

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO BIDIMENSIONAL DE CAVERNAS EM ROCHAS SALINAS
PARA ARMAZENAMENTO DE GÁS**

YINETH JOHANA PABÓN RUIZ

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD
CO-ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM-251/2015
BRASÍLIA/DF: MARÇO/2015**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO BIDIMENSIONAL DE CAVERNAS EM ROCHAS SALINAS
PARA ARMAZENAMENTO DE GÁS

YINETH JOHANA PABÓN RUIZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

PROF. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)

PROF. MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(CO-ORIENTADOR)

PROF. HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF. LÍCIA MOUTA DA COSTA, DSc (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 13 DE MARÇO DE 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

PABON RUIZ, JOHANA

Estudo Bidimensional de Cavernas em Rochas Salinas Para Armazenamento de Gás

[Distrito Federal] 2015

xix,108 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2015).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Modelagem Numérica

2. Armazenamento de Gás

3. Rochas Evaporíticas

4. Lei Potencial de Fluência

I. ENC/FT/UnB

II. Mestre

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PABON RUIZ, J. (2015). Estudo Bidimensional de Cavernas em Rochas Salinas Para Armazenamento de Gás. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-251/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: YINETH JOHANA PABÓN RUIZ

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo Bidimensional de Cavernas em Rochas Salinas Para Armazenamento de Gás.

Mestre / 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

JOHANA PABÓN RUIZ

E-mail: johanapabonr@gmail.com

A mi querida Abuelita Irma,

Por ser esa persona que me incentiva a ser mejor y se enorgullece con cada uno de mis logros.

A mí amado novio Ludin,

Por el apoyo, confianza y amor demostrado durante todos estos años juntos.

A mis tías Patty, Betty, Nana y a mi tío Carlos,

Por hacer parte esencial en mi educación.

A mi padre Olier, por su amor y apoyo incondicional.

Por ustedes soy lo que soy... Los Amo!

AGRADECIMIENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e a família que ele tem me dado. Seguido agradeço a toda minha família por sempre confiar em mi, são a base fundamental de todas minhas conquistas.

Agradeço ao Professor Hernán Martínez por falar em uma de suas aulas na Universidade Nacional de Colômbia do programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, que fez abrir minha mente e pensar na possibilidade do mestrado aqui. Também gostaria de agradecer pela amizade oferecida nestes dois anos; o que fez dele não só um excelente professor, se não também um bom amigo.

Gostaria agradecer ao Professor André Assis por me induzir neste tema de pesquisa, um tema que me tem maravilhada. Obrigada de coração pela confiança em meus conhecimentos neste ano de trabalho.

Agradeço ao Professor Manoel por sua ajuda no processo de escolha de orientador, por os momentos de café e bons conselhos.

Devo também um sincero agradecimento a todos e cada um dos professores da Geotecnia por transmitir seus conhecimentos de forma clara e com amor, o que fez deste um excelente programa de pós-graduação.

Agradeço as pessoas que conheci nesta bela experiência e que ficaram para sempre em meu coração. À Caro e à Eli por aguentar minhas manias em casa e serem as melhores amigas que conheci aqui, fizeram de nossa casa um verdadeiro lar. Ao Felipe, Julian e Eduardo por sua amizade e bons momentos. A meus colegas de aulas: Maria Paula, Tania, Estefanía, Alex, Francisco, Gabi, Yuri, Danilo, Andressa, Erich, etc. Agradeço também aquelas pessoas do programa que sempre me apoiarem e trouxeram um sorriso para mim, são muito, mas quero que todos estejam presentes. E finalmente aquelas pessoas que me acolherem em minha chegada à Carolina Ruiz, Maria Paz, Claudia, Marcelo, Eweton e o Robinson.

