de uma dimensão de maneira relativamente simples. Contudo, evidentemente o estudo se torna mais complexo, envolvendo operações mais sofisticadas e critérios de dano mais elaborados, como, por exemplo, os critérios de Von Mises e de Rankine. Apesar disso, os procedimentos computacionais para problemas unidimensionais e multidimensionais são bastante semelhantes (BESERRA, 2015; SEIXAS, 2015). A Tabela 3.2 resume todas as equações constitutivas do modelo de dano à tração de formar tensorial.

Além do mais deve-se saber que no modelo de dano adotado nos estudos numéricos deste trabalho, o tensor de tensões é projetado na direção normal à superfície da fratura, resultando no vetor de tensões $\bar{\mathbf{T}}$ (*traction*), e a componente normal deste vetor, $\bar{\sigma}_n$, é utilizada na definição do critério de dano (ou critério de degradação). Na técnica de fragmentação, a direção normal é ortogonal à base do elemento de interface com elevada razão de aspecto (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Elementos finitos de interface com elevada razão de aspecto: (a) Elemento triangular; (b) elemento tetraédrico; e (c) Projeção do vetor de tensões na direção normal elemento de interface.



Fonte: Sánchez *et al.* (2014).

Uma vez alcançado o limite de dano, degradam-se todas as componentes do tensor de tensões efetivas. A lei constitutiva, na forma tensorial para este modelo, pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= (1 - d)\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \text{ se } \bar{\sigma}_n > 0 \\ \boldsymbol{\sigma} &= \bar{\boldsymbol{\sigma}}, \text{ se } \bar{\sigma}_n \leq 0 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Tabela 3.2. Resumo das equações constitutivas do modelo de dano à tração de forma tensorial.

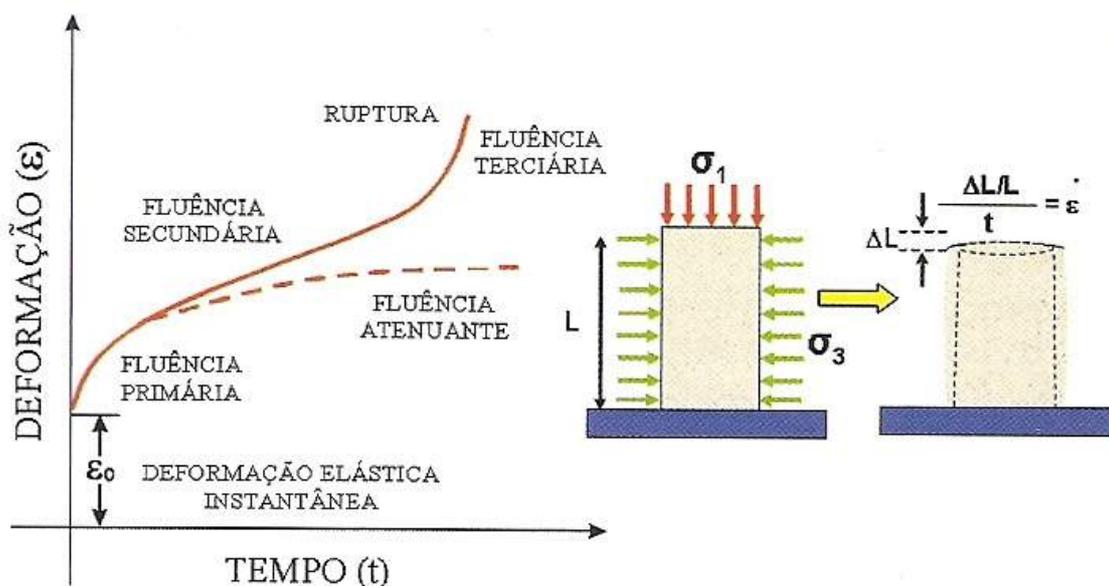
| | Modelo de Dano à tração |
|---------------------------------------|---|
| Relação Constitutiva | $\boldsymbol{\sigma} = (1 - d)\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \text{ se } \bar{\sigma}_n > 0$ $\boldsymbol{\sigma} = \bar{\boldsymbol{\sigma}}, \text{ se } \bar{\sigma}_n \leq 0$ |
| Tensões efetivas | $\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}$ |
| Tensão equivalente | $\bar{\tau}(\bar{\boldsymbol{\sigma}}) = \bar{\sigma}_n$ |
| Critério de dano | $\bar{\tau} - r \leq 0$ |
| Evolução da variável r | $r = \text{Max}[q_0, \bar{\tau}]$ |
| Evolução do dano | $d = 1 - \frac{q(r)}{r}$ |
| Lei de endurecimento/ amolecimento | $q(r) = q_0 + H(r - q_0) \text{ ou}$ $q(r) = q_0 \cdot e^{B\left(1 - \frac{r}{q_0}\right)}$ |

Fonte: Adaptado de Maedo (2015) e Sánchez *et al.* (2014).

3.3 MODELOS CONSTITUTIVOS DE FLUÊNCIA

A maioria dos modelos de uso prático na engenharia descreve somente uma parte da curva típica de fluência. Alguns modelos representam o regime transiente, enquanto outros trabalham com o regime estacionário (Figura 3.12). Os modelos mais utilizados em aplicações práticas são baseados em formulações empíricas que consideram a fase estacionária de fluência, sendo um dos mais empregados o modelo de mecanismo duplo de deformação, apresentando bons resultados quando as análises envolvem longos períodos de tempo (COSTA *et al.*, 2005; MEDEIROS, 1999; BOTELHO, 2008; COSTA *et al.*, 2004).

Figura 3.12 Representação esquemática do resultado de um ensaio de fluência, onde o corpo de prova submetido a uma tensão desviadora constante deforma-se em três estágios, ao longo do tempo.



Fonte: Mohriak *et al.* (2008).

No modelo de mecanismo duplo de deformação, a taxa de deformação de fluência uniaxial é dada por:

$$\dot{\epsilon}_{sc} = \dot{\epsilon}_d \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{do}} \right)^n \tag{3.25}$$

onde:

$\dot{\epsilon}_{sc}$ = taxa de deformação por fluência no regime estacionário [-];

$\dot{\epsilon}_d$ = taxa de deformação por fluência estacionária corrigida (função da temperatura) [-];

σ_d = tensão desviadora aplicada [MPa];

σ_{do} = tensão desviadora de referência [MPa];

n = parâmetro função da tensão desviadora aplicada, sendo $n = \begin{cases} n_1 & , \sigma_d \leq \sigma_{do} \\ n_2 & , \sigma_d > \sigma_{do} \end{cases}$

A taxa de deformação $\dot{\epsilon}_d$, por sua vez, é função da temperatura e pode ser calculada conforme (COSTA *et al.*, 2004):

$$\dot{\epsilon}_d = \dot{\epsilon}_{sco} \exp\left(\frac{Q}{R(T_0 + 273,15)} - \frac{Q}{R(T + 273,15)}\right) \quad 3.26$$

onde:

$\dot{\epsilon}_{sco}$ = taxa de deformação de referência (constante para cada rocha salina) [t^{-1}];

Q = energia de ativação (12 kcal/mol para o sal, aqui adotado para todas as rochas) [12 kcal/mol];

R = constante universal dos gases [0,0019858 kcal/mol/K];

T = temperatura da rocha em subsuperfície [°C];

T_0 = temperatura de referência [°C].

O termo exponencial da Equação 3.26 é conhecido como fator de ativação térmica e pode ser considerado como um fator multiplicativo da velocidade de deformação de referência, ou seja, uma constante definida em função da temperatura. Esse termo é conhecido também como a Lei de Arrhénius (MOHRIAK *et al.*, 2008; KARIMI-JAFARI, 2007).

Este modelo (COSTA *et al.*, 2005; MEDEIROS, 1999; BOTELHO, 2008) encontra-se implementado no programa CODE_BRIGHT (*COupled DEformation BRIne Gas and Heat Transport*) (GUIMARÃES, 2002; GUIMARÃES *et al.*, 2007; SILVA, 2010), embora, no presente trabalho tenha sido implementado o fator de ativação térmica, ou

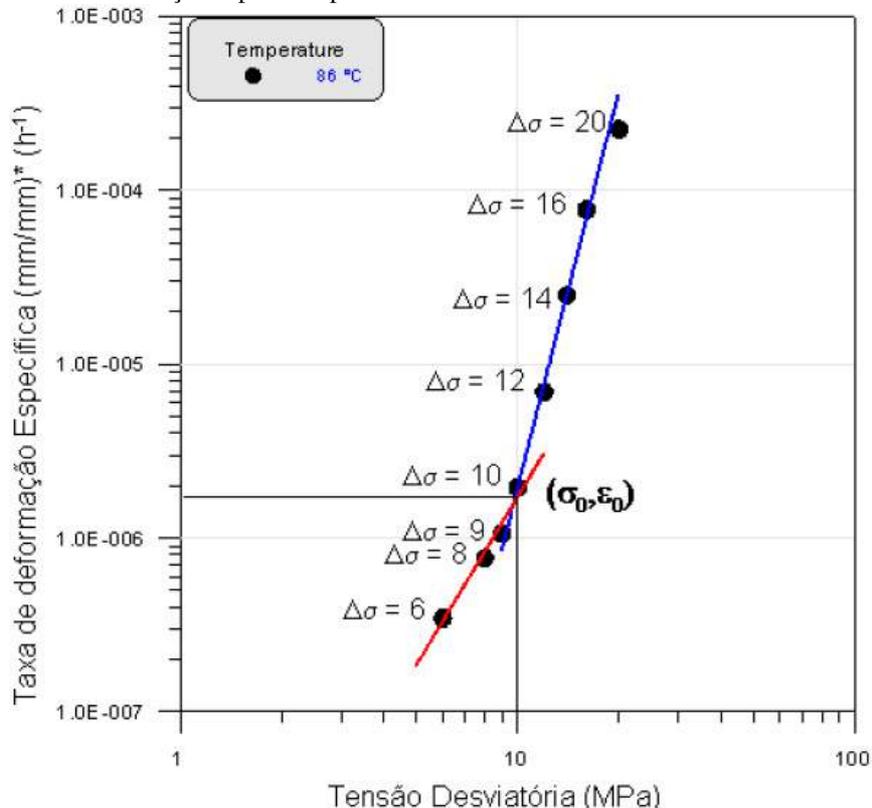
seja, anteriormente esse fator era calculado e feita a correção da taxa de deformação manualmente, e, agora, esse fator é calculado, dentro do código, automaticamente em função da temperatura. Para o estado multiaxial de tensões conforme a equação abaixo:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{sc}(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{3}{2} \left[\dot{\epsilon}_{sco} e^{\left(\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT} \right)} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{do}} \right)^n \right] \mathbf{M} \boldsymbol{\sigma} \frac{1}{\sigma_d} \quad 3.27$$

onde: $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{sc}(\boldsymbol{\sigma})$ = vetor da taxa de deformação da fluência estacionária [1/ano], $\dot{\epsilon}_{sco}$ = Taxa de deformação de fluência estacionária de referência [1/ano], σ_d = Tensão desviadora de von Mises [MPa], σ_{do} = Tensão desviadora de referência de von Mises [MPa], T_0 = Temperatura de referência [K], T = Temperatura [K], Q = Energia de ativação térmica (depende da rocha salina) [kcal/mol], R = constante universal dos gases [kcal/mol/K], n = expoente que varia de acordo com a tensão desviadora ($n = n_1, se \sigma_d \leq \sigma_{do}$ e $n = n_2, se \sigma_d > \sigma_{do}$) [-], \mathbf{M} = operador desviador [-], $\boldsymbol{\sigma}$ = tensor de tensões [MPa]. Os parâmetros $\dot{\epsilon}_{sco}$, σ_{do} , n_1 e n_2 são obtidos através de ensaios de laboratório de fluência sob condições controladas de temperatura e tensão desviadora (MOHRIAK *et al.*, 2008).

A equação de mecanismo duplo de deformação contempla a mudança de mecanismos que se estabelecem em estágios sucessivos de incremento da tensão efetiva. Um mecanismo inicial prevalecente num certo intervalo específico de tensão desviadora perde dominância para o mecanismo sucedâneo, a partir de um nível de tensão particular σ_{do} , que pode ser determinado experimentalmente. Esta determinação envolve a aplicação de pelo menos seis tensões diferenciais crescentes, mantendo-se a temperatura constante, de maneira a detectar o nível de tensão σ_{do} em que ocorre a mudança do primeiro para o segundo mecanismo de deformação (Figura. 3.6) (BORGES, 2008).

Figura 3.6 Taxa de deformação específica por fluência da halita *versus* tensão desviadora.



Fonte: Poiate(2012).

Como a taxa de deformação é substancialmente distinta para cada mecanismo, o expoente n da tensão efetiva também se altera, enquanto a taxa de deformação $\dot{\epsilon}_{sco}$, associada à mudança de regime, representa a abscissa do valor σ_{do} (BORGES, 2008).

Contudo, para análises que consideram um curto espaço de tempo, as deformações primárias ou transientes podem ser importantes (BOTELHO, 2008). No CODE_BRIGHT pode-se adotar, além do modelo de mecanismo duplo de deformação, acima descrito, uma formulação que considera a decomposição aditiva das deformações de fluência nas componentes transiente e estacionária. Esse modelo foi proposto por Lux e Heusermann (1983) e é denominado LUBBY2, sendo capaz de conseguir bons ajustes aos resultados experimentais quando há ocorrência de variação de tensões, principalmente em intervalos de curtos tempos (LUX E HEUSERMANN, 1983; HEUSERMANN *et al.*, 2003). Sua equação é dada a seguir:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_c(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{3}{2} \left[\frac{1}{\eta_K} \left(1 - \frac{\varepsilon_{pr}}{\sigma_d} G_K \right) + \frac{1}{\eta_M} \right] \mathbf{M} \boldsymbol{\sigma} \quad 3.28$$

onde: ε_{pr} = deformação de fluência transiente [d^{-1}], G_K = módulo de Kelvin [MPa], η_K = viscosidade de Kelvin [MPa.d], η_M = viscosidade de Maxwell [MPa.d].

Assume-se que a dependência desses parâmetro pode ser expressa com leis exponenciais em função da tensão desviadora e da temperatura:

$$\eta_K = \eta_{K0} \cdot e^{k_2 \cdot \sigma_d} \quad 3.29$$

$$\eta_M = \eta_{M0} \cdot e^{m_0 \cdot \sigma_d} \cdot e^{l_0 \cdot T} \quad 3.30$$

$$G_K = G_{K0} \cdot e^{k_1 \cdot \sigma_d} \quad 3.31$$

sendo k_1 , k_2 , m , l_0 , η_{K0} , η_{M0} e G_{K0} , constantes do modelo. Comumente, os parâmetros de fluência do modelo constitutivo LUBBY2 são determinados a partir dos resultados de vários ensaios nas fases de fluência transiente e estacionária em amostras de rochas salinas submetidas a estágios de carga crescente. LUBBY2 é baseado no modelo reológico de Burgers (SILVA, 2010), porém não linear (KARIMI-JAFARI, 2007; STAUDTMEISTER & ROKAHR, 1997), com parâmetros empíricos. Este modelo foi implementado no CODE BRIGHT por Silva (2010).

4 ASPECTOS GERAIS DA MINA TAQUARI-VASSOURAS

“O conhecimento nos faz responsáveis”.

(Che Guevara)

4.1 BREVE HISTÓRICO

As primeiras notícias sobre a ocorrência de sais solúveis na bacia de Sergipe datam de 1941, quando a companhia particular ITATIG, pesquisando petróleo no município de Socorro (perto de Aracaju) constatou, em suas sondagens, a presença de halita. Posteriormente, foi fundada a companhia IBASA (Indústria Brasileira de Álcalis S. A.) com o objetivo de explorar as jazidas encontradas (Figura 4.1) (SZATMARI, *et al.*, 1974a; AZEVEDO, 1960).

Figura 4.1 – Reportagem de Gennyson Azevedo do Jornal Carioca Novos Rumos em 8 à 14 de Abril de 1960 com o título: Sal-Gema: Riqueza a explorar.



Fonte: (AZEVEDO, 1960).

As descobertas mais importantes de sais de potássio somente ocorreram entre 1963 e 1966 nas áreas de Taquari-Vassouras e Santa Rosa de Lima, durante o desenvolvimento dos campos petrolíferos de Carmópolis e Riachuelo. A importância econômica dessas descobertas levou o

Governo Federal a criar, através do Decreto nº 61.157 de 16 de agosto de 1967, a "Área de Reserva Nacional de Sergipe", entre as coordenadas de 10° 35' 12" e 10° 42' de latitude sul e 36° 55' e 37° 15' 15" de longitude oeste, com uma extensão de 425 km² (SZATMARI, *et al.*, 1974a).

Coube ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), através do Projeto Potássio, criado em 1968, a execução dos trabalhos de pesquisa na Área de Reserva Nacional. Para isso, foram perfurados, nas áreas de Taquari-Vassouras e Santa Rosa de Lima, 25 poços que receberam a sigla de PKC - Projeto Potássio Carmópolis – com testemunhagem contínua de seção de sais solúveis. O estudo das amostras destes poços integrados às informações disponíveis na PETROBRAS originou o "Relatório Final do Projeto Potássio" apresentado em maio de 1970 (SZATMARI, *et al.*, 1974a).

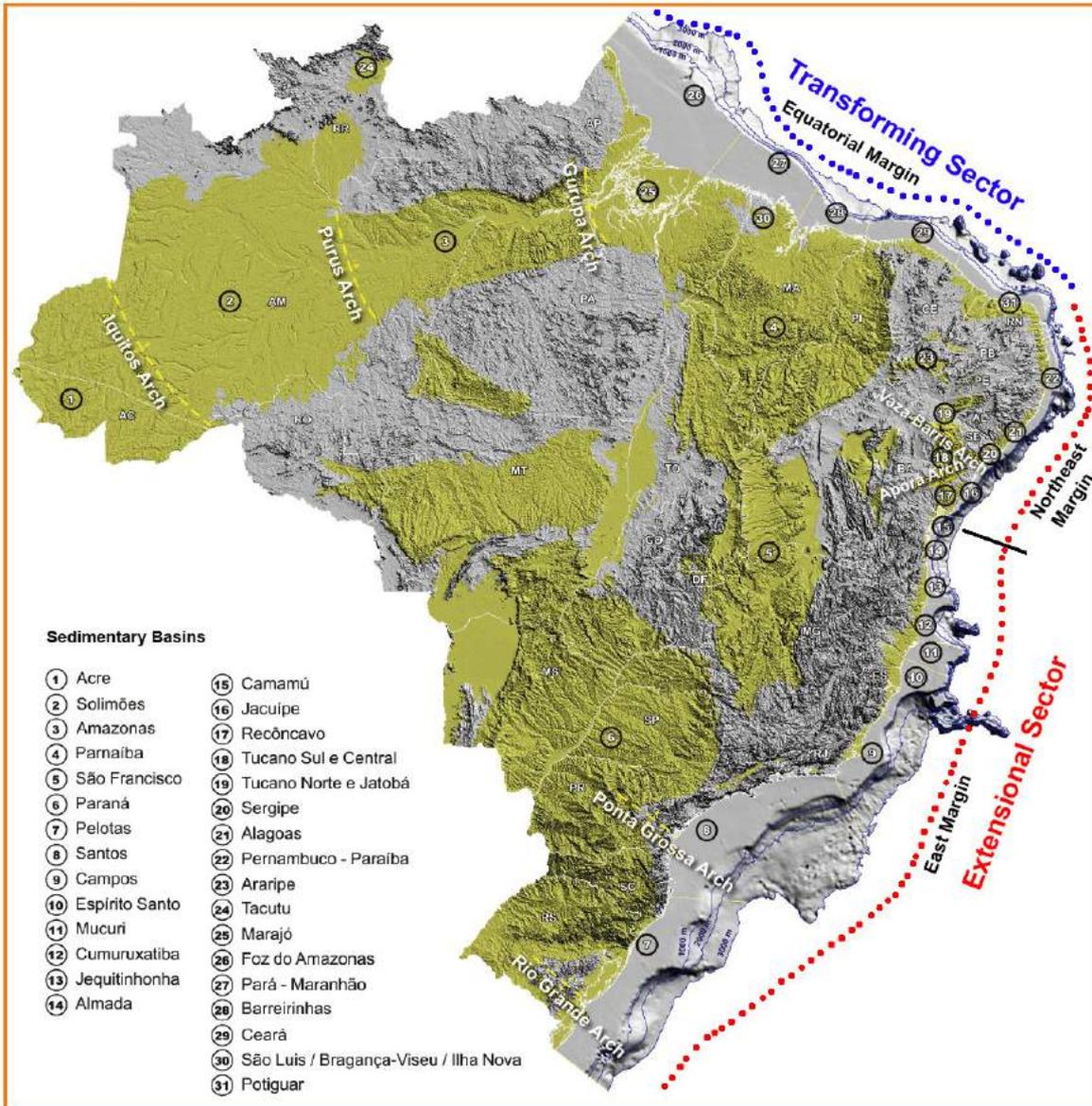
Com a criação da Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), foi incorporada a esta todo o patrimônio da Área de Reserva Nacional. A CPRM apresentou em 1972 relatórios sobre a ocorrência de sais de potássio adjacente à "Área de Reserva Nacional". Os depósitos de potássio foram colocados em licitação pública em 1971, tornada sem efeito por falta de interessados e posteriormente, em 1972, vencida pela KALIUM MINERAÇÃO S.A., do GRUPO LUME. Por força de dispositivo legal, a PETROBRAS, através da PETROQUISA, tem participação acionária garantida no consórcio a ser formado com o fim de industrializar os minérios de potássio (SZATMARI, *et al.*, 1974a).

O estudo das rochas salinas deu-se início com um "Curso de Evaporitos e Calcários" e posteriormente do "Projeto Evaporitos", realizados sob a supervisão da Divisão de Ensino do Setor de Pessoal da Petrobrás – Setor de Ensino da Bahia. A parte prática do projeto que teve lugar em Aracaju, foi desenvolvida através de duas etapas. A primeira, entre 10 de setembro de 1973 e 15 de março de 1974, constou do levantamento de dados e do estudo dos elementos de informação existente, inclusive testemunhos dos poços perfurados pelo "Projeto Potássio" do Departamento Nacional de Produção Mineral. A segunda etapa, entre 16 de março de 1974 e 15 de outubro corrente, constou da interpretação de dados.

4.2 GEOLOGIA DA MINA DE TAQUARI - VASSOURAS

A Bacia de Sergipe situa-se na costa nordeste do Brasil. Sua porção emersa ocupa uma estreita faixa na porção costeira do estado de Sergipe, e sua porção submersa está distribuída além dos limites da estreita plataforma continental (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Mapa de localização das Bacias sedimentares brasileiras.



Fonte: (Milani *et al.*, 2007).

Das bacias da margem continental brasileira, a Bacia de Sergipe é uma das qual apresenta a mais completa sucessão estratigráfica, parte dela aflorante, estando representados desde depósitos relacionados às sinéclises paleozoica até sequências características da evolução de bacias do tiporifte e *drift* em margens passivas. Na Bacia de Sergipe, podem ser identificadas sucessões sedimentares depositadas em diferentes ambientes deposicionais e regimes tectônicos distintos (MOHRIAK *et al.*, 2008; MILANI *et al.*, 2007).

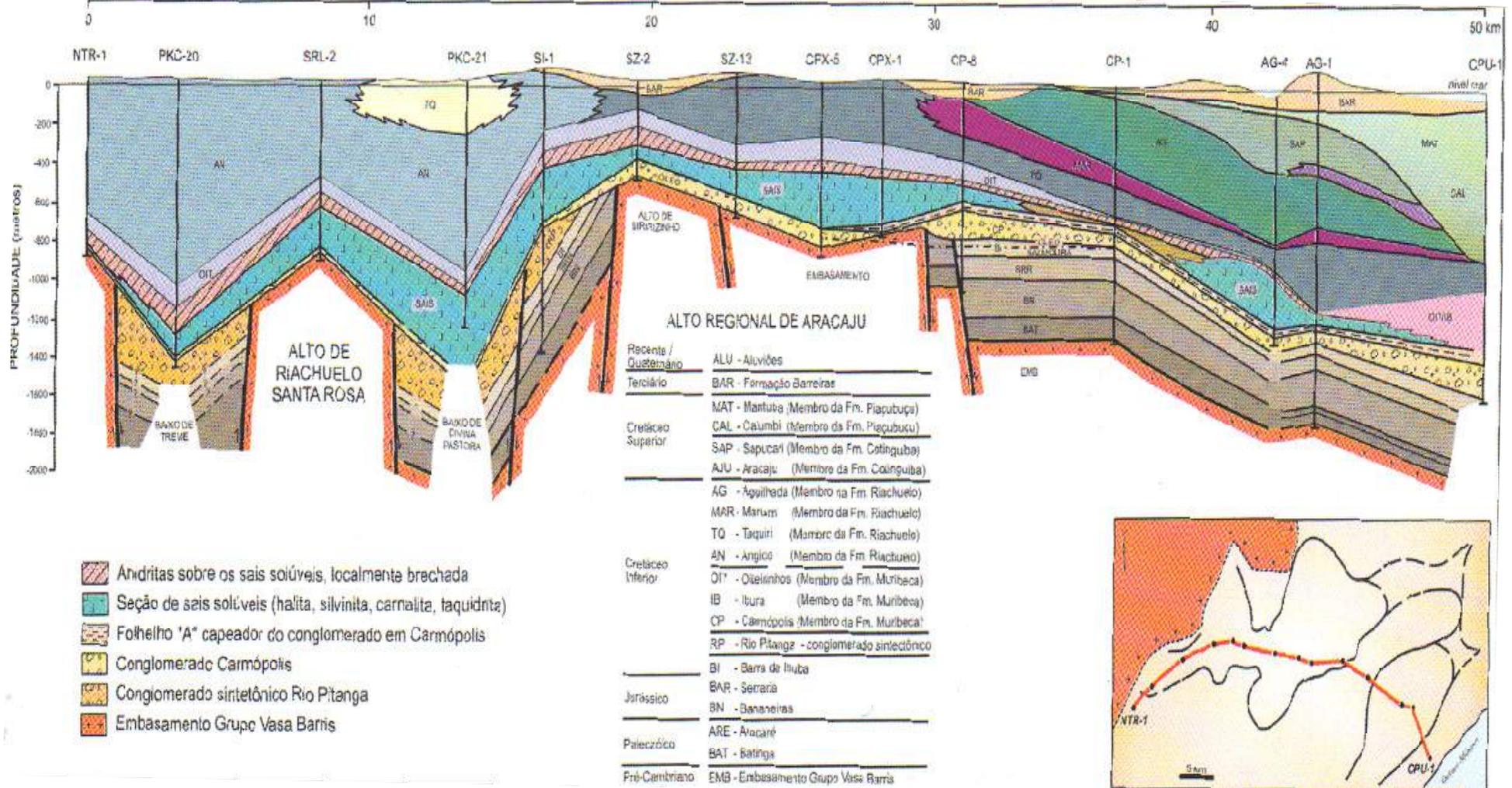
A Bacia de Sergipe é caracterizada pela ocorrência de altos do embasamento na porção emersa (Alto de Aracaju (Figura 4.3), Alto de Atalaia) que apresentam pequena espessura de sedimentos da sequência sin-rifte. A sequência transicional evaporítica é preservada nos baixos locais, resultando em camadas de sal do Aptiano Superior, que é minerado na região de Taquari-Vassouras (MOHRIAK *et al.*, 2008).

A sub-bacia de Taquari-Vassouras possui uma área de aproximadamente 215 km², localizada entre os altos de Carmópolis e Siririzinho, constituindo-se de sedimentos, da base para o topo, pertencentes às Formações Muribeca, Riachuelo e Barreiras. A Formação Muribeca abriga os depósitos salinos ricos em potássio, motivo pelo qual é realizada a lavra da mina de Taquari Vassouras. É constituída por uma sequência de rochas depositadas em ambiente continental a transicional, em espessura média de 450 metros, estando subdividida, da base para o topo, em três membros.

O primeiro membro é o Membro Oiterinhos que é constituído por folhelhos e siltito com intercalações de arenito fino a médio e calcário laminado, ocorrendo também níveis de anidrita. Os arenitos do Membro Oiterinhos quando testados revelaram-se produtores de água salgada. Conforme informações locais, na área dos poços da mina a distância entre os arenitos e o topo da seção salina está em torno de 50 metros. Na sequência, vem o Membro Ibura que é constituído pelos sais solúveis, e no qual se encontra a silvinita, minério objeto da lavra da mina de Taquari-Vassouras. Por fim, o Membro Carmópolis, que é constituído por arenitos e conglomerados com intercalações de folhelho, siltito e calcário. Constitui o principal reservatório petrolífero da Bacia de Sergipe.

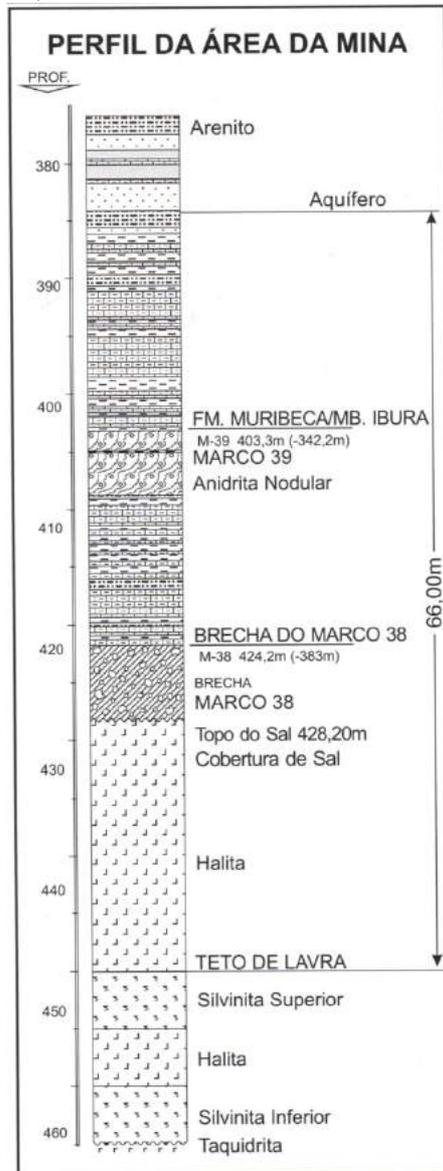
Como a estratigrafia tradicional é pouco aplicada em sequências salíferas, utilizam-se os ciclos de baixa e alta salinidade para empilhamento da seção, e por isso, a sequência evaporítica da Fm. Ibura é dividida em 9 ciclos, sendo que, na área de Taquari Vassouras, o ciclo VIII está ausente. O ciclo VII (Figura 4.4), que contém a mineralização de silvinita, possui espessura média em torno de 40 metros, podendo atingir até 57 metros. Está ausente, ou com pequena espessura, nas partes estruturalmente mais elevadas, devido, provavelmente a processos erosivos.

Figura 4.3 - Seção geológica da área dos depósitos de evaporitos no Alto Regional de Aracaju.



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008 *Apud* modificado de FONSECA, 1973; SZATMARI *et al.*, 1974c).

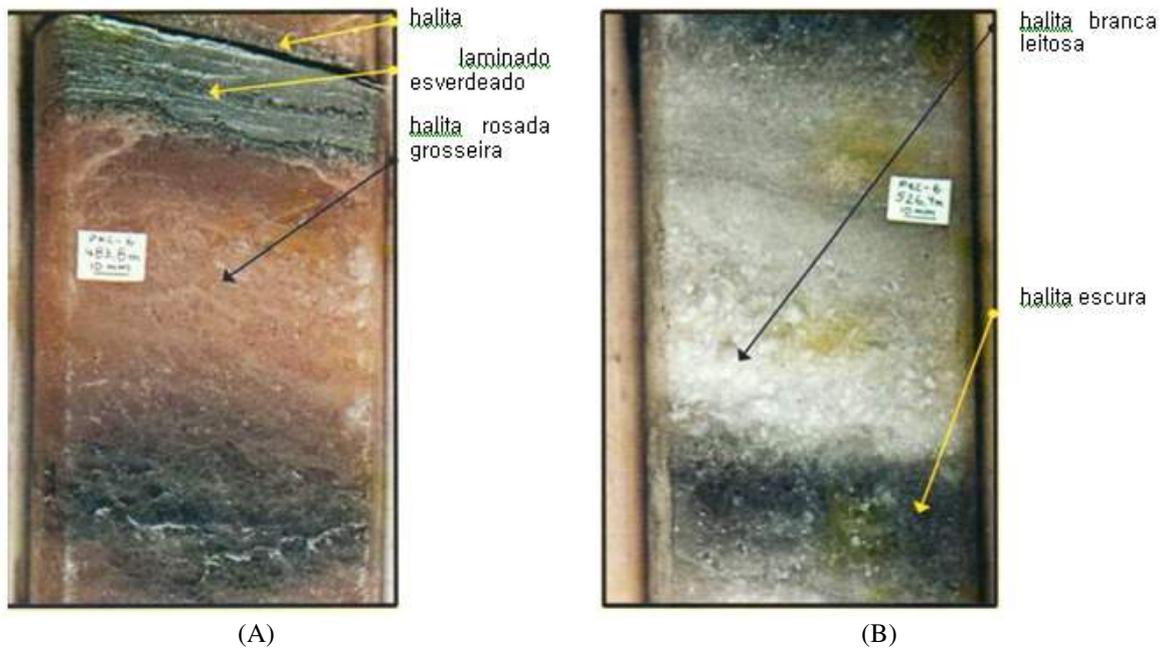
Figura 4.4 - Perfil da área da mina de Taquari-Vassouras. As camadas de silvinita (Ciclo VII) estão depositadas sobre a camada de taquidrita (Ciclo VI).



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008 *Apud* CARVALHO JR e ALVES, 2000).

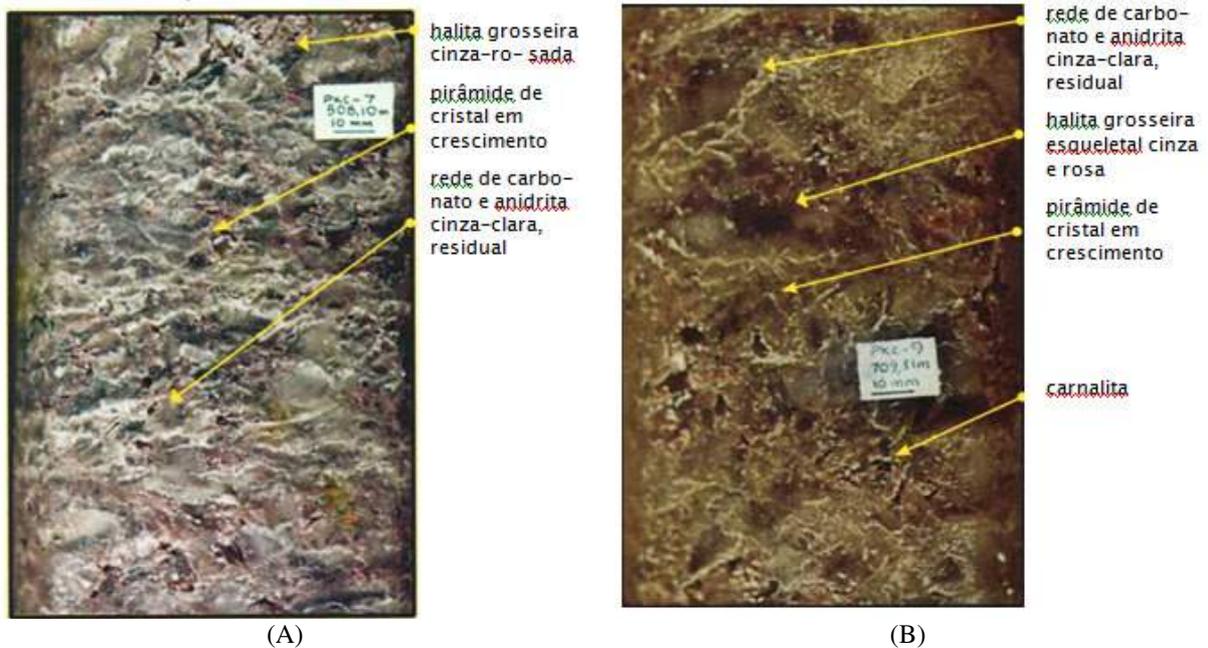
O ciclo VII é dividido nos seguintes intervalos do topo para a base: halita bandeada e digitiforme que, apresentando boa competência estrutural, são consideradas como parte do selo impermeável à migração de água dos aquíferos subjacentes (Figuras 4.5, 4.6 e 4.7);

Figura 4.5 - Halitas bandeadas: (A) Com intercalações de folhelho (PKC-6: 483,8m) e (B) Com laminações alternadas de cristais (PKC-6:526,4m)



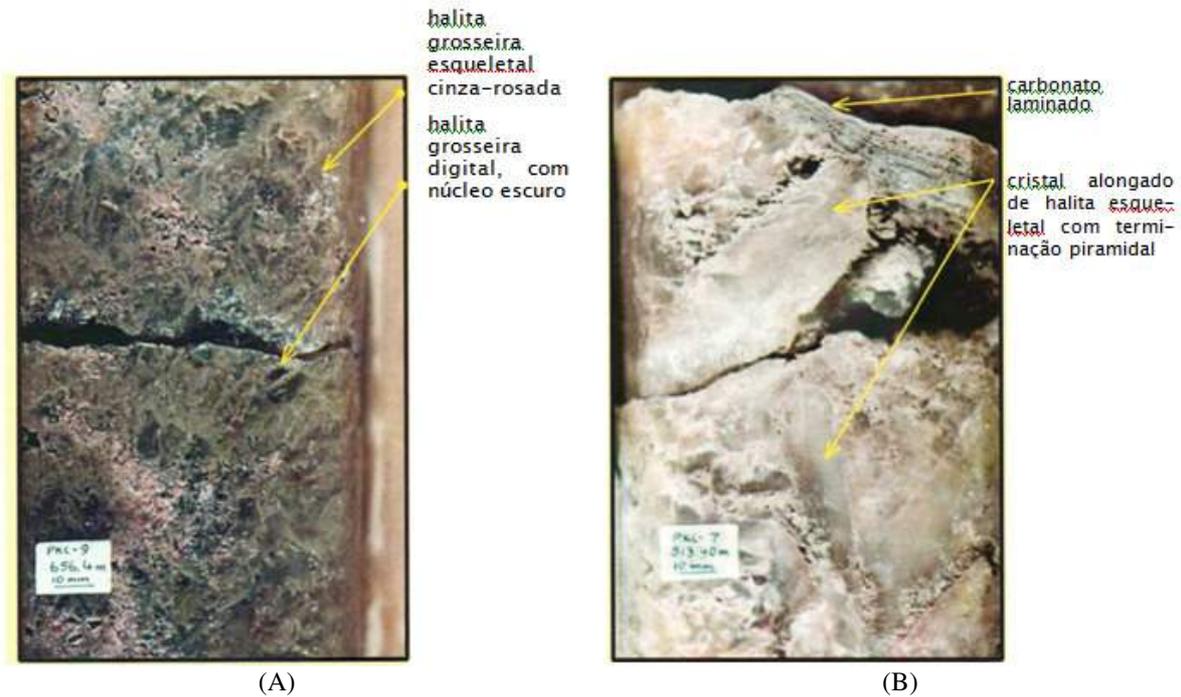
Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b)

Figura 4.6 - Halitas digitiforme com cristais esqueléticos: (A) PKC-7: 508,1m; e PKC-9: 709,31m



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b).

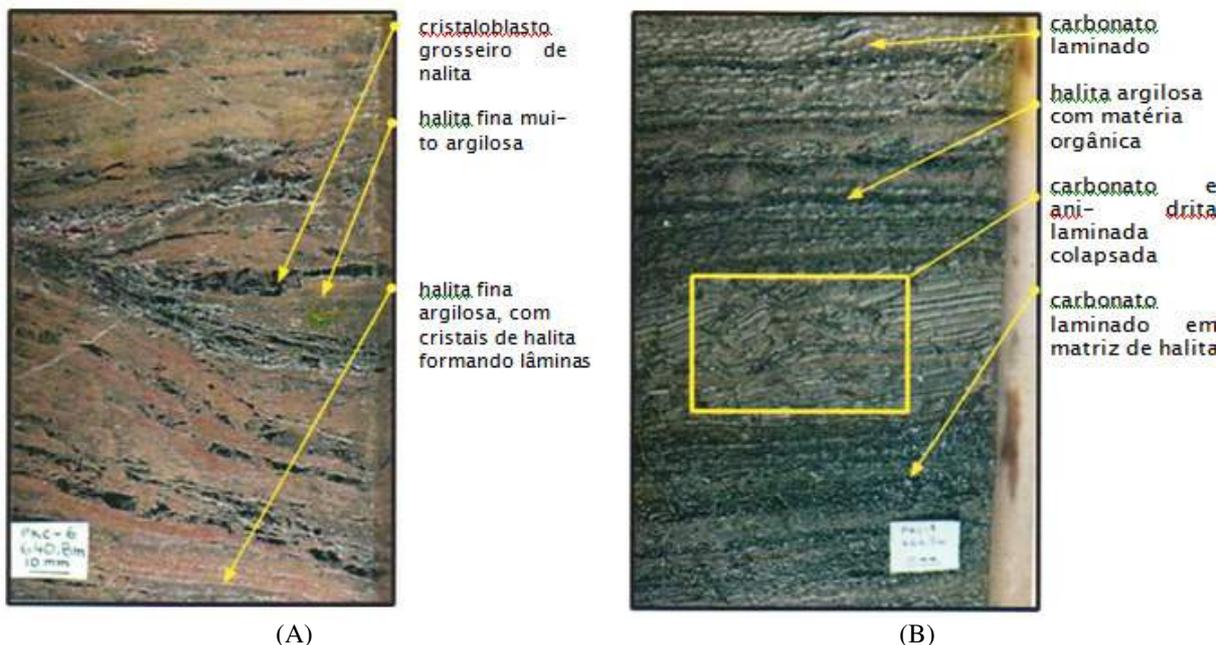
Figura 4.7 - Halita: (A) digitiforme com rede de anidritas e disseminação de carnalita (PKC-9:656,4m); (B) esquelético com carnalitização incipiente (PKC-7:513,4m).



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b)

Marco 35 - halita grosseira, caracterizada pela presença de lâminas e rede de folhelho orgânico. Apresenta baixa competência estrutural sendo evitada, conforme informações locais, da operação como teto imediato das escavações de desenvolvimento; halita fina - rocha com excelente competência estrutural, garantindo boas condições de segurança quanto à estabilidade de teto e selo impermeável (Figura 4.8);

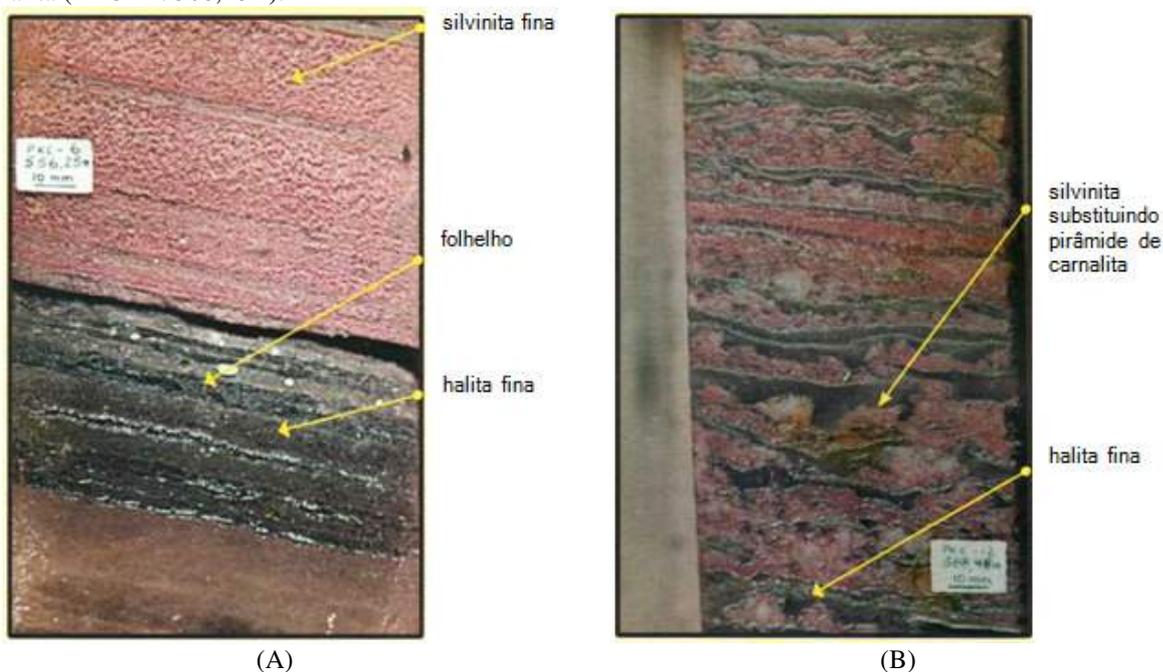
Figura 4.8 - Halita fina argilosa: (A) PKC-6: 640,8m; (B) PKC-9: 640,2m.



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b).

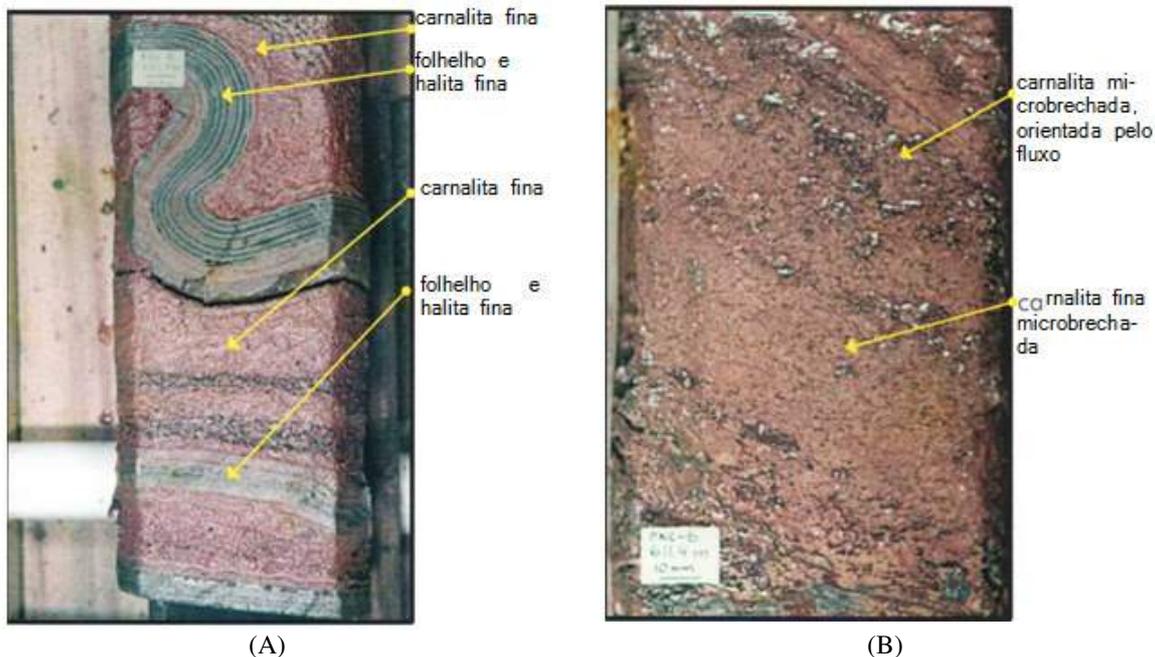
Zona potássífera - é constituída predominantemente por halitas, silvinitas e carnalitas. Nesta zona, como nas demais, estão presentes marcos geológicos (halita com argila intersticial ou finas camadas de argila/folhelho), que são usados como referência de nível de lavra e de comportamento geomecânico das camadas de rocha evaporíticas adjacentes às escavações de lavra. A silvinita, que ocorre na zona potássífera foi dividida em dois intervalos denominados de silvinita superior e silvinita inferior. A silvinita inferior encontra-se sobrejacente à camada de taquidrita, exigindo um dimensionamento diferenciado em relação ao que é adotado na lavra da camada superior (Figuras 4.9, 4.10 e 4.11).

Figura 4.9 - Silvinita: (A) “arenosa” com lâminas de halita fina (PKC-6: 556,25m); (B) grosseira com laminas de halita (PKC-12: 508,48m).