Por último, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

RESUMO

ESTUDO BIDIMENSIONAL DE CAVERNAS EM ROCHAS SALINAS PARA ARMAZENAMENTO DE GÁS

O armazenamento subterrâneo de gás e petróleo têm dois grandes propósitos: o primeiro deles pretende garantir a produção de petróleo de maneira constante e o segundo satisfazer uma relação ótima entre a produção e a demanda, o que é uma forma importante de regular as flutuações de preços. No Brasil, segundo Costa (2013), o papel da atividade de exploração e produção de gás natural até a década de 90 era muito mais de complementar e auxiliar a produção de petróleo do que de suprir o mercado de gás, mas no momento o setor está passando por mudanças significativas. Ao longo das últimas duas décadas, o consumo e a produção de gás natural cresceram e as reservas provadas aumentaram significativamente. Estudos recentes sugerem que as reservas brasileiras conhecidas irão aumentar ainda mais acentuadamente no futuro. Considerando essas variações de consumo, produção, infraestrutura e as reservas, é pertinente questionar a importância do armazenamento de gás no Brasil, pois atualmente, o gás é produzido e diretamente enviado pela rede de gasodutos para as unidades de tratamento de gás para ser especificado e posteriormente distribuído. A partir da necessidade exposta anteriormente e a espessura e continuidade da camada de sal que compõe as reservas de petróleo do pré-sal, estuda-se o comportamento de fluência da rocha salina composta principalmente por halita como local de construção de cavernas abertas por dissolução no mar aberto, para armazenamento de gás. Este estudo baseou-se na simulação no software de elementos finitos *Abaqus* da convergência de uma caverna de um diâmetro de 60 m e altura de 150 m construída a 3.500 m de profundidade em mar aberto, para um tempo de operação de 30 anos, sob condições diferentes de temperatura do maciço hospedeiro e pressão interna; através da lei potencial de fluência. Estas simulações permitiram encontrar uma combinação de temperatura e pressão interna mínima ótima para redução no volume ao final de tempo de operação próximo a 20%. Além do anterior os resultados mostram que a influência da temperatura na redução do volume da caverna é do tipo linear e as variações de pressão no interior permite concluir um comportamento parabólico de quarta ordem difícil de ajustar a uma só equação matemática.

ABSTRACT

BIDIMENSIONAL STUDY OF CAVERNS IN SALT ROCKS FOR GAS STORAGE

Underground oil and gas storage have two purposes: the first one aims to ensure constant oil production and the second one, consist in satisfy an optimum relationship between production and demand, which is an important form to regulate price fluctuations. In Brazil, according to Costa (2013), the role for exploration activity and natural gas production until the 90s was more of a complementary and auxiliary activity for oil production than for supplying the gas market, but nowadays this sector is going through significant changes. Over the past two decades, the consumption and production of natural gas grew, and proved reserves increase significantly. Recent studies suggest that the known Brazilian reserves will increase even more pronounced in the future. Given these changes in consumption, production, infrastructure and reserves it is questionable the importance of gas storage in Brazil, since the gas is produced and sent directly by the pipeline network for gas treatment units to be specified and subsequently distributed. From the need exposed above and the thickness and continuity of the salt layer that composes the oil reserves in the pre-salt, it is studied creep behavior in salt rocks consisting mainly of halite in locations where caverns construction are held by dissolving method, at open sea for gas storage. This study was based on a cavern convergence simulation in the finite element software *Abaqus*. Cavern dimensions were set up to be of 60 m diameter, and 150 m height at 3.500 m deep at open sea, with an operating time of 30 years, under different conditions of temperature and internal pressure; by potential creep law. Such simulations allowed us to find a good combination of temperature and a minimum optimum internal pressure to decrease volume at the end of the operating time to approximately 20%. In addition to this, results showed that temperature influence in the cavern volume reduction is of linear type and it can be concluded that pressure variations inside the cavern have a fourth order parabolic behavior difficult to adjust to a mathematical equation.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
1.1- CONTEXTO DO PROBLEMA	1
1.2- OBJETIVOS	4
1.3- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1- ARMAZENAMENTO SUBTERRÂNEO DE GÁS NATURAL.....	6
2.2- TIPO DE ESTOCAGEM SUBTERRÂNEA DE GÁS	8
2.3- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS DAS ROCHAS EVAPORÍTICAS.....	12
2.4- CONSTRUÇÃO DE CAVERNAS em DEPÓSITOS EVAPORÍTICOS “ <i>offshore</i> ”	15
2.5- COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA DOS EVAPORITOS.....	19
2.6- MODELOS CONSTITUTIVOS DE FLUÊNCIA	22
2.6.1- MODELOS EMPÍRICOS	22
2.6.2- MODELOS REOLÓGICOS	25
2.6.3- MODELOS BASEADOS EM LEIS FÍSICAS	34
2.7- FLUÊNCIA SOB TENSÃO VARIÁVEL COM O TEMPO.....	38
2.8- EXPANSÃO DAS FORMULAÇÕES UNIAXIAL PARA MULTIAXIAL.....	41
2.9- EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DE FLUÊNCIA NO ABAQUS	43
2.9.1- LEI POTENCIAL - <i>POWER LAW MODEL</i>	44
2.9.2- LEI SENO-HIPERBÓLICA - <i>HYPERBOLIC-SINE LAW MODEL</i>	45
3- VALIDAÇÃO DO USO DO PROGRAMA ABAQUS	47
3.1- FORMULAÇÃO ELÁSTICA	47
3.1.1- SOLUÇÃO CLÁSSICA DE KIRSCH.....	48
3.1.2- DESCRIÇÃO DO MODELO E A MALHA UTILIZADA.....	49

3.1.3-	PASSOS DE ANÁLISES E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	50
3.2-	FORMULAÇÃO DE FLUÊNCIA	53
3.2.1-	AJUSTES PARAMÉTRICOS PARA A EQUAÇÃO POTENCIAL MAIS REPRESENTATIVA ENTRE A LITERATURA PESQUISADA	53
3.2.2-	COMPARAÇÃO DAS EQUAÇÕES ENCONTRADAS COM DADOS DE ENSAIO TRIAXIAIS DE FLUÊNCIA	58
3.2.3-	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE	61
3.2.4-	VALIDAÇÃO DO SOFTWARE POR MEIO DA REPRODUÇÃO DOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA	62
4-	MODELAGEM DE CONVERGÊNCIA DE CAVERNAS EM ROCHAS EVAPORÍTICAS	68
4.1-	ESTUDO DE CASO	68
4.1.1-	LOCALIZAÇÃO	68
4.1.2-	ESTADO DE TENSÕES IN SITU EM CORPOS SALINOS.....	70
4.2-	CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES	73
4.2.1-	DADOS DA MALHA.....	73
4.2.2-	VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	79
4.2.3-	VARIAÇÕES DA PRESSÃO INTERNA	89
4.2.4-	ANALISES NA TEMPERATURA E PRESSÃO INTERNA IDEAL.....	96
5-	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Projeções até o ano 2020 do aumento no consumo de energia para diferentes fontes (Modificado de Bary et al. 2002).	1
Figura 1-2 Reservas mundiais (a) gás e (b) petróleo.....	2
Figura 2-1 Distribuição por numero de sítios de armazenagem subterrânea dos principais países. (Modificado de Confort & Mothe 2014).	7
Figura 2-2 Principais locais de armazenamento subterrâneo de gás (Modificado de FERC, 2004).....	9
Figura 2-3 Distribuição mundial de armazenagem subterrânea de gás por tipo. (Modificado de Giouse 2012).	10
Figura 2-4 Evolução histórica do armazenamento de gás de trabalho dos EUA em cavernas de sal e não sal. (Modificado de CODIGAZ 2013).	11
Figura 2-5 Comparação de resistência à compressão simples obtida para três diferentes tipos de rochas evaporíticas e sua comparação com o obtido em corpo de prova de concreto armado. (Costa, 2013)	14
Figura 2-6 Depósitos de sal “ <i>offshore</i> ” (Farmer & Miller, 1996).....	15
Figura 2-7 Camada de sal que compõe os reservatórios do pré-sal. (Modificado de Coppe/UFRJ 2014).....	15
Figura 2-8 Processos de abertura de caverna em rochas salinas (a) Circulação Reversa (b) Circulação Direta. (Modificado de Warren 2006).	17
Figura 2-9 Processo construtivo de uma caverna em depósitos evaporíticos <i>offshore</i> por um único poço. (Costa, 2013).	18
Figura 2-10 configuração final das cavernas para os processos construtivos (a) somente um poço para injeção e retirada da salmoura (b) dois poços, um de injeção e outro de retirada da salmoura (Costa et al., 2012).....	18
Figura 2-11 Deformação típica no tempo em três estágios de fluência: Primária (desaceleração da deformação), estacionária ou secundária (taxa constante) e terciária (aceleração e ruptura). (Costa & Poiate, 2008).	20
Figura 2-12 Curvas de fluência para diferentes níveis de (a) Tensão e (b) Temperatura. (Costa, 1984).....	22
Figura 2-13 Modelos reológicos básicos (a) Modelo mola (Hooke) (b) Modelo amortecedor (Newton) (c) Modelo deslizante (Saint-Venant). (Cavalcante, 2012).	26

Figura 2-14 Modelo de Maxwell (a) Representação gráfica (b) Gráficos de tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) (c) Gráfico de deformação-tempo ($\varepsilon - t$). (Modificado de Cavalcante 2012).....	28
Figura 2-15 Modelo de Kelvin (a) Representação gráfica (b) Gráficos de tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) (c) Gráfico de deformação-tempo ($\varepsilon - t$). (Modificado de Cavalcante 2012).....	29
Figura 2-16 Modelo Generalizado de Kelvin (a) Elementos sólidos (b) Elemento fluido. (Modificado de Cavalcante 2012).....	31
Figura 2-17 Modelo de Burgers. (Cavalcante, 2012).....	32
Figura 2-18 Representação do comportamento de fluência por meio do modelo de Burgers. (Modificado de Gravina 1997).....	33
Figura 2-19 Modelo reológico utilizado para representar o comportamento geral de fluência em rochas evaporíticas (a) Associação de elementos para formação do modelo (b) Gráfico de comportamento deformação-tempo ($\varepsilon - t$). (Modificado de Cavalcante 2012).	34
Figura 2-20 Curvas de fluência para um corpo de prova submetido a dois níveis de tensões σ_1 e σ_2 . (Gravina, 1997).....	38
Figura 2-21 Tensões aplicadas num corpo de prova para diferentes intervalos de tempo. (Gravina, 1997).	38
Figura 2-22 Evolução das deformações por fluência segundo os métodos de integração Time Hardening e Strain Hardening para um corpo de prova submetido às tensões σ_1 e σ_2 . (Oliveira, 2004).....	41
Figura 3-1 Modelo plano de deformação	49
Figura 3-2 Malha de elementos finitos utilizada (a) malha completa (b) <i>zoom</i> na zona da perfuração.....	50
Figura 3-3 Tensões tangenciais e radiais a 3.500m de profundidade.....	51
Figura 3-4 Erro relativo ao comparar os resultados para as tensões radiais e tangencias, obtidos com a solução clássica de Kirsch e o <i>Abaqus</i>	51
Figura 3-5 Deslocamentos tangenciais e radiais a 3500m	52
Figura 3-6 Erro relativo ao comparar os resultados para os deslocamentos radiais, obtidos com a solução clássica de Kirsch e o <i>Abaqus</i>	52
Figura 3-7 Deformação dos pilares na área experimental do projeto Salt Vault sob várias combinações de tensão e temperatura. (Modificado de Starfield & McClain 1973).	54
Figura 3-8 comparação entre as equações numéricas encontradas por Starfield & McClain (1973), Hansen & Mellegard (1977) e Costa (1984) e o ensaio de fluência feito por Cella (2003) numa amostra de halita.	60