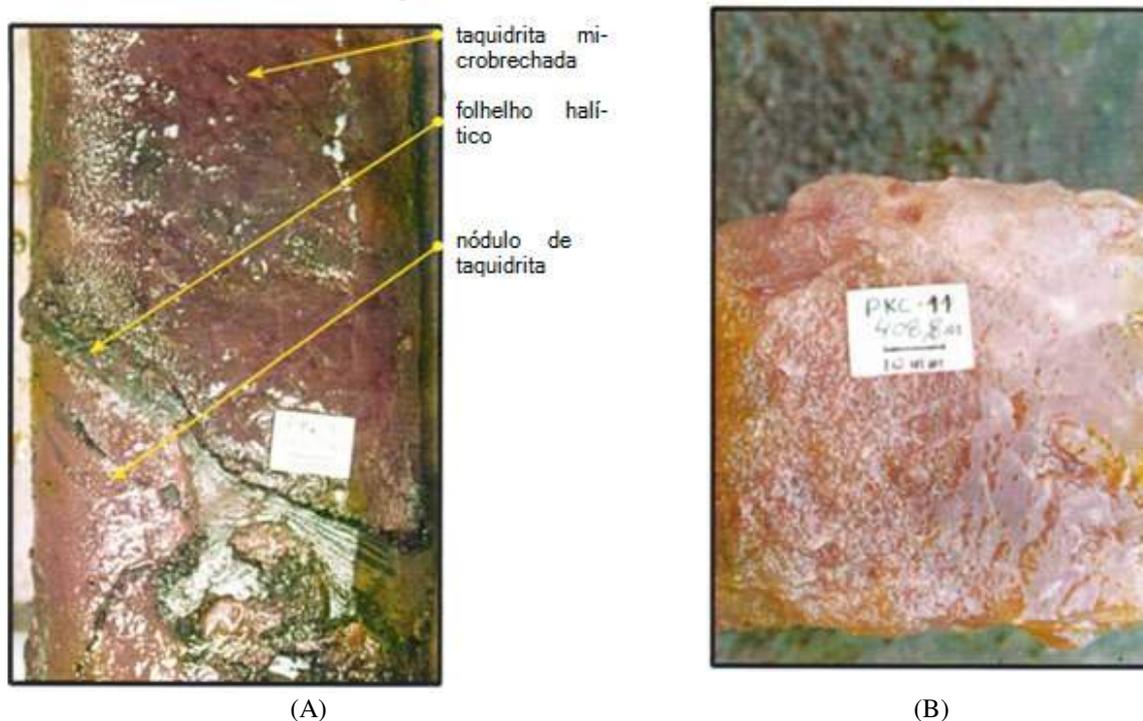
Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b).

Figura 4.10 - Carnalita: (A) fina “arenosa”, com laminas dobradas de halite fina e folhelho (PKC-8: 505,5m); (B) microbrechada “orientada” com lâminas interrompidas de halite fina, hematítica (PKC-6: 611,4m)



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b).

Figura 4.11 - Taquidrita: (A) nodular com rede de lâminas de folhelho halítico passando no topo para taquidrita microbrechada (PKC-8: 492,7m); (B) pura (PKC-1: 408,8m).



Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008; SZATMARI *et al.*, 1974b).

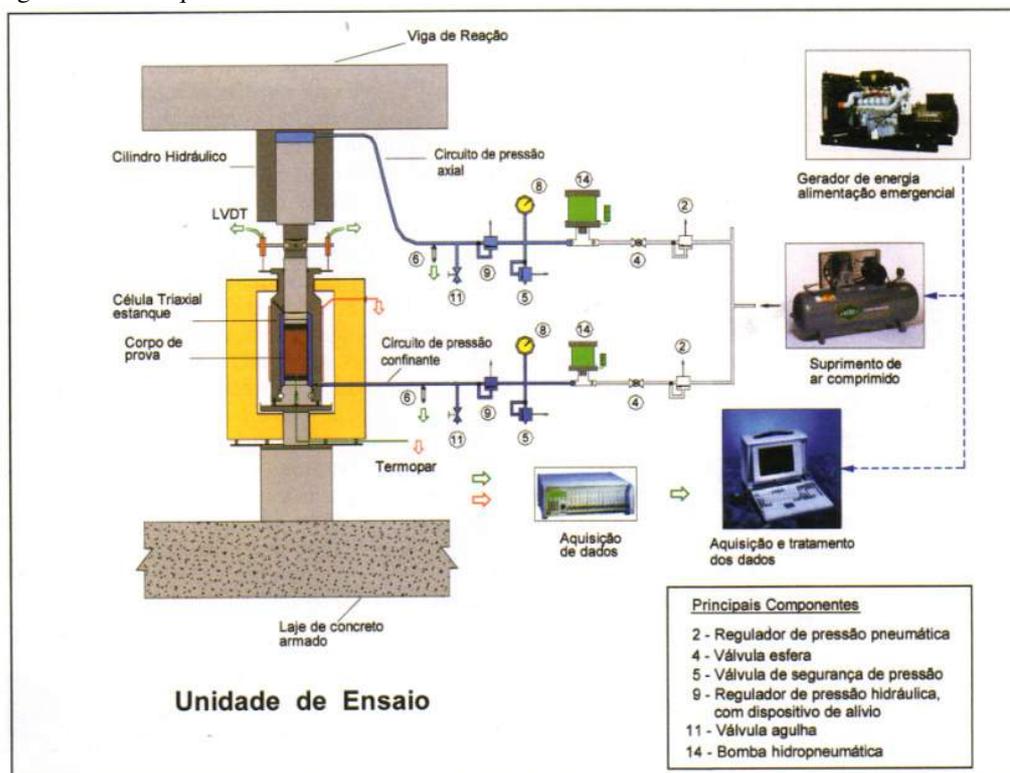
A zona potassífera tem como característica principal a ocorrência da silvinita lavrada na mina de Taquari Vassouras. Esse horizonte é constituído por halitas grosseiras, silvinita, carnalita e níveis centimétricos de halita fina. Estes níveis de halita fina são marcos de correlação. Ao todo são 25 os marcos geológicos, que apresentam boa distribuição em área e fácil identificação.

4.3 ESTUDOS DOS PARÂMETROS DA MINA TAQUARI VASSOURAS

Pelo fato de a camada inferior de silvinita encontrar-se sobrejacente à taquidrita e por ser a mina de Taquari Vassouras a única mina no mundo com lavra próxima a este evaporito, o comportamento de fluência dessa rocha sempre representou uma restrição à lavra da silvinita inferior.

Foram realizados, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, ensaios de fluência sobre os diversos evaporitos da mina de Taquari Vassouras, em salas com temperaturas e umidades controladas (Figuras 4.12). Ensaios destrutivos do tipo cisalhamento direto, Protodiakonov, tração e triaxiais foram também realizados de modo a se compararem as propriedades de resistência ao cisalhamento dessas rochas, excluindo a taquidrita, com valores encontrados na literatura técnica internacional (FAIRHURST, 1987, 1986a, 1986b, 1984, 1980, 1979, 1978a, 1978b, 1978c, 1978 d, 1977, 1976).

Figura 4.12 – Esquema de uma das unidades de ensaio triaxial de fluência.



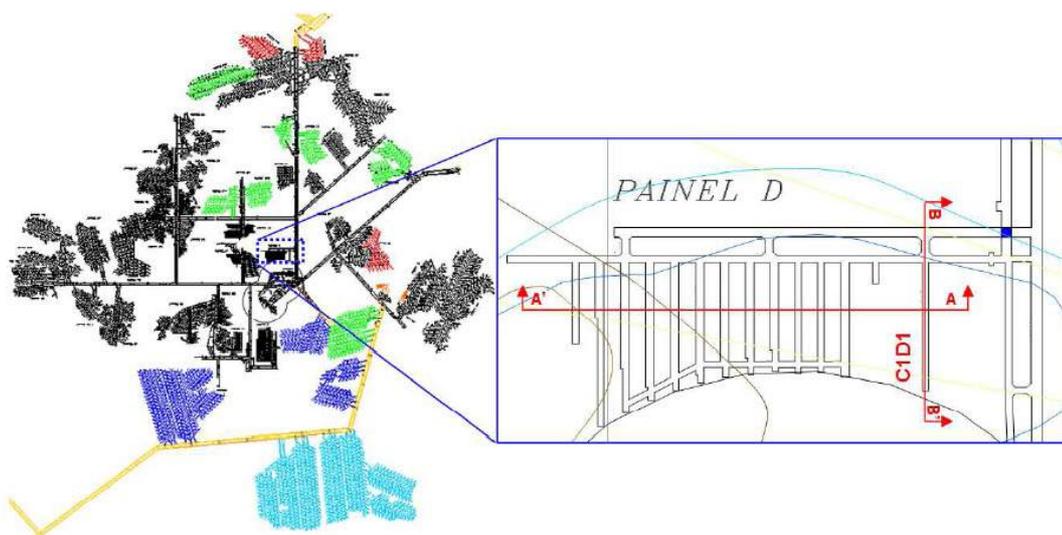
Fonte: (POIATE, 2012; MOHRIAK *et al.*, 2008).

No período de 1975 a 1987, procurava-se isolar parâmetros de fluência que melhor representassem o comportamento de fluência da halita, carnalita, silvinita e taquidrita, segundo a lei constitutiva de Lomenick (SILVA, 2010). Esta lei foi desenvolvida no programa de armazenamento de lixo atômico em minas de sal, programa este financiado pelo Waste Isolation Service do governo americano (BRADSHAW *et al.*, 1964; BRADSHAW & MCCLAIN, 1971).

Para a halita e silvinita, considerando-se a camada superior, a aplicação da equação de fluência de Lomenick representava com razoável aproximação o comportamento medido “in situ” para períodos entre 3 e 4 anos.

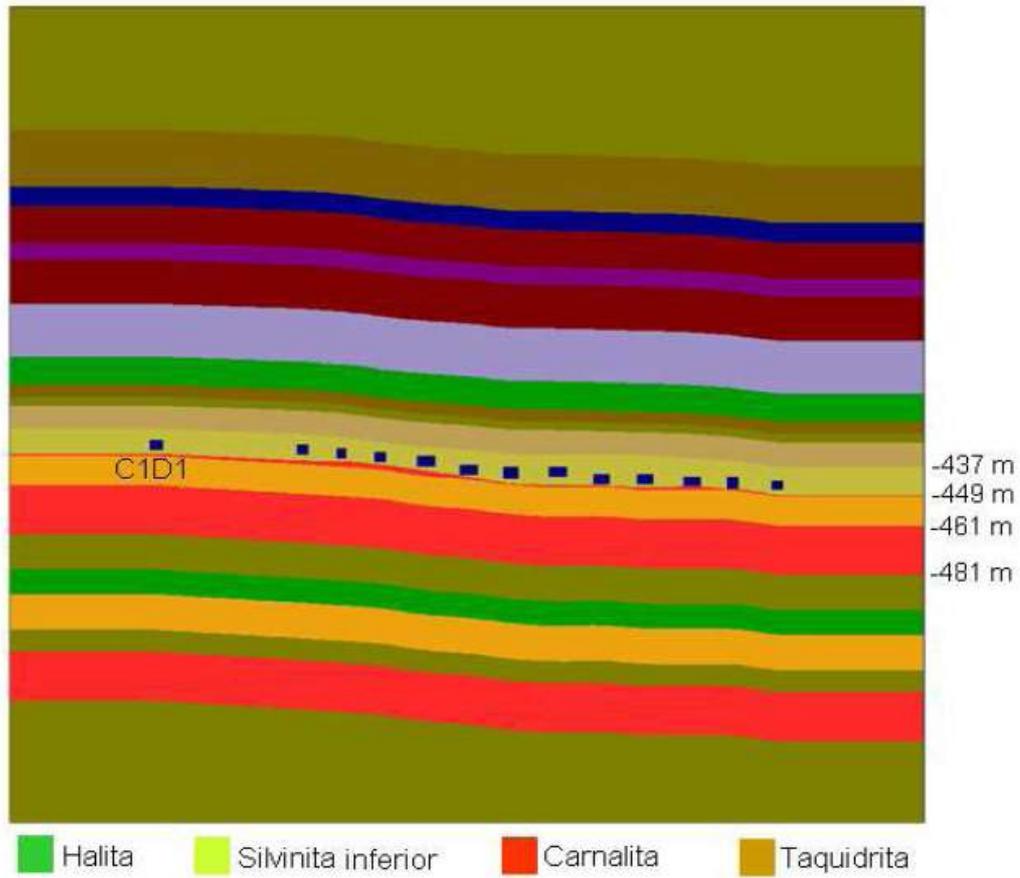
Em 1988 foi proposta, por consultores da CVRD, a execução da escavação de uma câmara experimental da camada inferior de silvinita, fornecendo ao complexo de Taquari Vassouras o projeto de escavação e instrumentação da câmara experimental C1D1 (Figura 4.13 a 4.15). Esta câmara experimental tinha por objetivo isolar, por retro-análise, os parâmetros de fluência da taquidrita, ou, pelo menos, definir um modelo constitutivo o qual permitisse representar o comportamento de fluência interativo entre a lavra de silvinita e a taquidrita.

Figura 4.13 – Galeria experimental C1D1 na mina de TV.



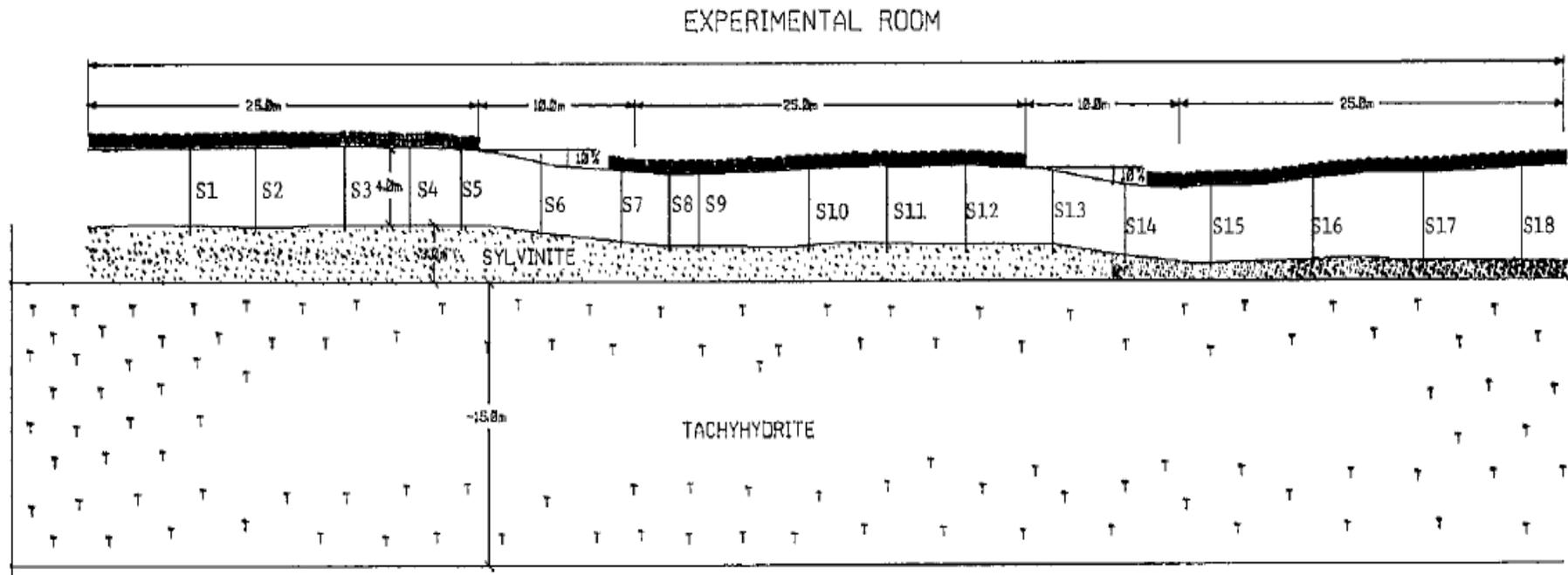
Fonte: (POIATE, 2012)

Figura 4.14 – Interpretação geológica do corte A-A'



Fonte: (POIATE, 2012).

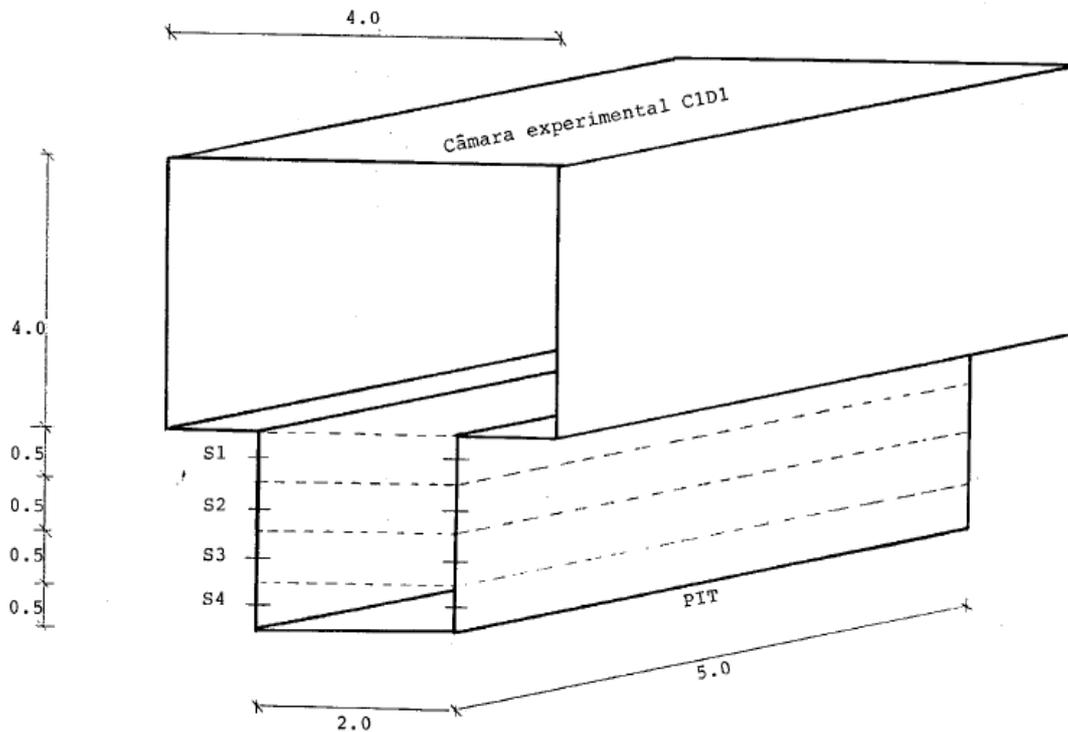
Figura 4.15 - Corte longitudinal B-B' da câmara experimental CID1, S1 a S18 são as seções de convergência vertical.



Fonte: (D'ELIA, 1991).

Na Figura 4.16 observa-se detalhe da cavidade escavada no final da câmara experimental C1D1, S1 a S4, que são seções de convergência horizontal e a típica seção de medições de convergência vertical da mina.

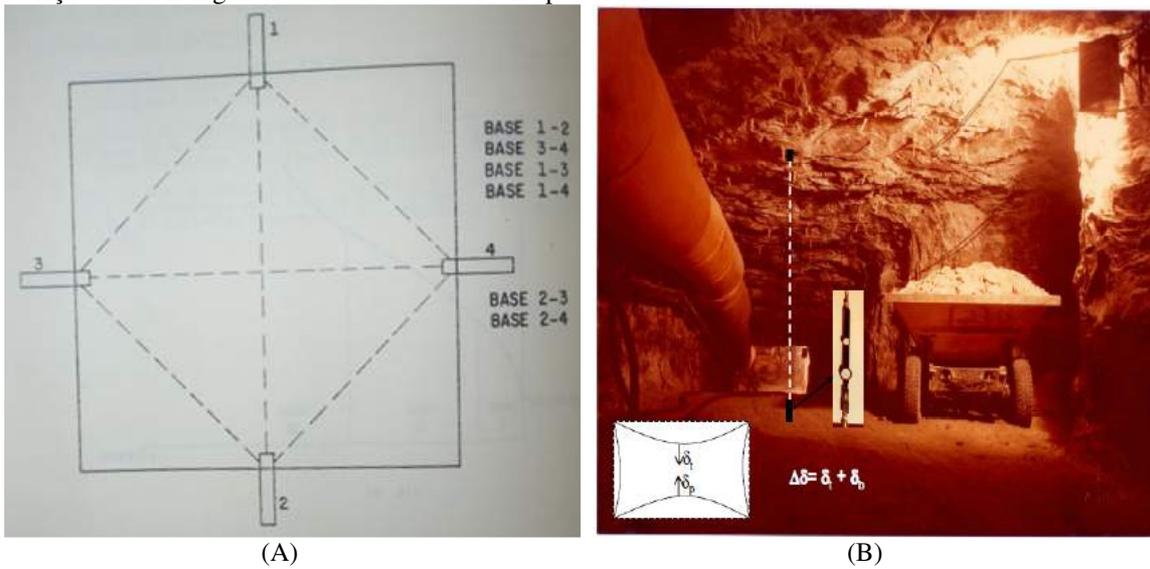
Figura 4.16 - (A) Detalhe da cavidade escavada no final da câmara experimental C1D1, S1 a S4, que são seções de convergência horizontal.



Fonte: D'Elia (1991).

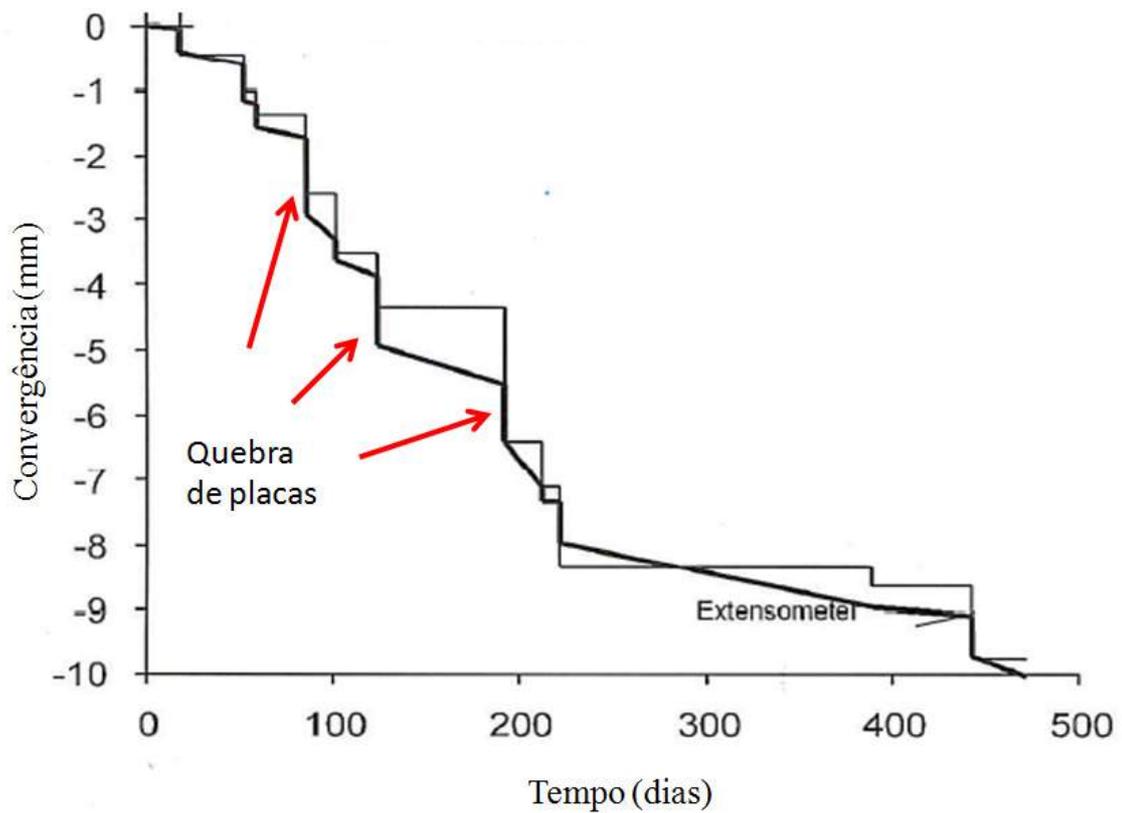
Na Figura 4.17 observam-se bases de convergência utilizadas e a seção de medição típica da mina TV no painel D1. Segundo Pontes *et al.* (1985), a base mais utilizada é 1-2 e, em casos especiais foram instalados bases próximas aos pilares para medir o efeito da “punção”, ou seja, foca-se nos resultados do fechamento vertical ($\Delta\delta = \delta_t + \delta_p$). Já na Figura 4.18 observam-se medições de convergência com indicações de fraturamento de placas em minas de evaporitos.

Figura 4.17 - (A) Bases de convergência utilizadas na mina de TV no Painel D1; e (B) Típica seção de medições de convergência vertical da mina TV no painel D1.



Fonte: Pontes *et al.* (1985); Costa *et al.* (2010).

Figura 4.18 – Medições de convergência com indicações de fraturamento de placas em minas de evaporitos.



Fonte: Adaptada de Hustrulid & Bullock (2001).

Devido aos problemas estruturais existentes no painel H1, a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) contratou uma firma estrangeira que introduziu a equação de fluência do tipo mecanismo duplo de deformação, que, na realidade, é uma simplificação da equação de Munson (MUNSON *et al.*, 1986; MUNSON & DEVRIES, 1991; MUNSON, 1993; MUNSON, 1997).

Rothenburg & Mraz (1995), recomenda um conjunto de propriedades mecânicas para os evaporitos de Sergipe. As propriedades elásticas foram obtidas de relatórios anteriores do consultor brasileiro e as propriedades de fluência da halita e silvinita foram obtidas com base na experiência de aplicação desta equação na mina de New Brunswick, porém com um fator de multiplicação de 3.64 sobre o valor de $\dot{\epsilon}_{sco}$, para levar em consideração a diferença de temperatura.

A Universidade de Waterloo obteve amostras de silvinita, halita e taquidrita na mina de Taquari-Vassouras com o objetivo de realizar ensaios na Universidade de modo a isolar novos parâmetros de fluência para os evaporitos de Sergipe, adotando a equação de fluência de mecanismo duplo de deformação.

O relatório final dos ensaios “Creep and Brittle Yield Testing of Tachyhydrite, Sylvinitite and Halite”, de dezembro de 1996, segundo consideração do consultor brasileiro, no respectivo relatório de 1999 (COSTA, 1999), não teria acrescentado novas informações em relação aos dados obtidos por calibração do modelo em análise mais antigo (COSTA, 1995a; COSTA, 1995b), retro-analisados a partir da câmara experimental C1D1, nem em relação aos valores encontrados para a taquidrita. A Tabela 4.1 resume as propriedades mecânicas elásticas e de fluência até então isoladas e discutidas nos trabalhos e relatórios de Costa (1981, 1984a, 1984b, 1985, 1986, 1988, 1993, 1994a, 1994b, 1995a, 1995b, 1997, 1999), Costa & Moreira (1989), Costa & Pereira (1989), Costa, *et al.*(1990), Costa & Melo (1992), Filho & Costa (1985) e Filho (1985).

Tabela 4.1 Propriedades mecânicas elásticas e de fluência.

| Material | E (MPa) | ν | c (MPa) | ϕ (°) | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|-----------------------|-----------|-------|-----------|------------|------------------------|---|-------|-------|
| Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| Siltito | 20696 | 0,15 | 1,1 | 32,8 | | | | |
| Aquifero | 20696 | 0,15 | 1,1 | 32,8 | | | | |
| Anidrita | 20403 | 0,33 | 3 | 42 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| Marco 38 | 15000 | 0,1 | 0,9 | 37,3 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| Halita Bandeada | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| Marco 35 | 15000 | 0,1 | 0,9 | 37,3 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| Halita fina | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| Silvinita superior | 15742 | 0,33 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| Silvinita inferior | 15742 | 0,33 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| Taquidrita | 4920 | 0,33 | 0,47 | 29,3 | 10 | 0,22 | 3 | 3 |
| Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| Halita | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |

Fonte: (COSTA, 1997, 1995b).

Já a Tabela 4.2 resume os parâmetros mais recentes dos materiais de Taquari-Vassouras, indicando as fontes de onde estes foram obtidos. Estes parâmetros são usados para caracterizar a deformabilidade das rochas (módulo de Young, coeficiente de Poisson e parâmetros de creep), sua resistência (coesão e ângulo de atrito) e quantificar o peso próprio dos materiais (densidades), responsáveis pela geração do estado de tensões inicial no maciço (geoestático). Todos estes dados, juntamente com as condições de contorno do problema, são necessário para a solução numérica da equação de conservação de quantidade de movimento (equilíbrio mecânico) via método dos elementos finitos, cujas variáveis primárias (incógnitas) são os deslocamentos dos nós da malha.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas elásticas e de fluência

| Material | E (MPa) | ν | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | σ_{do} (MPa) | n_1 | n_2 | ϕ (°) | c (MPa) | Densidade (Kg/m ³) |
|------------------------|--------------|-------|---|------------------------|-------|-------|---------------|--------------|-----------------------------------|
| Carnalita | 17467 | 0,26 | 0,0150 | 10 | 2 | 3,7 | | | 1847 |
| Halita | 36400 | 0,295 | 0,0043 | 12 | 3 | 5,8 | | | 2143 |
| Shale | 5000 | 0,33 | | | | | 22 | 4,8 | 2600 |
| Taquidrita | 10300 | 0,324 | 0,2200 | 10 | 3 | 7 | | | 1660 |
| Shales & Limest. | 9000 | 0,33 | | | | | 32 | 5,75 | 2375 |
| Clastics (Oiteirinhos) | 5000 | 0,33 | | | | | 21 | 0,44 | 2000 |
| Sandstone (Angico) | 5000 | 0,33 | | | | | 33 | 1,1 | 2325 |
| Limestones (Taquari) | 5000 | 0,33 | | | | | 42 | 6,7 | 2150 |
| Clastics (Barreiras) | 100 | 0,33 | | | | | 11 | 0,2 | 1900 |

Fonte: (IfG, 2007; TERRATRACE TECHNOLOGIES, 2004; COSTA *et al.*, 2004).

Mohriak, *et al.* (2008) resume novos parâmetros retroanalizados de fluência para rochas salinas da mina de Taquari Vassouras (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas de fluência retroanalizados de TV.

| Material | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|------------|---------------------|--|-------|-------|
| Silvinita | 10 | 0.016 | 3 | 5.8 |
| Halita | 10 | 0.016 | 3 | 5.8 |
| Carnalita | 8 | 0.072 | 3 | 5.8 |
| Taquidrita | 10 | 0.22 | 3 | 5.8 |

Fonte: (MOHRIAK *et al.*, 2008).

Contudo Poiate (2012) apresenta parâmetros de fluência nos ensaios laboratoriais com halita, carnalita e taquidrita da mina TV, mais recentes (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 Propriedades mecânicas de fluência nos ensaios de fluência corrigidas para temperatura de 86°C.

| Material | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|------------|---------------------|--|-------|-------|
| Halita | 9.91 | 0.016 | 3.36 | 7.55 |
| Carnalita | 5.71 | 1.35 | 2.87 | 7.17 |
| Taquidrita | 8.14 | 2.3 | 2.59 | 7.49 |

Fonte: (POIATE, 2012).

No que diz respeito à resistência a tração, Fontes (2003) apresentadas na Tabela 4.5, a resistência a tração da silvinita e halita obtidas por ensaio de compressão diametral, e Poiate (2012) executou diversos ensaios que estão resumidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Resistência média a tração.

| Litologia | Resistência à tração Kgf/cm² |
|------------------|--|
| Silvinita | 18,80 |
| Halita | 14,60 |

Fonte: (FONTES, 2003).

Tabela 4.6 - Resistência média a tração.

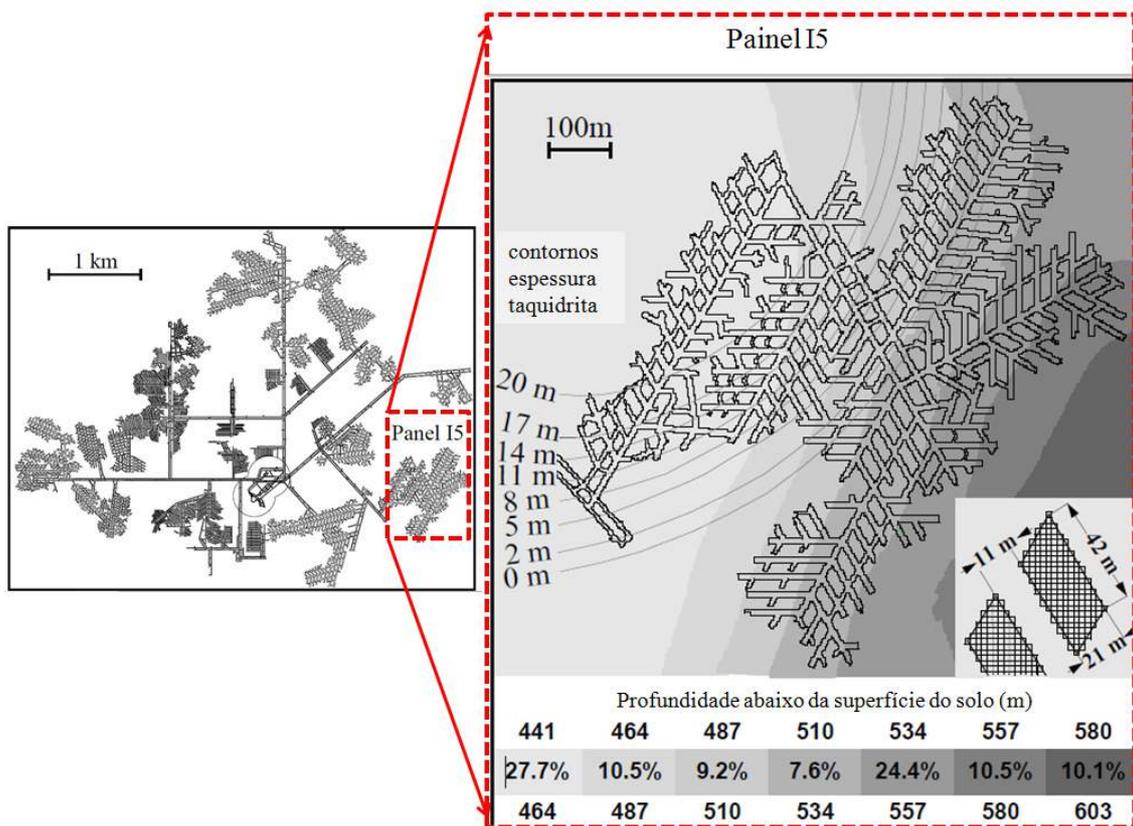
| Litologia | Resistência à tração média (MPa) | Taxa de carregamento (MPa/s) | Nº Corpo de provas | Diâmetro (Polegadas) |
|------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Anidrita | 5,79 | 0,3 | 10 | 3,0 |
| Anidrita | 6,16 | 1,5 | 10 | 3,0 |
| Halita | 1,66 | 0,175 | 5 | 3,5 |
| Halita | 1,85 | 0,3 | 5 | 3,5 |
| Halita | 1,92 | 0,7 | 5 | 3,5 |
| Carnalita | 1,12 | 0,175 | 5 | 3,5 |
| Carnalita | 1,21 | 0,3 | 5 | 3,5 |
| Carnalita | 1,06 | 0,7 | 5 | 3,5 |
| Taquidrita | 0,17 | 0,175 | 5 | 3,5 |
| Taquidrita | 0,22 | 0,3 | 5 | 3,5 |
| Taquidrita | 0,19 | 0,7 | 5 | 3,5 |

Fonte: (POIATE, 2012).

4.4 ESTUDOS DO PAINEL I5

O painel I5 (Figura 4.19) foi lavrado na camada inferior de silvinita sobrejacente a uma camada de taquidrita com espessura variando de 0 a 20 metros. O painel foi lavrado entre as profundidades de 441 a 603 metros. O método de lavra utilizado é o de câmaras e pilares retangulares com taxa de extração de 46% a 49% . O Painel I5 é essencialmente o primeiro painel escavado em áreas onde a espessura da laje de silvinita está prevista para permitir um fluxo quase sem restrições para o rápido aumento de taquidrita.

Figura 4.19 – Localização do Painel I5 na mina de Taquari – Vassouras.



Fonte: Adaptado de Rothenburg *et al.* (2007).

Isto é porque a taquidrita dentro do painel I5 arrasta a uma taxa comparável à taxa de fluência da silvinita em tensões de minas que correspondem a uma profundidade de cerca de 2500m. Isto leva à alta convergência em aberturas de cavidades e

consequentemente problemas relativos à subsidência (Figura 4.20). Ao mesmo tempo, o painel I5 está localizado em uma área geologicamente complexa da mina com mergulhos altos dos estratos e variações acentuadas em espessura taquidrita. Até então não se conhece nenhum caso precedente comparável no mundo com rochas salinas e mineração de potássio em condições tão difíceis.

Figura 4.20 – Posição dos monumentos para controle da subsidência.

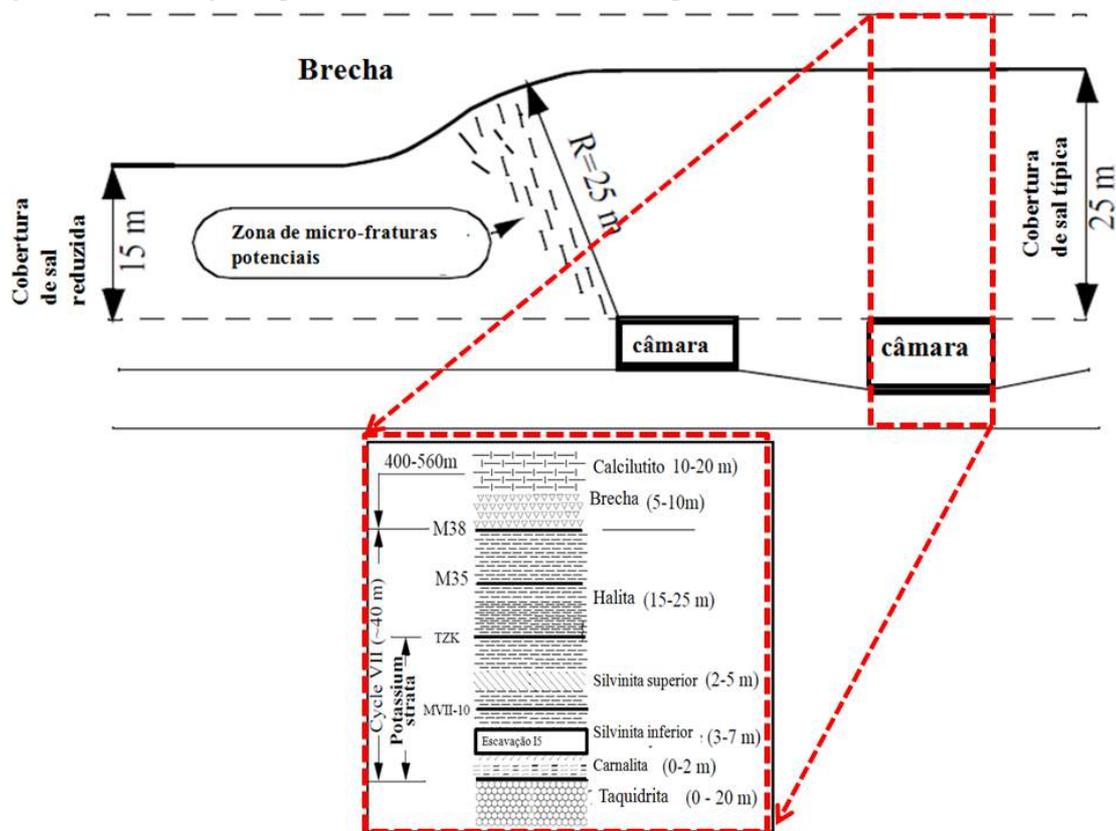


Fonte: (COSTA, 1999).

Durante a escavação de poços de minas em 1981, uma fina (6-8m) camada de arenito (aquífero) mal-consolidado foi encontrado acima do nível de mineração. Intensivas injeções foram necessários para estacionar o influxo para o poço (Soubrouillard e Lourdel, 1984).

Apesar de o aquífero ter sido encontrado a cerca de 80 m acima da nível da mina, a possibilidade de que seja muito mais próxima da mina em alguns locais foi constatado como uma possibilidade real quando foram analisadas sondagens indiretas por métodos eletromagnéticos (CHOUTEAU *et al.*, 1997). Mesmo que um aquífero esteja presente e próximo ao Painel I5, é geralmente esperado, por exemplo Berest *et al.* (2003), que espessuras de mais de 20 m de sal deva fornecer adequada proteção contra o fluxo de água (Figura 4.21).

Figura 4.21 – Ilustração esquemática da zona de micro-fraturas potenciales.



Fonte: Adaptado de Rothenburg *et al.* (2007).

No entanto, inundações inesperadas na Mina Holle, República do Congo (RUITER, 1979), sob uma cobertura espessa de sal semelhante, mas no lado africano do depósito Taquari-Vassouras, contribuiu para a extrema cautela na forma como a CVRD projeta e opera a mina. Painéis de minas são desenhados de tal maneira que o estado de tensões no topo do sal permaneçam acima da pressão potencial do aquífero durante a vida útil da mina.

A lógica por detrás deste projeto reflete a noção de que deformações naturais e/ou induzidas promovam aberturas, micro-fraturas que venham a servir como vias microscópicas através do maciço salino quando pressões do fluido excedam as tensões de confinamento. As vias podem se ampliar com o tempo, e acabar levando a um fluxo de água para o interior da mina. As preocupações com a redução das tensões de confinamento do maciço abaixo das pressões do aquífero foram expressas por Van Sambeek (1993) em referência ao influxo de água para o interior da mina K2, bem como Mraz & Genzwill (1986), em ligação com o mesmo evento. A fim de implementar um projeto otimizado e seguro deve-se ter uma gama de análises realizadas por ferramentas computacionais e dados laboratoriais.

4.5 ESTUDOS DA FORMAÇÃO DE QUEDA DE BLOCOS

O método de lavra utilizado na mina subterrânea de Taquari Vassouras é o de câmaras e pilares retangulares, com o uso de mineradores contínuos de rotores (Marieta), equipamentos de transporte elétrico (*shuttle-cars*) e quebrador-alimentador (*feeder-brake*) que descarrega o minério diretamente na correia transportadora (Figura 4.22).

O módulo de escavação de um painel de lavra corresponde à escavação de 37 metros no eixo do painel e à lavra das câmaras adjacentes, normalmente uma no lado direito e outra no lado esquerdo do eixo. Este módulo corresponde a um ciclo operacional de boa produtividade e de baixo nível de desgaste dos equipamentos.

O minerador escava o maciço descarregando o minério nos *shuttle-cars* com capacidade de 15 toneladas, que transportam o material a uma distância máxima de 150m, do minerador até o *feeder-braker*. Este equipamento faz a britagem primária do minério com uma cabeça de corte e alimenta um transportador de correias.

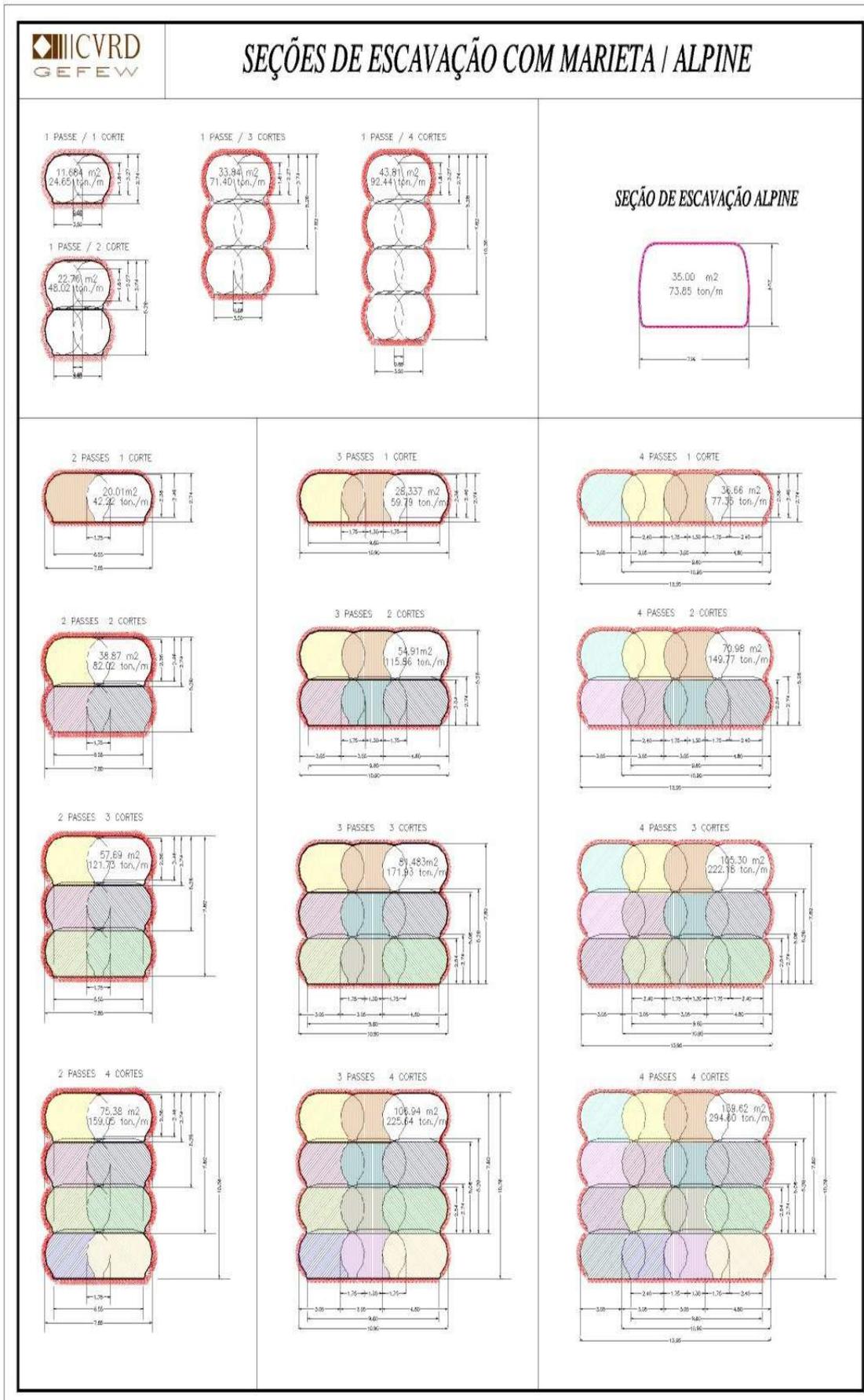
A tonelagem desmontada em cada painel varia de acordo com o número de cortes (verticais) e passes (horizontais) escavados em cada câmara de lavra, como mostra a Figura 4.23. As câmaras têm altura variável entre 2,7 e 10,3 metros e largura máxima de 14,0 metros. Os pilares são retangulares com área variando de 21,0 x 64,0m² (para largura da câmara com 10,9m) a 27,0 x 54,0m² (para largura da câmara com 14,0 metros). A taxa de extração varia de 43% a 47%.

Figura 4.22 – Ilustração do sistema de produção de lavra.



Fonte: Adaptado de Fontes (2003).

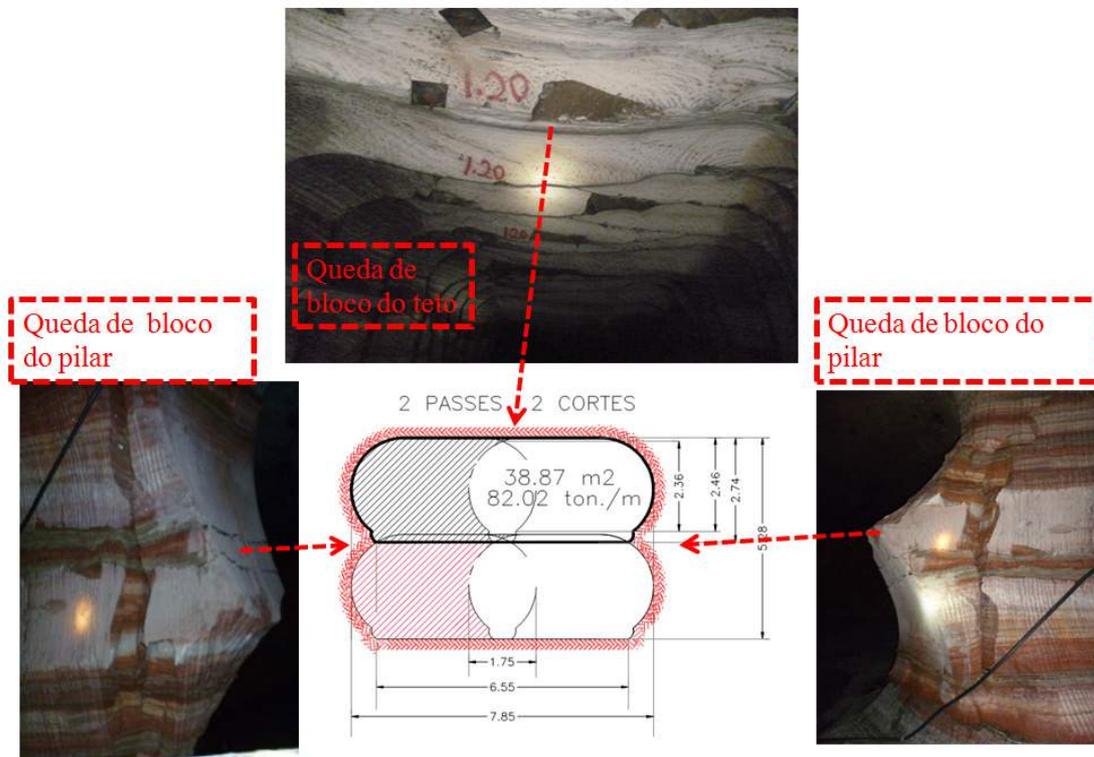
Figura 4.23 – Seções de escavação.