Figura 3-9 Comparação para o ensaio de fluência com tensão desviatória de 14 MPa em regime transiente e os parâmetros obtidos por meio da regressão múltipla.....	62
Figura 3-10 Esquemática do ensaio de fluência. (Cavalcante, 2012).....	64
Figura 3-11 Modelo axissimétrico.	64
Figura 3-12 malha de elementos finitos utilizada na reprodução do ensaio de fluência.....	65
Figura 3-13 Curva de deformação equivalente por fluência apresentada pelo software <i>Abaqus</i> para o corpo de prova submetido a uma tensão desviadora de 14 MPa.....	66
Figura 3-14 Comparação entre os dados encontrados por meio do software <i>Abaqus</i> e os calculados utilizando a equação proposta através do ajuste paramétrico para as deformações equivalente por fluência na reprodução do ensaio de tensão desviadora de 14 MPa.....	67
Figura 4-1 Província dos reservatórios do pré –sal, polo central de produção da Bacia de Santos e Campo de Lula. (Mohriak et al., 2008).....	69
Figura 4-2 Mapa de isopacas de halita a 10 km noroeste do poço descobridor. (Costa, 2013).....	69
Figura 4-3 Estratigrafia do domo salino no local de estudo. (Costa et al., 2012).....	70
Figura 4-4 Corpo de sal de geometria irregular perfil 1 e perfil 2. Modificado de Luo et al. (2011).....	71
Figura 4-5 Tensões no corpo de sal para o perfil 1. (Luo et al., 2011).....	72
Figura 4-6 Tensões no corpo de sal para o perfil 2. (Luo et al., 2011).....	72
Figura 4-7 Malha de elementos finitos número 1. (a) Vista geral de toda a malha (b) <i>zoom</i> na zona da escavação da caverna (os pontos cinza correspondem aos nós do elemento).....	74
Figura 4-8 Malha de elementos finitos número 2. (a) Vista geral de toda a malha (b) <i>zoom</i> na zona da escavação da caverna (os pontos cinza correspondem aos nós do elemento).....	75
Figura 4-9 Malha de elementos finitos número 3. (a) Vista geral de toda a malha (b) <i>zoom</i> na zona da escavação da caverna (os pontos cinza correspondem aos nós do elemento).....	76
Figura 4-10 Variações do deslocamento vertical do nó 34 com o tempo para as malhas estudadas.....	79
Figura 4-11 Vista geral na zona de influência das deformações por fluência na caverna. Temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos.....	81
Figura 4-12 <i>Zoom</i> no nó de maior deformação por fluência para as condições de temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos.....	82
Figura 4-13 Vista geral na zona de influência da magnitude dos deslocamentos da caverna para a condição de temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos.....	82

Figura 4-14 Magnitude dos deslocamentos da caverna. Temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos (a) <i>Zoom</i> no nó de maior deslocamento no teto (b) <i>Zoom</i> no nó de maior deslocamento no piso.	83
Figura 4-15 <i>Zoom</i> no nó de maior deslocamento na parede para as condições de temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos.	84
Figura 4-16 Deformação equivalente do nó 891 em metros para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.	84
Figura 4-17 Variação das deformações por fluência sofridas num mesmo tempo de análise para as temperaturas de 359 K, 334 K, 311 K e 304 K. (a) Dados em escala real (b) Dados em escala log.	85
Figura 4-18 Variação da tensão de von Mises nó 891 em kPa para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.	86
Figura 4-19 Máximos deslocamentos apresentados na caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K. (a) Máximo deslocamento horizontal sofrido na parede. (b) Máximo deslocamento Vertical sofrido no teto. (a) Máximo deslocamento Vertical sofrido no piso...	87
Figura 4-20 Convergência geral sofrida pela caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.	88
Figura 4-21 Convergência geral sofrida num tempo de operação de 30 anos da caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.	89
Figura 4-22 Localização dos onze nós de estudos na etapa de variação de pressão interna. ...	90
Figura 4-23 Variações da tensão de von Mises em kPa para as diferentes variações da pressão interna.	91
Figura 4-24 Variações da tensão de von Mises em kPa para as diferentes variações da pressão interna em tempos determinados.	91
Figura 4-25 Deformação equivalente ou de fluência em metros para diferentes pressões internas.	92
Figura 4-26 Deformação equivalente ou de fluência em metros para os diferentes tempos de análise.	92
Figura 4-27 Convergência geral da caverna em porcentagem para as diferentes pressões internas.	93
Figura 4-28 Convergência geral da caverna em porcentagem para os diferentes tempos de análises.	94
Figura 4-29 Associação de uma linha de tendência para o comportamento de convergência para diferentes pressões interna em um só tempo de análise. (a) trinta anos (b) um dia.	94

Figura 4-30 Velocidade de convergência geral em porcentagem por ano para as diferentes pressões internas.....	95
Figura 4-31 Deslocamentos na caverna para uma pressão interna de 30% da tensão vertical in situ no topo da caverna. (a) Deslocamento Horizontal. (b) Deslocamento Vertical.....	96
Figura 4-32 Resultados obtidos ao término de 30 anos na simulação de caverna com temperatura de 304 K e 30% da pressão interna na condição não deformada (a) Tensão de von Mises. (b) Deformação por fluência. (c) Deslocamento Vertical (d) Deslocamento Horizontal.....	97
Figura 4-33 Resultados de deslocamentos ao término de 30 anos na simulação de caverna com temperatura de 304 K e 30% da pressão interna na condição deformada (a) Deslocamento Vertical . (b) Deslocamento horizontal	98
Figura 4-34 Convergencia geral da caverna com temperatura de 304°K e pressão interna 30%.	98
Figura 4-35 Curva de deformação por fluência da caverna com temperatura de 304 K e pressão interna 30%.	99
Figura 4-36 Deslocamentos na caverna para uma temperatura de 304 K e pressão interna de 30% da tensão vertical in situ no topo da caverna. (a) Deslocamento Horizontal. (b) Deslocamento Vertical	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Propriedades operacionais dos principais locais de armazenamento subterrâneo de gás. (Modificado de FERC 2004).	9
Tabela 2-2 Minerais mais comuns nos depósitos evaporíticos.	12
Tabela 2-3 Parâmetros elásticos determinados nos evaporitos da mina Taquari-Vassouras. ..	14
Tabela 2-4 Equações básicas necessárias para chegar ao modelo de Maxwell	28
Tabela 2-5 Equações básicas necessárias para chegar ao modelo de Kelvin.....	30
Tabela 3-1 Tensão <i>in situ</i> na profundidade de 3500m	48
Tabela 3-2 Ajuste paramétrico obtido por Costa (1984) para diferentes tipos de rochas evaporíticas.....	57
Tabela 3-3 Ajuste paramétrico feito por diferentes autores para descrever o comportamento de fluência da halita.	59
Tabela 3-4 Coeficientes de determinação encontrados ao comparar as seis curvas de fluência obtidas por Cella (2003) com os valores calculados através das equações da Tabela 3-3 na fase transiente.....	60
Tabela 3-5 Condições geométricas, térmicas e de tensão dos corpos de provas utilizadas na validação numérica.....	63
Tabela 4-1 Tensões iniciais na superfície do modelo	73
Tabela 4-2 Descrição das malhas analisadas.....	74
Tabela 4-3 Parâmetros utilizados nas análises de densidade de malha	77
Tabela 4-4 Deslocamento nos pontos de análises (Magnitude, direção horizontal u_1 e vertical u_2)	77
Tabela 4-5 Erros absolutos entre as medições calculadas para cada uma das malhas	78
Tabela 4-6 Equações de fluência empregada por o software <i>Abaqus</i> na versão <i>time-hardening</i> para diferentes temperaturas.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α, k	Parâmetros equação modelo logarítmico
A	Constante empírica dos modelos de comportamento de fluência
A, n, m	Constantes empíricas do modelo potencial utilizado pelo <i>Abaqus</i>
A_1, n_1	Constantes que definem a equação o mecanismo <i>Dislocation Climb</i>
A_2, n_2	Constantes que definem a equação o mecanismo indefinido
a, b, c, k	Parâmetros equação modelo potencial
a	Raio do poço
b, c, k, λ	Parâmetros equação modelo exponencial
B_1, B_2, q	Constantes que definem a equação o mecanismo <i>Dislocation Glide</i>
$\Delta\sigma$	Incremento de tensão
$d\varepsilon$	Variação da deformação num intervalo de tempo
dt	Intervalo de tempo
ε	Deformação e deformação por fluência
$\dot{\varepsilon}$	Taxa ou velocidade de deformação
$\ddot{\varepsilon}$	Derivada segunda da deformação
ε^{cr}	Deformação por fluência
ε^e	Deformação parcela elástica
ε^p	Deformação parcela plástica
ε^v	Deformação elemento viscoso
ε_K	Deformação segundo o modelo de Kelvin
ε_M	Deformação segundo o modelo de Maxwell
ε_t	Deformação por fluência transiente ou primária
ε_{ss}	Deformação por fluência estacionária ou secundária
ε_x	Deformação em direção X
ε_y	Deformação em direção Y
ε_z	Deformação em direção Z
$\dot{\varepsilon}_0$	Taxa de deformação por fluência de referência