Fonte: (FONTES, 2003).

As escavações das aberturas para desenvolvimento e lavra do painel da mina TV podem, via de regra ser feitas segundo a configuração de 2 passes e 2 cortes (Figura 4.24), podendo, com algumas exceções, serem feitas apenas com 1 corte, ou seja, sem rebaixo do piso. Sabendo-se que os marcos geológicos tem uma característica peculiar de serem formados pela alternância rítmica de halita e argila em lâminas milimétricas, possuem uma menor qualidade/comportamento geomecânico com relação às camadas de halita+silvinita. Contudo, o processo de escavação atrelado às condições geológicas são motivos primordiais pela formação de queda de blocos na mina de TV.

Figura 4.24 – Configuração de 2 passes e 2 cortes com a indicação de queda de blocos.



Fonte: Adaptado de Fontes (2003).

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CASOS RELACIONADOS À MINA TAQUARI - VASSOURAS

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.
(**Simone de Beauvoir**)

A metodologia utilizada para a simulação numérica deste trabalho consistirá das seguintes etapas:

- Pré-processo: que consiste na caracterização geométrica da formação com obtenção de pontos (coordenadas xy) e superfícies que representam as rochas que caracterizam os materiais do modelo numérico a ser analisado; discretização da geometria com a geração de malha de elementos finitos utilizando o aplicativo comercial Gmesh e SOLIDWORKS para os outros casos; introdução dos parâmetros dos modelos constitutivos a serem usados na representação do comportamento tensão-deformação das rochas que compõem a formação; introdução das condições de contorno do problema, compostas de forças aplicadas (principalmente peso próprio) e zonas de deslocamentos prescritos (fronteiras e planos de simetria do domínio de análise).

- Processo: que consiste na execução do programa CODE-BRIGHT, com os arquivos de dados gerados no pré-processo, executa-se o CODE-BRIGHT em servidor Linux. Esta etapa compreende a geração do estado inicial de tensões (devido ao peso próprio das camadas), escavação das cavernas e ativação do mecanismo de fluência das rochas salinas, deformando e alterando o estado de tensões em todo maciço, ao longo do tempo. Os cálculos das tensões e deformações são realizados de maneira implícita.

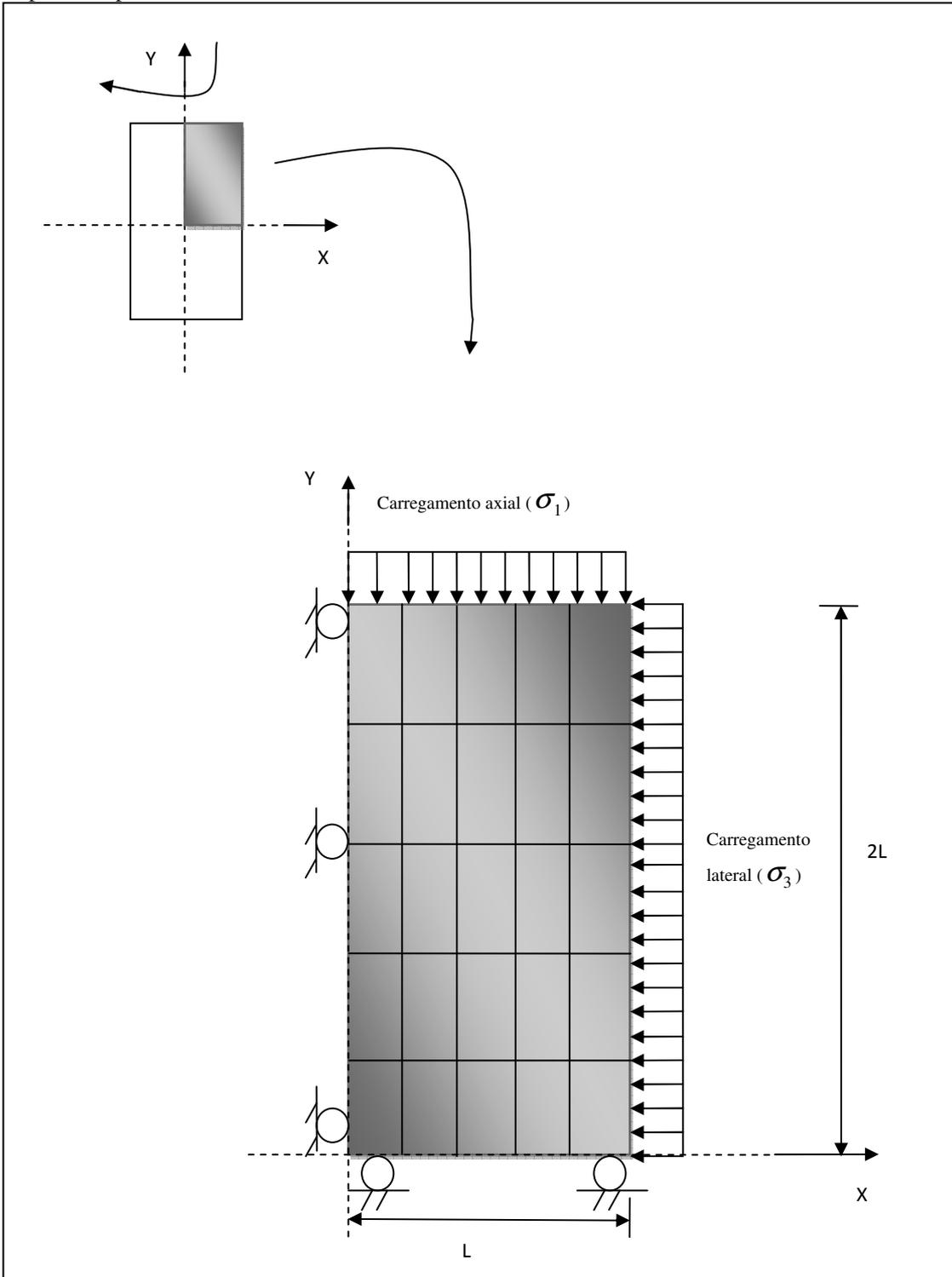
- Pós-Processo: que consiste na obtenção dos deslocamentos teto-piso com análises de convergência/fechamento das câmaras e demais saídas de interesse do problema e visualização gráfica, através do aplicativo comercial GID, desenvolvido no CIMNE (Universidade da Politécnica de Catalunha, Espanha), dos campos de deslocamentos, tensões, deformações e identificação de zonas de plastificação no maciço.

Um aspecto importante dos problemas em estudo é a simulação do processo de escavação, que deve considerar a evolução gradual da abertura da caverna. Este procedimento é fundamental quando o material apresenta comportamento tensão-deformação não-linear, e irrelevante se o modelo constitutivo for elástico-linear. Cabe destacar que o processo de escavação em elementos finitos reproduz a variação de tensões do estado inicial de tensões devido ao peso próprio das camadas (geoestático ou litostático) ao estado final onde os elementos escavados são retirados da malha de elementos finitos.

5.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO TRIAXIAL DE FLUÊNCIA

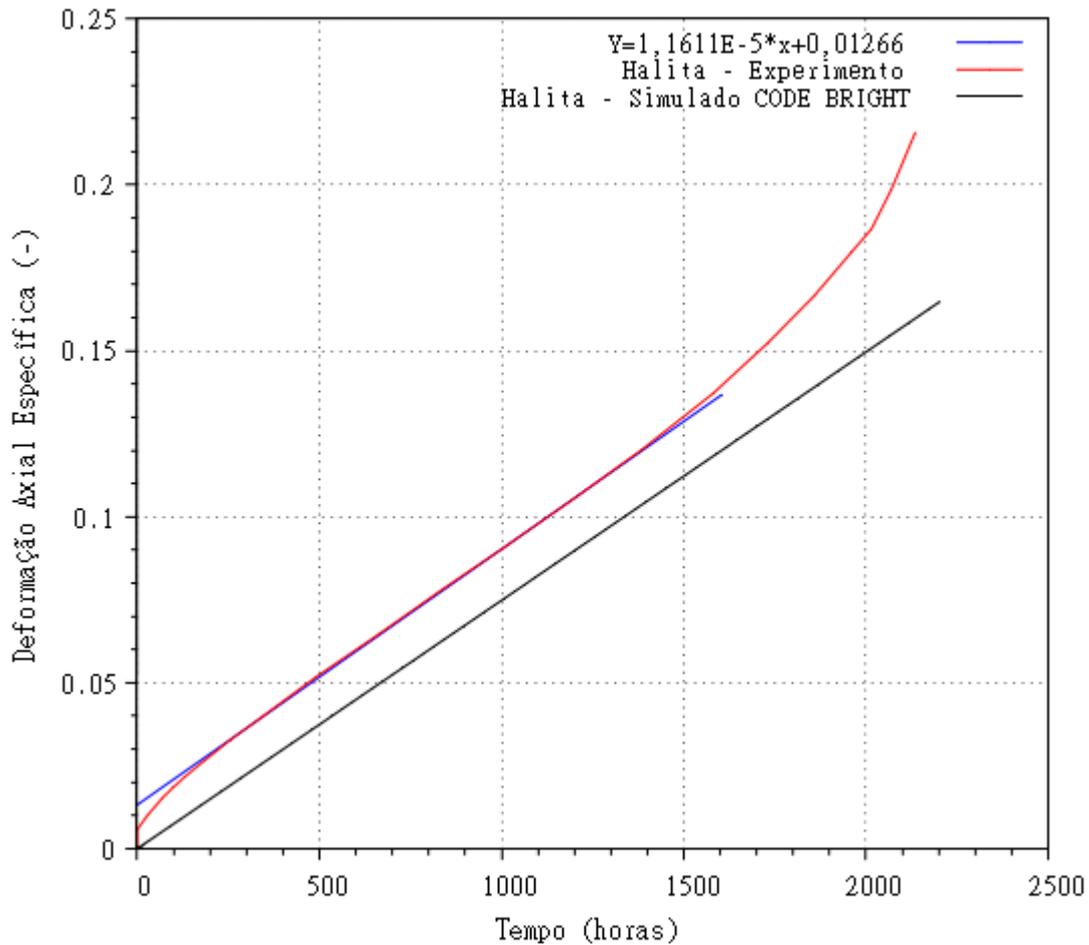
Neste item, comparam-se os resultados de simulação numérica, realizada no CODE-BRIGHT, com os resultados medidos em laboratório, descritos em Mohriak *et al.* (2008), num corpo de prova de halita, extraído na mina Taquari Vassouras, com diâmetro de 88 mm e altura de 176 mm, submetido ao ensaio triaxial de fluência nas condições de temperatura de 86°C e pressões confinantes e axial de 10 e 26 MPa, respectivamente, com tensão de referência de 9,91 MPa (σ_{do}), taxa de deformação corrigida de 0,016 por ano ($\dot{\epsilon}_{sco}$), e coeficientes n_1 e n_2 iguais a 3,36 e 7,55, respectivamente. Na Figura 5.1 apresenta-se um esquema ilustrativo para a simulação do ensaio triaxial, em que se utilizou uma malha com elementos quadriláteros de quatro nós, com um total de 25 elementos e 36 nós, e na Figura 5.2 os resultados simulados do CODE-BRIGHT e experimentais capturados de Mohriak *et al.* (2008).

Figura 5.1 Esquema ilustrativo das condições de contorno, geometria e discretização de amostra para o ensaio triaxial, onde só $\frac{1}{4}$ da amostra de rocha evaporítica é modelado (considerando a simetria axial, eixo vertical da amostra, e radial), σ_1 é a tensão principal maior e σ_3 é a tensão principal menor que é responsável pelo confinamento.



Fonte: Adaptado de Silva (2010).

Figura 5.2 – Halita submetida a uma tensão desviatória de 16 MPa e temperatura de 86 °C.



Fonte: Autor.

De acordo com Poiate (2012), a validação do modelo de mecanismo duplo deformação se faz com a comparação da taxa de deformação por fluência em regime permanente obtida por simulação numérica, aqui representada pela reta de cor preta, com a dos resultados experimentais, aqui representada pela reta de cor azul, que sobrepõe parte da curva experimental de cor vermelha, buscando-se captar, assim, o comportamento de fluência no estacionário. Observa-se, então, o paralelismo entre elas, o que denota inclinações aproximadas e, corroborando, a validação da metodologia utilizada para a aplicação dos parâmetros de fluência da equação constitutiva de mecanismos duplo de deformação do CODE BRIGHT.

5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÊNCIA EM ESCAVAÇÕES NA MINA TAQUARI - VASSOURAS: PAINEL D1

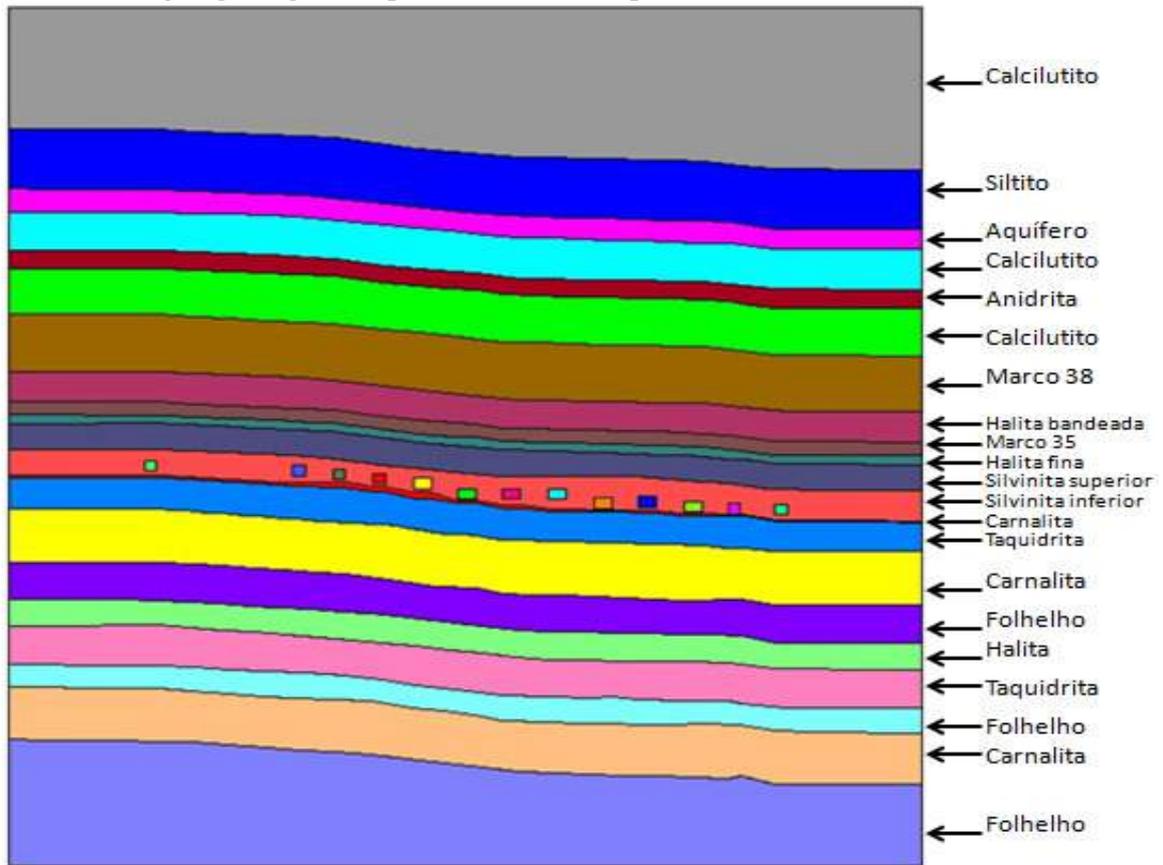
Esta seção tem por objetivo avaliar o comportamento do painel de lavra experimental D1 e a câmara experimental C1D1. Isso está embasada nas discussões do Capítulo 4, principalmente na seção 4.3, e em dados cedidos pela CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), que forneceram uma seção geológica detalhada do Painel D1, a câmara experimental C1D1 (Figura 5.3), e as medições de instrumentação de convergência das câmaras, que podem ser vistas no relatório de Costa (1997).

O teto da câmara C1D1 está localizado a uma profundidade de 426m e o piso a 430,0m. O painel D1 foi escavado inicialmente com uma taxa de extração média de 27%, com altura de corte de 4m, largura de pilares de 11,5m e largura de câmaras de 4,20m. Sabendo-se, ainda, que o pilar que separa C1D1 de C7D1 é de 57,0m. Além disso, foi considerada uma laje de silvinita de 1.5m e carnalita com 1.0m de espessura na C1D1. Sabe-se, ainda, que o nível de topo do perfil da Figura 6.5 não corresponde ao nível da superfície, e, por isso na modelagem numérica, será adotada uma tensão vertical de 7,25 MPa, equivalente ao efeito dos níveis de solo acima (Figura 5.4).

Em função dos registros das instrumentações instaladas na câmara experimental C1D1 e demais câmaras do painel D1 disponibilizado pela CVRD, constatou-se que as câmaras C7D1 a C29D1 tiveram início de sua escavação a cerca de 1 ano após a conclusão da câmara C1D1. Em todos os casos analisados, considera-se que a câmara experimental C1D1 é escavada no instante $t = 30$ dias, e que as demais câmaras do painel D1 são escavadas simultaneamente no instante $t = 365$ dias. Além disso, observa-se também uma desaceleração da convergência das câmaras que é provavelmente decorrente da refrigeração que a mina teve a aproximadamente dois anos após o início da lavra de C1D1.

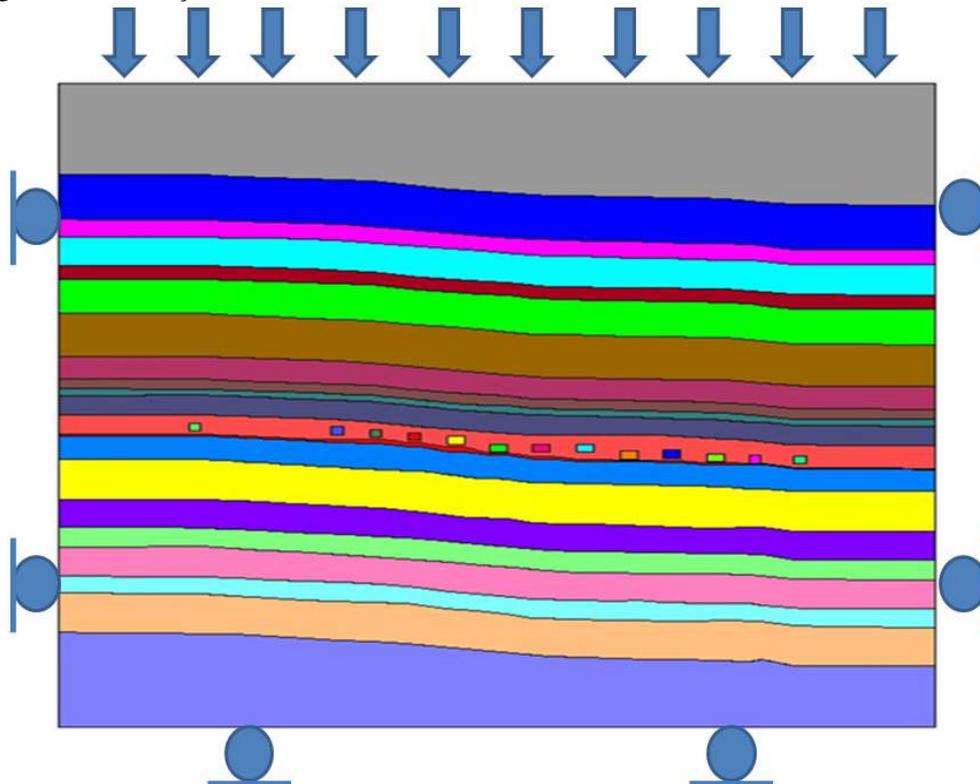
Quando se comparam os resultados simulados com os medidos nas câmaras C7D1 a C29D1, desloca-se a curva obtida por simulação de um intervalo de 365 dias, de modo a que possa ser comparada com as curvas de convergência medidas nas câmaras de lavra.

Figura 5.3 - Seção geológica do painel D1 adotada para análise.



Fonte: Autor.

Figura 5.4 - Condições de contorno do modelo estrutural de análise.



Fonte: Autor.

Na Tabela 5.1 constam os parâmetros mecânicos elástoplástico e de fluência adotados para análise, com indicações de cada camada e respectivos materiais do perfil geológico. Para as rochas salinas foi adotado o modelo de fluência de mecanismo duplo de deformação, com T_0 (temperatura de referência) de 43°C e para as demais rochas o modelo clássico elastoplástico de Mohr-Coulomb.

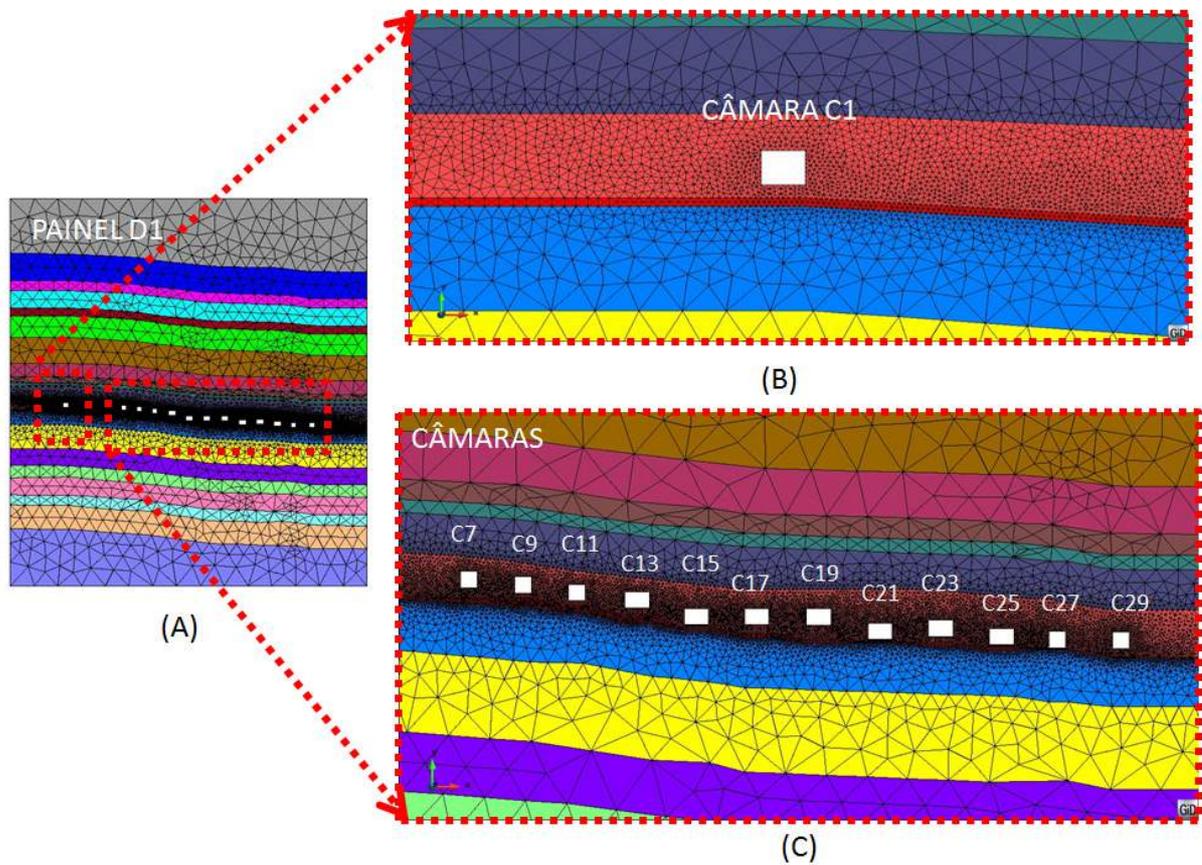
Tabela 5.1 – Parâmetros mecânicos adotados para as análises com temperatura de referência de 43°C para as rochas salinas.

| Camada | Material | E (MPa) | ν | c (MPa) | ϕ (°) | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|--------|-----------------------|-----------|-------|-----------|------------|------------------------|---|-------|-------|
| 1 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 2 | Siltito | 20696 | 0,15 | 1,1 | 32,8 | | | | |
| 3 | Aquifero | 20696 | 0,15 | 1,1 | 32,8 | | | | |
| 4 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 5 | Anidrita | 20403 | 0,33 | 3 | 42 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 6 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 7 | Marco 38 | 15000 | 0,1 | 0,9 | 37,3 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 8 | Halita Bandeada | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 9 | Marco 35 | 15000 | 0,1 | 0,9 | 37,3 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 10 | Halita fina | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 11 | Silvinita superior | 15742 | 0,33 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 12 | Silvinita inferior | 15742 | 0,33 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 13 | Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| 14 | Taquidrita | 4920 | 0,33 | 0,47 | 29,3 | 10 | 0,22 | 3 | 3 |
| 15 | Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| 16 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 17 | Halita | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 18 | Taquidrita | 4920 | 0,33 | 0,47 | 29,3 | 10 | 0,22 | 3 | 3 |
| 19 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 20 | Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| 21 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |

Fonte: (COSTA, 1997, 1995b)

Sobre o modelo estrutural de análise foi gerada a malha de elementos finitos. Na discretização foram utilizados elementos triangulares de 3 nós, sendo utilizado um total de 29750 elementos e 14933 nós. Próximo à escavação, procurou-se gerar a malha com maior nível de refinamento, conforme ilustrado na Figura 5.5.

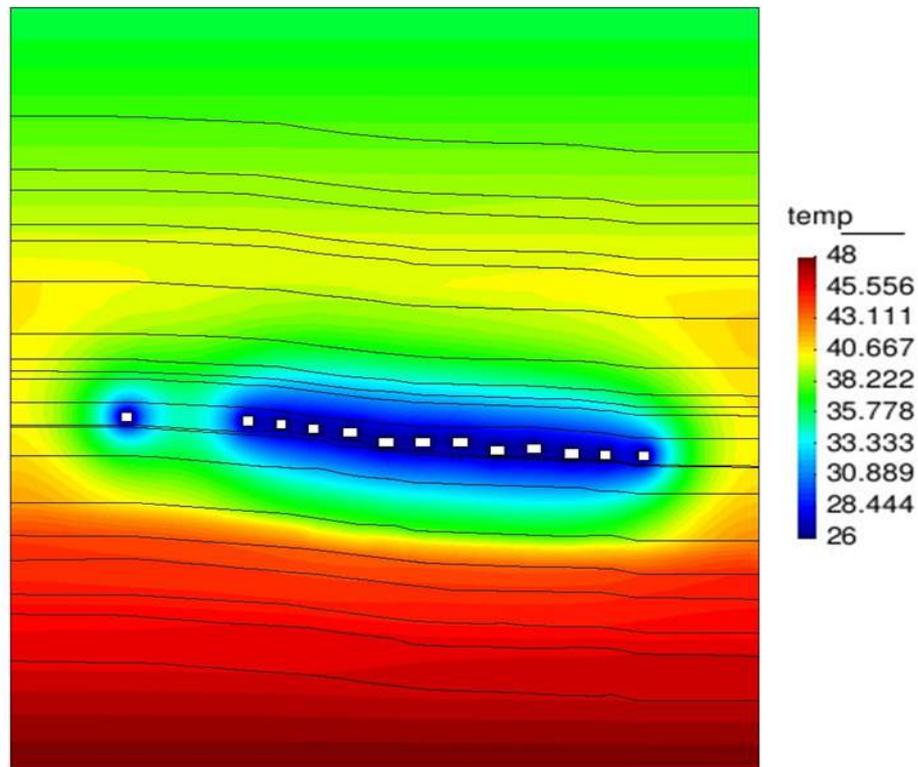
Figura 5.5 - Malha de elementos finitos adotada para as análises: (A) Painel D1, malha com 29750 elementos e 14933 nós; (B) Detalhe da câmara C1 e (C) Detalhe das câmaras C7, C9, C11, C13, C15, C17, C19, C21, C23, C25, C27 e C29.



Fonte: Autor.

No que concerne à temperatura, foi imposta, no topo do modelo, 36°C e, na base, 48°C , para que a temperatura média das câmaras fosse de 43°C , e depois de dois anos foi imposta, de forma arbitrária, porém necessária, 26°C de temperatura devido à refrigeração da mina Taquari Vassouras (Figura 5.6). Cabe enfatizar que temperatura constante influencia tanto quanto tensão constante em modelos de fluência. Então, a imposição de temperaturas inadequadas para as câmara irá certamente influenciar os resultados da convergência das câmaras.

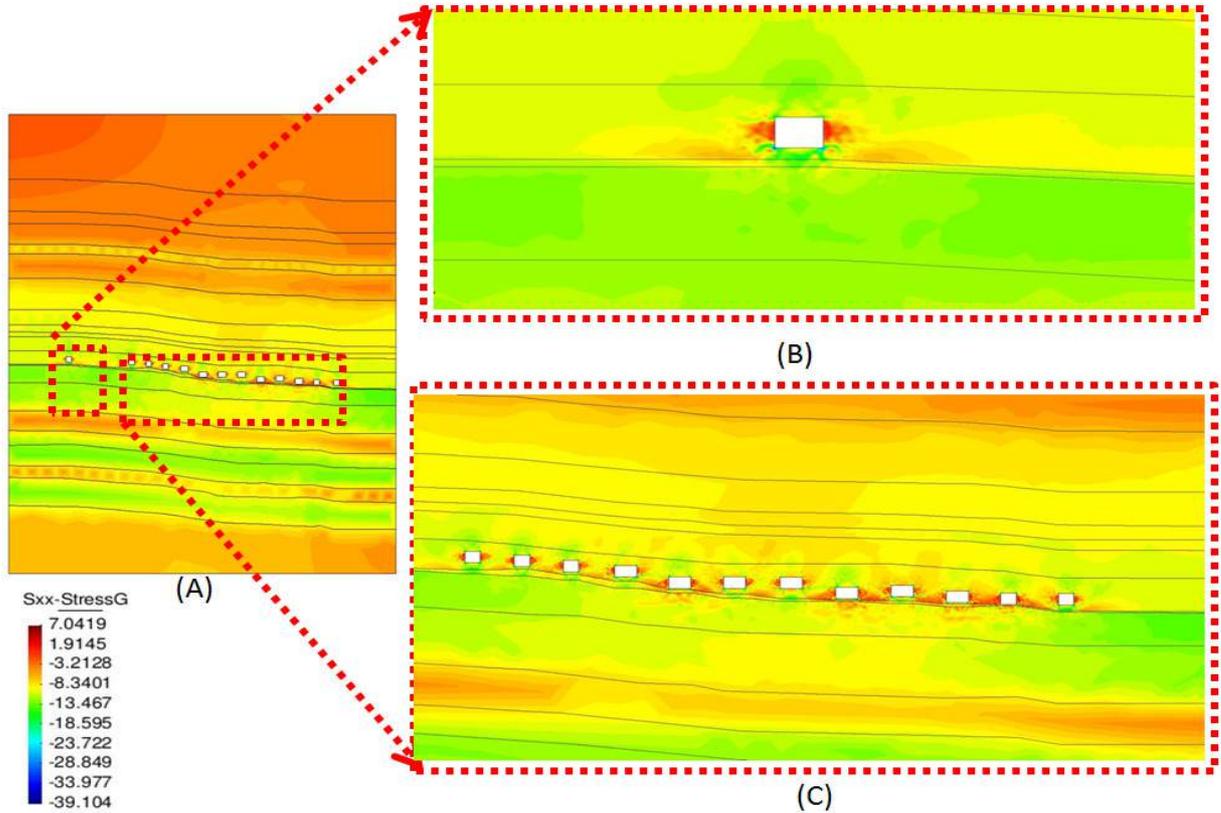
Figura 5.6 Distribuição da temperatura a 6 anos.



Fonte: Autor.

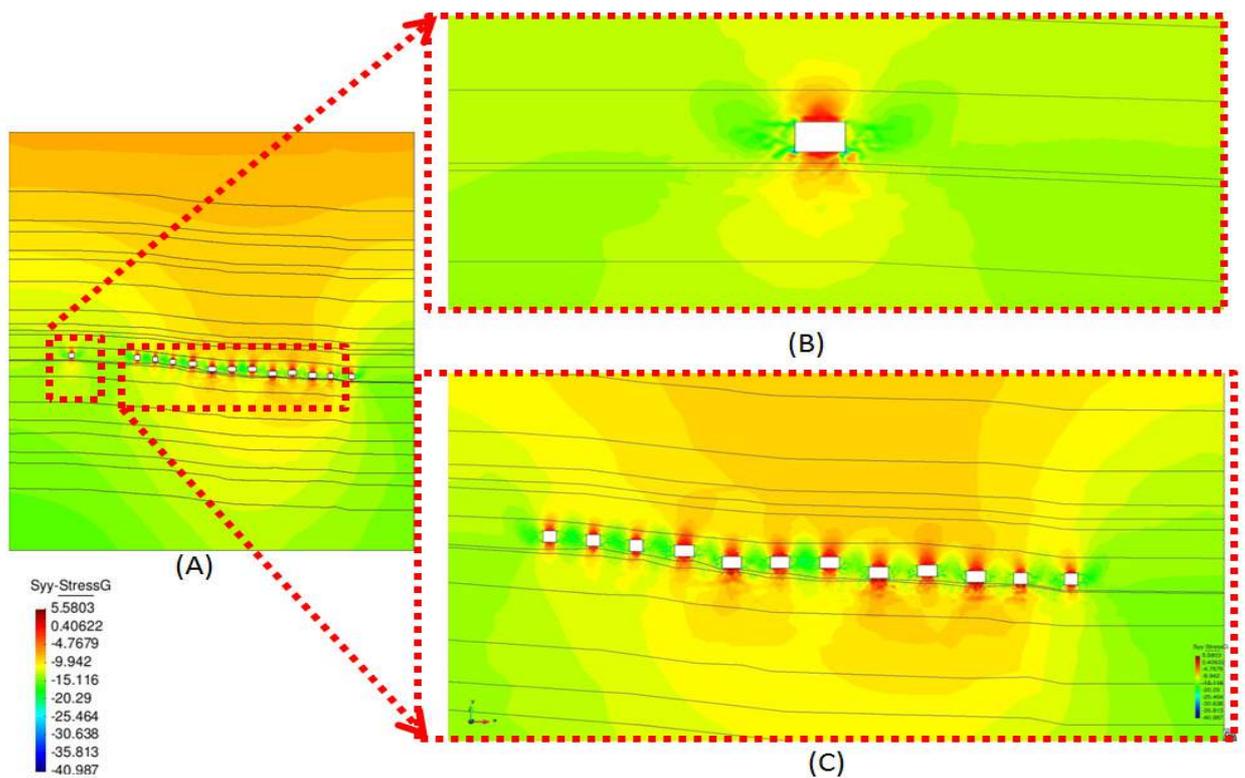
A distribuição das tensões horizontais é apresentada na Figura 5.7, através da qual se observa camadas de folhelho, por exemplo, sendo afetadas pela escavação. Isto se dá pelo fato de o folhelho, nesse caso, ser um material não-viscoso intercalado por materiais que apresentam altas taxas de deformação por fluência. Na camada superior de taquidrita, acima da carnalita superior, é possível observar, também, que há uma zona de tração na interface taquidrita-folhelho. Já nas tensões verticais (Figura 5.8), é possível notar uma concentração de tensões de tração no teto e no piso das câmaras e de compressão ao longo dos pilares chegando a valores de 20 MPa, aproximadamente. Na Figura 5.9, que apresenta, a distribuição das tensões cisalhantes (representadas pelo segundo invariante do tensor desviador, J) no maciço, pode-se observar o alto nível de cisalhamento das camadas de folhelho e, no entorno das câmaras, corroborando com o que foi discutido até então.

Figura 5.7 - Distribuição das tensões horizontais a 6 anos: (A) no painel D1; (B) no detalhe da escavação da CID1; (c) no detalhe das outras câmaras.



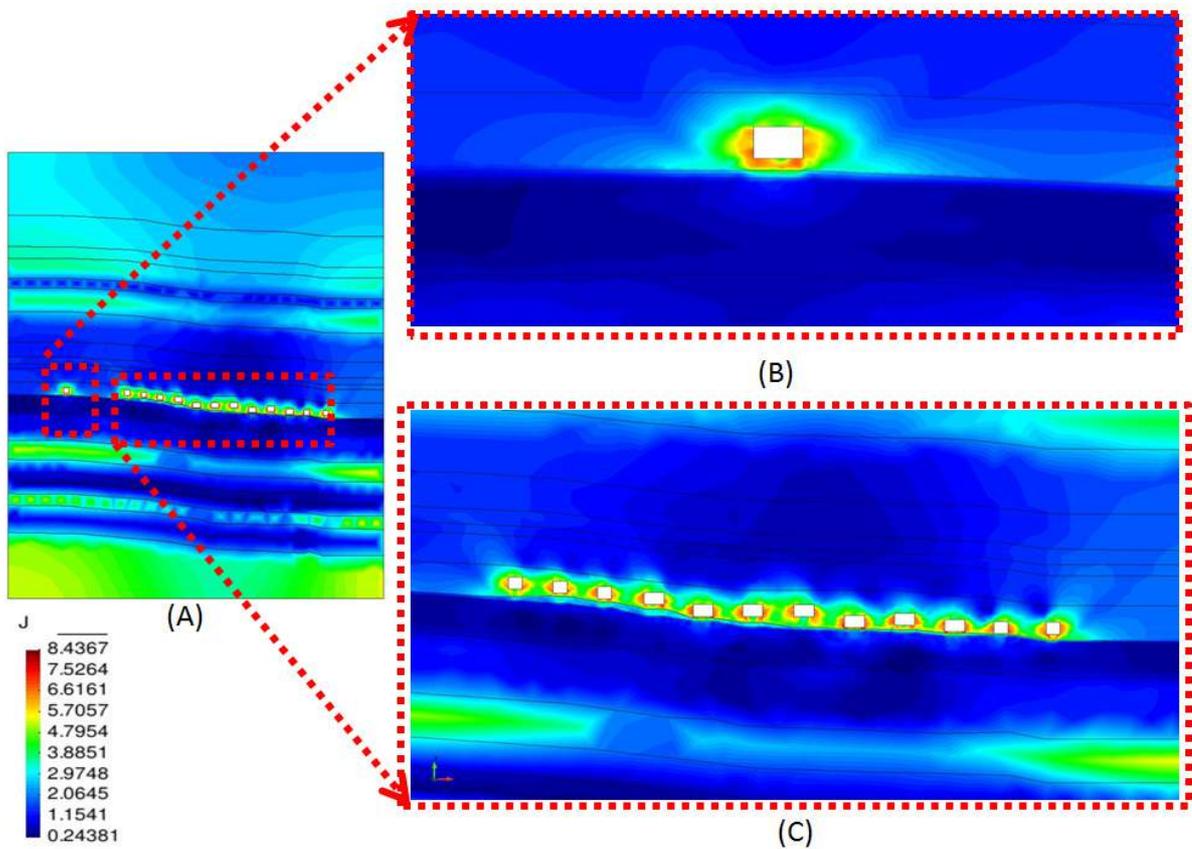
Fonte: Autor.

Figura 5.8 - Distribuição das tensões verticais a 6 anos: (A) no painel D1; (B) no detalhe da escavação da CID1; (c) no detalhe das outras câmaras.



Fonte: Autor.

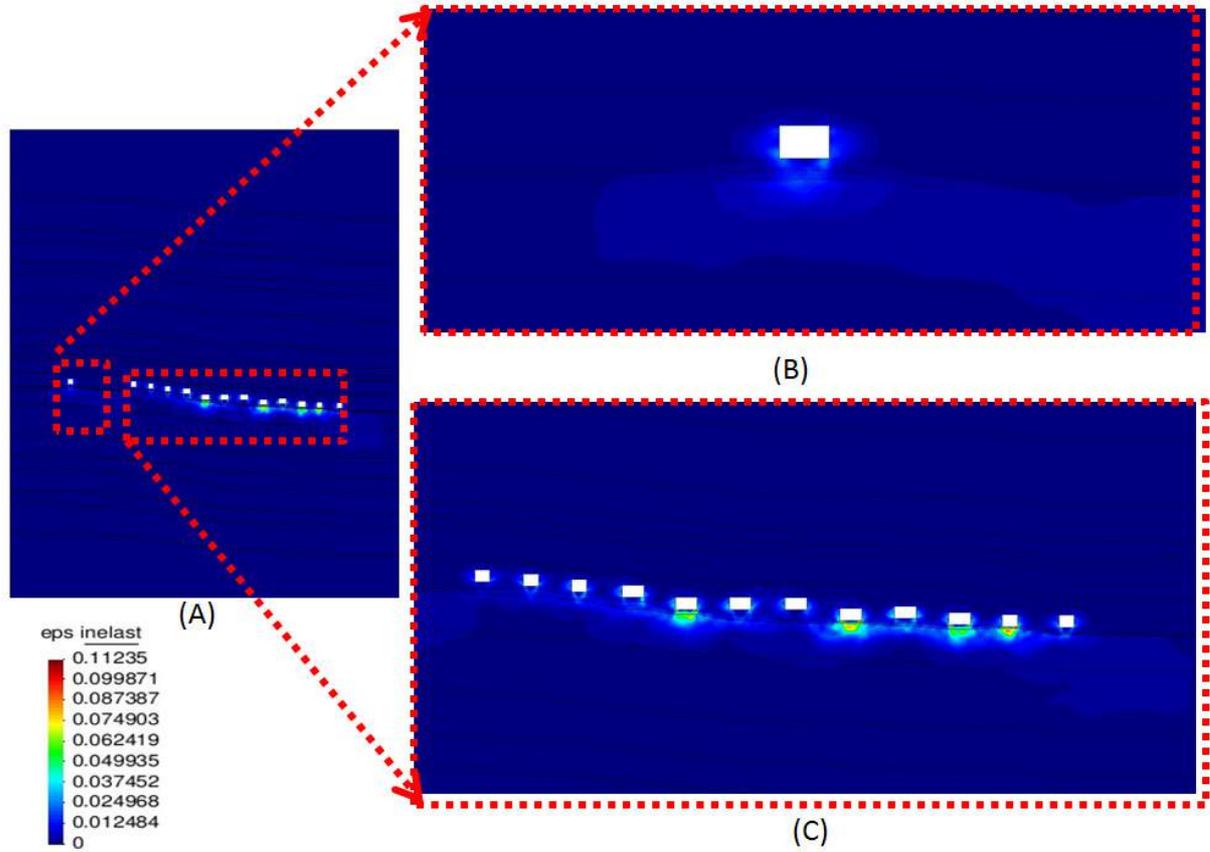
Figura 5.9 - Distribuição das tensões cisalhantes a 6 anos: (A) no painel D1; (B) detalhe da escavação da C1D1; (C) detalhe das outras câmaras.



Fonte: Autor.

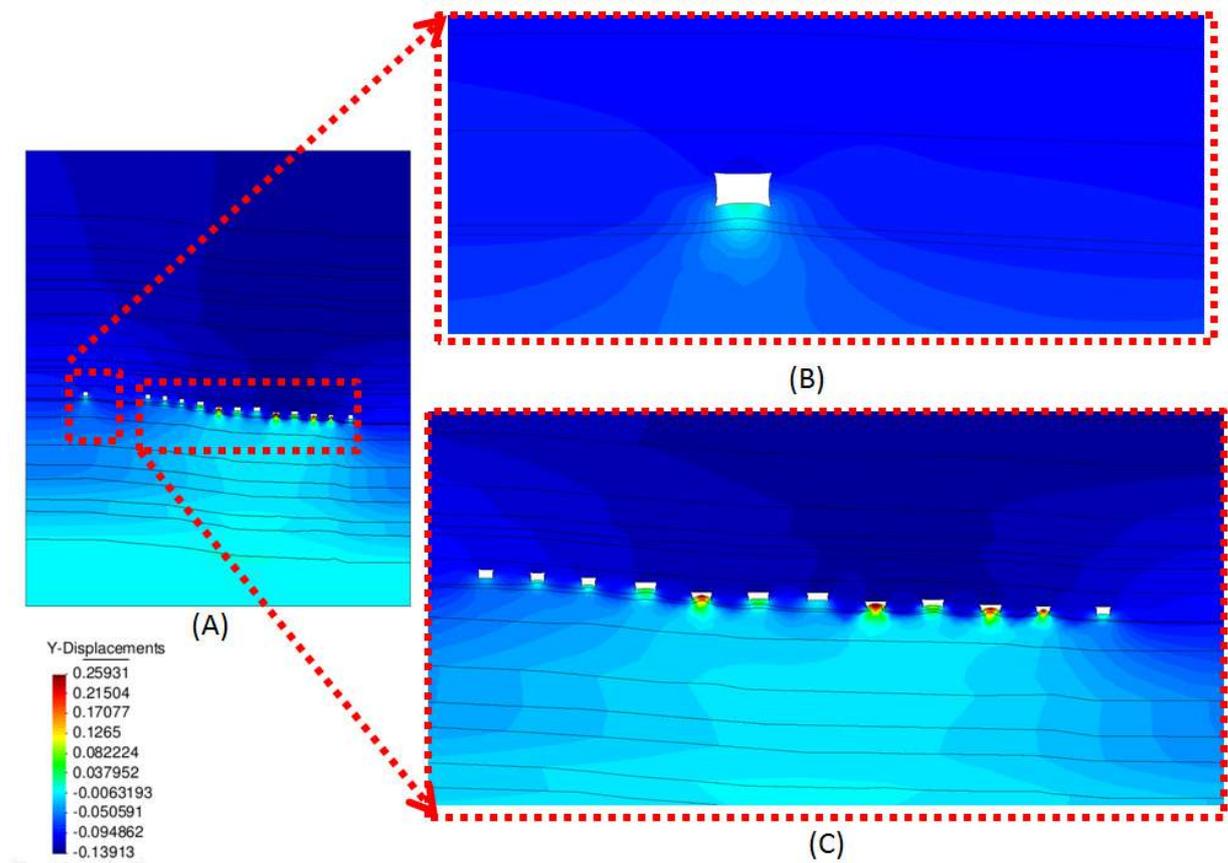
Na Figura 5.10 é apresentada a distribuição de deformações inelásticas, podendo-se observar que estas se propagam pelo maciço. Já as deformações elasto-plásticas dos materiais não-salinos podem ser causadas pela escavação das cavernas e pelas deformações de fluência dos materiais salinos, uma vez que estes últimos se deformam a diferentes taxas, solicitando mecanicamente (cisalhando) os materiais não-salinos intercalados. Já na Figura 5.11 é apresentada a distribuição dos deslocamentos verticais.

Figura 5.10 - Distribuição das deformações inelásticas a 6 anos: (A) no painel D1; (B) detalhe da escavação da CID1; (C) detalhe das outras câmaras.



Fonte: Autor.

Figura 5.11 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 8 para os deslocamentos) e distribuição dos deslocamentos verticais a 6 anos: (A) no painel D1; (B) detalhe da escavação da C1D1; (C) detalhe das outras câmaras.



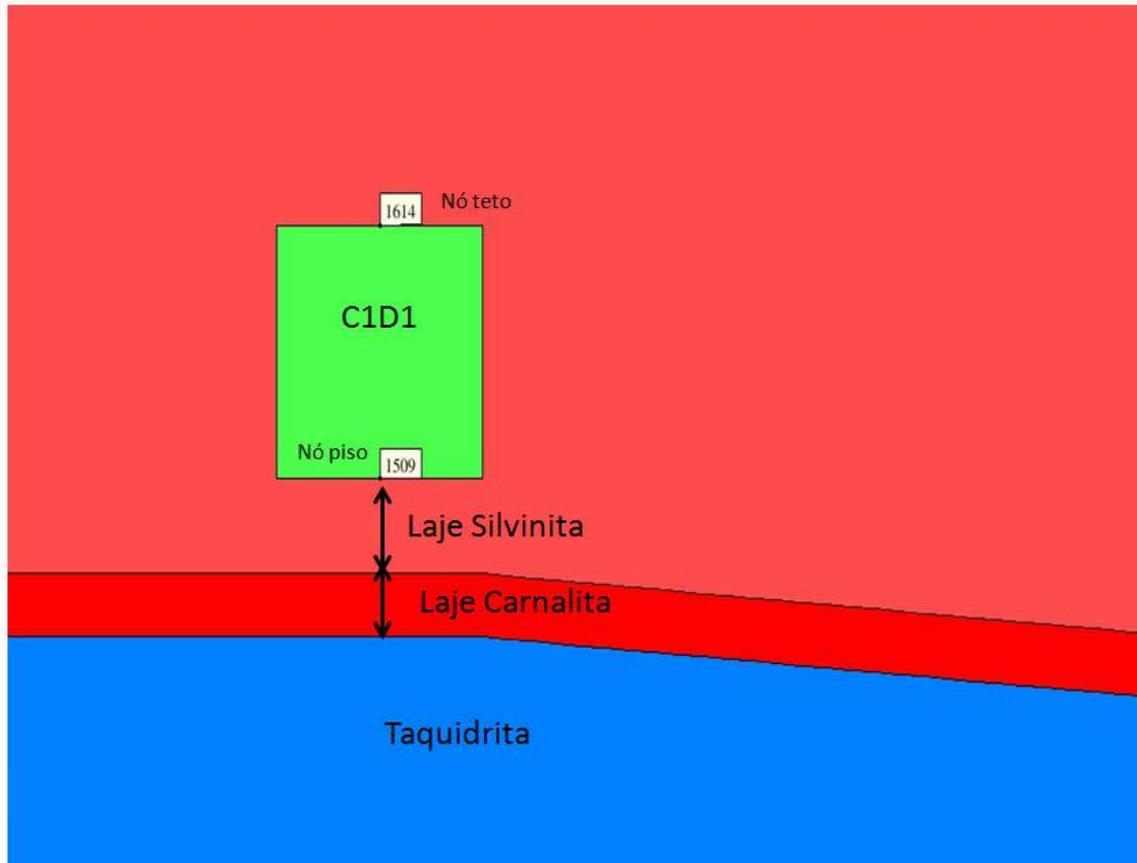
Fonte: Autor.

Por se utilizar o modelo de estado plano de deformação, considera-se que a topologia do modelo é constante ao longo de todo o comprimento da câmara, ou seja, a espessura da laje de silvinita é a mesma ao longo do eixo longitudinal da câmara. Como a seção geológica baseia-se no mapeamento da seção A-A', visto no capítulo 4, em alguns casos serão comparados resultados de medição de convergência em pontos do eixo longitudinal da câmara com espessura de silvinita diferente daquela utilizada na simulação. Esta diferença poderá causar desvios entre os resultados simulados e os medidos. O importante, no entanto, é avaliar a tendência do resultado da modelagem numérica do painel, ou seja, se as velocidades de deformação do maciço encontram-se próximas dos valores medidos.

Na Figura 5.13, comparam-se as curvas de convergência, base 1-2 (teto-piso) (Figura 5.12), visto no capítulo 4 desde trabalho, das seções 8 a 13 da câmara C1D1, com o resultado obtido por simulação. Nas seções instrumentadas de 8 a 13, a espessura média de silvinita sobrejacente à taquidrita é igual a 1,10 m. Comparando-se a curva de simulação com a laje de silvinita com 1,5 m de espessura, verifica-se que os resultados numéricos são consistentes

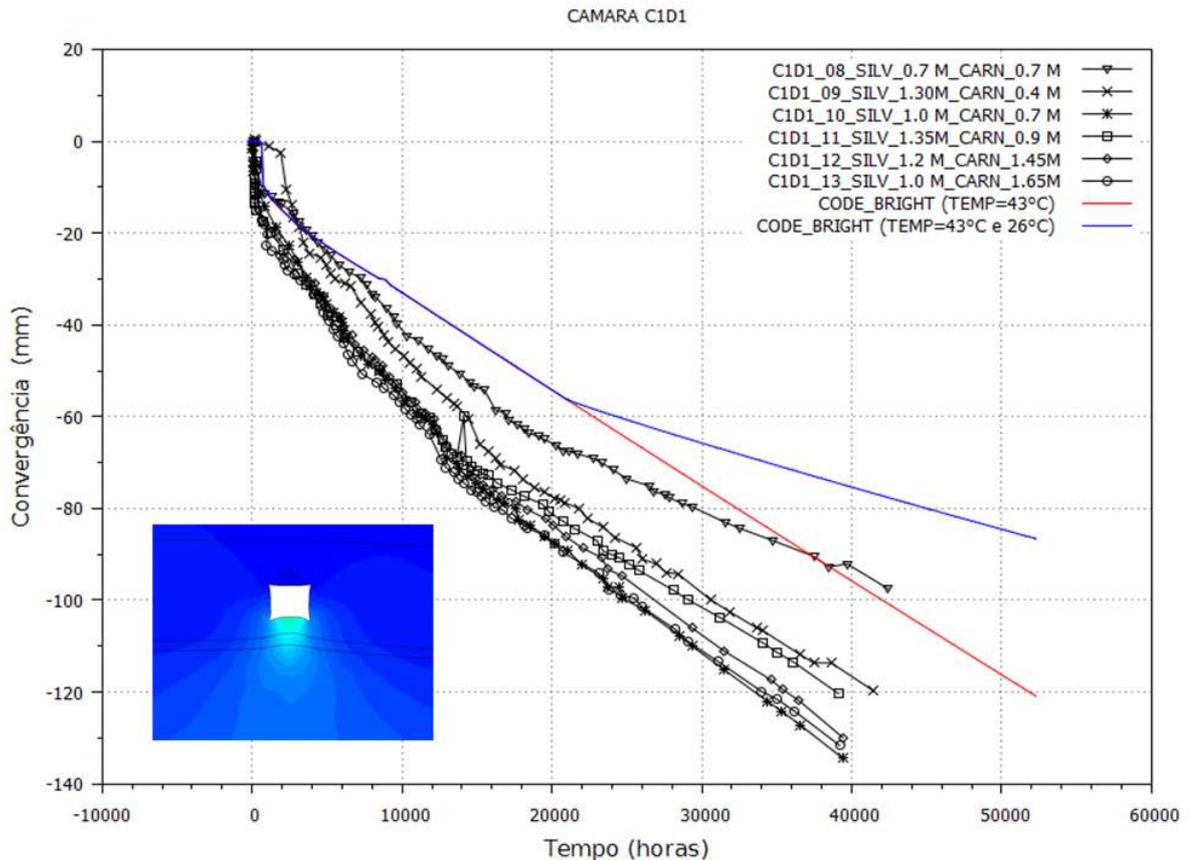
com os valores medidos “in-situ”. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foi realizado uma análise adicional com temperatura de 43°C, cujo resultado para a câmara C1D1 pode ser visto na figura 5.13.

Figura 5.12 – Câmara C1D1 com indicações dos nós da base 1-2 (teto-piso), da laje de silvinita, da laje da carnalita e da taquidrita.



Fonte: Autor.

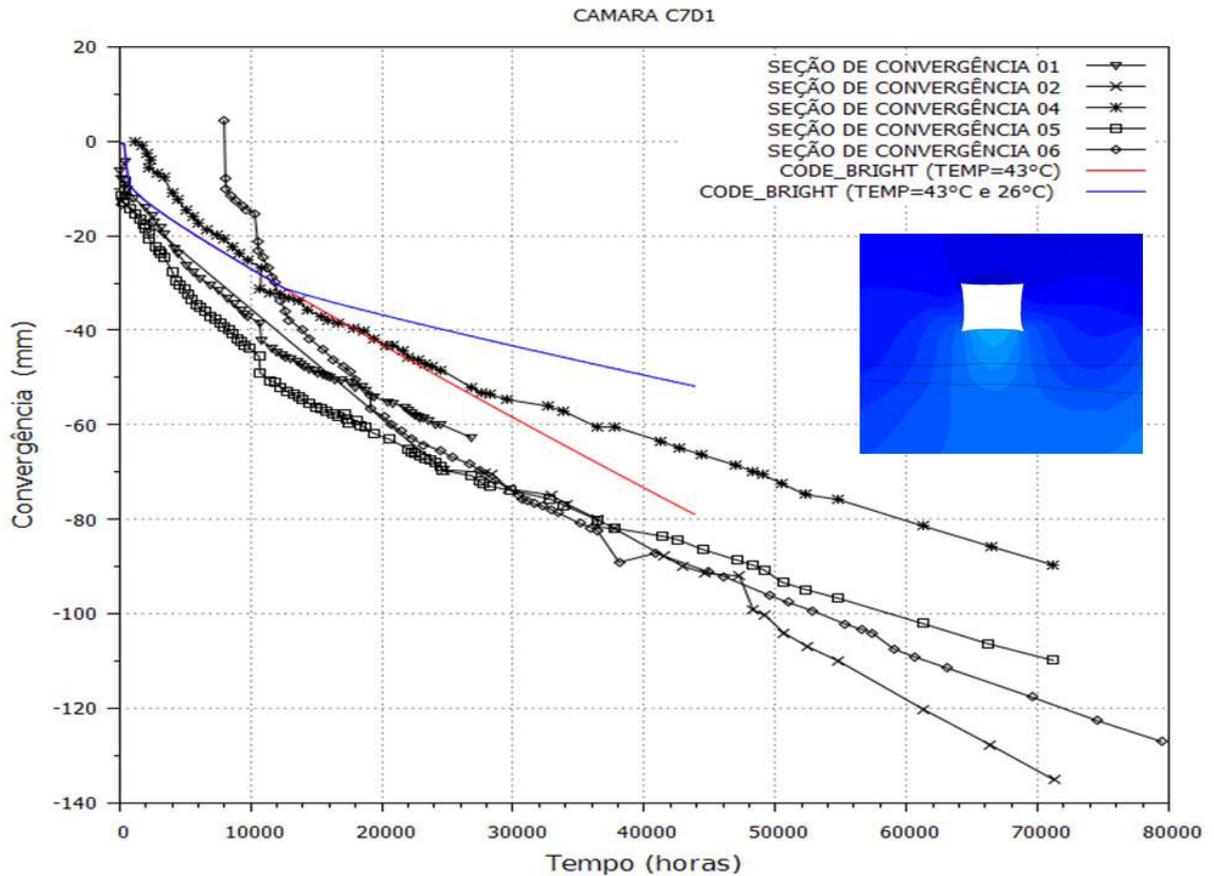
Figura 5.13 - Comparação entre a convergência medida na câmara C1D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 1,5 m e carnalita de 1,0 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.14, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C7D1 com os previstos numericamente. Neste caso, tem-se, na seção geológica de referência e no modelo de análise, a espessura de laje de silvinita igual a 2,5 m e a de carnalita igual a 1,5 m. Constata-se que a convergência prevista por simulação, a 43°C, de 14,71 mm/ano, apresenta-se bem aproximado dos valores médios medidos “in situ”, de 14,04 mm/ano. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foi realizado uma análise adicional com temperatura de 43°C, cujo resultado para a câmara C7D1 pode ser visto na figura 5.14.

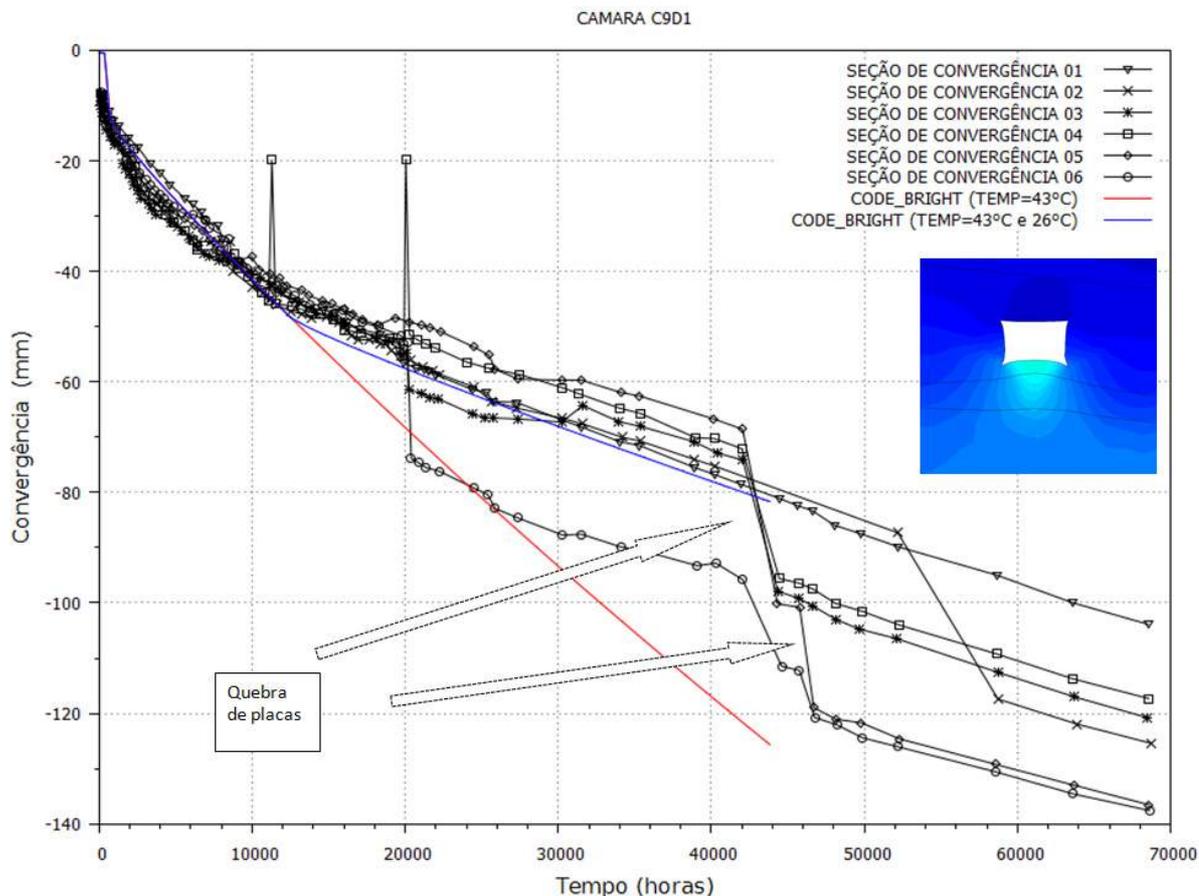
Figura 5.14 Comparação entre a convergência medida na câmara C7D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 2,5 m e carnalita de 1,5 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.15, tem-se a comparação para a câmara C9D1. A velocidade da convergência da câmara, obtida numericamente, a 43°C, é de 21,05 mm/ano e, no caso das curvas medidas, o valor médio é de 11,87 mm/ano, ou seja, o resultado numérico é 77% superior. Observa-se nos gráficos medidos que existem saltos associados aos eventos de quebra de placas já relatados na seção 4.3 deste trabalho. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foi realizado uma análise adicional com temperatura de 43°C, cujo resultado para a câmara C9D1 pode ser visto na figura 5.15.

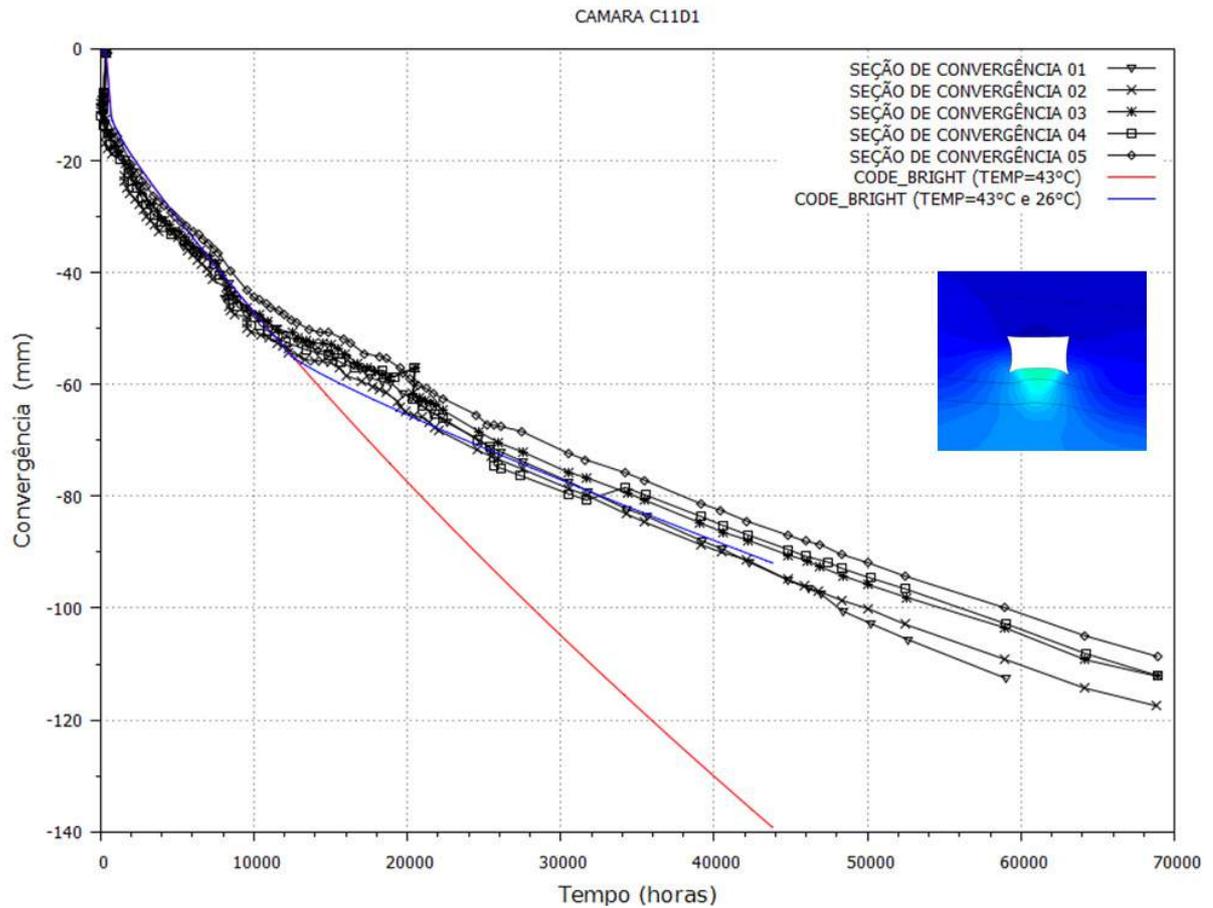
Figura 5.15 - Comparação entre a convergência medida na câmara C9D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 1,0m e carnalita de 2,5 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.16, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C11D1 com o obtido por simulação. Na seção geológica de análise, tem-se 1,0 m de silvinita e 2,0 m de carnalita sobrejacente à taquidrita. A velocidade da convergência da câmara obtida numericamente, a 43°C, é de 22,20 mm/ano e, no caso das curvas medidas, o valor médio é de 11,35 mm/ano para uma temperatura de 26°C. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foi realizado uma análise adicional com temperatura de 43°C, cujo resultado para a câmara C11D1 pode ser visto na figura 5.16.

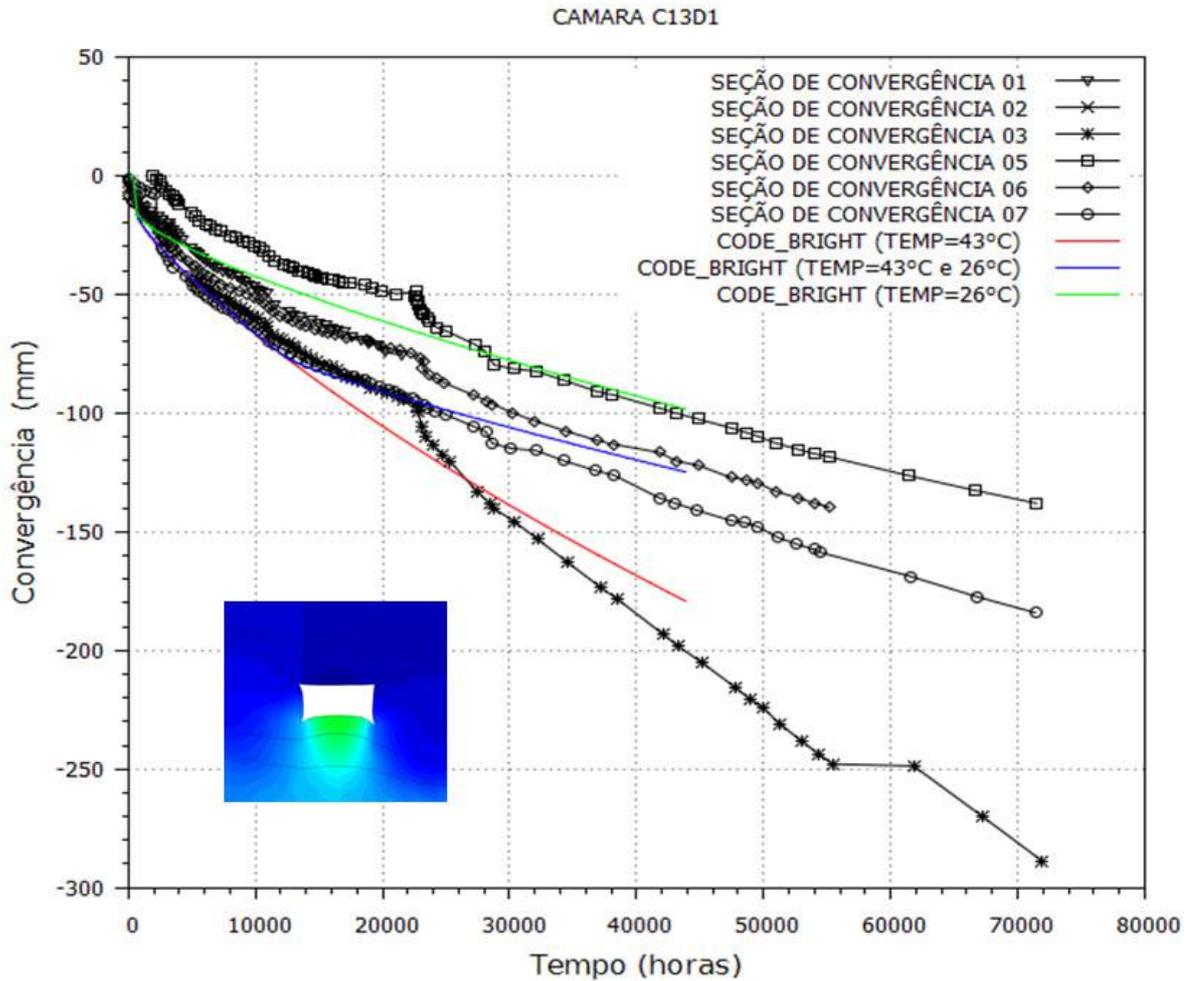
Figura 5.16 - Comparação entre a convergência medida na câmara C11D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 1,0 m e carnalita de 2,0 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.17, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C13D1, seções 01 a 07, com o obtido por simulação. Na seção geológica de análise, tem-se 1,5 m de silvinita e 2,5 m de carnalita sobrejacente à taquidrita. A velocidade da convergência da câmara obtida numericamente, a 43°C, é de 26,20 mm/ano e, no caso das curvas medidas, o valor médio é de 22,80 mm/ano, ou seja, o resultado numérico é 15% superior. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizados duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C13D1 podem ser vistos na figura 5.17.

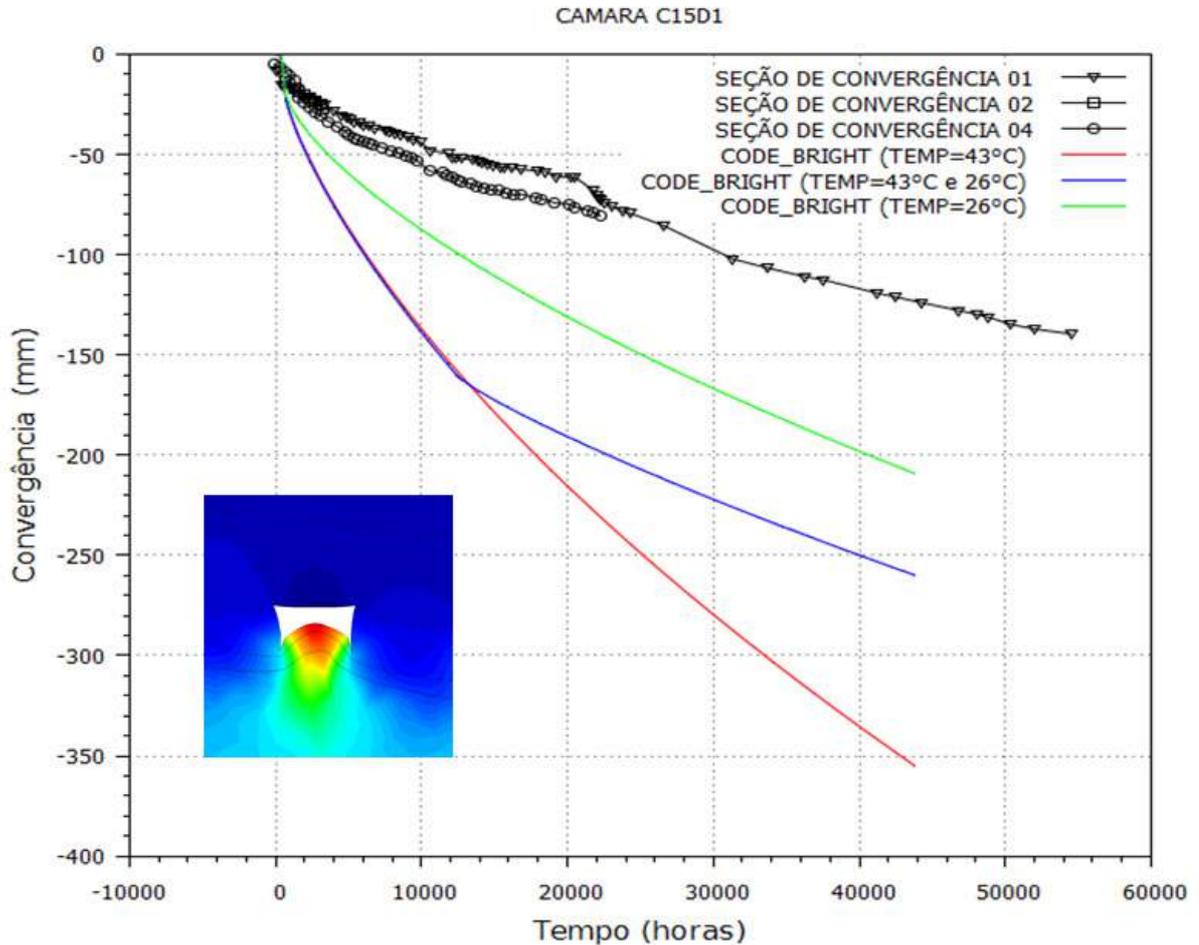
Figura 5.17 - Comparação entre a convergência medida na câmara C13D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 1,0 m e carnalita de 2,5 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.18, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C15D1, seções de convergência de 01 a 07, com o obtido por simulação. Na seção geológica de análise, tem-se 0,5 m de silvinita. Verifica-se que a convergência medida apresenta valores sensivelmente menores do que se poderia esperar para uma espessura de silvinita igual a 0,5 m. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizados duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C15D1 podem ser vistos na figura 5.18.

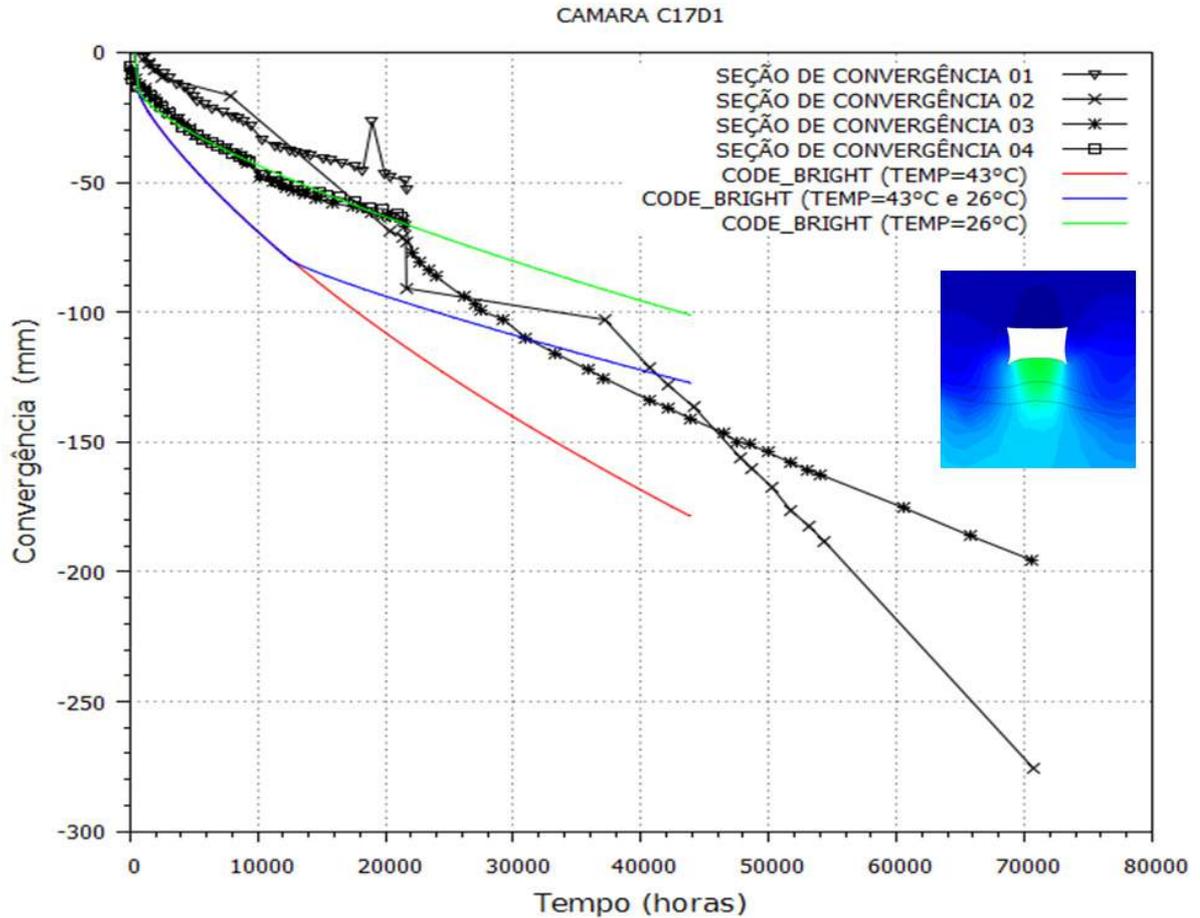
Figura 5.18 - Comparação entre a convergência medida na câmara C15D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 0,5 m e carnalita de 1,0 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.19, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C17D1, seções de convergência de 01 a 04, com o obtido por simulação. Na seção geológica de análise, tem-se 2,0 m de silvinita e 1,5 m de carnalita sobrejacente à taquidrita. A velocidade da convergência da câmara obtida numericamente, a 43°C, é de 21,90 mm/ano e, no caso das curvas medidas, o valor na seção 02 é de 45,28 mm/ano e a seção 03 de 18,86 mm/ano. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizadas duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C17D1 podem ser vistos na figura 5.19.

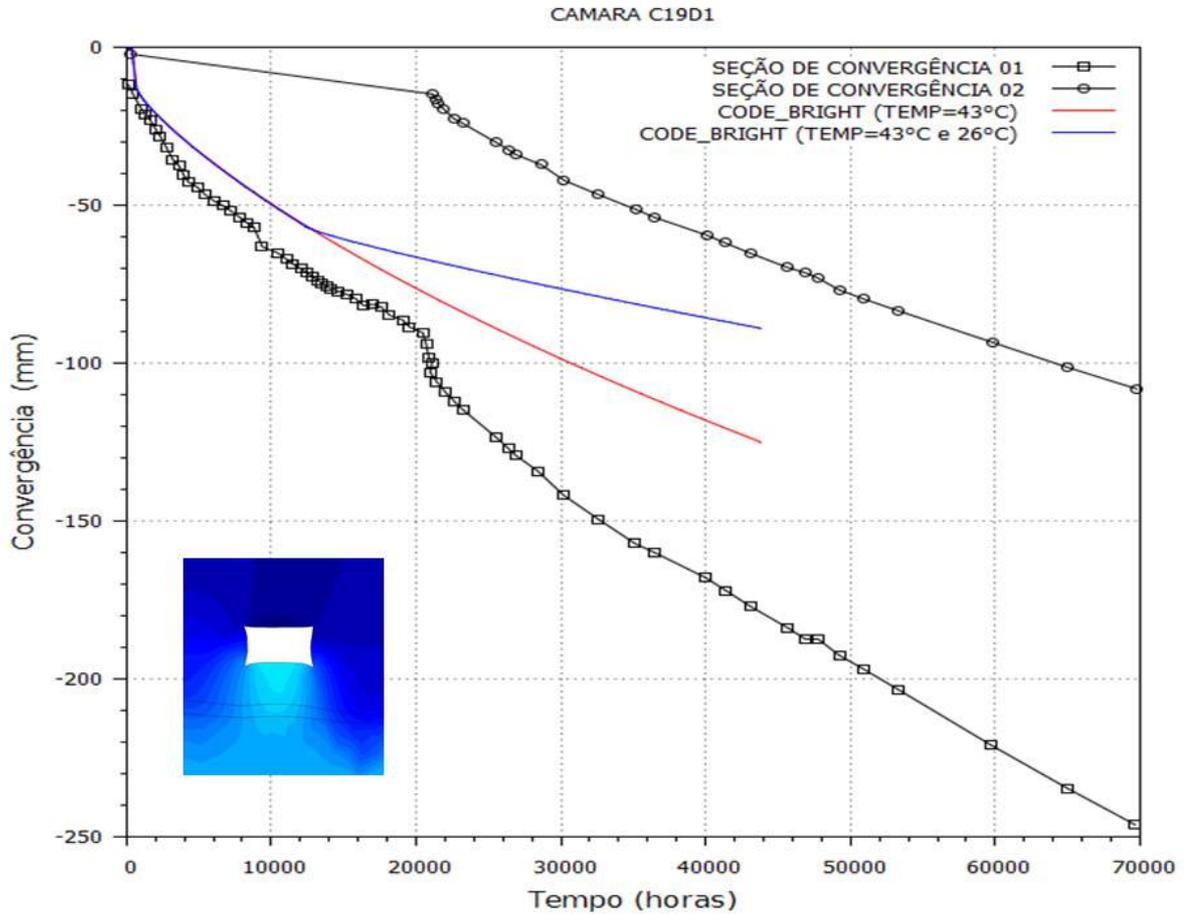
Figura 5.19 - Comparação entre a convergência medida na câmara C17D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 2,0 m e carnalita de 1,5 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.20, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C19D1 com o obtido por simulação. Na seção geológica de análise, tem-se 3,5 m de silvinita e 1,0 m de carnalita sobrejacente à taquidrita. A velocidade da convergência da câmara obtida numericamente, a 43°C, é de 17,20 mm/ano e, no caso das curvas medidas, o valor médio é de 18,5 mm/ano. Neste caso, considera-se que há boa concordância entre o resultado numérico e o medido “in-situ” para as condições de um painel de lavra. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foi realizado uma análise adicional com temperatura de 43°C, cujo resultado para a câmara C19D1 pode ser visto na figura 5.20.

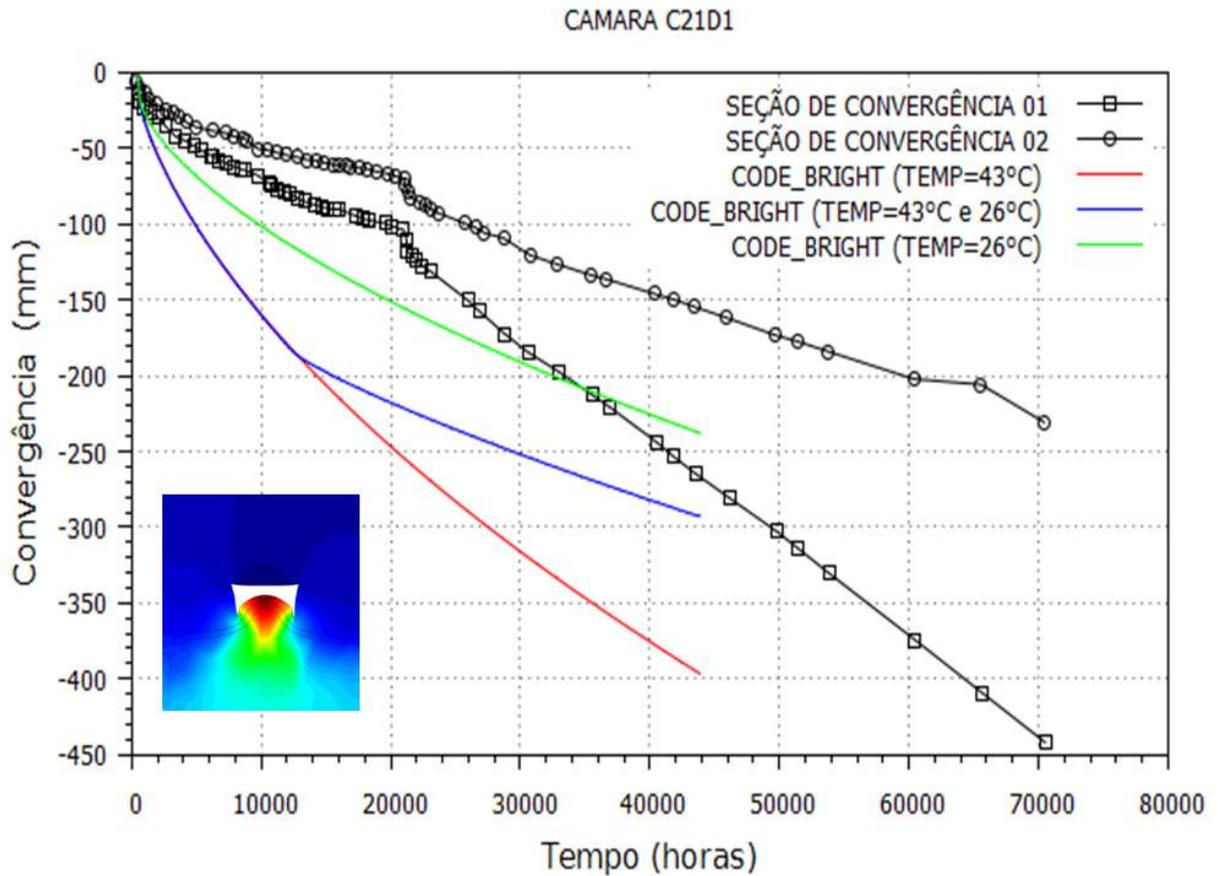
Figura 5.20 - Comparação entre a convergência medida na câmara C19D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 3,5 m e carnalita de 1,0 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.21, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C21D1 com o obtido por simulação. Na seção geológica de análise, tem-se 0,5 m de silvinita e 0,5 m de carnalita sobrejacente à taquidrita. A velocidade da convergência da câmara obtida numericamente, a 43°C, é de 52,50 mm/ano e, no caso da velocidade da seção 01, atinge-se, na condição de fluência secundária, o valor de 57,32 mm/ano. Neste caso, considera-se que há boa concordância entre o resultado numérico e o medido “in-situ” (diferença de 9%). Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizadas duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C21D1 podem ser vistos na figura 5.21.

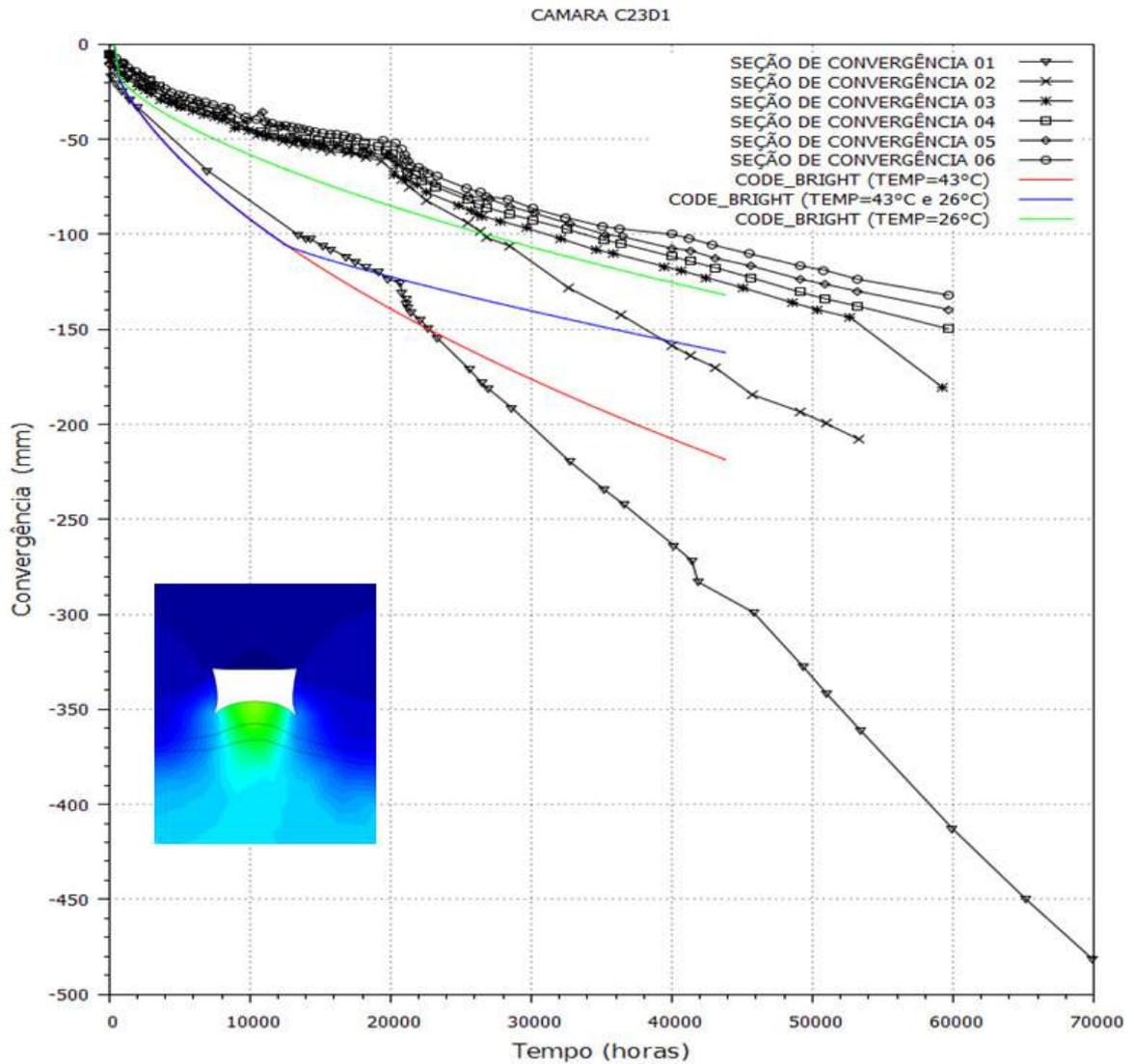
Figura 5.21 - Comparação entre a convergência medida na câmara C21D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 0,5 m e carnalita de 0,5 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.22, comparam-se os resultados de convergência medidos nas seções 01 a 06 da câmara C23D1 com o obtido por simulação. A velocidade da convergência da câmara, obtida numericamente, a 43°C, é de 27,80 mm/ano e, no caso da velocidade da seção 02, atinge-se, 38,41 mm/ano. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizadas duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C23D1 podem ser vistos na figura 5.22.

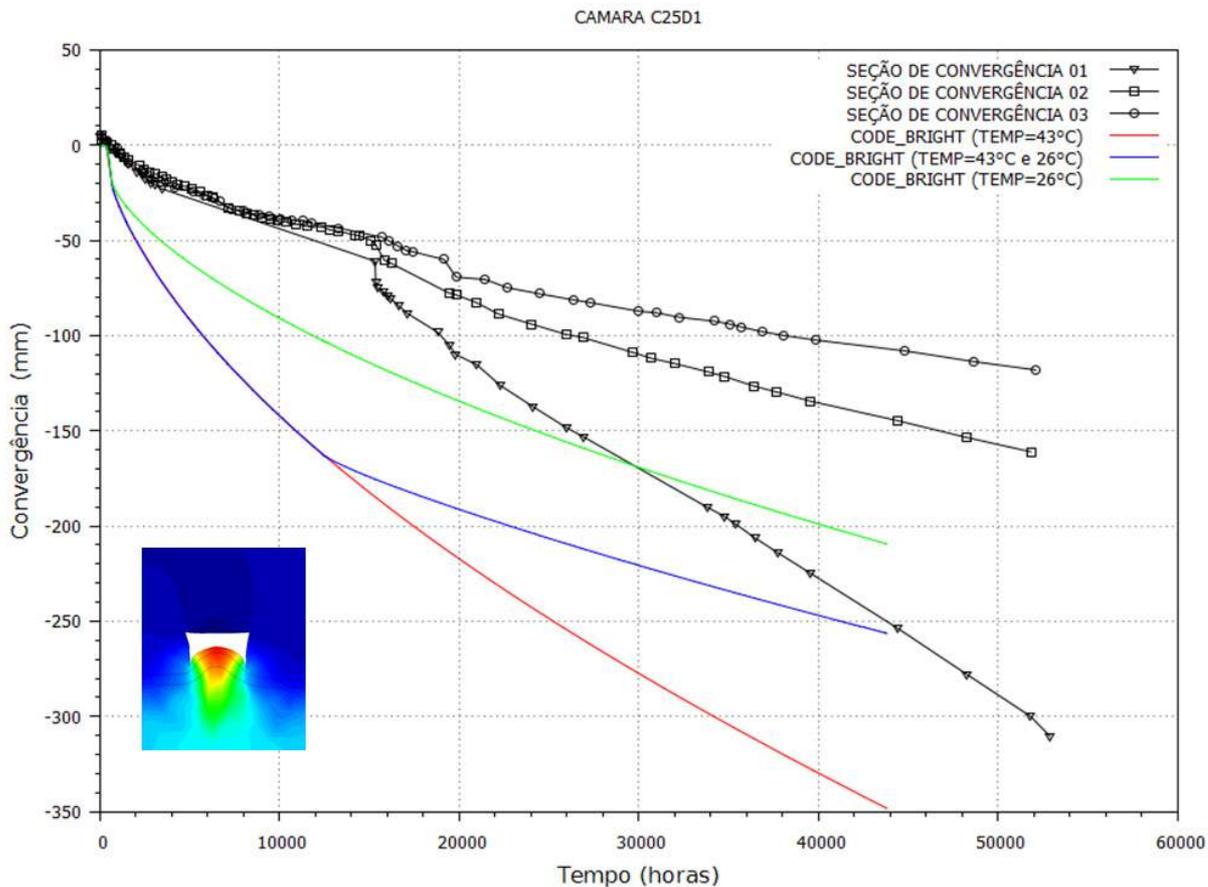
Figura 5.22 Comparação entre a convergência medida na câmara C23D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 1,5 m e carnalita de 1,0 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.23, comparam-se os resultados de convergência medidos na câmara C25D1 com o obtido por simulação. Neste caso, a espessura de silvinita da seção geológica de referência é de 0,5 m. A velocidade da convergência da câmara obtida numericamente, a 43°C, é de 46,20 mm/ano. Na seção de convergência com a velocidade mais próxima à prevista, numericamente, seção 01, a velocidade em regime de fluência secundária é de 38,79 mm/ano, ocorrendo, portanto, um desvio de 19 %. As demais seções devem ter sido instaladas em locais com espessuras de silvinita superiores a 0,5 m. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizadas duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C25D1 podem ser vistos na figura 5.23.