$\dot{\epsilon}_e$	Taxa de deformação por fluência efetiva
$\dot{\epsilon}_{ij}$	Tensor de taxas deformações por fluência
$\dot{\epsilon}^v$	Taxa de deformação do elemento viscoso
E	Módulo de elasticidade
E_1	Módulo de elasticidade elemento 1
E_2	Módulo de elasticidade elemento 2
G	Modulo cisalhante
γ	Peso específico
γ_w	Peso específico da água
H	Função degrau de Heaviside
I_2	Segundo invariante do tensor taxas de deformação
I_{2D}	Segundo invariante do tensor desviador de taxas de deformação
J_2	Segundo invariante do tensor de tensões
J_{2D}	Segundo invariante do tensor desviador de tensões
k	Fator de proporcionalidade
η	Constante viscosa
p_1	Tensão inicial na direção Y
p_2	Tensão inicial na direção X
Q	Energia de ativação
R	Constante universal dos gases
R^2	Coefficiente de determinação
r	Distancia a partir do eixo do poço
σ	Tensão desviatória
$\ddot{\sigma}$	Derivada segunda da tensão
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor
σ_c	Tensão constante
σ_C	Tensão Confinante
σ_e	Tensão efetiva de fluência

σ_H	Tensão horizontal maior
σ_h	Tensão horizontal menor
σ_K	Tensão no modelo de Kelvin
σ_M	Tensão no modelo de Maxwell
σ_{VM}	Tensão de von Mises
σ_0	Tensão desviatória de referência
σ_r	Tensão normal efetiva na direção radial
σ_θ	Tensão normal efetiva na direção tangencial
σ_v	Tensão vertical
σ^e	Tensão no elemento elástico
σ^v	Tensão no elemento viscoso
σ_x	Tensão na direção X
σ_y	Tensão na direção Y
σ_z	Tensão na direção Z
S_{ij}	Tensor de tensões desviatórias
θ	Ângulo medido no sentido anti-horário do plano XY a partir do eixo Y
$\tau_{r\theta}$	Tensão cisalhante no plano $r\theta$
τ_{xy}	Tensão cisalhante no plano XY
τ_{yz}	Tensão cisalhante no plano YZ
τ_{xz}	Tensão cisalhante no plano XZ
T	Temperatura
T_0	Temperatura de referência
t_1	Temperatura 1
t_2	Temperatura 2
u	Deslocamento
u_r	Deslocamento radial
u_θ	Deslocamento tangencial
u_1	Deslocamento em direção X

u_2	Deslocamento em direção Y
u_3	Deslocamento em direção Z
ν	Coefficiente de Poisson
SPR	Strategic Petroleum Reserve
EIA	Energy Information Administration
FERC	Federal Energy Regulatory Commission

1- INTRODUÇÃO

1.1- CONTEXTO DO PROBLEMA

Nos últimos anos, o aumento da demanda energética é refletido pelo acelerado crescimento da população mundial e, ao mesmo tempo, a procura do uso de energias limpas que sejam ambientalmente amigáveis são o desafio para os novos projetos do século XXI. O gás natural, que queima sem gerar resíduos, é o combustível com maiores possibilidades para atender às necessidades complexas da sociedade atual.

A Figura 1-1 representa as projeções até o ano 2020 do aumento no consumo de energia para diferentes fontes. Tem-se registrado um aumento no uso de energias provenientes de petróleo e gás e uma notória diminuição em energias nucleares.