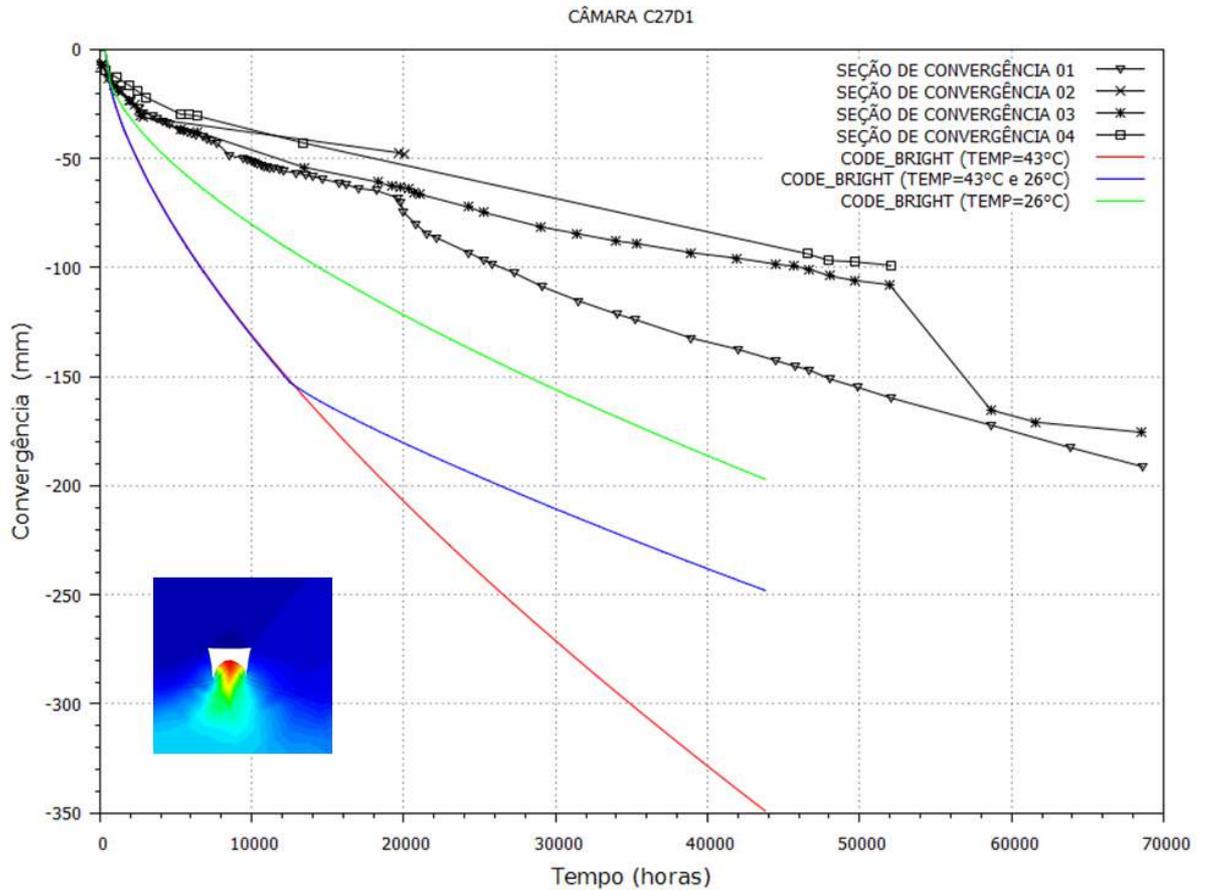
Figura 5.23 - Comparação entre a convergência medida na câmara C25D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 0,5 m e carnalita de 1,0 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Para a câmara C27D1, Figura 5.24, a seção geológica de referência não prevê uma laje de silvinita. Os valores medidos são sensivelmente inferiores aos que se poderia esperar para esta condição. Isso acontece devido a análise numérica ser feita em estado plano deformações e assim a seção de referência não apresenta a condição dos locais onde foram instaladas as seções de convergência. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foram realizados duas análises adicionais, uma com temperatura de 26°C e outra com 43°C, cujo, os resultados para a câmara C27D1 podem ser vistos na figura 5.24.

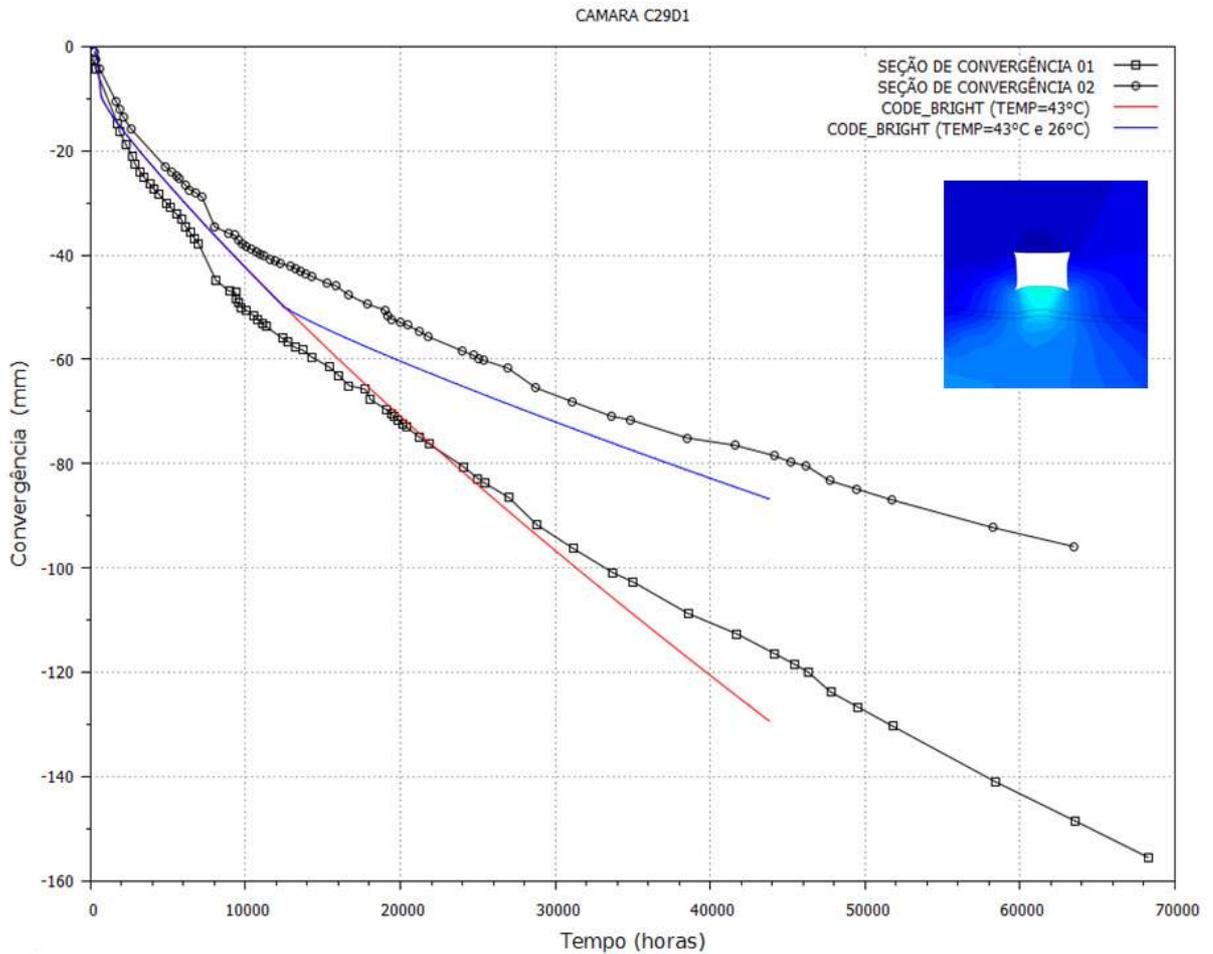
Figura 5.24 Comparação entre a convergência medida na câmara C27D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 0,0 m e carnalita de 0,5 m de espessura.



Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Na Figura 5.25, comparam-se o resultado numérico com as curvas de convergência medidas nas seções 01 e 02 da câmara C29D1. A seção 01 é a que apresenta velocidade de convergência, a 43°C, de 14,35 mm/ano mais próxima a da curva prevista numericamente de 21,05 mm/ano. Para ilustrar o impacto da incerteza quanto à temperatura mantida pelo sistema de refrigeração, foi realizado uma análise adicional com temperatura de 43°C, cujo resultado para a câmara C29D1 pode ser visto na figura 5.25.

Figura 5.25 Comparação entre a convergência medida na câmara C29D1 com resultado simulado: Laje de silvinita de 2,0 m e carnalita de 0,5 m de espessura.



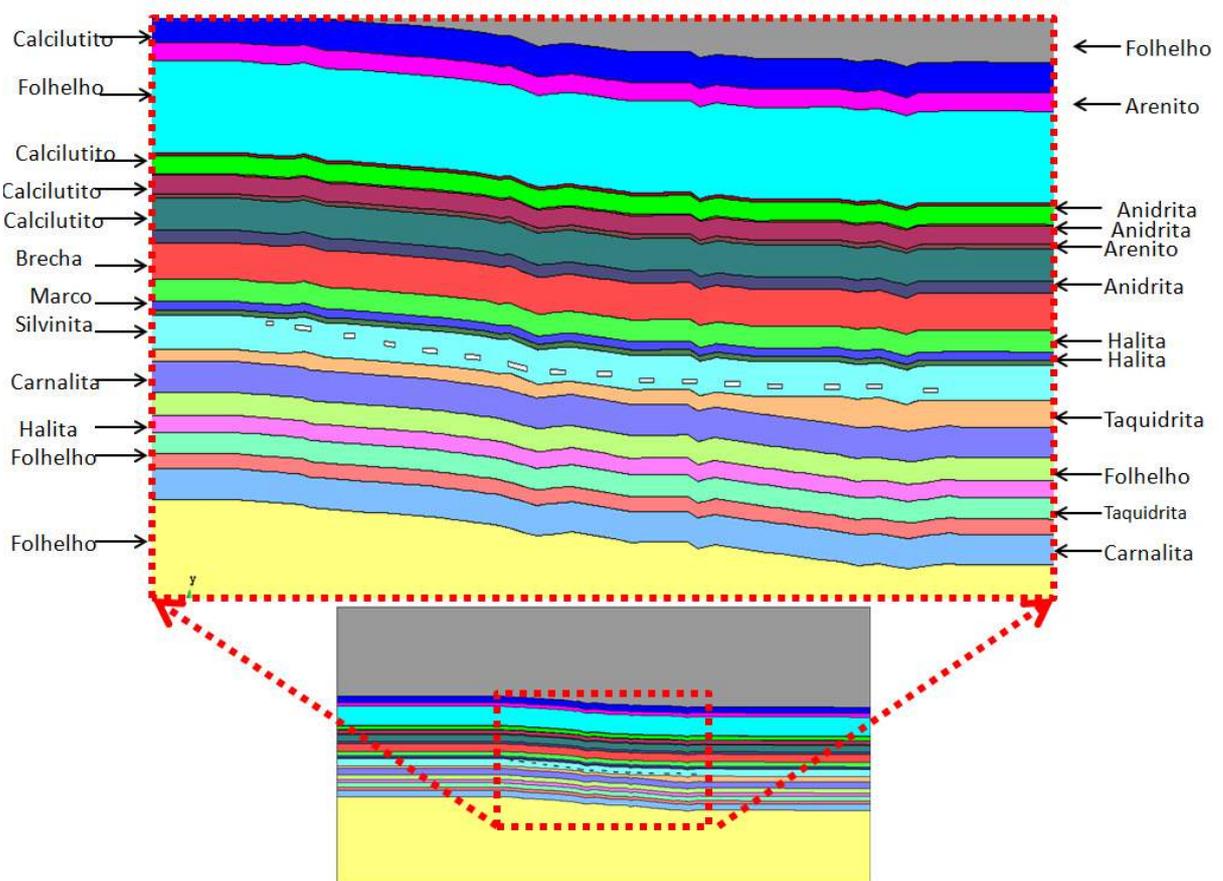
Fonte: Adaptado de Costa (1997).

Contudo, foram de fundamental importância os estudos de convergência do Painel D1, pois eles permitiram a comparação dos resultados das simulações com os medidos “in situ”, e, com isso, validar e deixar a metodologia cada vez mais acurada. O próximo item tratará de outro painel da mina Taquari - Vassouras que, por sua vez, nos trará novas e importantes discussões sobre as consequências da fluência dos evaporitos.

5.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÊNCIA EM ESCAVAÇÕES NA MINA TAQUARI - VASSOURAS: PAINEL I5

Neste item, apresentam-se os resultados e discussões embasados no item 4.4, relativos à simulação numérica da escavação de câmaras, considerando um modelo bidimensional definido pela seção geológica do Painel I5 da Mina Taquari Vassouras (Figura 5.26) obtida em Costa (1999). Esta análise envolve o estudo puramente mecânico das deformações das rochas escavadas e das camadas adjacentes, empregando o modelo constitutivo mecânico de fluência para as camadas de rocha salina, e elastoplástico para as demais camadas. As análises foram realizadas em deformação plana. Foram escavados, aos 30 dias, as travessas e as câmaras, e foi simulado um tempo de 20 anos, já que, além disso, as cavernas apresentam a temperatura média de 48 C°.

Figura 5.26 Seção geológica do painel D1 adotada para análise.



Fonte: Autor.

Na Tabela 6.2, estão os parâmetros adotados para análise, que se encontram descritos na seção 4.3, com indicações de cada camada e respectivos materiais do perfil geológico. Assim, como

no estudo do Painel D1, item 5.2, as rochas salinas têm comportamento de fluência e são modeladas com o mecanismo duplo de deformação com T_0 (temperatura de referência) de 43°C, descrito do Capítulo 3, item 3.3 deste trabalho. Já as demais rochas tem um comportamento elasto-plástico de Mohr-Coulomb.

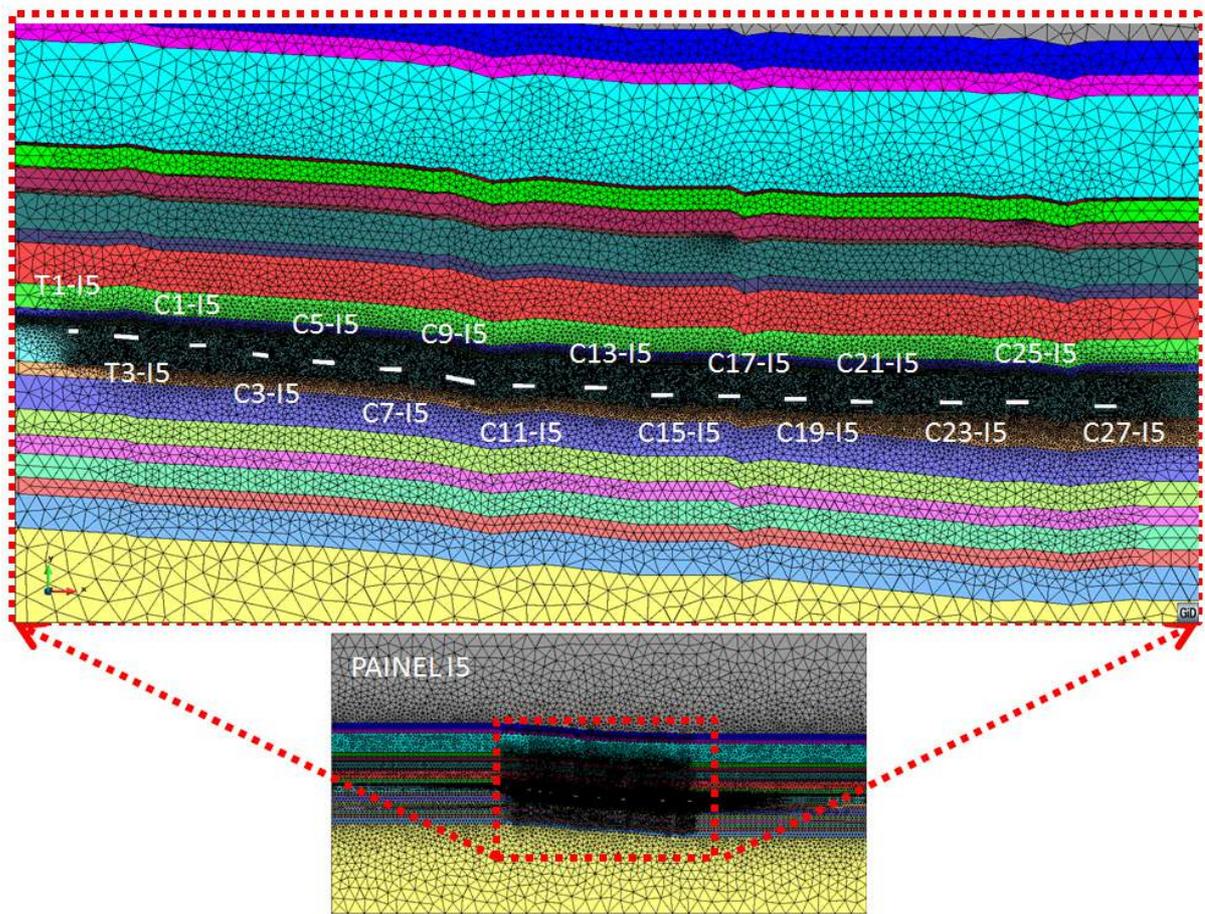
Tabela 6.2 – Parâmetros mecânicos adotados para as análises com temperatura de referência de 43°C para as rochas salinas.

| Camada | Material | E (MPa) | ν | c (MPa) | ϕ (°) | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|--------|-------------|-----------|-------|-----------|------------|------------------------|---|-------|-------|
| 1 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 2 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 3 | Arenito | 20696 | 0,15 | 1,1 | 32,8 | | | | |
| 4 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 5 | Anidrita | 20403 | 0,33 | 3 | 42 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 6 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 7 | Anidrita | 20403 | 0,33 | 3 | 42 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 8 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 9 | Arenito | 20696 | 0,15 | 1,1 | 32,8 | | | | |
| 10 | Calcilutito | 31044 | 0,24 | 0,9 | 37 | | | | |
| 11 | Anidrita | 20403 | 0,33 | 3 | 42 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 12 | Brecha | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 13 | Halita | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 14 | Marco | 15000 | 0,1 | 0,9 | 37,3 | 12 | 0,0036 | 3 | 5,8 |
| 15 | Halita | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 16 | Silvinita | 15742 | 0,33 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 17 | Taquidrita | 4920 | 0,33 | 0,47 | 29,3 | 10 | 0,22 | 3 | 3 |
| 18 | Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| 19 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 20 | Halita | 20403 | 0,36 | 3 | 40 | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| 21 | Taquidrita | 4920 | 0,33 | 0,47 | 29,3 | 10 | 0,22 | 3 | 3 |
| 22 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |
| 23 | Carnalita | 4020 | 0,36 | 0,47 | 29,3 | 8 | 0,0072 | 3 | 5,8 |
| 24 | Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 22 | | | | |

Fonte: (COSTA, 1997, 1995b)

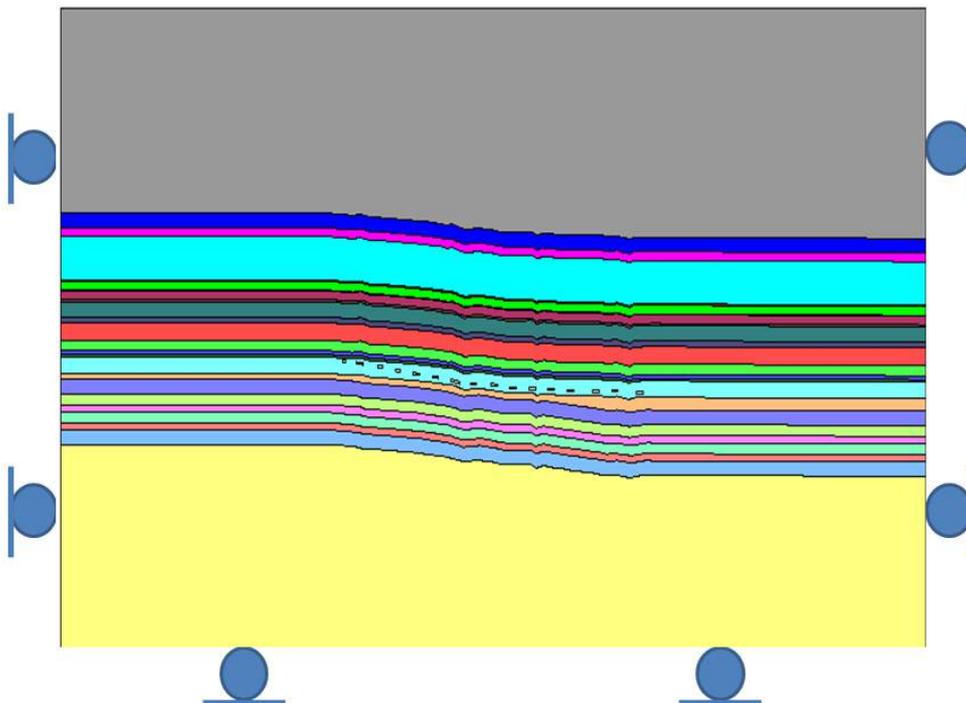
Na discretização, foram utilizados elementos triangulares de 3 nós, com malha de 94029 elementos e 47101 nós. Próximo à escavação procurou-se gerar a malha com maior nível de refinamento, conforme ilustrado na Figura 5.27. Já na Figura 5.28 estão ilustrados as condições de contorno do modelo estrutural de análise, sabendo-se que esse modelo chega até à superfície do terreno, possibilitando estudos de subsidência.

Figura 5.27 - Malha de elementos finitos adotada para as análises: Painel I5, malha com 94029 elementos e 47101 nós com detalhes das travessas T1 e T3, e câmaras C1, C3, C5, C7, C9, C11, C13, C15, C17, C19, C21, C23, C25 e C27.



Fonte: Autor.

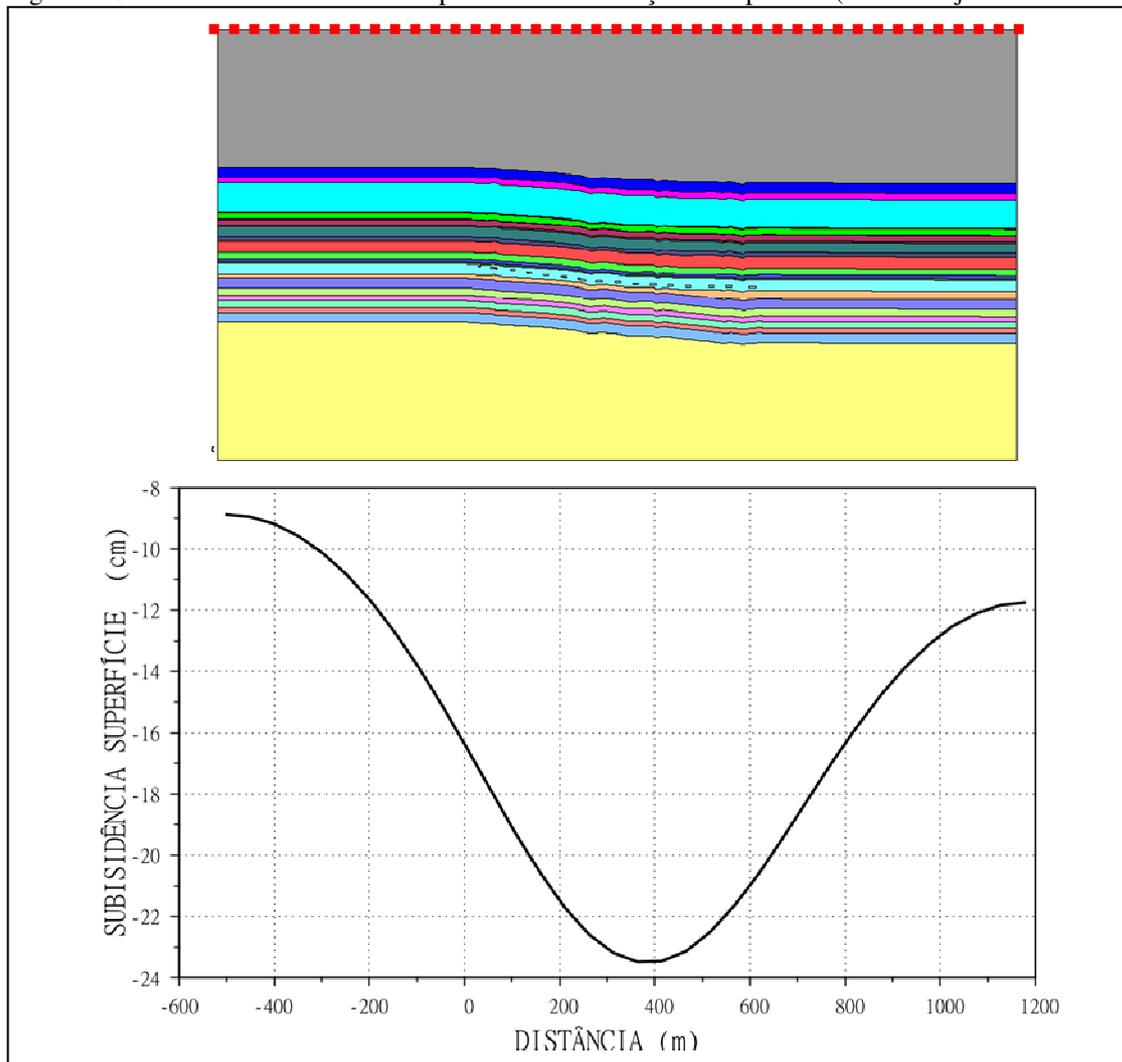
Figura 5.28 – Condições de contorno do modelo estrutural de análise.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.29, observa-se o perfil de subsidência na superfície obtido pelo modelo bidimensional de estado plano de deformações decorridos 20 anos após a lavra do painel. Segundo este modelo, a subsidência máxima sobre a área do painel é de 23,5 cm em 20 anos. Este resultado considera câmaras e pilares infinitamente longos, com taxa de extração e sobrecarga nos pilares equivalente ao do painel I5, segundo o layout de câmaras e pilares retangulares.

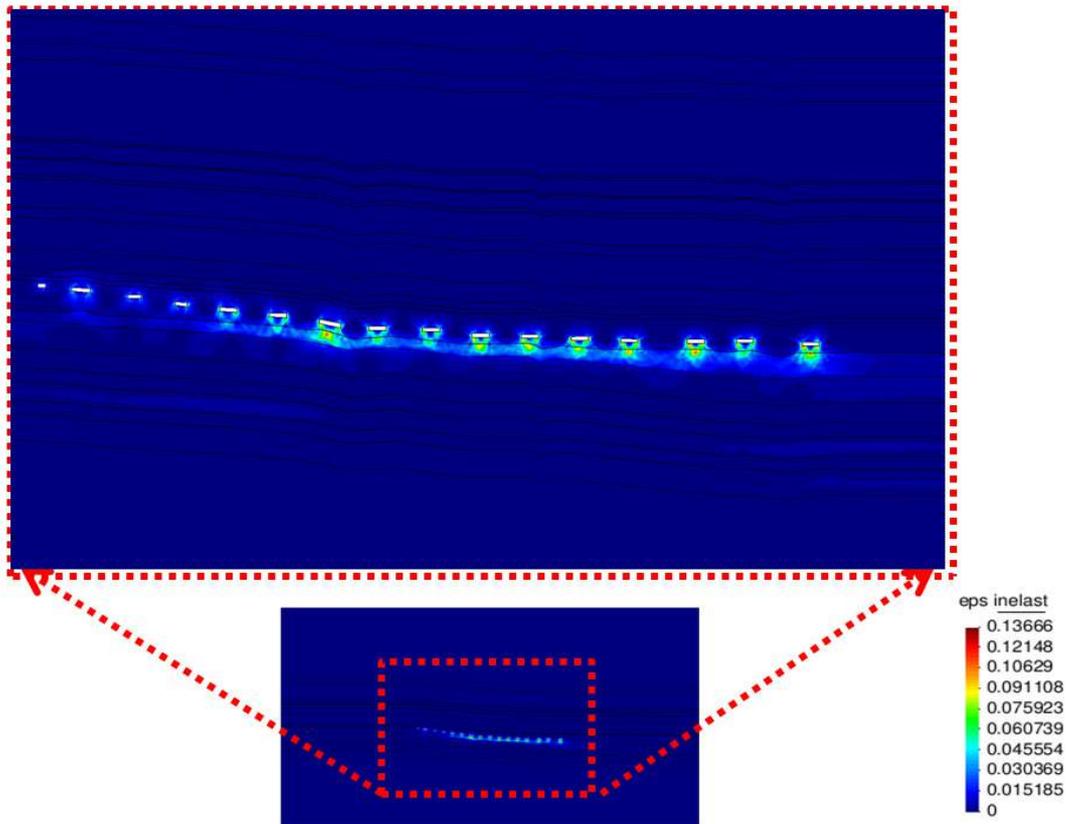
Figura 5.29 - Perfil de subsidência na superfície com indicação da superfície (linha tracejada de cor vermelha).



Fonte: Autor.

Na Figura 5.30, é apresentada a distribuição de deformações inelásticas, através da qual se observa que estas propagam-se, principalmente, pela taquidrita. Isso acontece pelo fato de a taquidrita ter uma altíssima mobilidade comparada com as demais rochas evaporíticas.

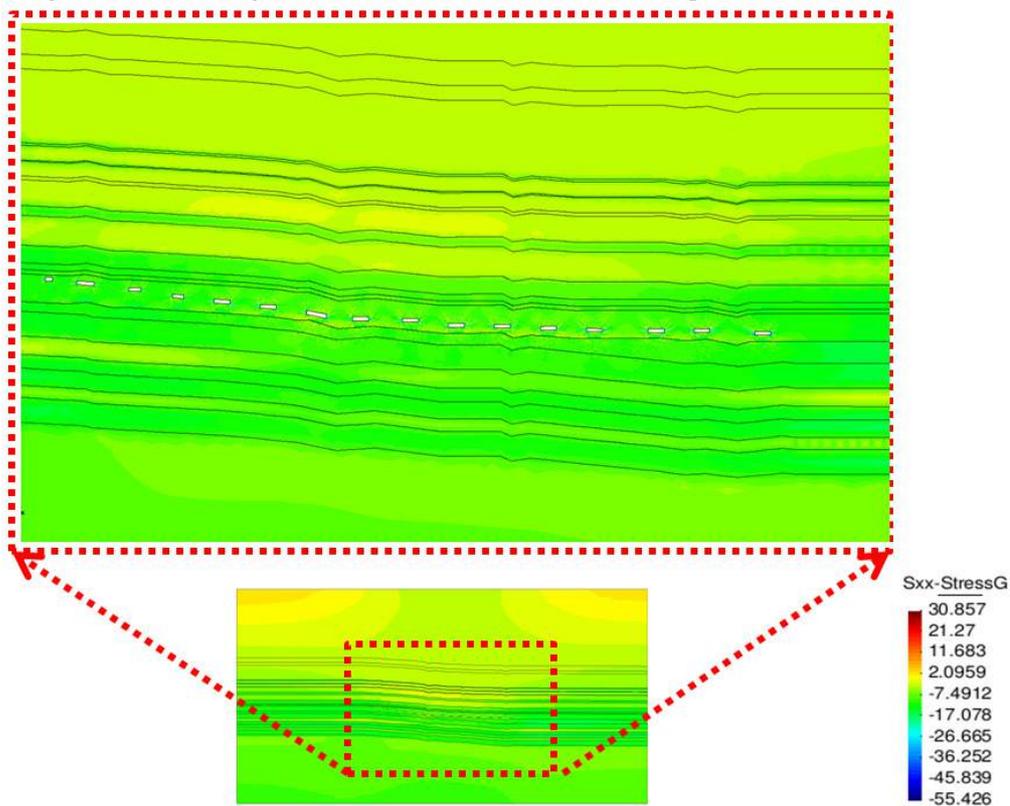
Figura 5.30 Distribuição das deformações inelásticas acumuladas até 20 anos.



Fonte: Autor.

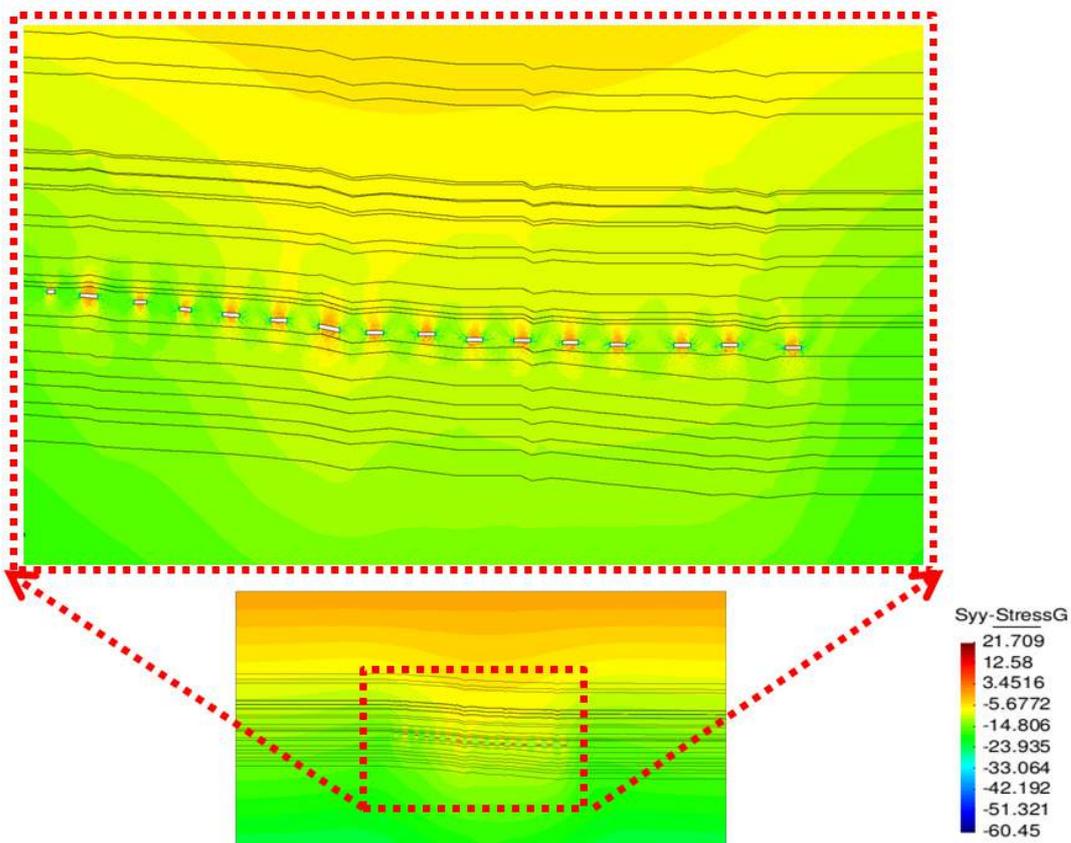
A distribuição das tensões horizontais é apresentada na Figura 5.31, e mostra uma zona de alta concentração de tensões de compressão se propagando no interior do folhelho. Isto se dá pelo folhelho ser um material não-viscoso e intercalado por materiais que apresentam altas taxas de deformação por fluência. Na camada superior de taquidrita, acima da carnalita superior, é possível observar também que há uma zona de tração na interface taquidrita-folhelho. As tensões na direção vertical (Figura 5.32) ainda apresentam tração nesta mesma zona de interface. Também é possível notar o acúmulo de tensões de compressão ao longo das paredes do pilar, se propagando entre as duas camadas de carnalita. Na Figura 5.33, que dá a distribuição das tensões cisalhantes (representadas pelo segundo invariante do tensor desviador, J) no maciço, pode-se observar o alto nível de cisalhamento das camadas de folhelho.

Figura 5.31 Distribuição das tensões horizontais à 20 anos no painel I5 com detalhe das travessas e câmaras.



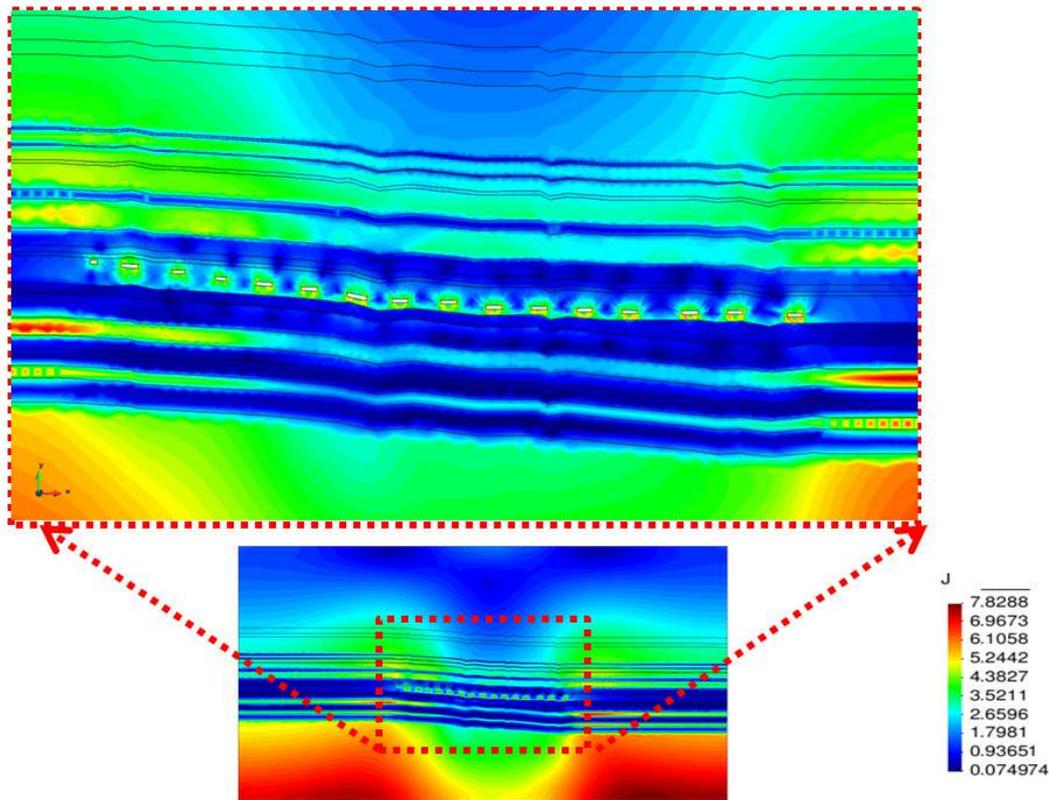
Fonte: Autor.

Figura 5.32 - Distribuição das tensões verticais a 20 anos no painel I5 com detalhe das travessas e câmaras.



Fonte: Autor.

Figura 5.33 - Distribuição das tensões cisalhantes a 20 anos no painel I5 com detalhe das travessas e câmaras.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.34, tem-se a distribuição da tensão vertical σ_y no instante t igual a 0,0 segundos antes da escavação de lavra do painel I5. Na profundidade média do painel, igual a 572 m, a tensão vertical inicial é dada por:

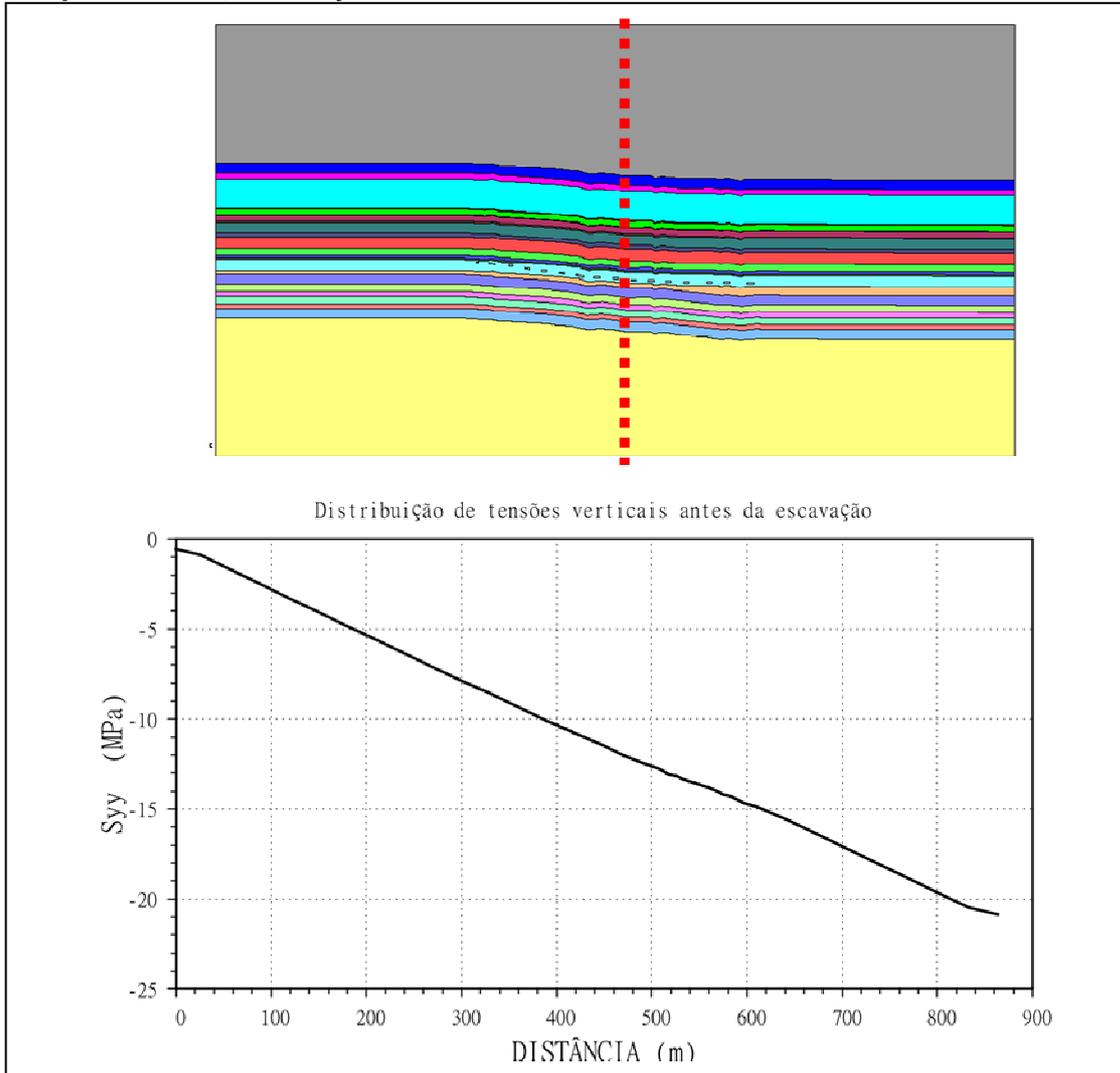
$$\sigma_y = (\gamma \cdot 572) = (22,56 \cdot 572) = 12904,32 \text{ kPa} \quad 5.1$$

Considerando-se uma taxa de extração média do painel igual a 43 %, a tensão vertical nos pilares após a escavação é dada por:

$$\sigma_y = 12904,32 / (1 - 0,43) = 22639,16 \text{ kPa} \quad 5.2$$

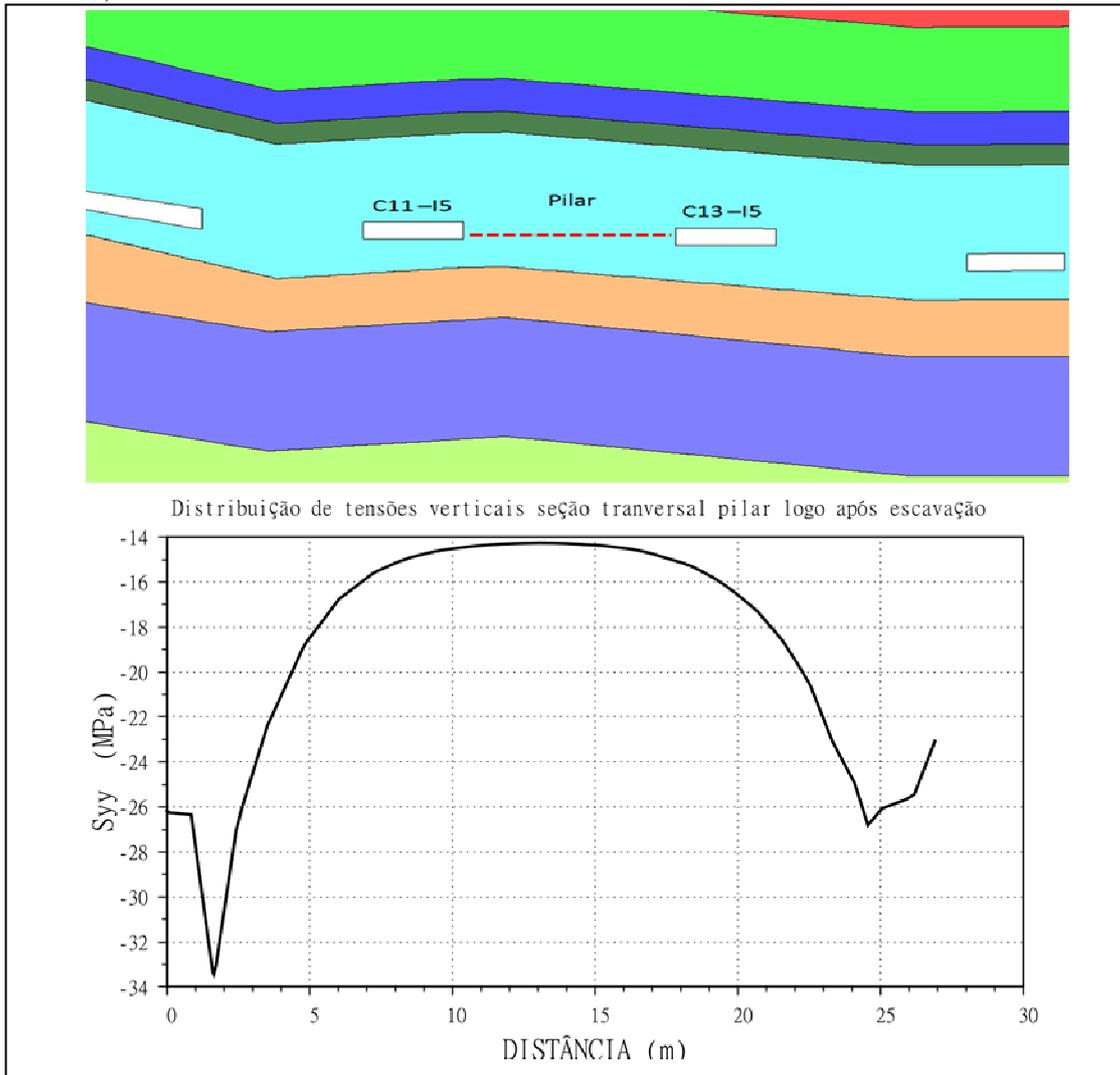
Este valor está mostrado na Figura 5.35 segundo uma seção transversal horizontal passando pela altura média do pilar central, entre câmaras C11-I5 e C13-I5. Verifica-se que a tensão média no pilar é próxima do valor calculado pela taxa de extração. Por esse resultado, demonstra-se que a tensão vertical calculada pelo método de estado plano de deformações, pós-escavação, reproduz a carga real transmitida pelo maciço sobre os pilares, segundo um arranjo de câmaras e pilares retangulares.

Figura 5.34 - Distribuição da tensão verticais no maciço antes da escavação das câmaras de lavra, com indicação da seção de análise (linha tracejada de cor vermelha).



Fonte: Autor.

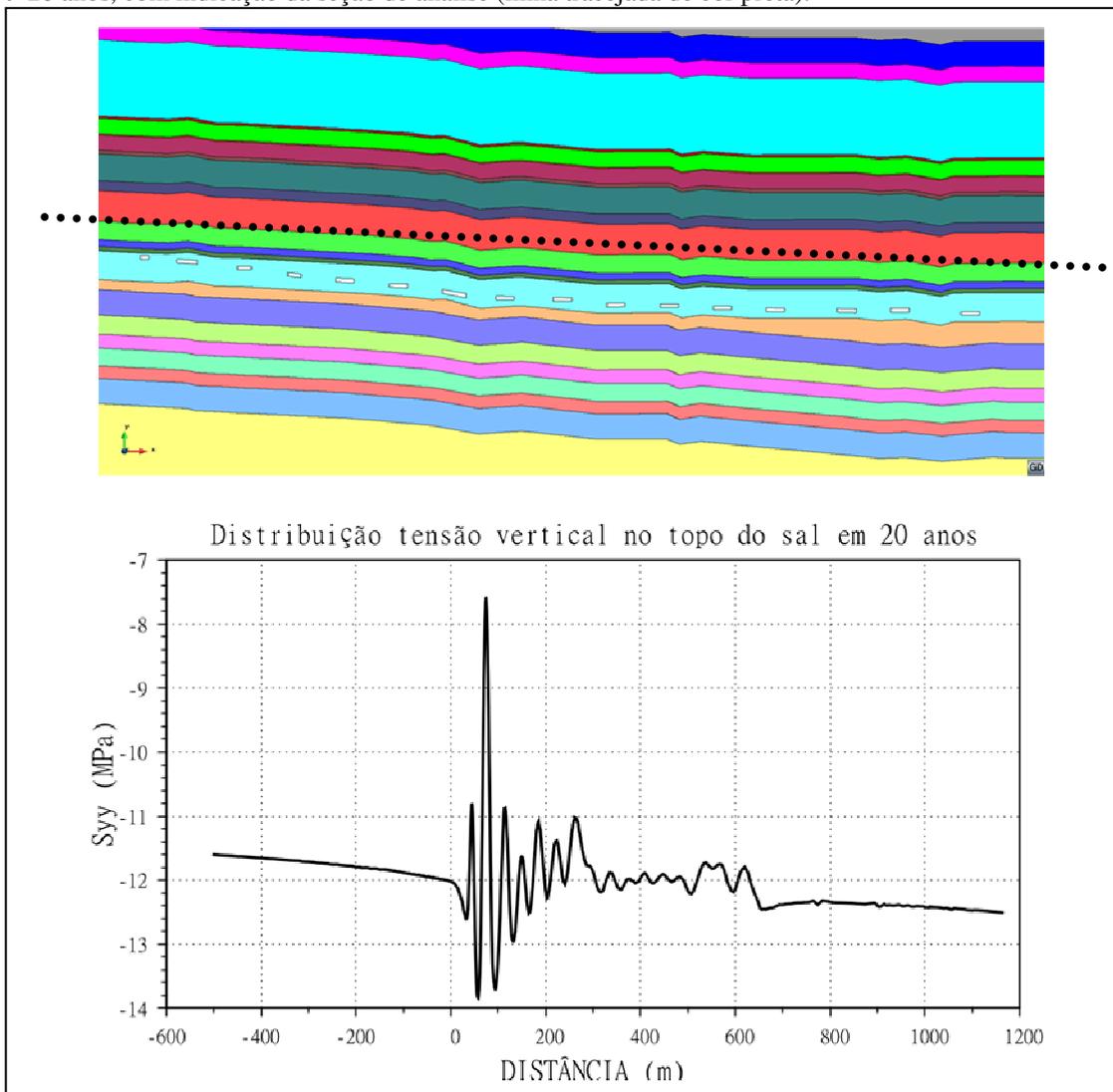
Figura 5.35 - Distribuição de tensão vertical em uma seção transversal horizontal passando por um pilar central, entre câmaras C11-I5 e C13-I5, em $t=0,0$ s, logo após a escavação, com indicação do pilar (linha tracejada vermelha).



Fonte: Autor.

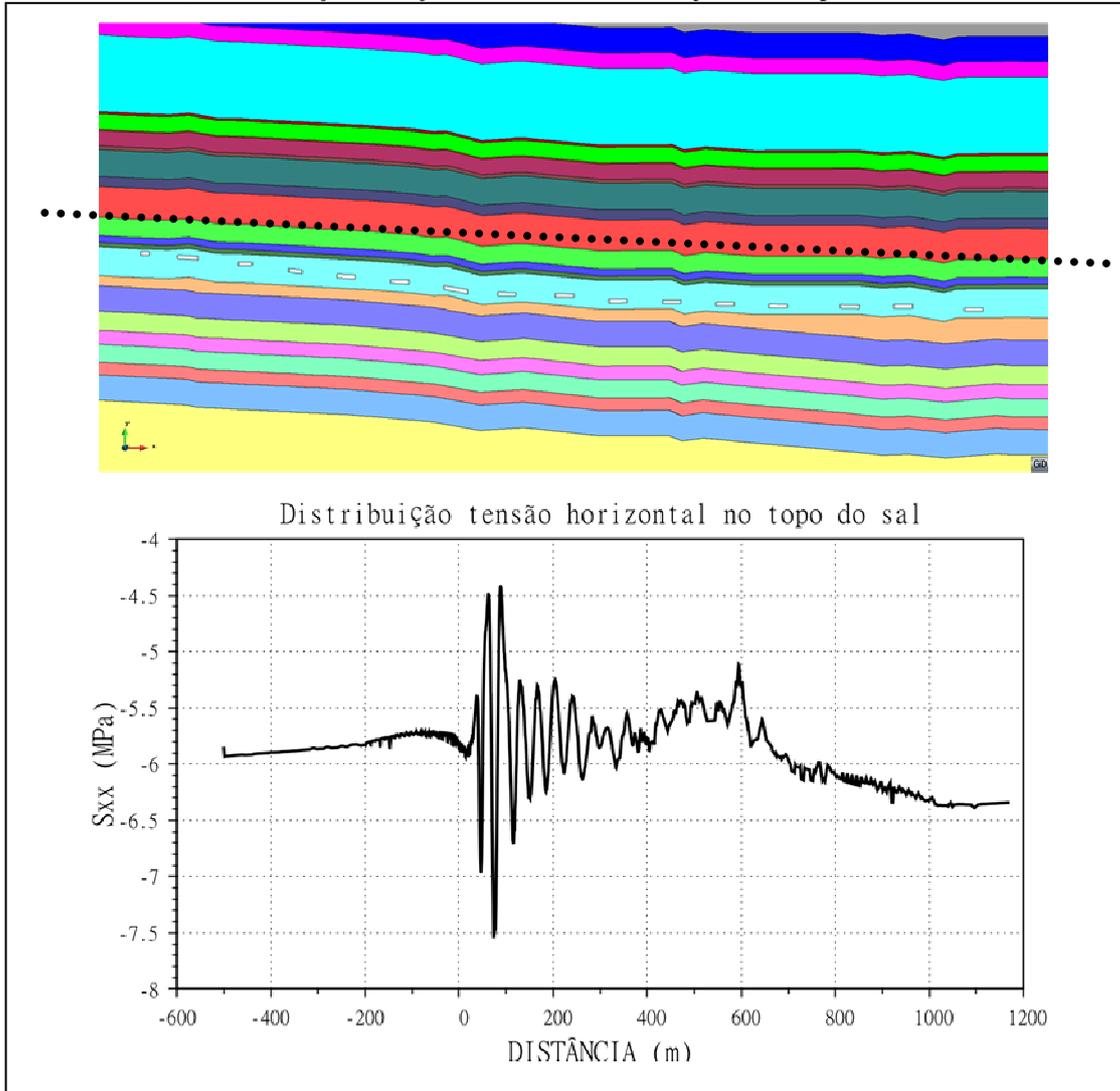
Decorridos 20 anos após a escavação das câmaras de lavra, a distribuição da tensão vertical σ_y , no intervalo de sal considerado como laje de segurança, à migração de água dos aquíferos (arenitos), sofre uma redução pequena, mantendo-se superior a 7,5 MPa (Figura 5.36). No topo do sal, a pressão do aquífero, admitindo-se carga hidrostática, é de 5,4 MPa que é igual à $(572m - 33m) \cdot 10kN/m^2$. Tem-se, portanto, uma margem de segurança superior a $1,40(=7,5/5,4)$. Já a tensão horizontal mínima na mesma seção é de 4,4 MPa e pode ser observada na Figura 5.37, ao final de 20 anos.

Figura 5.36 - Distribuição de tensão vertical em uma seção transversal horizontal passando pelo topo do sal em $t=20$ anos, com indicação da seção de análise (linha tracejada de cor preta).



Fonte: Autor.

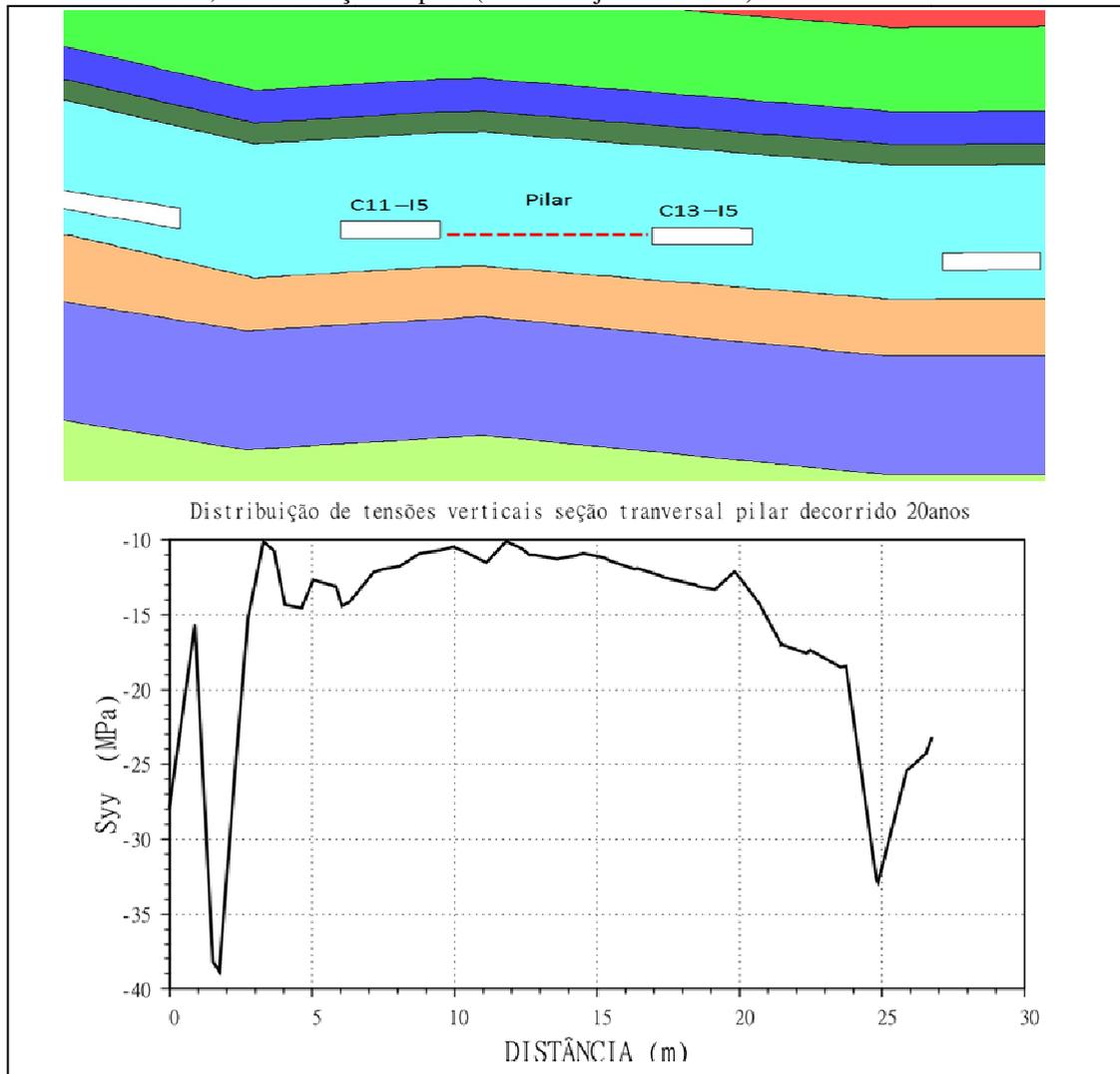
Figura 5.37 - Distribuição de tensão horizontal segundo uma seção transversal horizontal passando pelo topo do sal em $t=20$ anos, com indicação da seção de análise (linha tracejada de cor preta).



Fonte: Autor.

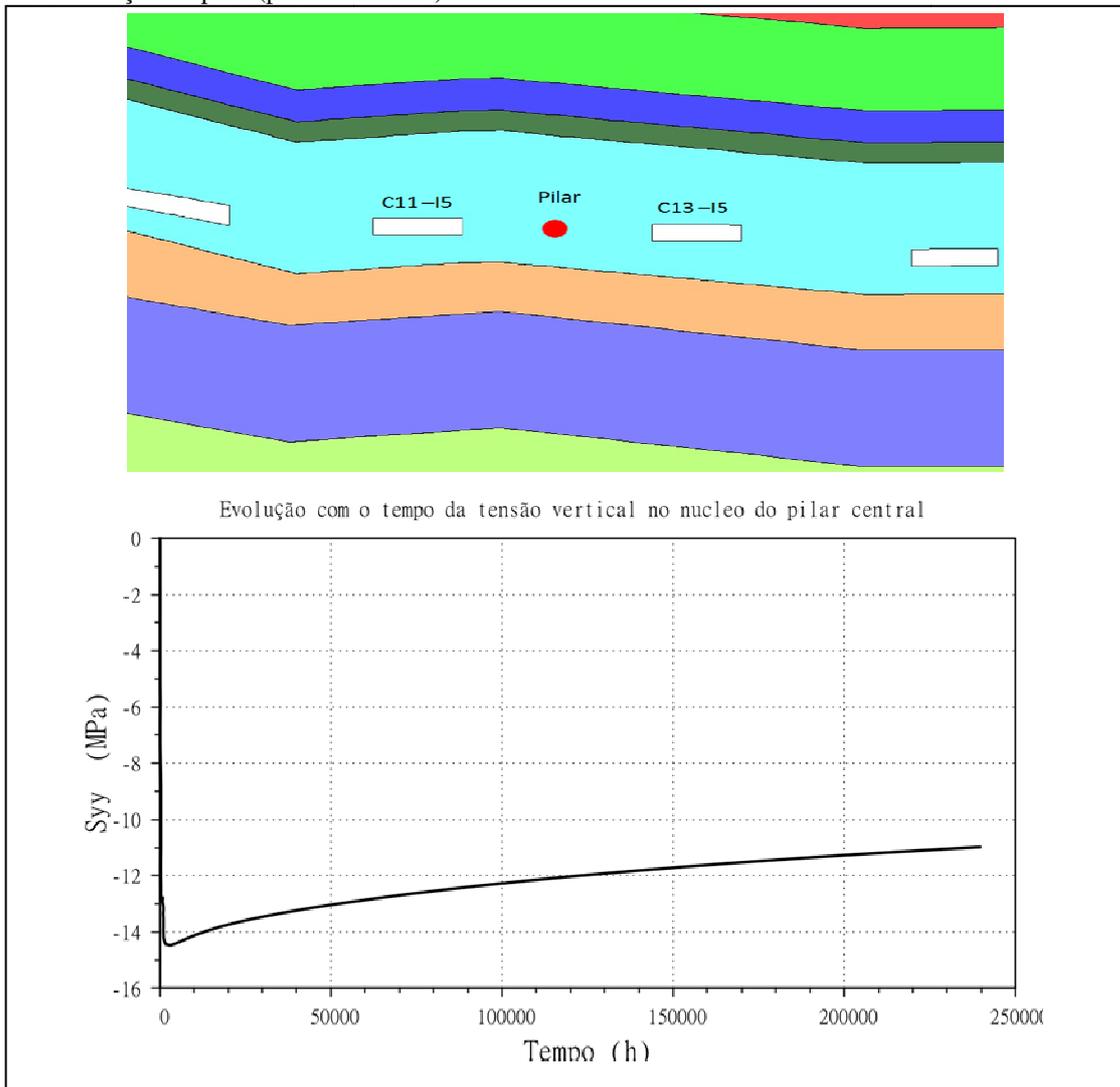
À medida que os pilares de silvinita penetram na camada de taquidrita, devido ao fenômeno de fluência, ocorre a transferência de carga gravitacional dos pilares para a região do maciço não escavado que aqui se denomina suporte lateral. A tensão vertical inicial, conforme demonstrado anteriormente, atinge o valor aproximado de 14 MPa. Decorridos 20 anos (Figura 5.38), a tensão vertical decai para o valor aproximado de 11 MPa. Há, portanto, uma transferência de carga para o maciço adjacente ao painel de cerca de 21 % da carga gravitacional inicial. Este decaimento está ilustrado na Figura 5.39, para um ponto localizado no núcleo do pilar central, entre câmaras C11-I5 e C13-I5.

Figura 5.38 - Distribuição de tensões verticais, da seção do pilar central, entre câmaras C11-I5 e C13-I5, decorridos 20 anos, com indicação do pilar (linha tracejada vermelha).



Fonte: Autor.

Figura 5.39 Evolução com o tempo da tensão vertical no núcleo do pilar central, entre câmaras C11-I5 e C13-I5, com indicação do pilar (ponto vermelho).



Fonte: Autor.

No geral, o Painel I5 nos trouxe um profundo conhecimento sobre as possíveis consequências de lavra subterrânea próximas à taquidrita. No próximo item, será abordado o modelamento de quedas de blocos laterais, aplicando-se modelo de dano à tração aliado ao modelo de fluência.

5.4 SIMULAÇÃO DE QUEDA DE BLOCOS LATERAIS

Os resultados apresentados neste item têm por objetivo modelar numericamente choccos laterais observados nas paredes das galerias da mina Taquari Vassouras, combinando o modelo de fluência, que fornece a resposta quanto às deformações da rocha, com o modelo de dano que reproduz a ocorrência de fraturas por tração decorrentes das deformações das paredes. O modelo de fluência de mecanismo duplo deformação e o de dano à tração, ambos descritos no Capítulo 3 deste trabalho, foram aplicados neste estudo. Até então, não foi observado este tipo de análise considerando a abordagem aqui apresentada.

Foram criados quatro modelos estruturais hipotéticos, porém baseados em cenários reais, em que as geometrias de escavação foram extraídas da Seção 4.5 deste trabalho na qual estão apresentadas as seções de escavação por Marieta. Na Tabela 5.3, encontram-se descritos os tipos de casos e descrições das seções analisadas.

Tabela 5.3 – Tipos e descrição das seções analisadas.

| Caso | Descrição da seção |
|-------------|---------------------------|
| 1 | 2 passes e 2 cortes. |
| 2 | 2 passes e 3 cortes |
| 3 | 4 passes e 4 cortes |
| 4 | 3 passes e 4 cortes |

Fonte: Autor.

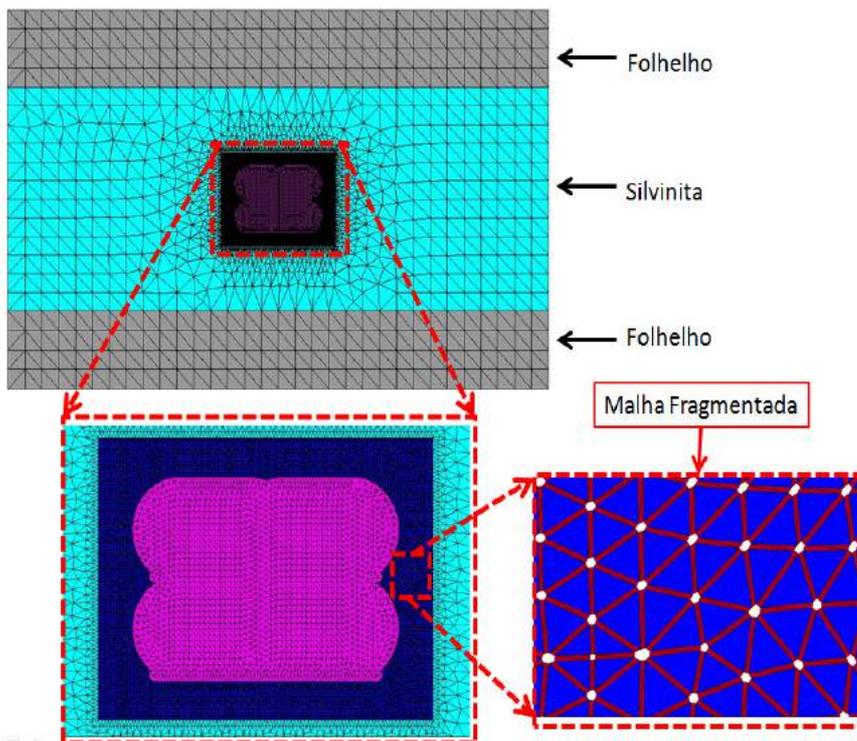
Sobre o modelo estrutural, de todos os cenários analisados, foram geradas as respectivas malhas de elementos finitos ilustradas nas Figuras de 5.40 a 5.43. Na discretização, foram utilizados elementos triangulares de 3 nós, tendo sido utilizado um total de 33430 elementos e 26201 nós para o Caso 1 (Figura 5.40), de 38776 elementos e 31632 nós para o Caso 2 (Figura 5.41), de 36098 elementos e 29018 nós para o Caso 3 (Figura 5.42), e de 33486 elementos e 26946 nós para o Caso 4 (Figura 5.43).

Para todos os casos de análise, foi feito um refinamento da malha de elementos finitos na região mais próxima do contorno da escavação, onde há maior tendência de ocorrer o fraturamento. Isto permite capturar, de forma mais precisa, a origem e a trajetória de propagação das fraturas. Empregou-se a mesma metodologia de imposição das condições de contorno, do Painel D1, exceto no valor do carregamento estimado na superfície, sendo este de 16 MPa, uma vez que, neste caso, o perfil adotado não compreende as camadas superiores

que atinjam o nível do terreno. Logo, esta tensão representa o soterramento pelas camadas acima, o que equivale a uma profundidade de aproximadamente 615 metros do topo do modelo em relação à superfície do terreno.

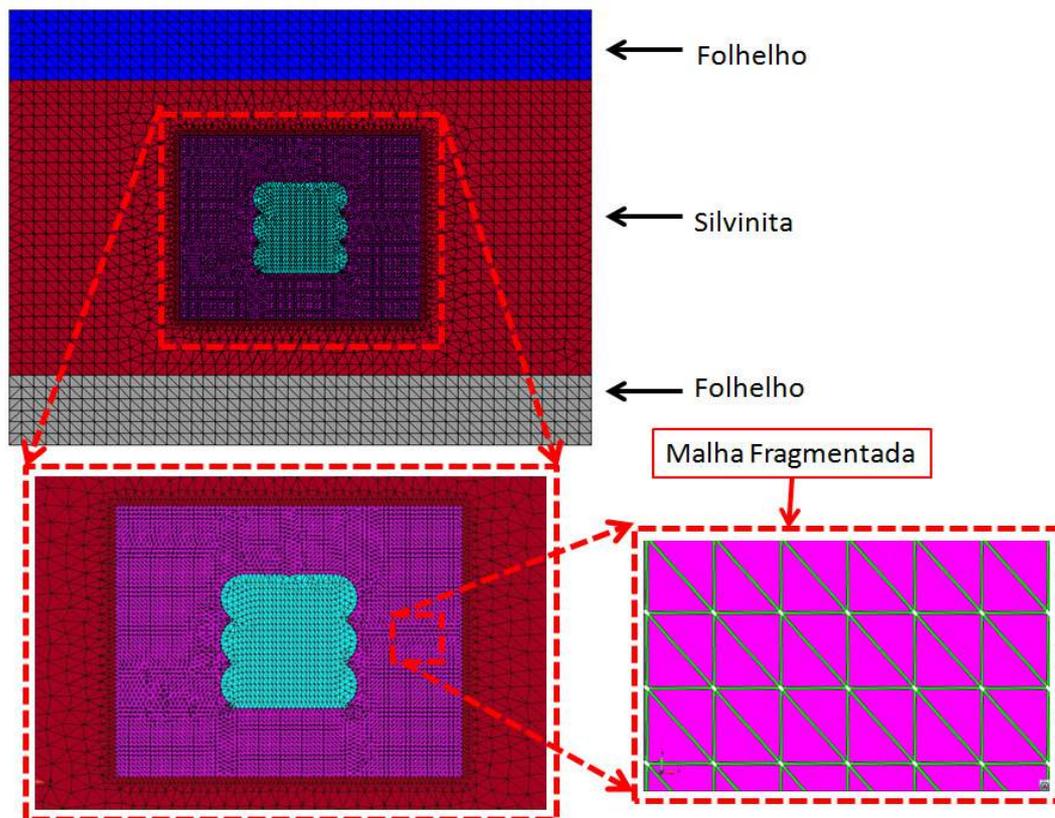
Foi considerado um tempo de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos, para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3, e 364 dias para o Caso 4. Essas discrepâncias nos tempos de simulação ocorrem como consequência do processo de fraturamento do sal acontecer em diferentes seções de escavação e, com isso, o tempo de convergência será naturalmente diferente para cada caso, pois está atrelada à estabilidade da escavação a queda de blocos. Então, o objetivo das discussões será para comparação de forma qualitativa do padrão de fraturamento obtido numericamente e observado na mina.

Figura 5.40 - Malha de elementos finitos adotada para as análises do caso 1, malha com 33430 elementos e 26201 nós.



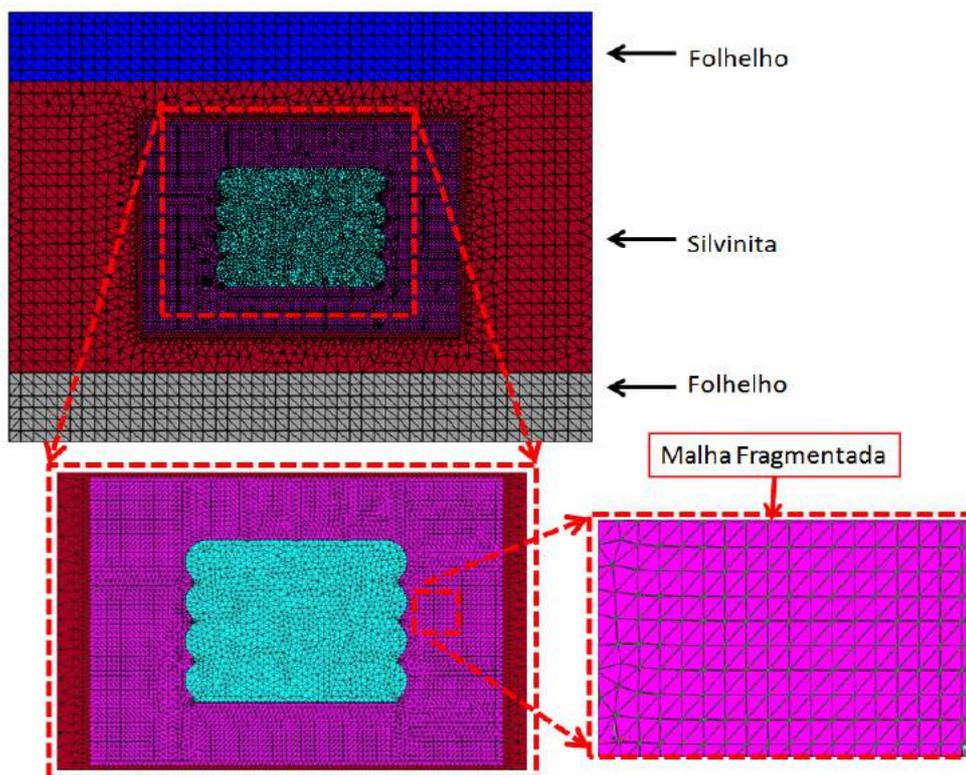
Fonte: Autor.

Figura 5.41 - Malha de elementos finitos adotada para as análises do caso 2, malha com 38776 elementos e 31632 nós.



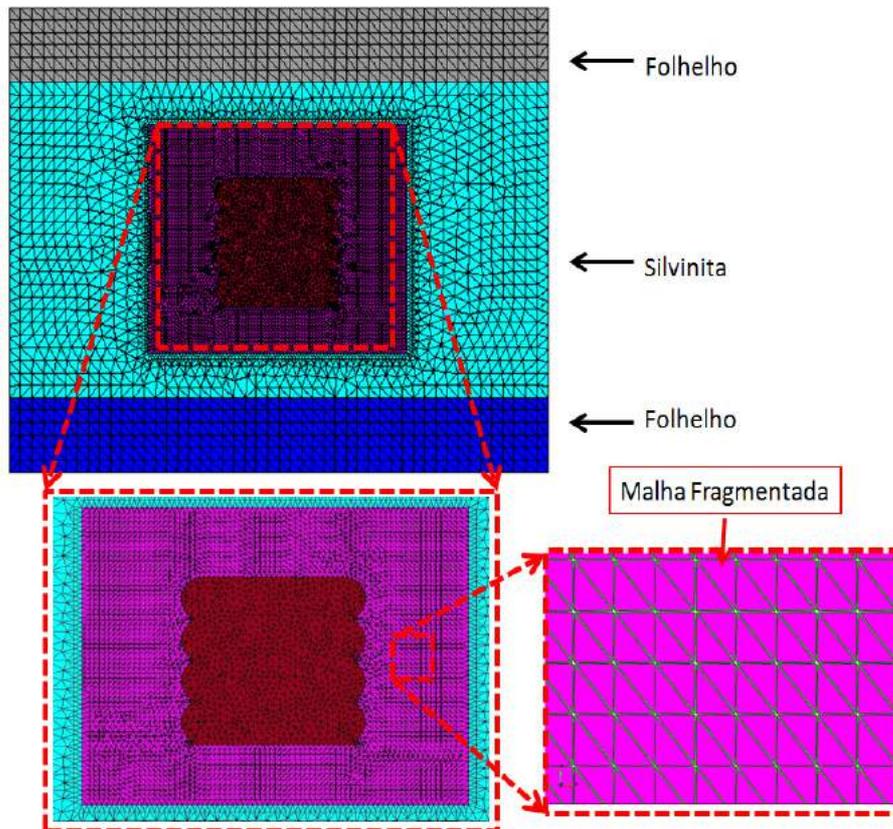
Fonte: Autor.

Figura 5.42 - Malha de elementos finitos adotada para as análises do caso 3, malha com 36098 elementos e 29018 nós.



Fonte: Autor.

Figura 5.43 - Malha de elementos finitos adotada para as análises do caso 4, malha com 33486 elementos e 26946 nós.



Fonte: Autor.

Da Tabela 5.4, constam dos parâmetros mecânicos elasto-plásticos e de fluência adotados para análise, com indicações de cada camada e respectivos materiais do perfil geológico adaptado. O elemento de interface tem uma espessura de 1 cm, a resistência à tração de 0,8 MPa e a energia de fratura de $4,235 \times 10^{-5}$ N/m, valores estes obtidos após análises de sensibilidade.

Tabela 5.4 – Parâmetros mecânicos adotados para as análises.

| Material | E (MPa) | ν | c (MPa) | Densidade (Kg/m ³) | ϕ (°) | σ_0 (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|-----------|-----------|-------|-----------|--------------------------------|------------|------------------|--|-------|-------|
| Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 2600 | 22 | | | | |
| Silvinita | 15742 | 0,33 | | 2160 | | 10 | 0,0016 | 3 | 5,8 |
| Folhelho | 18971 | 0,15 | 4,8 | 2600 | 22 | | | | |

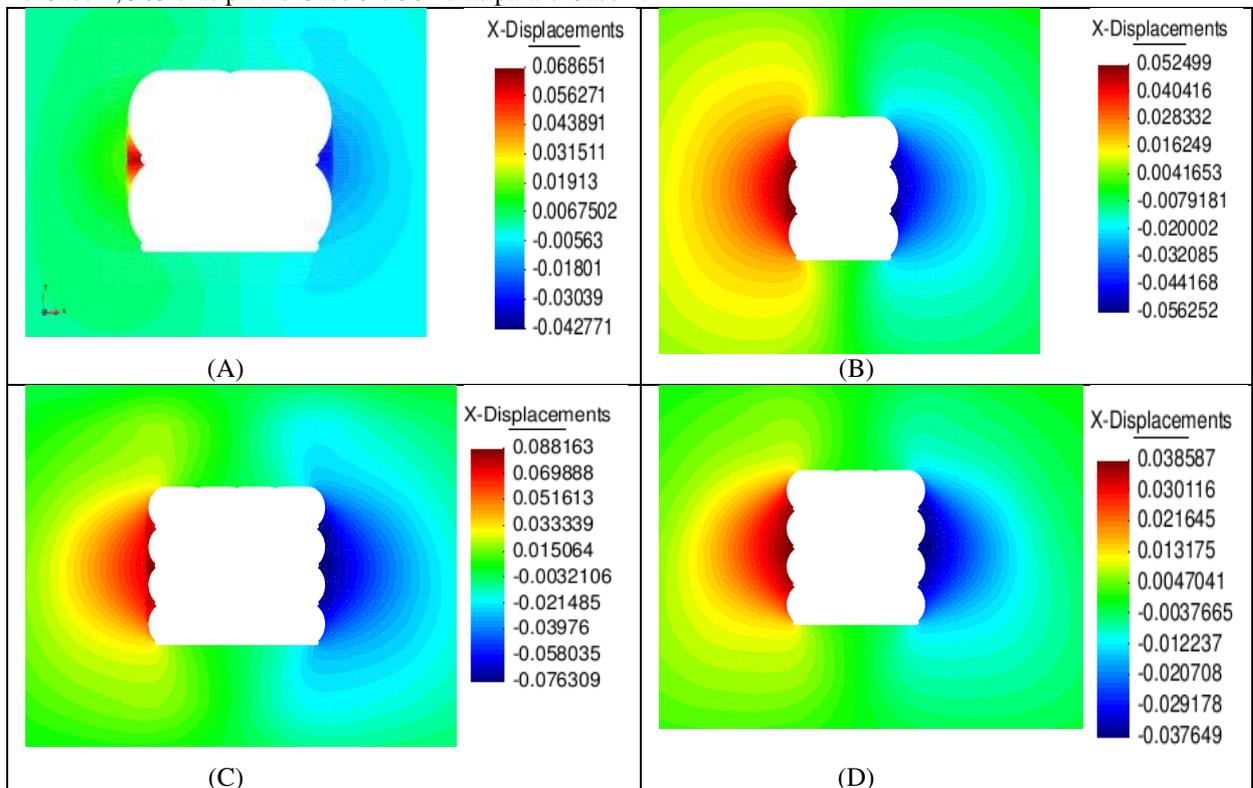
Fonte: (COSTA, 1997, 1995b).

Na Figura 5.44, apresenta-se a configuração da distribuição final dos deslocamentos horizontais, em todo domínio, para cada um dos quatro casos simulados. Observa-se que os maiores deslocamentos se dão próximos à zona da cavidade, onde há o maior alívio de

tensões devido à escavação desta. Chegando a valores de deslocamento laterais máximos, de aproximadamente, positivos de 8,8 cm e negativos de 7,6 cm, no sentido de fechamento (convergência), no Caso 3.

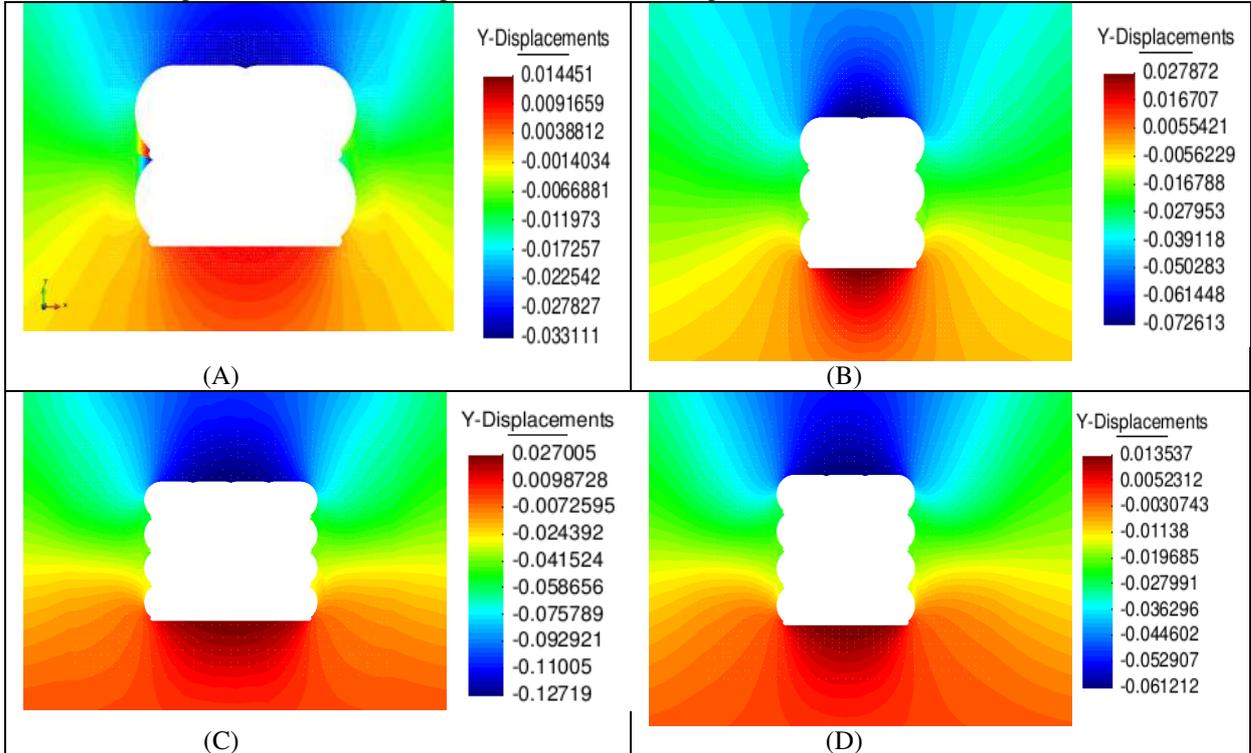
Já na Figura 5.45 observa-se que os maiores deslocamentos verticais, direção y, são justamente no teto e no piso da escavação. Observam-se deslocamentos máximos no teto de 12,7 cm no Caso 3 e no piso de 2,7 cm nos Casos 3 e 2. A distribuição vetorial dos deslocamentos está na Figura 5.46, com fator de escala de 20.

Figura 5.44 - Configuração da distribuição dos deslocamentos horizontais, em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



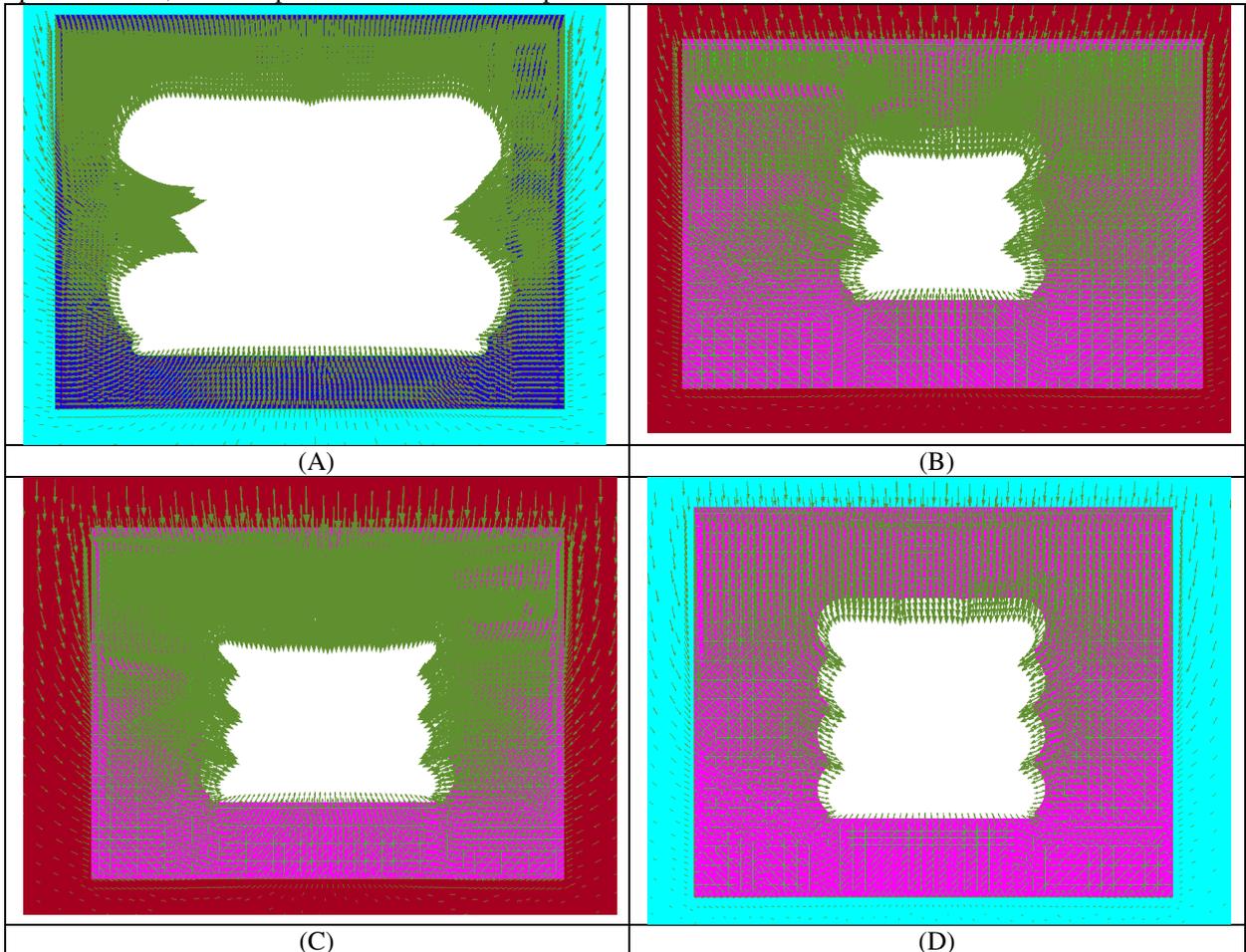
Fonte: Autor.

Figura 5.45 - Configuração da distribuição dos deslocamentos verticais, direções y, em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



Fonte: Autor.

Figura 5.46 – Distribuição vetorial dos deslocamentos com fator de escala de 20, em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.

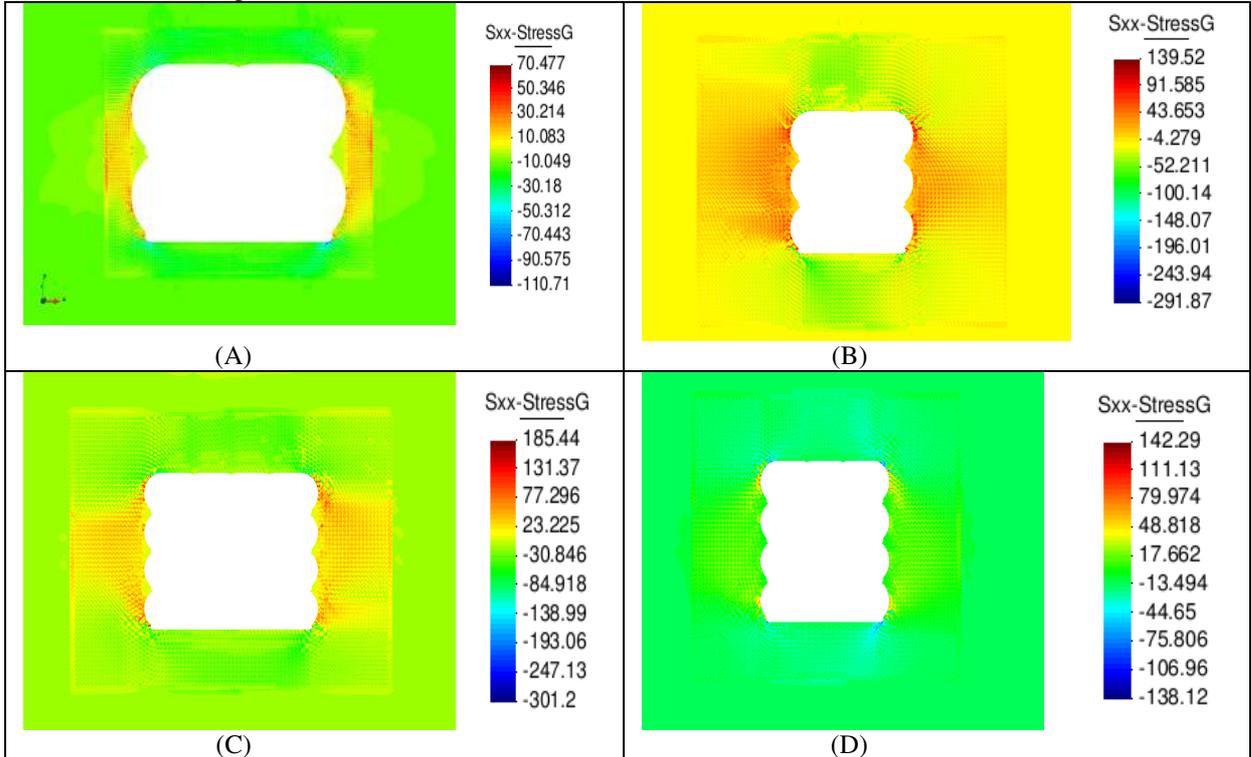


Fonte: Autor.

No que diz respeito às tensões horizontais, pode-se observar, na Figura 5.47, tensões máximas de tração no Caso 3 seguida dos Casos 4, 2 e 1. Já nas tensões verticais (Figura 5.48) observa-se que as tensões de compressão têm uma tendência de ligarem as quinas mais distantes dos cortes feitos. As tensões horizontais desempenham um papel importante nas análises de fraturamento, pois indicam uma tração lateral das paredes da escavação. Isto está associado à compressão vertical atuando nos pilares.

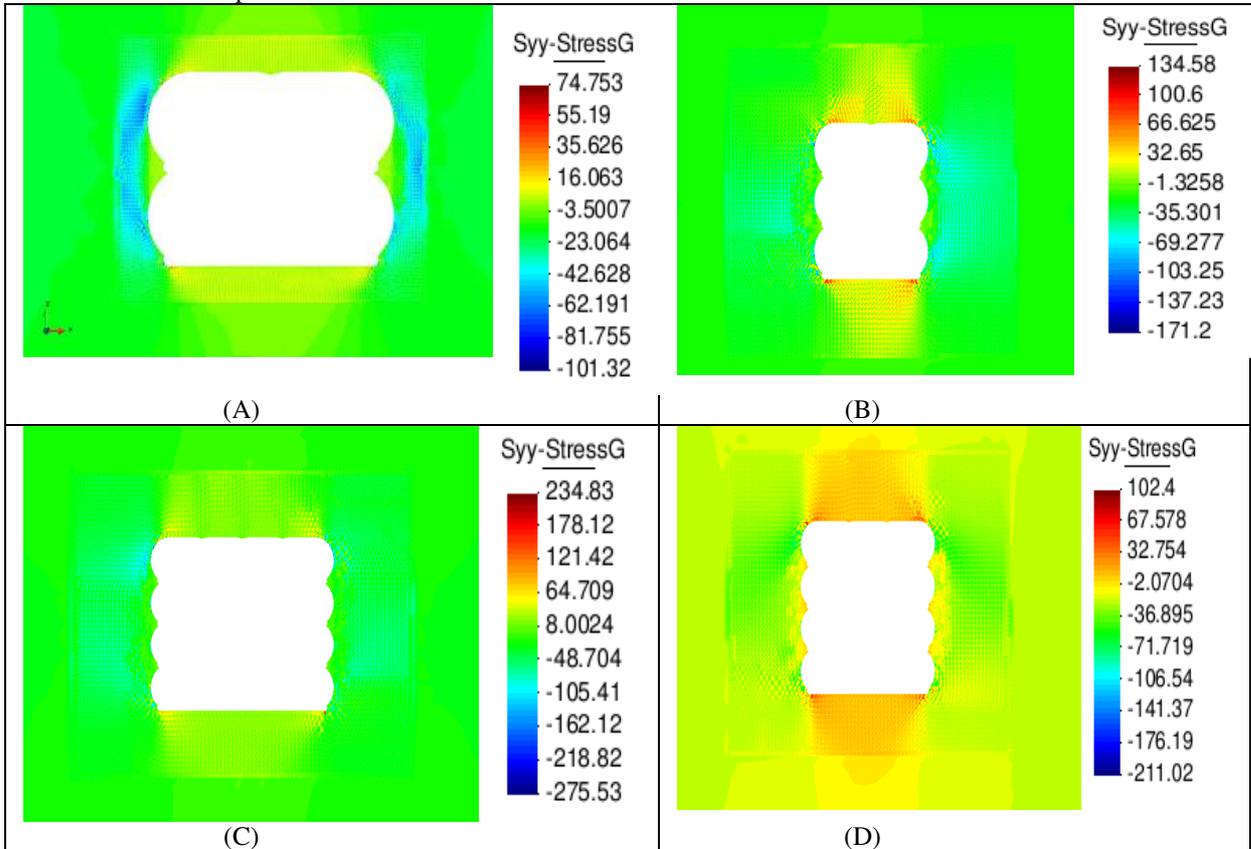
Nas Figura 5.49 observa-se a distribuição das tensões cisalhantes (representada pelo segundo invariante do tensor desviador, J_2) no corpo rochoso, e, na Figura 5.50, as deformações inelásticas que ocorrem pela fluência da rocha salina escavada.

Figura 5.47 – Distribuição das tensões horizontais em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



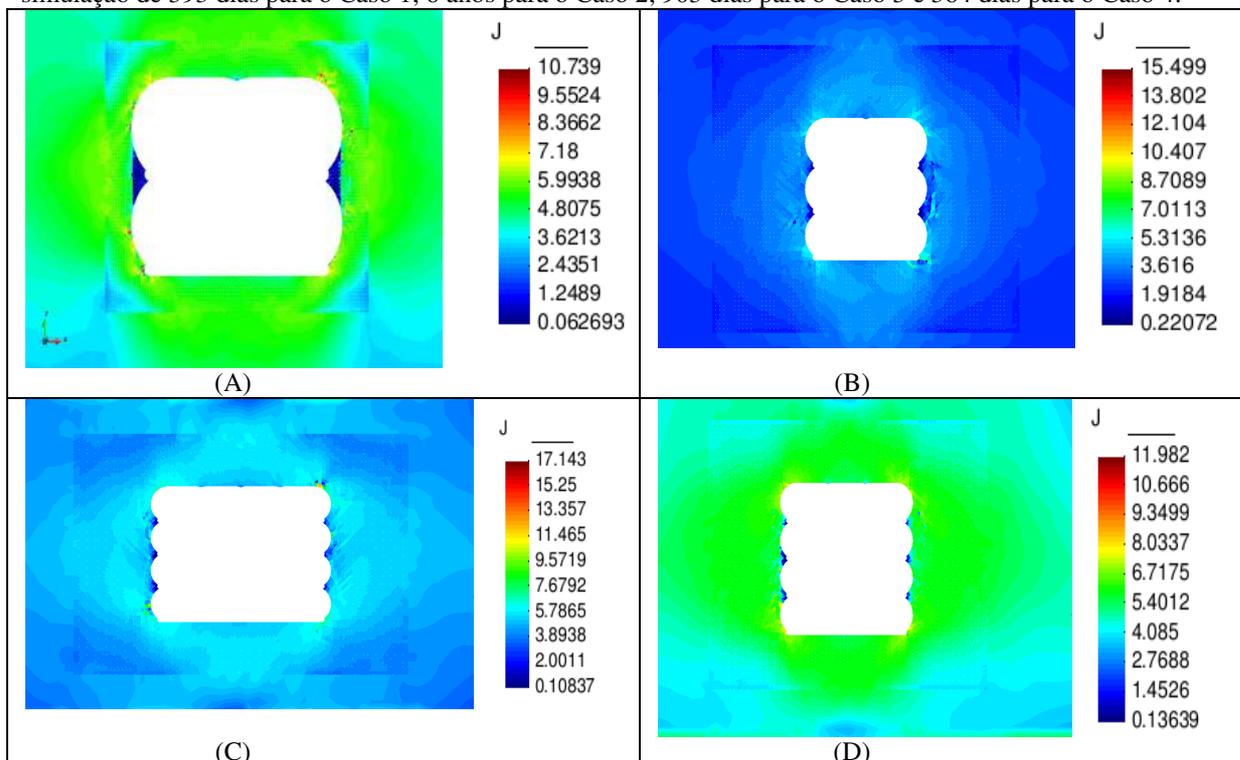
Fonte: Autor.