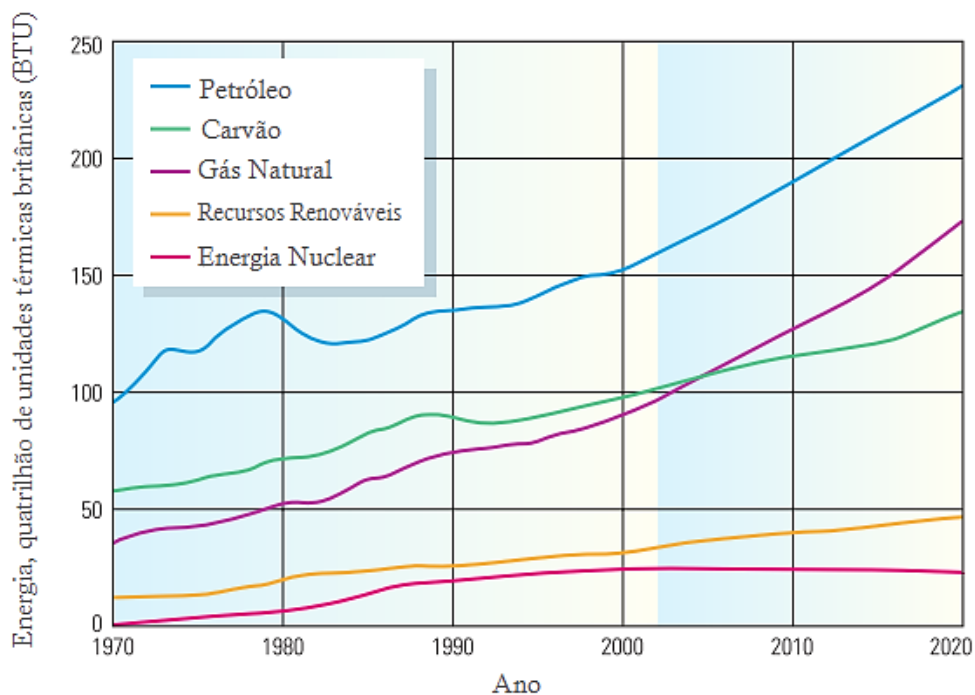


Figura 1-1 Projeções até o ano 2020 do aumento no consumo de energia para diferentes fontes (Modificado de Bary et al. 2002).

Em 2013 as reservas de gás e petróleo ascenderam a 187,3 trilhões de m³ e 1.668,9 bilhões de barris respectivamente (BP, 2013). Figura 1-2 mostra as reservas mundiais de gás e petróleo em porcentagens por região.

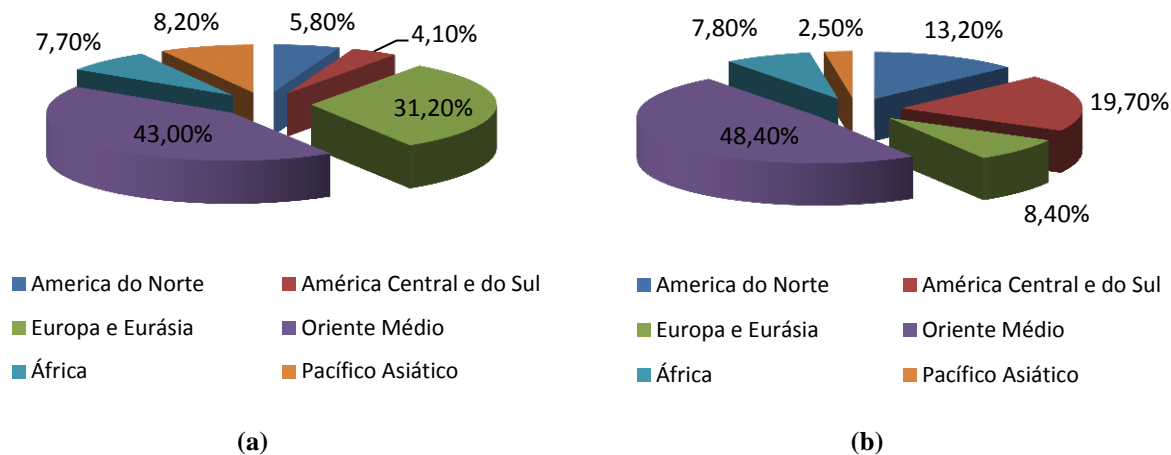


Figura 1-2 Reservas mundiais (a) gás e (b) petróleo.

No trabalho feito por Bary et al. (2002) assegura-se que as reservas na época de gás parecem ser suficientes para atender à demanda energética projetada para o ano 2020 e dado o aumento na atualidade dessas reservas é possível fortalecer a afirmação feita anteriormente. Na Figura 1-2 também é possível ver que as grandes reservas de gás e petróleo estão principalmente no Oriente Médio.

No Brasil, dentre as regiões exploratórias de petróleo em alto mar, destacam-se as Bacias de Campos e de Santos as quais são responsáveis por mais de 80% da produção nacional (Bresolin, 2010). No ano 2007 a Petrobrás confirmou a descoberta de grandes volumes de petróleo de alta qualidade, situados abaixo de uma camada de sal de 2.000 m de espessura, denominada pré-sal, localizada entre os Estados de Santa Catarina e Espírito Santo (Petrobrás, 2014). Estas descobertas colocam o Brasil no cenário entre os países com grandes reservas de petróleo e gás no mundo.

Considerando a grande espessura e continuidade da camada de sal que conformam as reservas do pré-sal, nos últimos anos estudos estratégicos e de viabilidade técnica e econômica estão sendo realizados para a avaliação do uso de cavernas subterrâneas no mar aberto para armazenamento de produtos petrolíferos (Costa et al., 2012). O armazenamento subterrâneo de gás e petróleo têm dois grandes propósitos: o primeiro deles pretende garantir a produção de petróleo de maneira constante e o segundo satisfazer uma relação ótima entre a produção e a demanda, o que é uma forma importante de regular as flutuações de preços.