Figura 5.48 – Distribuição das tensões verticais em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



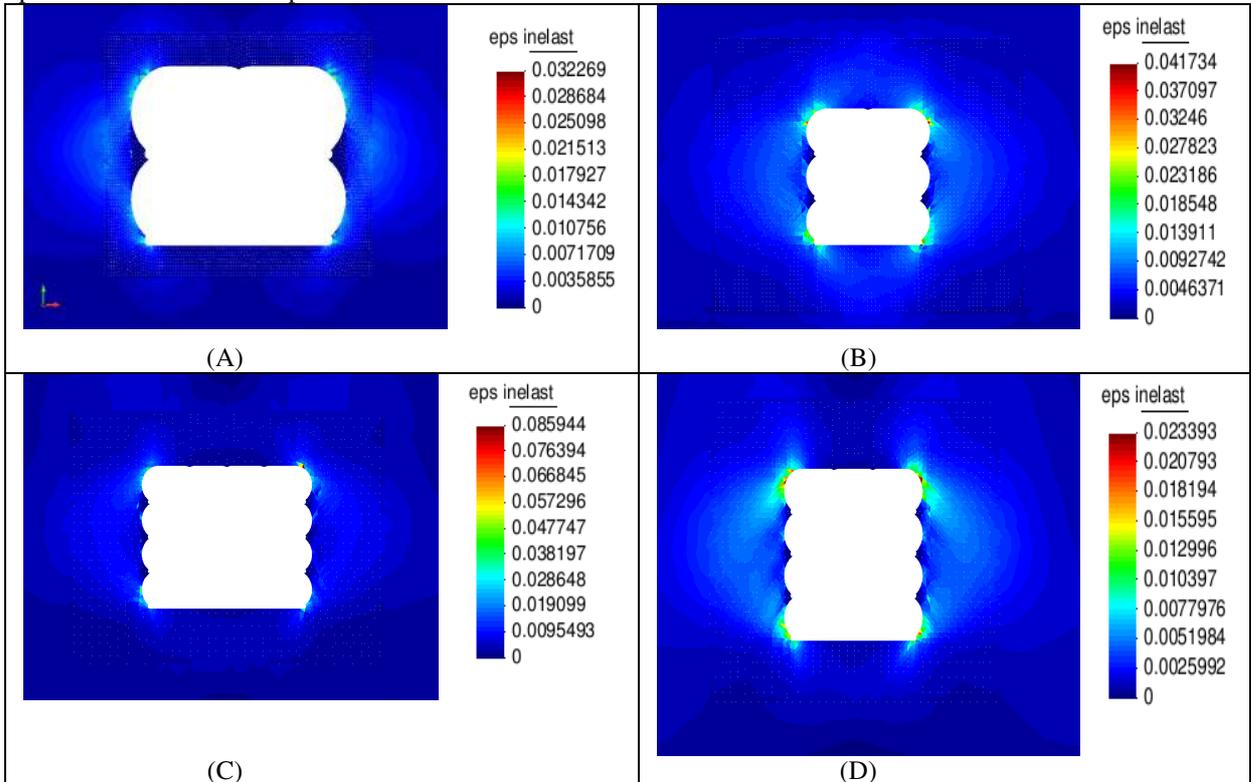
Fonte: Autor.

Figura 5.49 – Distribuição das tensões cisalhantes (representadas pelo segundo invariante do tensor desviador, J_2) em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



Fonte: Autor.

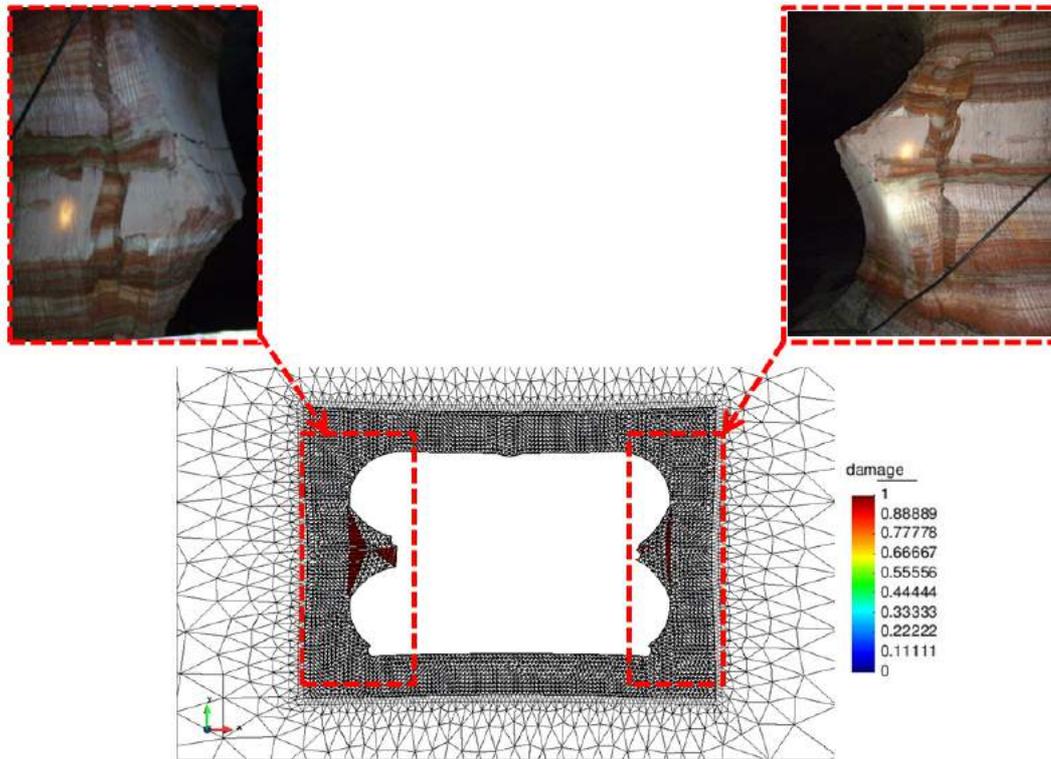
Figura 5.50 – Distribuição das deformações inelásticas em todo domínio da escavação: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



Fonte: Autor.

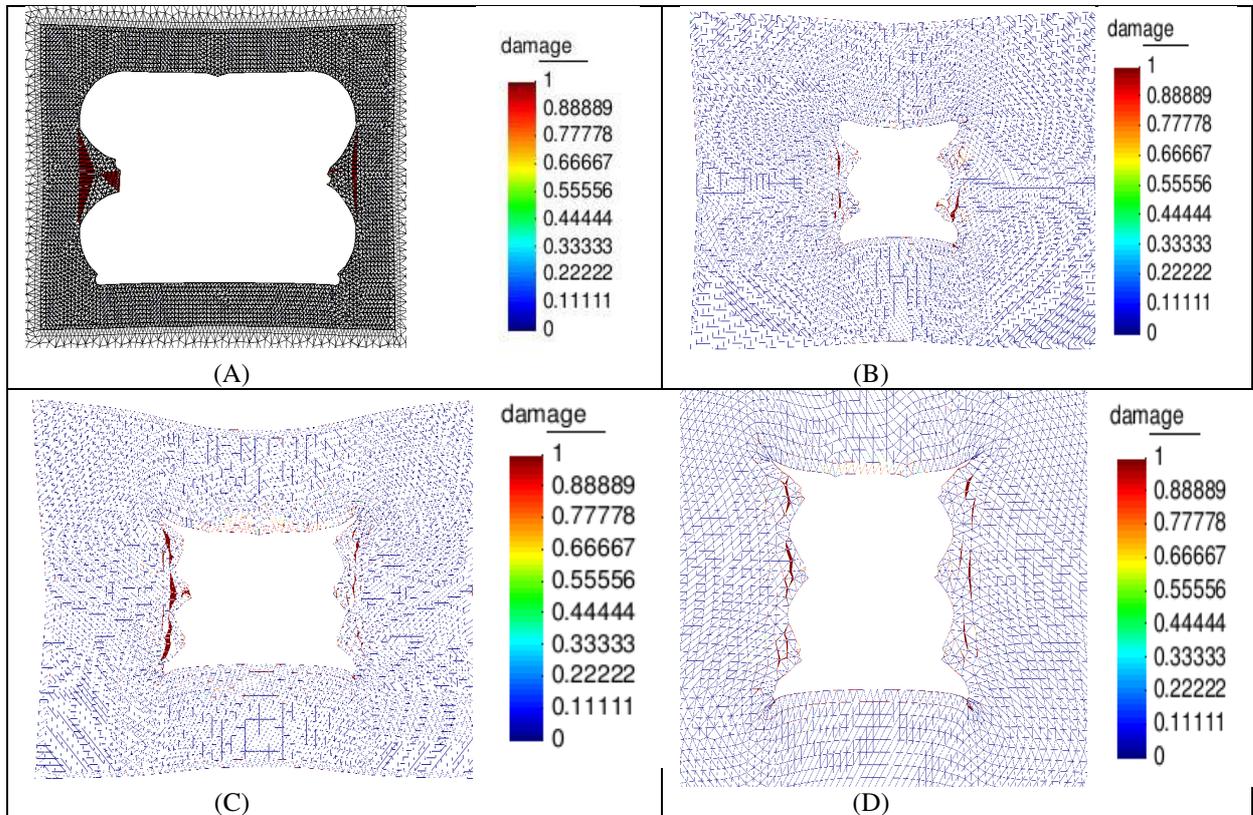
Finalmente, a distribuição do dano com a malha deformada pode ser observada na Figura 5.51, em que se tem a ilustração do caso 1 mostrando a modelagem de chocos laterais da mina Taquari Vassouras. Já na Figura 6.54, observa-se a distribuição do dano em todos os casos. Essas distribuições preconizam, também, uma tendência segundo a qual cavidades têm de se tornar “ovais” com o tempo.

Figura 5.51 – Distribuição do dano em todo domínio da escavação no Caso 1, com ilustrações de chochos laterais da mina de Taquari Vassouras.



Fonte: Autor.

Figura 5.52 – Distribuição do dano com malha deformada em todo domínio da escavação no caso 1, com ilustrações de chocos laterais da mina de Taquari Vassouras: (A) Caso 1; (B) Caso 2; (C) Caso 3 e (D) Caso4. No tempo final de simulação de 393 dias para o Caso 1, 6 anos para o Caso 2, 903 dias para o Caso 3 e 364 dias para o Caso 4.



Fonte: Autor.

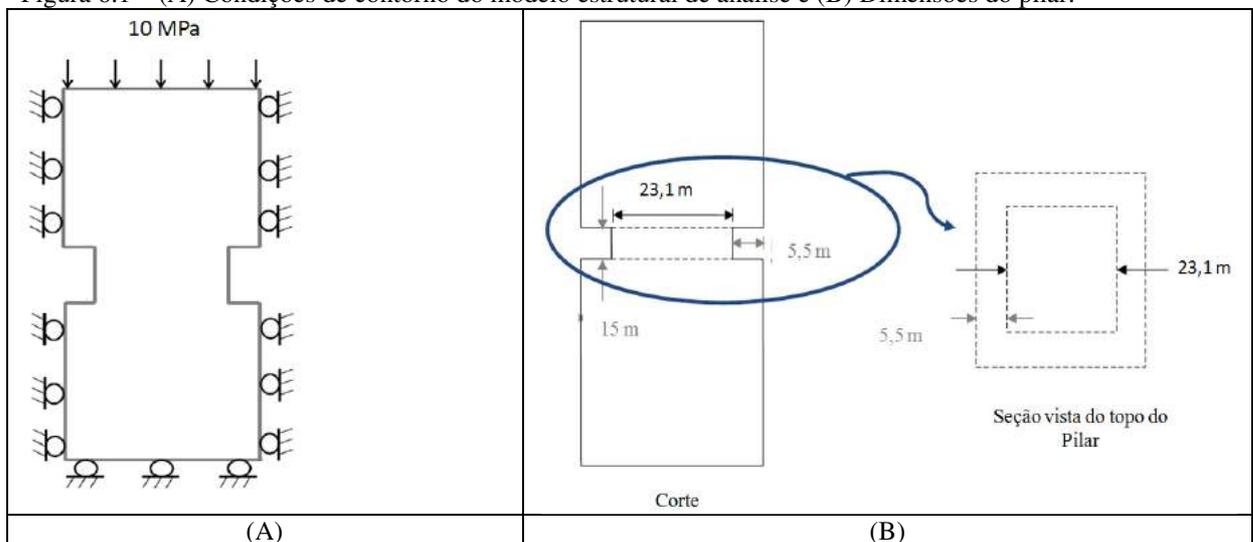
Assim como relatado no Capítulo 3, seção 3.1 deste trabalho, estes resultados tratam-se de uma contribuição original onde se mostrou que está técnica de fragmentação é viável para reproduzir diferentes comportamentos em um mesmo material (exemplo: comportamentos de tração e fluência no sal) de maneira desacoplada aplicando os modelos constitutivos adequados para cada subdomínio discretizado do meio (fratura e contínuo).

6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FLUÊNCIA EM UM PILAR 3D

“É a vida a escola, é a sustentação de todo saber.
Tudo na vida é aprendido que todos estão aptos a aprender”.
(Mirna Rosa)

Neste item, apresentam-se os resultados preliminares da simulação numérica do comportamento mecânico de um pilar tridimensional de uma mina subterrânea adaptado de Lau (2010). Adotou-se, no presente estudo, a geometria tridimensional e um tempo de simulação 365 dias. A espessura das rochas elásticas é de 50 m, cada uma delas, e o teto e piso de sal de 26 m cada. O pilar está a uma profundidade média de 500 m. Na Figura 6.1, estão ilustradas as condições de contorno do modelo estrutural de análise; sabendo-se que esse modelo não chega até a superfície, foi estimado um carregamento de 10 MPa e dimensões do pilar.

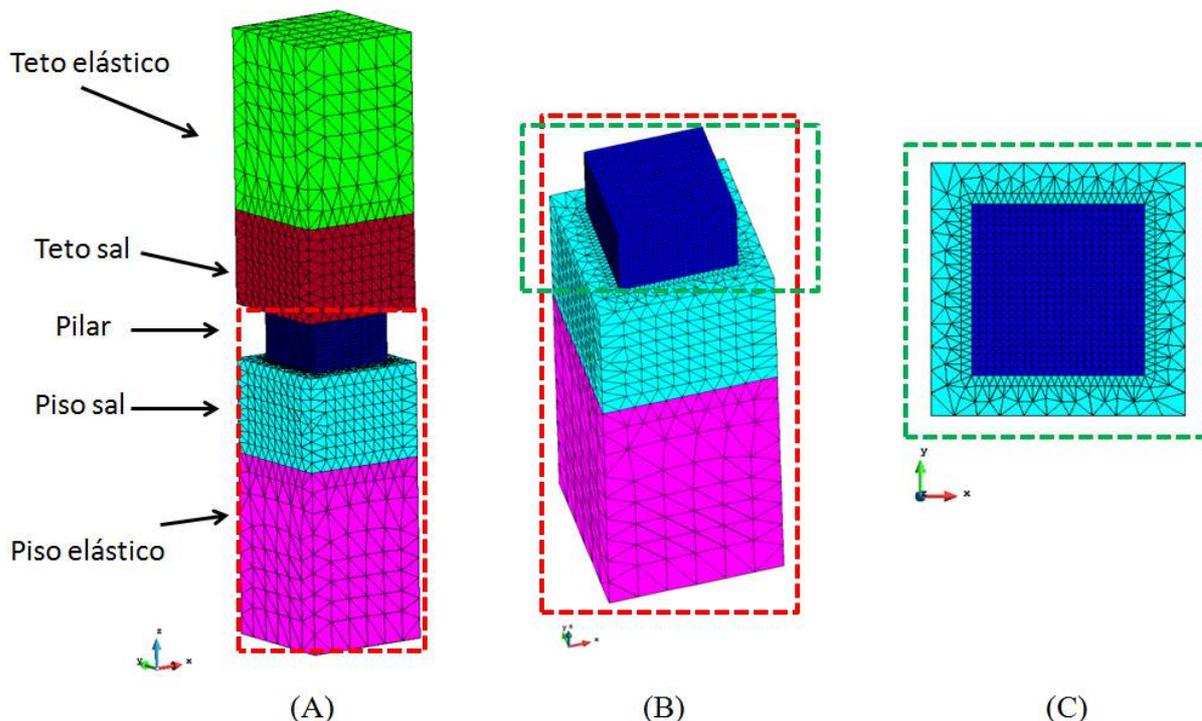
Figura 6.1 – (A) Condições de contorno do modelo estrutural de análise e (B) Dimensões do pilar.



Fonte: Adaptado de Lau (2010).

Utilizou-se um total de 99991 elementos tetraédricos, e 17274 nós na geração da malha em elementos finitos sobre o modelo estrutural de análise. E, assim, como os casos do Capítulo 6, próximo à escavação procurou-se gerar a malha com maior nível de refinamento, conforme, ilustrado na Figura 6.2.

Figura 6.2 - Malha de elementos finitos adotada para as análises do pilar 3D: (A) Malha com 99991 elementos e 17274 nós; (B) Corte com vista para o pilar e camadas inferiores; e (C) Corte com vista 2D do teto do pilar.



Fonte: Autor.

Na Tabela 6.1 constam os parâmetros mecânicos elásticos e de fluência, do mecanismo duplo de deformação, adotados para análise, com indicações de cada camada, dos respectivos materiais do perfil geológico e suas espessuras.

Tabela 6.1 – Descrição da espessura das camadas e dos parâmetros mecânicos adotados para as análises.

| Material | Espessura (m) | E (MPa) | ν | γ (MN/m ³) | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|---------------|---------------|-----------|-------|-------------------------------|---------------------|--|-------|-------|
| Teto Elástico | 50 | 20000 | 0,33 | 0,023 | 10 | 0,000 | 1,0 | 1,0 |
| Teto Sal | 26 | 20000 | 0,33 | 0,023 | 10 | 0,002 | 3,0 | 3,0 |
| Pilar | 15 | 20000 | 0,33 | 0,023 | 10 | 0,002 | 3,0 | 3,0 |
| Piso Sal | 26 | 20000 | 0,33 | 0,023 | 10 | 0,002 | 3,0 | 3,0 |
| Piso elástico | 50 | 20000 | 0,33 | 0,023 | 10 | 0,000 | 1,0 | 1,0 |

Fonte: Lau (2010).

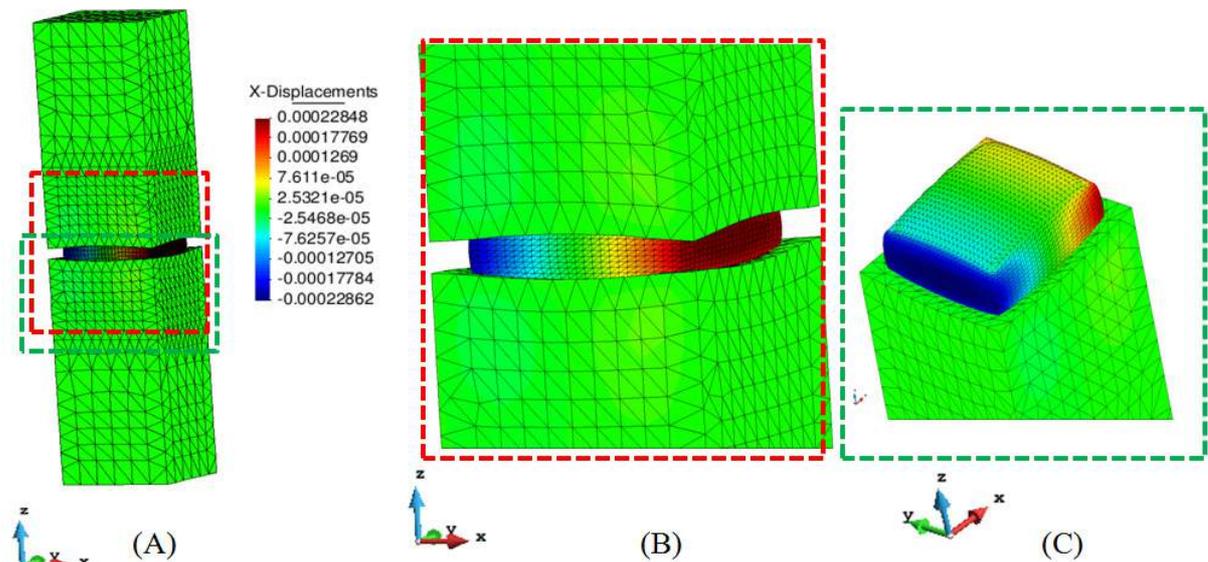
As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam a configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos), e a distribuição final dos deslocamentos horizontais, direções x e y, respectivamente, e, na Figura 6.5, mostra-se a distribuição final dos deslocamentos na vertical (direção z) em todo domínio do problema. Observa-se que os

maiores deslocamentos se dão próximos à zona da cavidade, onde há o maior alívio de tensões devido à escavação destas.

Nas Figuras 6.3 e 6.4, observa-se que os maiores deslocamentos horizontais são justamente nas paredes laterais das cavernas, resultado das deformações por fluência acumuladas ao longo de 335 dias de análise após escavação. O deslocamento lateral máximo foi de 0,2 mm no sentido de fechamento (convergência) da caverna escavada. Já na Figura 6.5 observam-se deslocamentos máximos de convergência do teto e piso com valores de 0,9 e 0,2 milímetros, respectivamente.

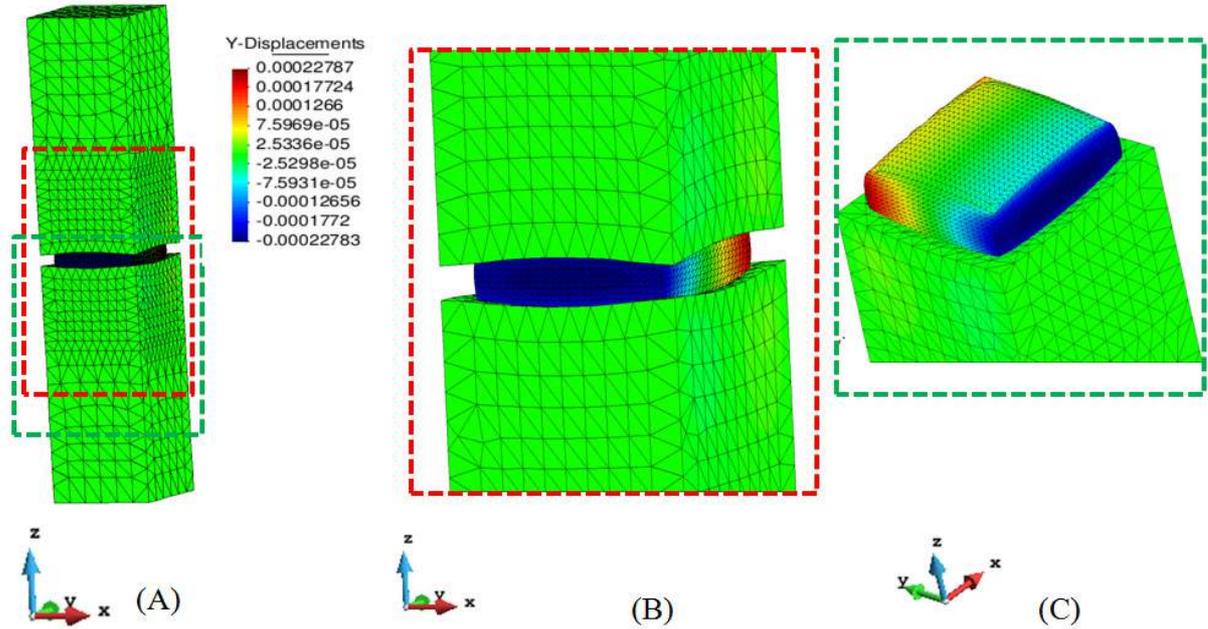
Na figura 6.6, observa-se a distribuição da norma dos deslocamentos, indicando que o teto da escavação superior desce não só pela fluência da camada salina superior, mas também por deformação dos materiais não salinos.

Figura 6.3 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição dos deslocamentos horizontais na direção x a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



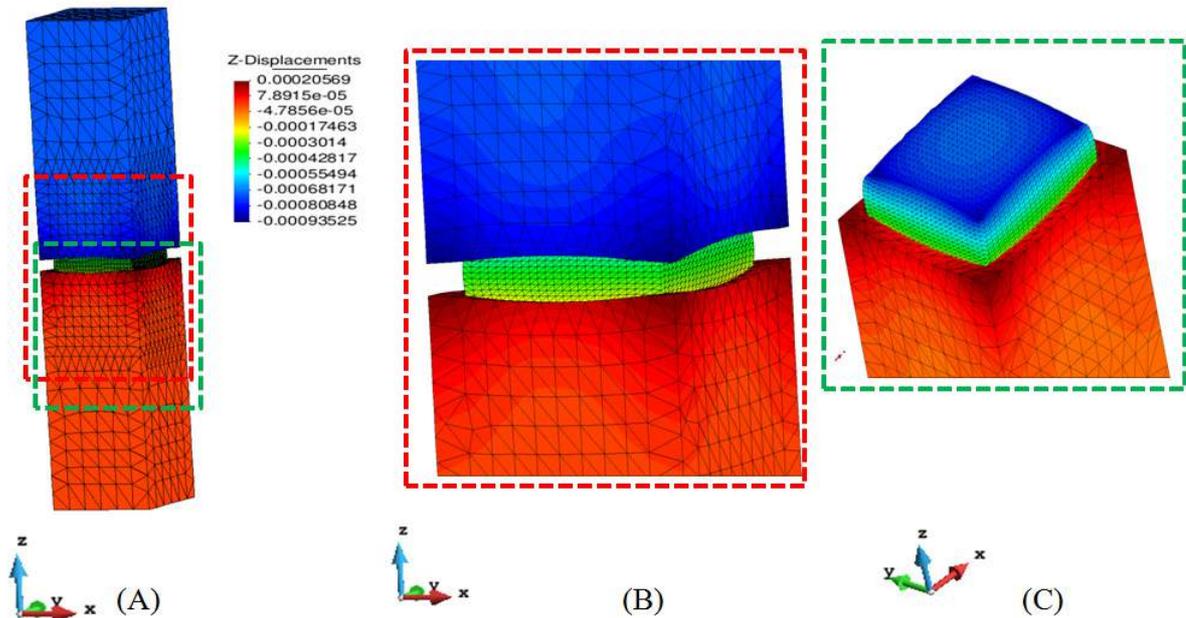
Fonte: Autor.

Figura 6.4 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição dos deslocamentos horizontais na direção y a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



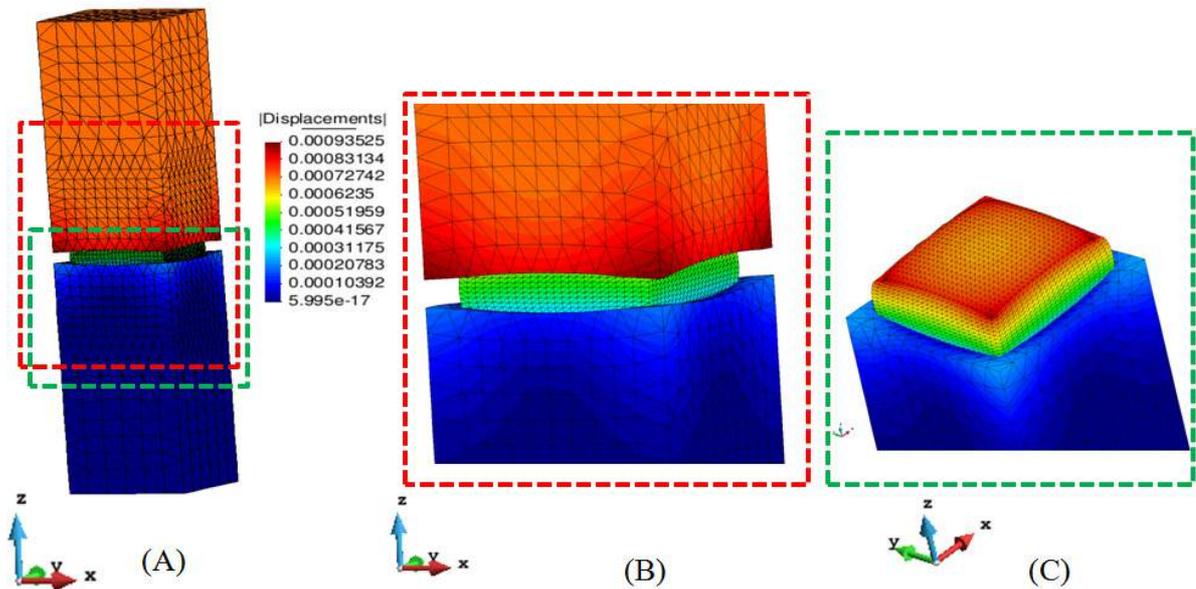
Fonte: Autor.

Figura 6.5 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição dos deslocamentos verticais na direção z a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



Fonte: Autor.

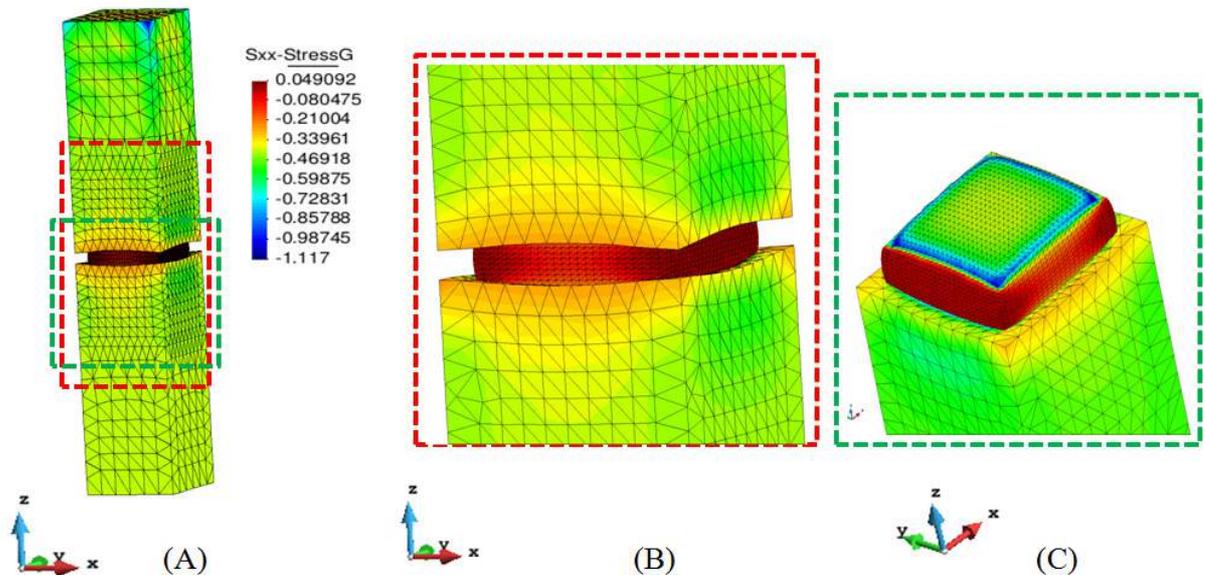
Figura 6.6 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição das normas dos deslocamentos a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



Fonte: Autor.

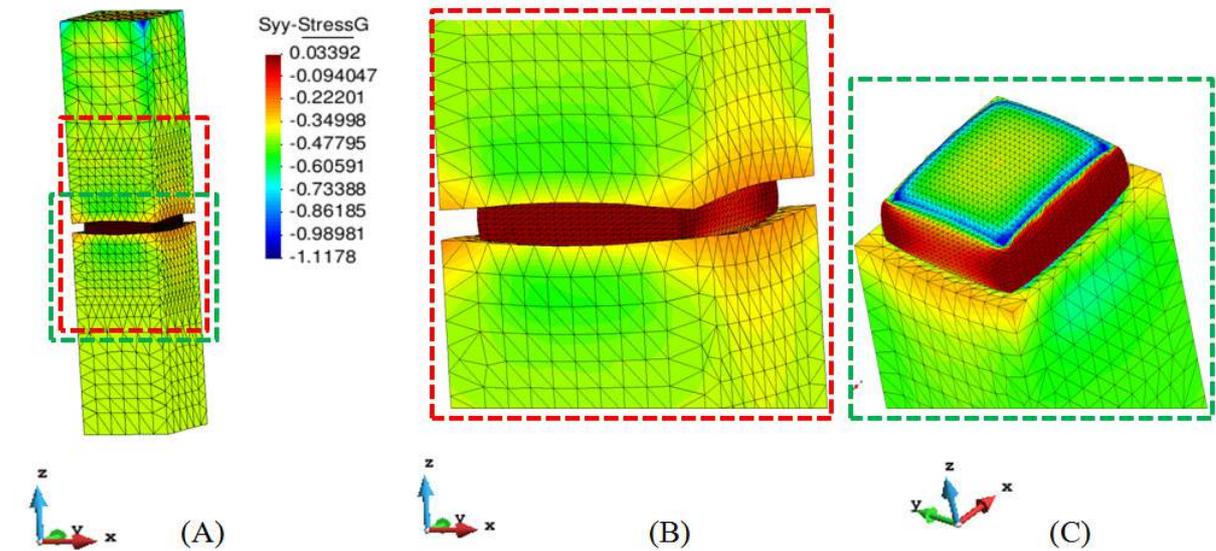
A distribuição das tensões horizontais é apresentada nas Figura 6.7 e 6.8 (direção x e y, respectivamente), mostrando uma zona de alta concentração de tensões de tração nas quinas nos encontros do teto com a parede. Nas tensões na direção vertical (Figura 6.9), é possível notar o acúmulo de tensões de compressão no pilar.

Figura 6.7 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição das tensões horizontais na direção x a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



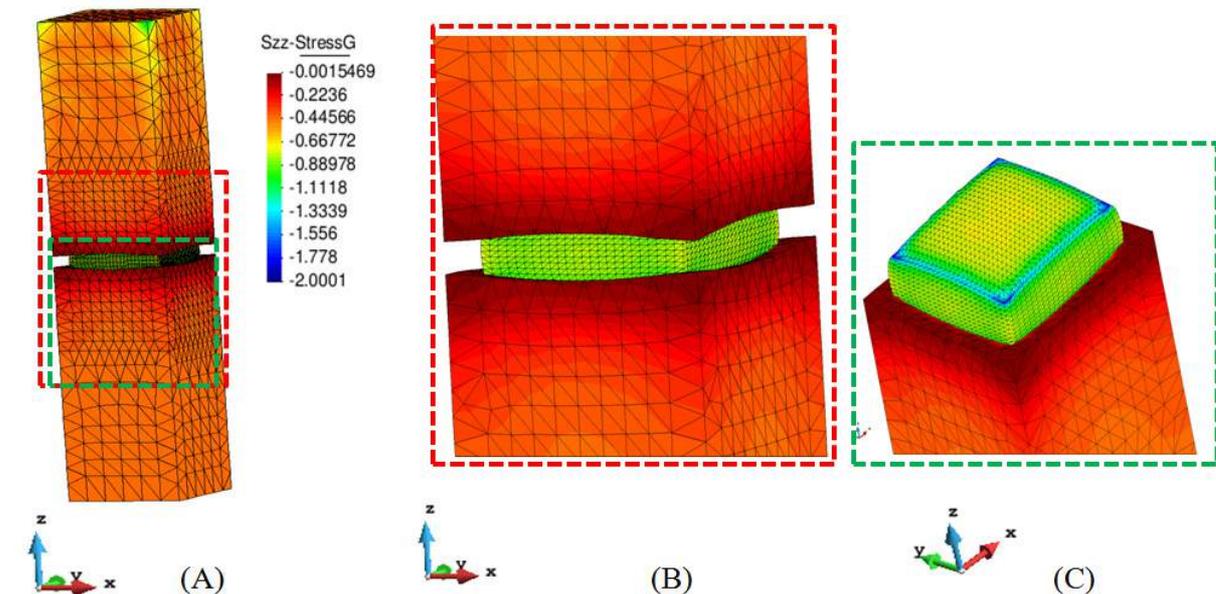
Fonte: Autor.

Figura 6.8 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição das tensões horizontais na direção y a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



Fonte: Autor.

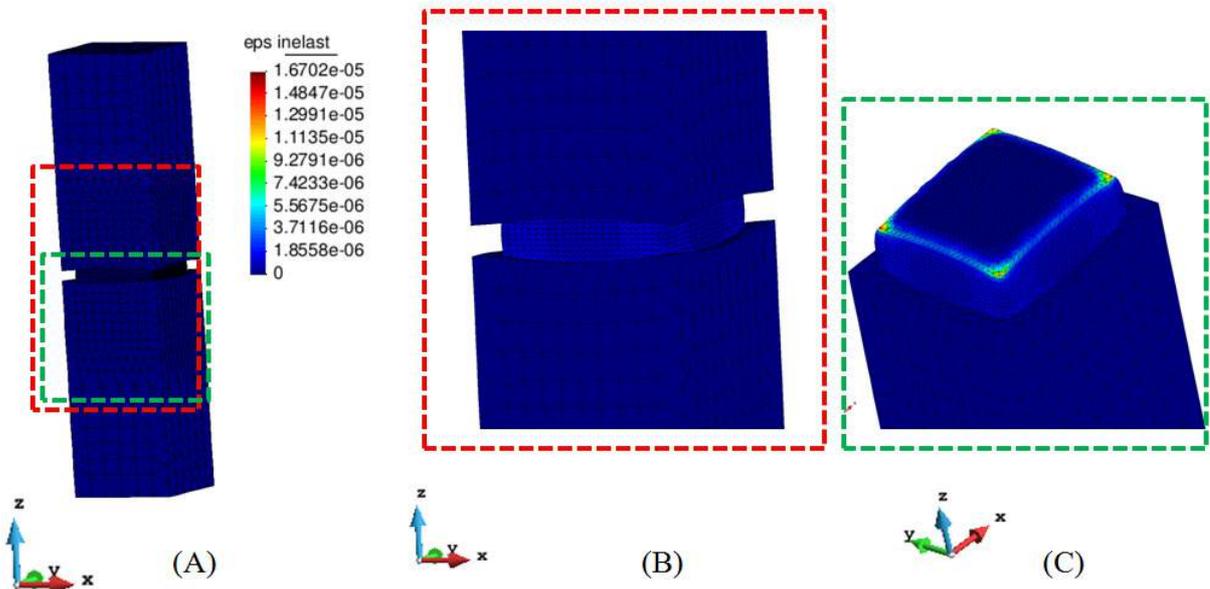
Figura 6.9 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição das tensões verticais na direção z a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



Fonte: Autor.

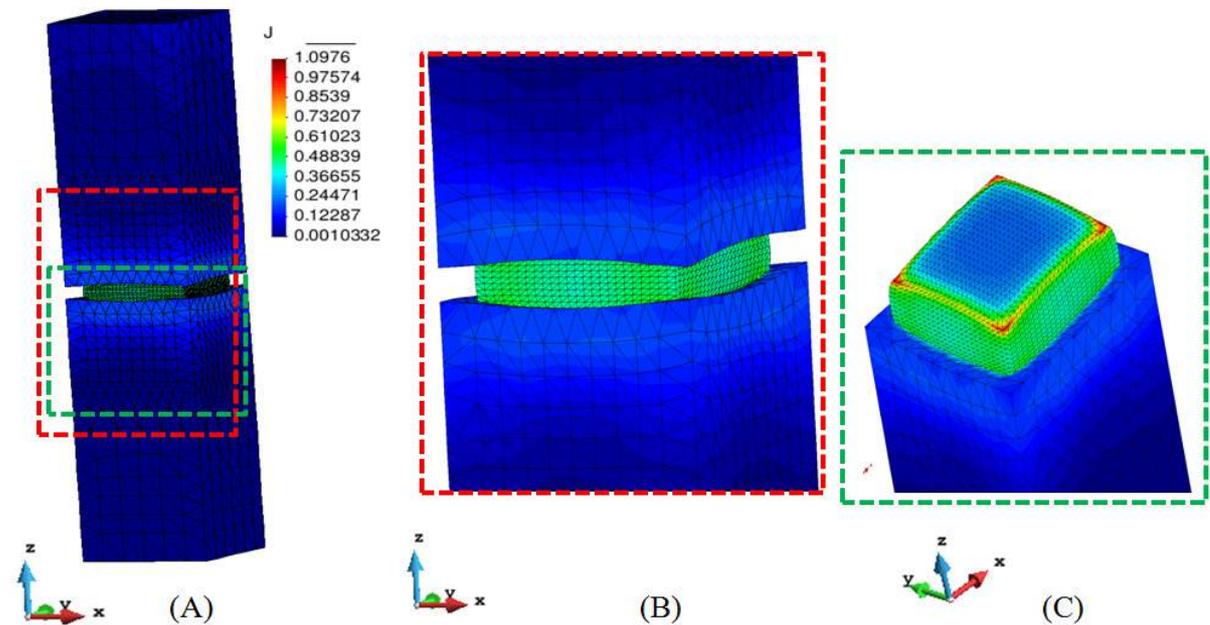
Na Figura 6.10 é apresentada a distribuição de deformações inelásticas, a parti das quais se podem observar concentrações nas quinas. Na Figura 6.11, que dá a distribuição das tensões cisalhantes (representadas pelo segundo invariante do tensor desviador, J) no maciço, pode-se observar o alto nível de cisalhamento nas paredes e principalmente nas quinas.

Figura 6.10 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição das deformações inelásticas a 335 dias após escavação (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



Fonte: Autor.

Figura 6.11 - Configuração deformada da escavação em escala não real (fator de escala de 10000 para os deslocamentos) e distribuição das tensões cisalhantes a 335 dias após escavação: (A) Pilar 3D; (B) detalhe do pilar 3D; e (C) corte com vista para o teto do pilar 3D e camadas inferiores.



Fonte: Autor.

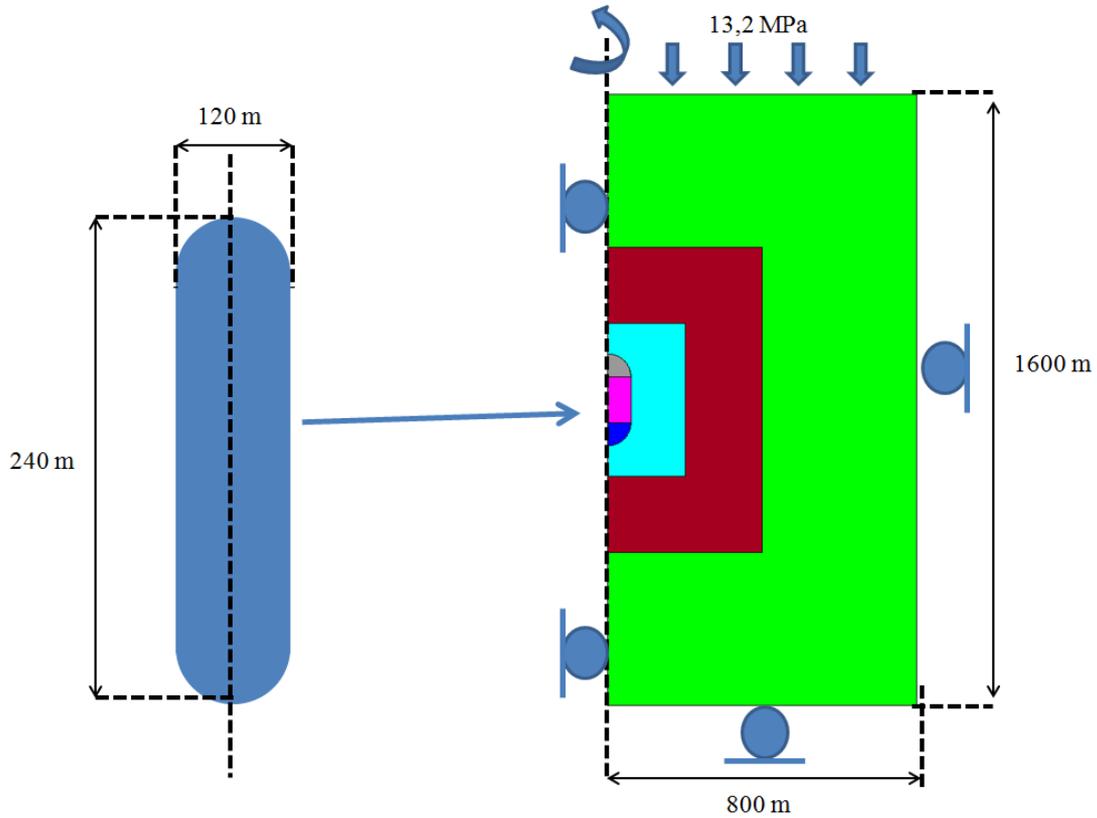
7 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FLUÊNCIA NA ESTOCAGEM DE GÁS EM MINAS DE DISSOLUÇÃO

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

(John F. Kennedy)

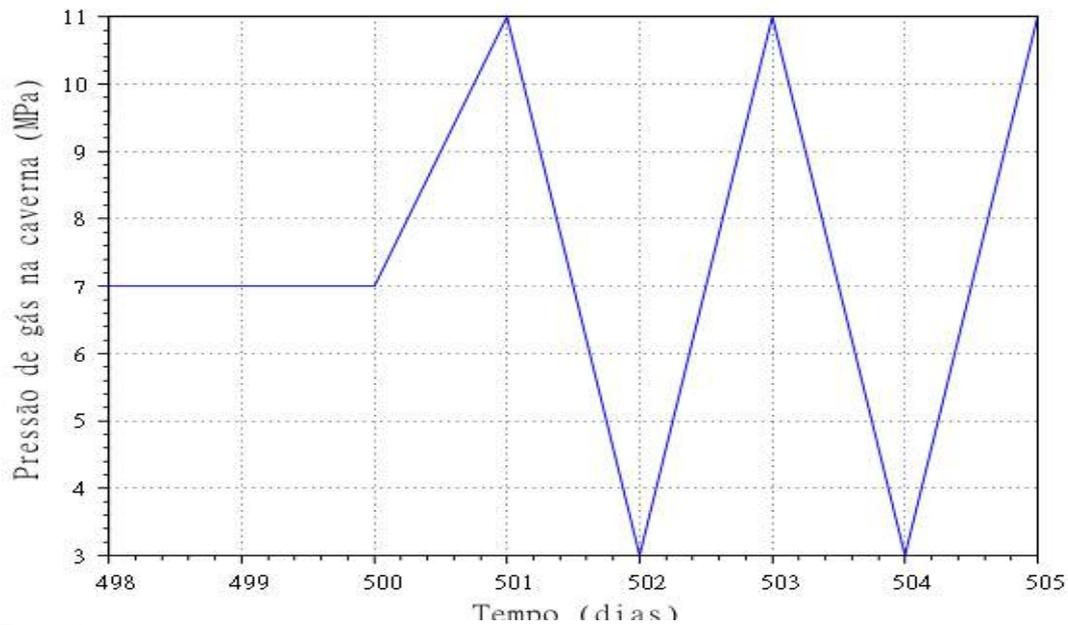
Tendo em vista a validação e aplicação do modelo de fluência para os cenários anteriores, e com base nas discussões dos Capítulos 1 e 2 deste trabalho, no presente item destacam-se os resultados da simulação numérica do comportamento de fluência de uma mina de halita lavrada por dissolução para estocagem de gás natural, com geometria adaptada de Moghadam *et al.* (2013). Adotaram-se, neste estudo, as condições de contorno e a geometria bidimensional com simetria, ilustrada na Figura 7.1. A escavação durou 30 dias e a simulação 505 dias. A geometria da mina tem um formato tipo cápsula, e seu volume é de $2,261 \times 10^9$ m³. Sabendo-se que esse modelo estrutural não chega até a superfície, foi estimado um carregamento de 13,2 MPa, em que as profundidades 1280 m e 1520 m são do teto e do piso, respectivamente. Considerando que se fez uma análise puramente mecânica, é importante indicar que a pressão de gás foi representada por tensão prescrita na parede da cavidade de, aproximadamente 30% da carga vertical no teto da cavidade antes do início do processo de escavação, 7 MPa durante 500 dias e depois, durante 5 dias, foram aplicados ciclos de pressões com amplitudes de ± 4 MPa (Figura 7.2).

Figura 7.1 – Dimensões da geometria e condições de contorno do modelo estrutural de análise.



Fonte: Adaptado de Moghadam *et al.* (2013).

Figura 7.2 – Pressão de gás dentro da cavidade tipo cápsula.



Fonte: Autor.

Utilizou-se um total de 32040 elementos triangulares e 16185 nós na geração da malha em elementos finitos sobre o modelo estrutural de análise. Procurou-se gerar a malha com maior nível de refinamento mais próximo à cavidade. Conforme ilustrado na Figura 7.3, criaram-se três regiões com densidades de elementos diferentes.

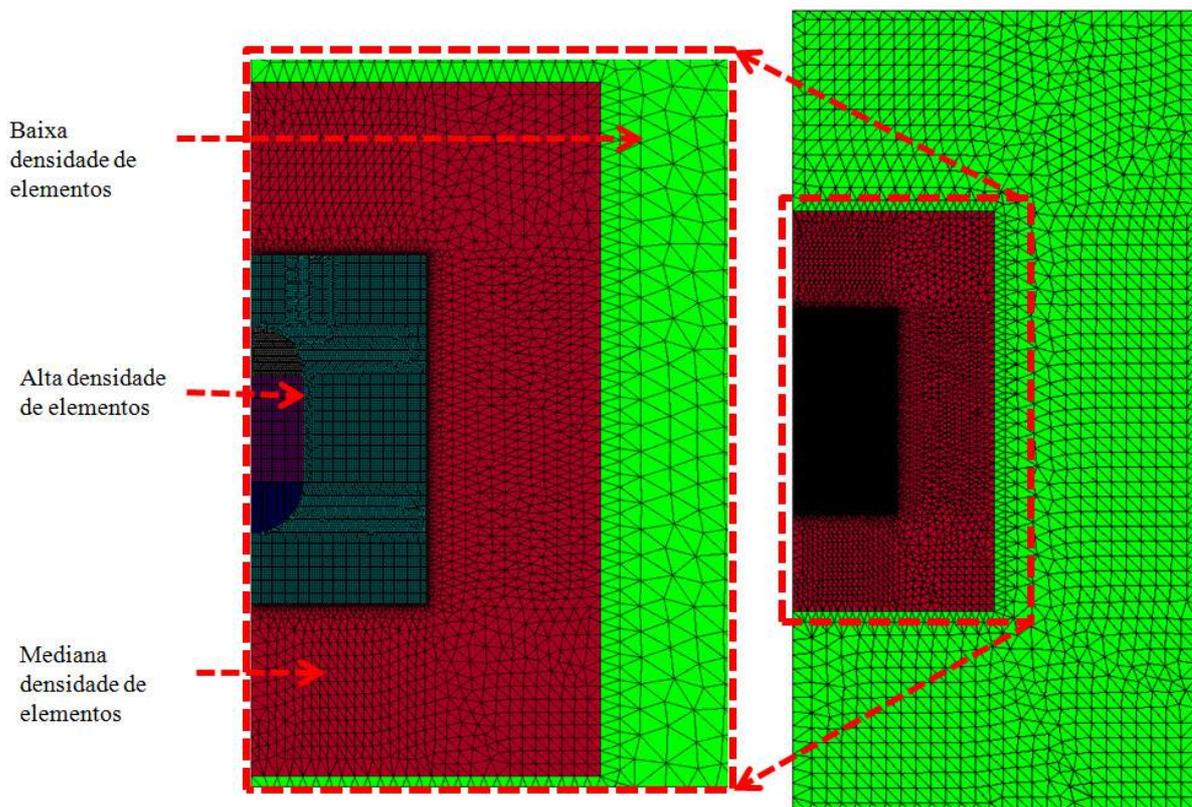
Da Tabela 7.1, constam os parâmetros mecânicos da halita adotados na análise. O modelo de fluência é o de mecanismo duplo deformação, e os parâmetros são da mina Taquari Vassouras.

Tabela 8.1 – Parâmetros mecânicos adotados para as análises.

| Material | E (MPa) | ν | Densidade (Kg/m ³) | σ_{do} (MPa) | $\dot{\epsilon}_{sco}$ (ano) ⁻¹ | n_1 | n_2 |
|----------|-----------|-------|--------------------------------|---------------------|--|-------|-------|
| Halita | 20403 | 0,36 | 2200 | 12 | 0,0016 | 3 | 5,8 |

Fonte: (COSTA, 1997, 1995b)

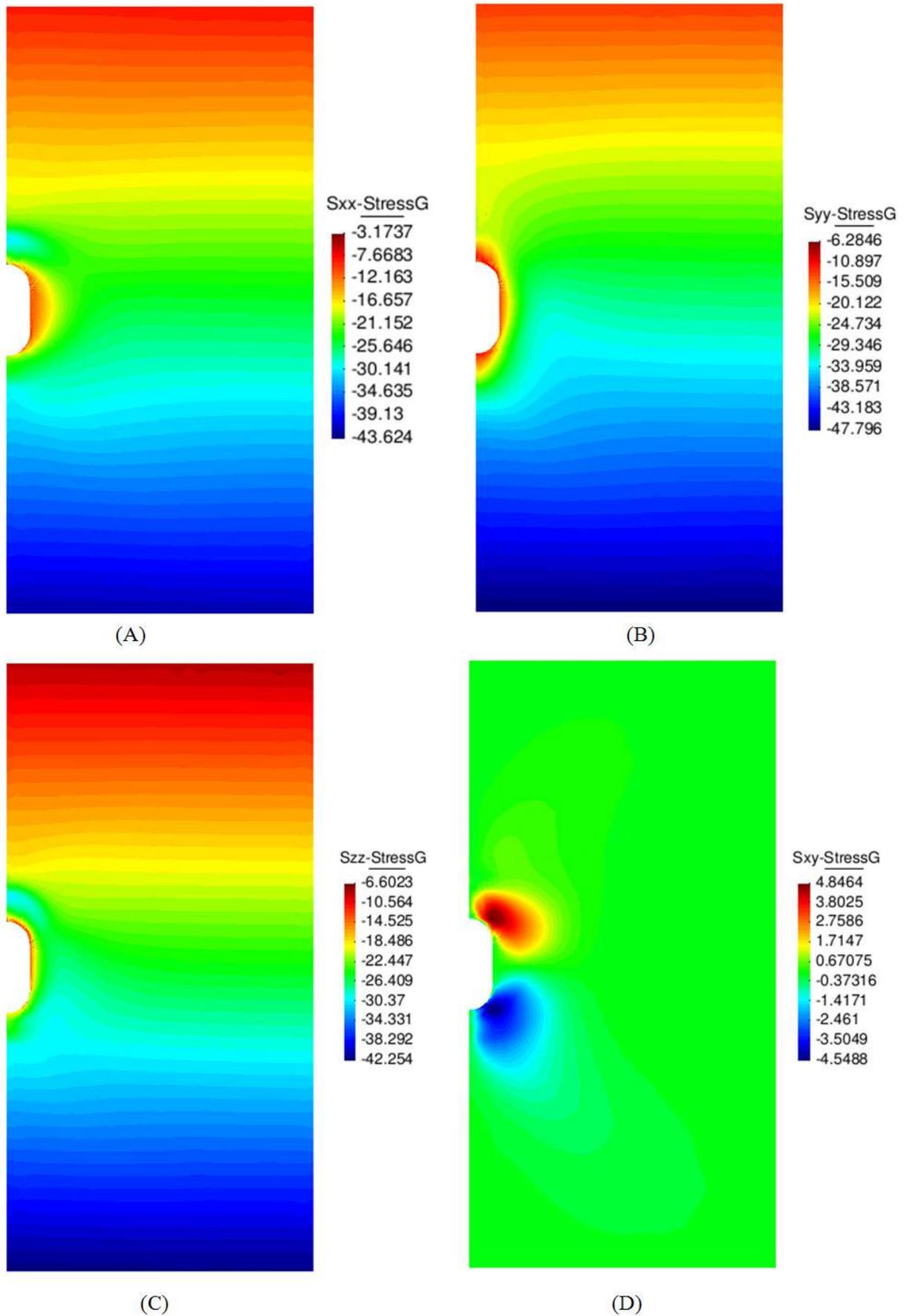
Figura 7.3 - Malha de elementos finitos adotada para as análises da cavidade tipo cápsula com 32040 elementos e 16185 nós e com detalhe próximo a cavidade.



Fonte: Autor.

A distribuição das tensões radiais, verticais, tangenciais e cisalhantes são apresentadas nas Figuras 7.4 A a D, respectivamente. Mostrando uma zona de alta concentração de tensões radiais (Figura 7.4 A) na parede e verticais no teto e piso (Figura 7.4 B). Além disso, observam-se tensões tangenciais médias de 6,6 MPa no entorno da cavidade (Figura 7.4 C) e concentrações de tensões cisalhantes no arco superior e inferior da cápsula (Figura 7.4 D).

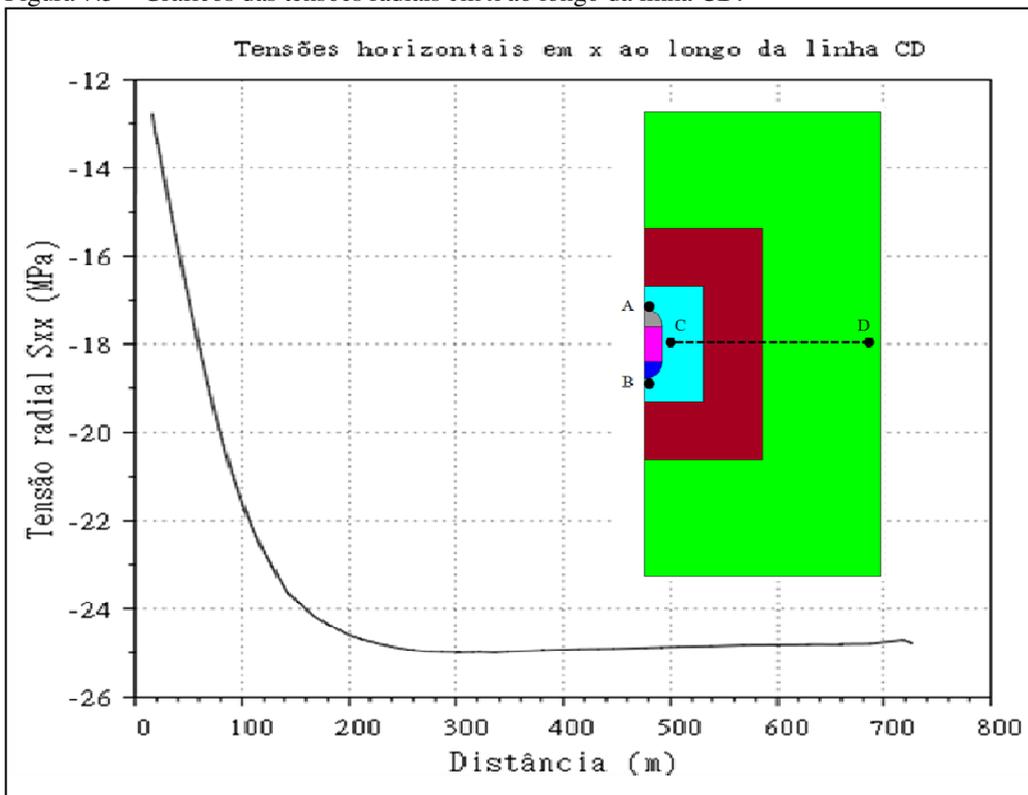
Figura 7.4 – Distribuições das tensões em 505 dias: (A) radiais; (B) verticais; (C) tangenciais e (D) cisalhantes.



Fonte: Autor.

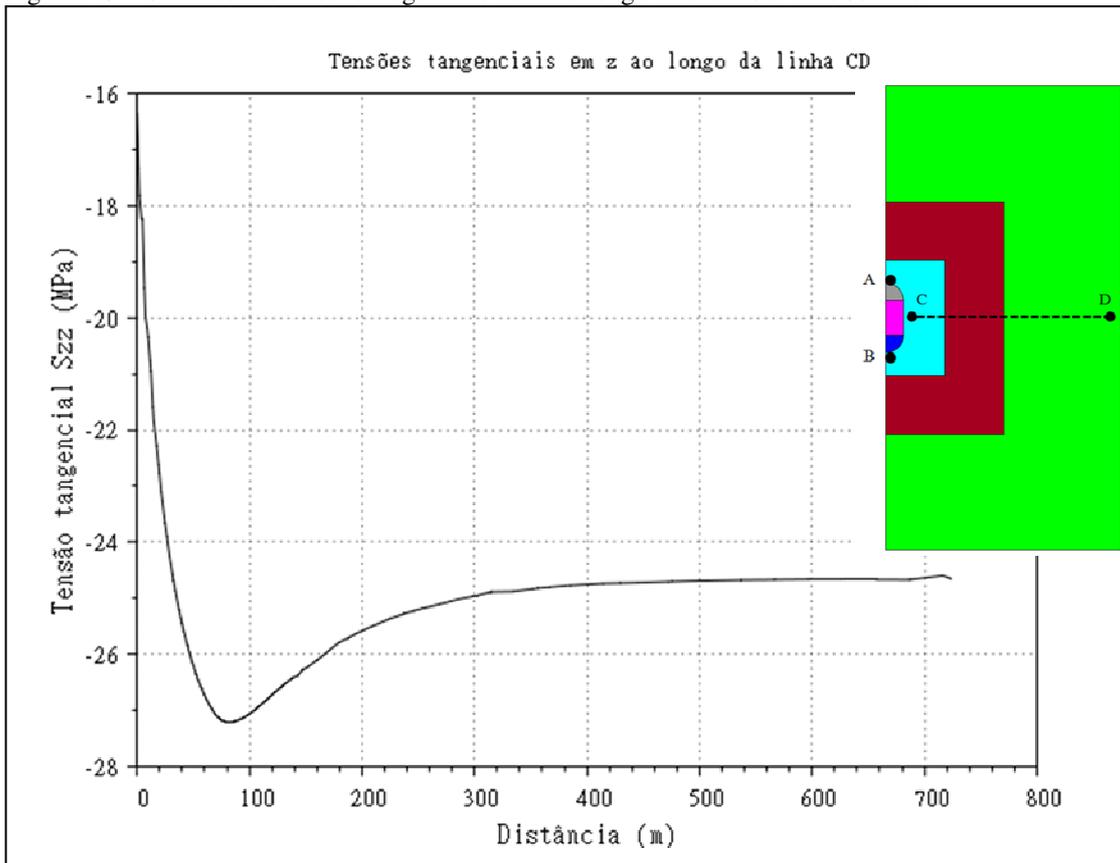
Na Figura 7.5 observa-se as tensões radiais ao longo da linha CD onde se tem próximo a cavidade tensões em torno de 13 MPa e no ponto D tensões de 25 MPa. Já na Figura 7.6 observa-se tensões tangenciais ao longo da linha CD, que por sua vez vê-se próximo a cavidade tensões de 18 MPa e no ponto D tensões de 25 MPa.

Figura 7.5 – Gráficos das tensões radiais em x ao longo da linha CD.



Fonte: Autor.

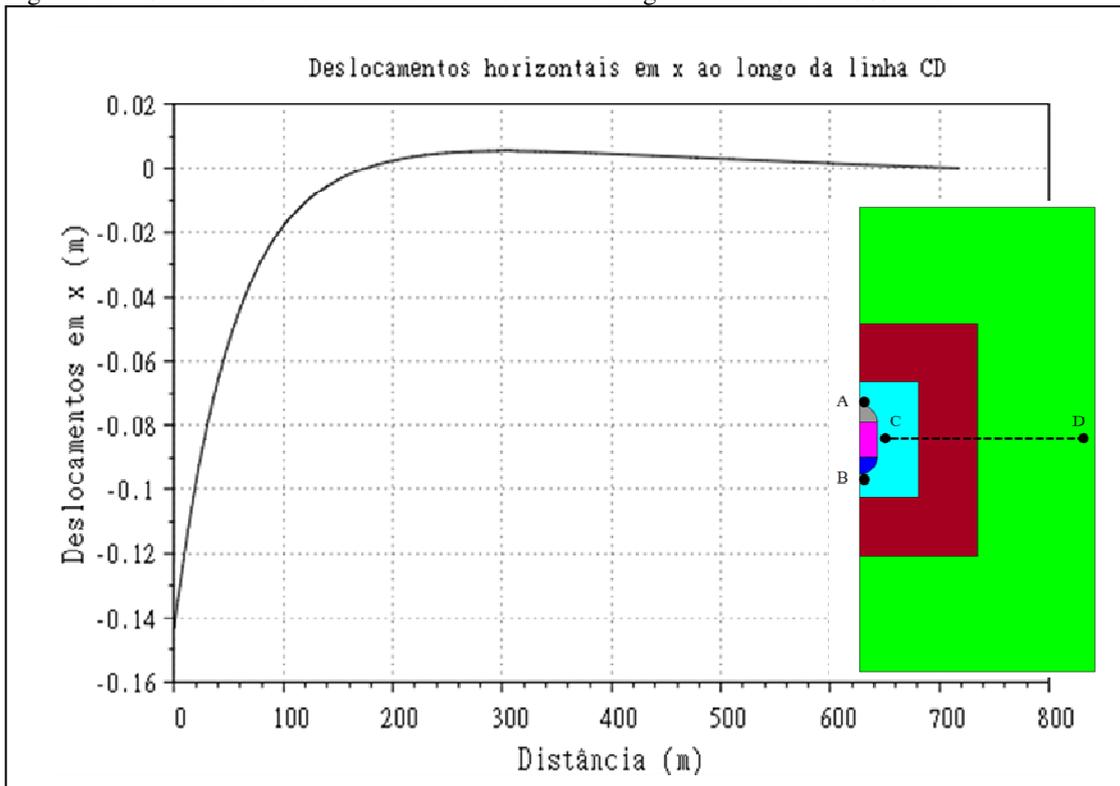
Figura 7.6 – Gráficos das tensões tangenciais em z ao longo da linha CD em 505 dias.



Fonte: Autor.

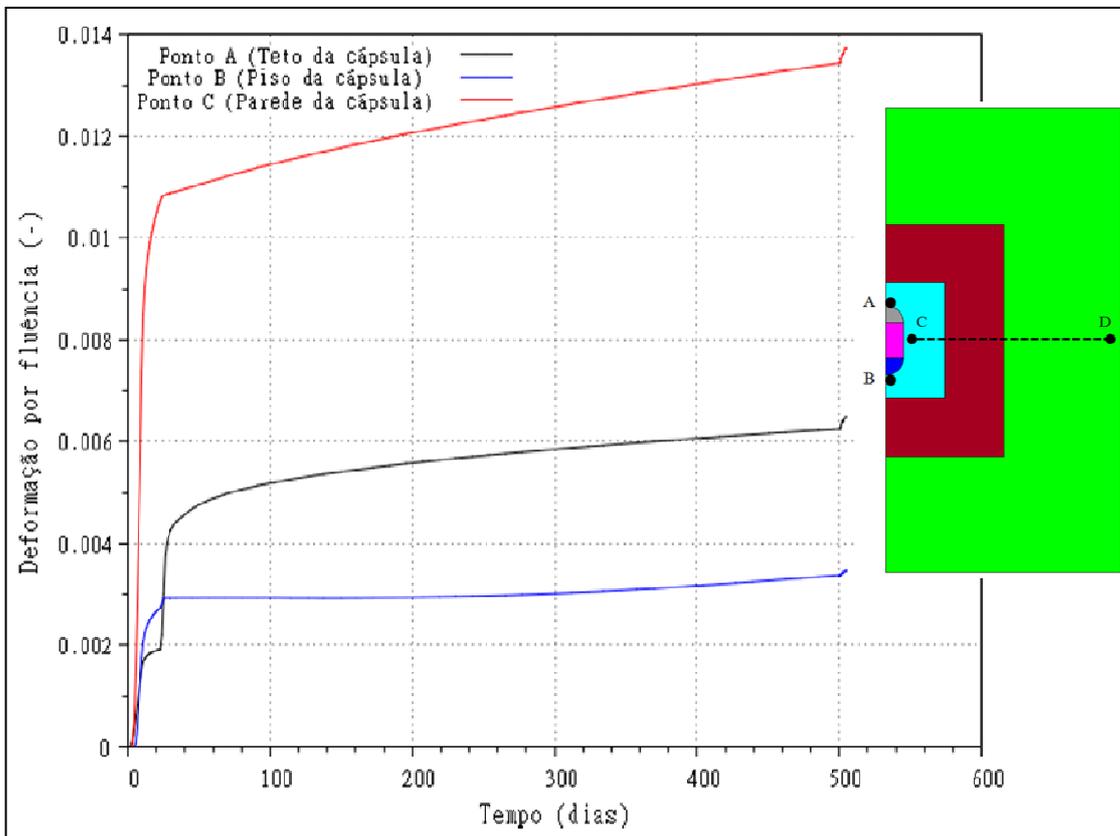
Na Figura 7.7 observa-se o gráfico dos deslocamentos radiais ao longo da linha CD em 505 dias e vê-se nitidamente o deslocamento de 14 cm no sentido de fechamento da cavidade. Já na Figura 7.8 têm-se as deformações por fluência ao longo do tempo onde ocorrem maiores deformações na parede da cápsula comparando com as deformações no tomo e no piso.

Figura 7.7 – Gráfico dos deslocamentos radiais em x ao longo da linha CD em 505 dias.



Fonte: Autor.

Figura 7.8 – Gráficos de deformação por fluência ao longo dos 505 dias nos pontos A (próximo ao teto da cavidade), B (próximo ao piso da cavidade) e C (próximo a parede da cavidade).



Fonte: Autor.

Como mencionado no início desse capítulo, os estudos apresentados neste estudo de estocagem de gás são preliminares, necessitando, assim, de análises mais aprofundadas e comparativos com dados reais para uma melhor validação da metodologia aplicada. A quantidade de parâmetros que devem ser considerados nos estudos de estocagem de gás é grande, como, por exemplo, compressibilidade do gás, quantidades de ciclos de pressões, amplitudes das pressões, temperatura do gás e do maciço rochoso.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(**Marthin Luther King**)

8.1 CONCLUSÕES

É notória a importância do potássio para o desenvolvimento da humanidade, já que a maior parte do potássio produzido no mundo é utilizada na produção de fertilizantes. A lavra de minérios ricos em potássio torna-se, então, estratégica para a economia do país. Daí a importância de se estudar a mina subterrânea de Taquari Vassouras, que é a única mina subterrânea de potássio do Brasil.

A validação do ensaio triaxial de fluência pelo modelo constitutivo de mecanismo duplo deformação denotou uma fiel concordância com a fase secundária de fluência, porém deixou clara a necessidade de se utilizar em modelos que capturem outras fases além da fase de fluência no estacionário, como, por exemplo, o LUBBY 2, que é um modelo que descreve as fases transiente e estacionária de fluência e está implementado, também no CODE BRIGHT.

O estudo do Painel D1 possibilitou uma validação da metodologia aplicada neste trabalho, com o modelo de fluência de mecanismo duplo deformação com os dados de convergência cedidos pela CVRD. O programa CODE_BRIGHT mostrou-se capaz de analisar problemas com a utilização do modelo de fluência para representar o comportamento de um evaporito, devendo-se, assim, incrementar a quantidade de pesquisas que considerem temperaturas diferentes para que, através de análises de sensibilidade, possam ser melhorados os ajustes das curvas de convergência.

O Painel I5 é o único no mundo com configurações de lavra próximas à taquidrita. Isso levou a um estudo versando, dentre outras coisas, a subsidência na superfície do terreno e estabilidade da mina em relação ao influxo de água. Deve-se, assim, estudar esse painel de maneira mais detalhada em trabalhos futuros devido a sua complexidade.

O estudo de queda de blocos laterais possibilitou uma validação que, ainda não observada na literatura, do fraturamento de rochas salinas, aplicou a técnica de fragmentação que utiliza elementos regulares como o modelo de fluência e elementos com alta razão de aspecto com o modelo de dano à tração. Este estudo é um precedente extraordinário, pois se pode aplicar essa técnica a partir de agora em casos mais realistas. Uma desvantagem dessa técnica, contudo, está no elevado custo computacional envolvido.

O método de lavra por câmaras e pilares leva à necessidade de se estudar a estabilidade de pilares em três dimensões. Esse estudo foi preliminar, mas percebeu-se que o CODE_BRIGHT é capaz de modelar problemas desse porte utilizando modelos de fluência.

Estocagem de gás é um tema atual e de fundamental importância para o nosso país, pois servirá como pulmões contingenciais para manutenção da produção de petróleo, e como regulador das quantidades e proporções ótimas para atender as perspectivas que estão por vir com o advento do pré-sal.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para possíveis continuações da presente pesquisa, são propostos alguns temas, abaixo indicados:

- Utilização do modelo LUBBY 2, que é um modelo que descreve a fase transiente e secundária da fluência e já está implementada no CODE BRIGHT (SILVA, 2010).
- Utilização do modelo de descontinuidades fortes descritos em Beserra (2015), com custo computacional menor, comparado com a técnica de fragmentação (SEIXAS, 2015), empregada nesse trabalho.
- Realização de retro análises com os dados de convergência do Painel D1, e, nesse sentido, para isso utilizar softwares de otimização, como o DAKOTA. Isso é necessário, pois não foram observados estudos assim nos relatórios cedidos pela CVRD.
- Simulação da lavra por dissolução desde a etapa da dissolução do sal e formação da cavidade. Posteriormente, a partir da cavidade resultante, fazer análises numéricas do desempenho mecânico do sistema rocha-fluido na cavidade.

- Estudos de hidro-mecânicos no PaineI I5, para analisar as possibilidades de fraturamento da rocha e/ou reativações de falhas e o influxo de água para o interior da cavidade.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. A. **Produção de Potássio: Panorama no Brasil e no Mundo**. VALE, 2015.
Disponível em: < <http://www.cetem.gov.br/agrominerais/livros/producaopotassio.pdf> >. Acesso em: 04/07/2015.
- ANDRADE JÚNIOR, F. S. **Apostila de Aula da disciplina Lavra Subterrânea**.
Universidade Federal da Bahia, 1994.
- AZEVEDO, G.. Sal-Gema: Riqueza a explorar. **Novos Rumos**, Rio de Janeiro, 8 à 14 de
Abril de 1960. Disponível em:<[http://memoria.bn.br/docreader/DocReader.aspx?](http://memoria.bn.br/docreader/DocReader.aspx?bib=122831&PagFis=721)
bib=122831&PagFis=721>. Acesso em: 13 de Junho de 2015. 1960.
- BARAJAS, P., CIVAN, F. **Modeling and Analysis of Salt-Cavern Natural-Gas Storage**.
SPE 164489, University of Oklahoma City, USA. 2014.
- BEREST, P., BROUARD, B., FEUGA, B. *Dry Mine Abandonment, SMRI Fall Meeting*,
Chester, UK, 2003.
- BESERRA, L. B. de Sá. **Análise hidro mecânica do fraturamento hidráulico via
elementos finitos com descontinuidade forte incorporada**. Tese de doutoramento.
Universidade Federal de Pernambuco. 2015.
- BORGES, R. G. **Avaliação Numérica de Perturbações de Tensões Associadas a
Estruturas Salíferas e suas Influências na Estabilidade de Poços**. Dissertação de Mestrado
UFRJ/COPPE. 2008.
- BOTELHO, F. V. C. **Análise Numérica do Comportamento do Sal em Poços de Petróleo**.
Dissertação de Mestrado, PUC - Rio. 2008.
- BRADSHAW, R. L.,BOEGLY, W. J. AND EMPSON, F. M. "**Correlation of Convergence
Measurements in Salt Mines with Laboratory Creep-test** data: Proc. 6th Symp. Rock
Mech, Univ. of Missouri, Rolla; Ed. E. M. Spokes and. C. R. Christiansen; p. 501-514, 1964.

BRADSHAW, R. L.; MCCLALN, W. C.: **“ProJect Salt Vault: A Demonstration of the Disposal of High-Activty Solldified Wastes in Underground Salt Mines,ORNL-4555,** abril 1971.

CAMACHO, G., ORTIZ, M. **Computational modelling of impact damage in brittle materials.** Int. J. Solids Structures, 33(20-22):2899–2938. 1996.

CARVALHO JUNIOR, A. L. P.; ALVES E. A. A. **O planejamento de lavra da mina de Taquari-Vassouras.** In Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, 1., 2000, Belo Horizonte. Anais. 13 p.1 CD – ROM. Belo Horizonte: Instituto Brasileiro de Mineração, 2000.

CHOUTEAU, M., PHILLIPS, G., AND PRUGGER, A. **Mapping and Monitoring Softrock Mining, Proc. of Exploration 97,** Prosp. and Dev. Assoc. of Canada, Sept. 14-18. Toronto. 1997.

COSTA, A. M. **O Método dos Deslocamentos Descontínuos Aplicado a Análise de Escavações Subterrâneas ,** Seminário de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1981.

COSTA A. M. **Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de Escavações Subterrâneas Destinadas à Mineração Subterrânea,** tese de doutorado, COPPE/UFRJ, 1984a.

COSTA, A. M. **"Análise de Estabilidade do Pannel H1 na Camada Superior de Silvinita",** RT CVRD 002/94,junho 1994a.

COSTA, A. M. : **" Revisão do Dimensionamento do Pannel da Lavra da Camada Superior de Silvinita"**, Memorando Interno Petromisa, AMC-026/85, 1985.

COSTA, A. M. : **"Compilação e Avaliação dos Dados Fornecidos pela CVRD"** [Bases de Projeto-Camada Inferior de Silvinita], Relatório RT CVRD 001/93, novembro 1993.

COSTA, A. M. : **"Revisão do Dimensionamento das Estruturas de Lavra para a Camada Superior de Silvinita"**, RT CVRD 001/94, abril 1994b.

- COSTA, A. M. : "**Revisão do Dimensionamento Estrutural do Primeiro Painel da Lavra Experimental**", Relatório Interno da Petromisa, RT-AMC-002/86, 1986.
- COSTA, A. M. "**Reavaliação do comportamento do painel de lavra I5 da mina de potássio de taquari-vassouras**", RT CVRD 001/1999, 22 de junho de 1999.
- COSTA, A. M., MEDEIROS, F. A. S., FONSENCA, C. F. **Perfuração de Espessas Camadas de Sal na Bacia de Campos**. Relatório Petrobrás. 2004.
- COSTA, A. M., PEREIRA, A. M. P. -"**Ata de reunião**", Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, fevereiro de 1989.
- COSTA, A. M., POIATE, E. JR., FALCÃO, J. L. **Triaxial Creep Test in Salt – Applied in Drilling Through Thick Salt Layers in Campos Basin - Brazil**. International Society for Rock Mechanics. News Journal, Vol. 9, pp. 14-24. 2005.
- COSTA, A. M.: "**Dimensionamento do Painel de Lavra Experimental**", Relatório Interno da Petromisa, RT-AMC-002/84, 1984b.
- COSTA, A. M.: "**ANALISE DA INFLUENCIA DA ESPESSURA DE LAJE DE SILVINITA E CARNALITA SOBREJACENTE A TAQUIDRITA EM INIBIR A FLUENCIA DA TAQUIDRITA**", relatório técnico emitido pelo consultor à CVRD, RT-CVRD003/95, abril 1995a.
- COSTA, A. M.: "**SIMULACAO DO COMPORTAMENTO DE FLUENCIA DO PAINEL D1 E CAMARA EXPERIMENTAL C1D1, DIMENSIONAMENTO DO PAINEL DE LAVRA PARA CAMADA INFERIOR DE SILVINITA DA MINA DE POTASSIO DE TAQUARI VASSOURAS SERGIPE**", relatórios - RT-CVRD-02-95 e RT-CVRD-04-95. Relatórios emitidos pelo consultor à CVRD em março e junho de 1995b.
- COSTA, A. M.; D'ELIA, P. D.; MOREIRA, L. F. R.; COELHO, L. C.: "**Estudo de Mecânica da Rochas e Dimensionamento dos Painéis de Lavra da Camada Inferior de Silvinita**", relatório RE-013/90, CENPES/SUPEN/DIPREX/SEDEM, fevereiro de 1990.

COSTA, A.M.- “**Análise do Comportamento Estrutural de Cavernas Subterrâneas em flauta**”, RT-SIG-001/88, 1988”.

COSTA, A.M. “**Avaliação do comportamento do painel de lavra experimental D1 e câmara experimental C1D1**”. Relatório técnico emitido pelo consultor à CVRD, RT-CVRD04/97, 6 de dezembro de 1997.

COSTA, A.M., AMARAL, C.S. AND CERQUEIRA, R.M. **Aproveitamento Estratégico de Espaço Subterrâneo - Armazenamento de Gás Natural na Bacia Evaporítica de Sergipe**, Relatório Interno Petrobras. 2011.

COSTA, A.M., AMARAL, C.S., POIATE, E., ROEHL, D. AND GATTASS, M. **Underground Storage of Natural Gas and CO₂ in Salt Caverns in Deep and Ultra-deep Water Offshore Brazil**. Beijing: 12th International Congress on Rock Mechanics – ISRM - Harmonizing Rock Engineering and the Environment. 2012.

COSTA, A. M., MELO, P. R. C. *Stress Analysis and Sizing of Caverns by Dissolution of Halite of the Evaporitic Basin at the State of Alagoas in Brazil*, SMRI FALL MEETING, Houston, Texas. Outubro 1992.

COSTA, A.M., MOREIRA, L.F.R.- “**Avaliação dos Resultados dos Ensaios Laboratoriais de Mecânica das Rochas Realizados sobre Amostras Coletadas no Poço 23 na Área da Salgema em Maceió-AL**”, RT-SIG-002/89, 1989.

COSTA, A.M.; POIATE, JR. E.; AMARAL, C.S.; GONÇALVES, C.J.C.; FALCÃO, J.L.; PEREIRA, A. **Geomechanics applied to the well design through salt layers in Brazil: A history of success**. ARMA 10-239. 2010.

CRUZ, E. R. DA. **Modelagem Numérica de Escavações Subterrâneas em Evaporitos da Sub-bacia de Taquarí-Vassouras**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2003.

- D'ELIA, P. C. **Análise e retroanálise do comportamento de fluência em escavações subterrâneas pelo método dos elementos finitos**. Dissertação de Mestrado. 12, 170 p. 29,7 cm. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro 1991.
- FAIRHURST, C. : **Computer Design of Extraction Patterns for the Mining of Sergipe Evaporites**. november 1976.
- FAIRHURST, C. : **Draft Report-Possibilities for Mining of Lower Sylvinite**, a-In Proximity of Tachyhidrite b-After Mining of Upper Sylvinite, november 1978d.
- FAIRHURST, C. : **Progress of Rock Mechanics Investigations of Sergipe Evaporites**, april 1978a.
- FAIRHURST, C. : **Recent Developments in Rock Mechanics Analysis of Potash Mining in Taquari-Vassouras**, Sergipe, april 1979.
- FAIRHURST, C. : **Rock Mechanics Program, Taquari -Vassouras Mine**, Sergipe, Brazil, april 1986b.
- FAIRHURST, C. : **Sergipe Evaporite Creep Tests at IPT, Sao Paulo-Progress, Mining Implications and Recommendations**, December 1978b
- FAIRHURST, C. **Comments on the Rock Mechanics Investigations at Potash Mine in Brazil**, october 1984.
- FAIRHURST, C. **Derivation of Empirical Creep Laws from IPT Creep Data on Sergipe Evaporite**, november 1978c.
- FAIRHURST, C. **Rock Mechanics Studies of Evaporite Mining- Taquari-Vassouras**, Sergipe, march 1980.
- FAIRHURST, C.: **Creep Tests on Selected Samples of Halite and Sylvinite from Taquari-Vassouras Potash Mine**, Sergipe, Brazil, April 1986a.

- FAIRHURST, C.: **Impressions and Recomendations Concerning Preliminary Investigations of the Mining of Sergipe Evaporites**, june 1977.
- FAIRHURST, C.: **Required Thickness of Protective Sylvinite Layer in Lower Sylvinite, Taquari-Vassouras**, Preliminary Report, dec 1987.
- FILHO, V. M. COSTA, A.M. -"A Técnica de Sísmica de transmissão Direta na Obtenção de Parâmetros Elásticos de Maciços Rochosos com Aplicação em Projetos de Escavações Subterrâneas", Segundo Simpósio sobre Escavações Subterrâneas, RJ, Novembro 1985.
- FILHO, V.M. - **Determinação de Velocidades de Propagação de Onda Compressional e Cisalhante na Mina de Potássio de Sergipe**, Relatórios Técnicos IPT 21752(1985) e 21304(1984). 1985.
- FONSECA, J. C. **Evaporitos de Sergipe**. In Congresso Brasileiro de Geologia, 27., 1973, Aracaju. Coletânea de trabalhos apresentados no.São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. 2v. v.2, p 185-226. 1973.
- FONTES, S. L. **PLANEJAMENTO DA LAVRA DOS PILARES DO PAINEL E5D E DESENVOLVIMENTO DE LAY-OUTS ALTERNATIVOS PARA OS PAINÉIS DE LAVRA DA MINA SUBTERRÂNEA DE POTÁSSIO DE TAQUARÍ-VASSOURAS**. Escola Politécnica da USP - Programa de Educação Continuada em Engenharia - MBA-CVRD. 2003.
- FONTES, S.L., PINTO, C.L.L. **Planejamento da Lavra dos Pilares do Painel E5D da Mina Subterrânea de Potássio de Taquarí-Vassouras – (CVRD)**. 2004.
- GATEWAY STORAGE COMPANY LIMITED. **Gateway Gas Storage Project, Offshore Enviromental Statement Addendum**, Revision 01, dezembro 2010.
- GORAIEB, C. L.; IYOMASA, W. S.; APPI, C. J. **Estocagem subterrânea de gás natural: tecnologia para suporte ao crescimento do setor de gás natural no Brasil**. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2005.

GUIMARÃES, L. J. N. **Análisis multi-componente no isoterma en medio poroso deformable no saturado**. Phd Thesis, Geotechnical Engineering Department, Technical University of Catalunya, Spain. 2002.

GUIMARÃES, L. J. N., GENS, A., OLIVELLA, S. **Coupledthermo-hydro-mechanical and chemical analysis of expansive clay subjected to heating and hydration**. *Transport in Porous Media*, 66:341–372. 2007.

HANSEN, F. D. AND LEIGH, C. D. **Salt Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste**. Prepared by Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550. 2011.

HEUSERMANN, S., ROLFS, O., SCHMIDT, U. **Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model**. In: *Computers and Structures* 81, pp. 629-638. 2003.

HUSTRULID, W.; BULLOCK, R.L. **Underground Mining Methods Handbook**, Colorado 2001.

IfG . **Rock Mechanical Investigations for Planing and Dimensioning of Solution Mining Caverns Taquari-Vassouras**, Relatório Técnico. Institut Für Gebirgsmechanik – IfG, Alemanha. 2007.

KARIMI-JAFARI, M. **SUR LE COMPORTEMENT TRANSITORE DES CAVITÉS SALINES PROFONDES**. Dissertação de Doutorado. École Polytechnique. 2007.

LAU, L. I. H., **Performance of Pillars in Rock Salt Mines**. Dissertação de mestrado. University of Waterloo. Waterloo, Ontário, Canadá, 2010.

LEMAITRE, J. **A three dimensional ductile damage model applied to deep-drawing forming limits**. *ICM 4 Stockholm*, 2:1047–1053, 1983.

LÓPEZ, C. M., CAROL, I., AND AGUADO, A. **Meso-structural study of concrete fracture using interface elements. I: numerical model and tensile behavior.** *Materials and Structures*, 41:583–599. 2007a.

LÓPEZ, C. M., CAROL, I., AND AGUADO, A. **Meso-structural study of concrete fracture using interface elements. II: compression, biaxial and brazilian test.** *Materials and Structures*, 41:601–620. 2007b.

LUX, K., H., HEUSERMANN, S. **Creep Tests on Rock Salt with Changing Load as a Basis for the Verification of theoretical Material Laws.** In: *Proceedings of 6th Symposium on Salt*, Toronto, vol. 1, pp. 417- 435. 1983.

MAEDO, M. A. **Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando técnica de fragmentação da malha.** Tese (Qualificação) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil, 2015.

MANZOLI, O. L., GAMINO, A. L., RODRIGUES, E. A., AND CLARO, G. K. S. **Modeling of interfaces in two-dimensional problems using solid finite elements with high aspect ratio.** *Computers & Structures*, 94-95:70–82. 2012.

MEDEIROS, F., A., S. **Análise do Comportamento de Colunas de Revestimento Frente à Movimentação do Sal em Poços de Petróleo.** Dissertação de Mestrado, PUC-Rio. 1999.

MILANI, E. J., RANGEL, H. D., BUENO, G. V., STICA, J. M., WINTER, W. R., CAIXETA, J. M., NETO, O. DA C., P. **Bacias sedimentares brasileiras – Cartas estratigráficas.** *B. Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 183-205, maio/Nov. 2007.

MOGHADAM, S. N. MIRZABOZORG, H. AND NOORZAD , A. **“Modeling time-dependent behavior of gas caverns in rock salt considering creep, dilatancy and failure”**, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 33, pp. 171–185. 2013.

MOHRIAK, W., SZATMAN, P., ANJOS, S. M. C. **Sal: Geologia e Tectônica (Exemplos nas Bacias Brasileiras).** (1^oEd).Beca Edições Ltda. Petrobrás, São Paulo. 2008.

MORRISON, D. **Tecnologia de Pasta de Rejeito para Disposição de Rejeito em Subsolo e em Superfície**. I Congresso Brasileiro de Lavra Subterrânea – Belo Horizonte – MG. Golder Associates Brasil, 2000.

MRAZ, D. Z. AND GENZWILL, D. **Evaluation of Subsidence over a Deep Saskatchewan Potash Mine**”, *2nd Workshop on Surface Subsidence Due to Underground Mining*, June, Morgantown, West Virginia. 1986.

MUNSON, D. E.; DEVRIES, K. L.: **Development and Validation of a Predictive Technology for Creep Closure of Underground Rooms in Salt**”, *Seventh International Congress on Rock Mechanics*, vol 1, pp127-134, Aachen/Deutschland, 1991.

MUNSON, D. E.; T. M. TORRES; BLANKENSHIP, D. A.: **“Early results from the thermal / structural response in situ test series at the WIPP”**, chapter 133, *Rock Mechanics: Key to Energy Production*, US Rock Mechanics Symposium. The 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 23-25 June, Tuscaloosa, Alabama. 1986.

MUNSON, D.E. ***Constitutive Model of Creep in Polycrystalline Halite Based on Workhardening and Recovery***. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. 1993.

MUNSON, D.E. ***Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure***. *Int. J. Rock Mech. Sci.* Vol34, N°2, pp. 233-247. 1997.

OLIVELLA, S., CARRERA, J., ALONSO, E. **Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media**. *Transport in Porous Media*, 15:271–293. 1994.

OLIVER J, HUESPE AE, SAMANIEGO E, CHAVES EV OLIVER, J., HUESPE, A.E., SAMANIEGO, E., CHAVES, E.V.W W. **Continuum approach to the numerical simulation of material failure in concrete**. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*; 28(7–8):609–632. 2004.

OLIVER, J., HUESPE, A.E., SAMANIEGO, E., CHAVES, E.V.W. **On strategies for tracking strong discontinuities in computational failure mechanics**. In *Proceedings of the*

Fifth World Congress on Computational Mechanics (WCCM V), Vienna, Austria, Mang HA, Rammersdorfer FG, Erberhardsteiner J (eds). 2002.

OLLER, S. *Fractura mecânica. Un enfoque global*. Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia, Barcelona, Espanha, 2001.

PINTO, C. L. L. *Longwall Mining in Boulby Potash Mine: A Numerical Study*. Tese de doutoramento, Colorado School of Mines, Estados Unidos da América, 1995.

POIATE JR, E. **Mecânica das rochas e mecânica computacional para projetos de poços de petróleo em zonas de sal**. Tese de doutoramento. PUC-Rio. 2012.

PONTES, A.M., COSTA, A.M. AND RESENDE, J. **Sistema de Armazenamento e Tratamento dos Dados de Instrumentação da Mina de Taquari-Vassouras, 2º Simpósio sobre Escavações Subterrâneas**, RJ, 08 de novembro de 1985.

ROTHENBURG, L., CARVALHO, A. L. P. & DUSSEAULT, M. B. *Performance of a mining panel over tachyhydrite in Taquari-Vassouras potash mine*. Proceedings of the 6th Conference on the Mechanical Behavior of Salt 'SALTMECH6' - The Mechanical Behavior of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt, 2007.

ROTHENBURG, L. ;MRAZ, D. *Evaluation of Taquari-Vassouras Mine-Interim Report*, february 20, 1995.

RUITER, P. A. C. *The Gabon and Congo Basins Salt deposits*. Economic Geology, 74, pp. 419-431. 1979.

SÁNCHEZ, M., MANZOLI, O. L., GUIMARÃES, L. J. N.. **Modeling 3-d desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique**. Computers and Geotechnics, 62:27–39, 2014.

SANTOS. A. R.: **"Ensaio de mecânica das rochas em amostras provenientes de furo de sondagem da região do poço nº 23 na área da Salgema, em Maceió- AL"**, relatório 27535, agosto 1989.

SEIXAS, M. G. **Modelagem hidro-mecânica do fraturamento hidráulico de rochas via elementos finitos com elementos especiais de interface**. Tese de doutoramento, Universidade Federal de Pernambuco. 2015.

SERATA, S., SCHULTZ, W. G. **Stress control methods help to optimize underground mining design**. *Mining Engineering*, março, 1989.

SILVA, A. C. **Curso de Mineração por Solução**. RPCS – Mineração. Setembro/2001.

SILVA, I.J.M. da. **Implementação via algoritmo implícito de modelos de fluência de rochas salinas em programa de elementos finitos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 148 p. 2010.

SOUBROUILLARD, G. AND LOURDEL, Y. *L'ingénierie Minière integer: exemple du project Potasse Sergipe au Brésil: Industries Minérale*, Les techniques, 3-84, 246-255. 1984.

STAUDTMEISTER, K., ROKAHR, R. B. **Rock Mechanical Design of Storage Caverns for Natural Gas in Rock Salt Mass**. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 34: 3-4, paper n°300. 1997.

SZATMARI, P. CARVALHO, R. S.; SIMÕES, I. A.; TIBANA, P.; LEITE, D. C. **Evaporitos de Sergipe: Geologia e geoquímica**. Aracaju: PATROBRAS. SEM-BA. SEPES. v. 1. p. 1-160. Relatório interno. 1974a.

SZATMARI, P. CARVALHO, R. S.; SIMÕES, I. A.; TIBANA, P.; LEITE, D. C. **Facies Evaporíticas, Fotografias: Interpretação Ambiental**. In: SZATMARI, P. CARVALHO, R. S.; SIMÕES, I. A.; TIBANA, P.; LEITE, D. C. **Evaporitos de Sergipe**. Aracaju: PATROBRAS. RPNE, 4v, v. 3. Relatório interno. 1974b.

SZATMARI, P. CARVALHO, R. S.; SIMÕES, I. A.; TIBANA, P.; LEITE, D. C. **Mapas e Seções Geológicas**. In: SZATMARI, P. CARVALHO, R. S.; SIMÕES, I. A.; TIBANA, P.;

LEITE, D. C. **Evaporitos de Sergipe**. Aracaju: PATROBRAS. RPNE, 4v, v. 4. Relatório interno. 1974c.

TERRATRACE TECHNOLOGIES. *Rock Mechanics Design of Solution Mining of the Miranda Carnalite*. Relatório Técnico, Canadá. 2004.

VALE. **Confira nosso Relatório de Produção 4T14: forte desempenho operacional com recordes de produção em 2014**. Rio de Janeiro, 19 de Janeiro de 2015b. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/production-report-4q14.aspx>>. Acesso em: 04/07/2015.

VALE. **Uso dos fertilizantes**. 2015a. Disponível em: (<http://www.vale.com/PT/business/mining/fertilizers/Paginas/default.aspx>)>. Acesso em: 04/07/2015

VAN SAMBEEK L.L. *The IMC K2 Mine Flooding*. SMRI Fall Meeting, LaFayette, LA. 1993.

VASSALO, P. M. C.; ROEHL, D.; COSTA, A.M; AMARAL, C.S.; POIATE, E. *Underground Salt Caverns opened by solution mining for brine production and storage of natural gás*. Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure, SBMR – ISRM Specialized Conference 09-13 September, Goiania, Brazil. 2014.

VASSALO, P.M.C. **Uso Estratégico de Espaço Subterrâneo para Estocagem de Gás em Cavernas Abertas por Dissolução de Rocha Salina**, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ. 2013.