A associação das rochas salinas com o armazenamento de produtos petrolíferos decorre das características reológicas e estrutura cristalina deste tipo de rochas, que faz com que em

condições de alta pressão e temperatura, desenvolvam o fenômeno de auto-cicatrização, ou seja, fraturas que não estejam preenchidas por argilo-minerais cicatrizam-se retomando, com o tempo, sua excelente qualidade de estanqueidade devido à porosidade desprezível, absorvendo grandes níveis de deformação sem o desenvolvimento de fraturas, o que torna este tipo de rochas perfeito no aprisionamento de hidrocarbonetos. Isto esclarece o fato de que a camada de sal que compõe as novas reservas destina-se a ser usada para a construção de cavernas de armazenamento.

Segundo Cella (2003) as pesquisas mundiais sobre o comportamento termo-mecânico de rochas salinas sempre estiveram direcionadas para a indústria da mineração. A partir da década dos 60, voltaram-se também para a questão do armazenamento de resíduos radioativos e de hidrocarbonetos.

Nas últimas décadas diversos projetos para armazenamento de hidrocarbonetos foram realizados, destes projetos destaca-se o projeto Strategic Petroleum Reserve (SPR), desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano após a crise dos anos 1973-74 no qual estoques estratégicos de petróleo foram armazenados em cavernas abertas por dissolução em rochas salinas localizadas na bacia do Golfo de México, particularmente próximos do litoral dos estados do Texas e da Louisiana; a escolha para estes locais de armazenamento de óleo é conhecida por ser um meio barato e seguro de armazenamento de petróleo, além disso, a localização geográfica permite a proximidade com muitas das refinarias norte-americanas e os pontos de distribuição para petroleiros, barcaças e gasodutos. Segundo U.S. Department of Energy (2014) o programa continha 63 cavernas com capacidade de armazenamento de 727 milhões de barris a ano 2012.

De acordo com Poiate (2012) projetos com o Strategic Petroleum Reserve (SPR) são os principais responsáveis pelos grandes investimentos no estudo de mecânica das rochas evaporíticas, visando compreender melhor o comportamento termo-mecânico dessas rochas, cujos resultados são aproveitados na indústria petrolífera em suas diferentes atividades.

Para o Brasil os estudos realizados por diferentes autores entre os quais é possível destacar Costa (1984) e Cella (2003) em materiais extraídos da Mina de Taquari-Vassouras, no estado de Sergipe, representam um avanço científico no estudo do comportamento de rochas salinas no país; conhecimento aproveitado nos processos de perfuração e produção nos novos campos situados no pré-sal.

Estes conhecimentos também fazem parte essencial dos estudos realizados nesta pesquisa na procura da viabilidade técnica dos projetos de armazenamento estratégico de gás nas zonas de pré-sal. A compreensão do fenômeno físico de fluência sofrido por este tipo de materiais rochosos é um aspecto de influência relevante na etapa de operação e manutenção destes locais de estocagem.

1.2- OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é estudar o comportamento geomecânico de cavernas construídas em rochas salinas para armazenamento de gás durante sua vida útil. Para isto é necessário compreender o comportamento dependente do tempo do sal, pois ele é o responsável pelas deformações por fluência que sofrem estes materiais.

Os objetivos específicos serão divididos em três assuntos essenciais, subdivididos nas seguintes itens.

- Estudar os modelos constitutivos uniaxiais e multiaxiais de fluência usualmente adotados para descrever as deformações por fluência em rochas salinas.
- Adotar um modelo de fluência que se ajuste as condições reais do problema a ser representado.
- Fazer um ajuste paramétrico das variáveis que compõem o modelo de fluência adotado através de regressões múltiplas simples.
- Fazer uma análise paramétrica dos aspectos constitutivos da caverna e do modelo de comportamento por fluência, utilizando uma abordagem bidimensional do problema.
- Fazer uma modelagem computacional mediante a utilização de um software comercial de elementos finitos *Abaqus* de uma caverna construída numa camada evaporítica de mais de 2.000 m de espessura.
- Analisar os valores obtidos de deslocamento no tempo nas modelagens computacionais, com o propósito de determinar o efeito da pressão interna e a temperatura nas taxas de convergência sofridas pela caverna no tempo.

1.3- ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa é o resultado de um ano de investigações e faz parte da iniciativa do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília de ampliar suas linhas de investigação, com a criação de uma linha dedicada ao estudo de gás e petróleo.

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 contém uma introdução ao tema de estudo, no qual se apresenta de maneira sucinta o contexto geral do problema e as motivações para realizar o estudo, seguido pelos objetivos propostos.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica de diferentes tópicos que de uma forma ou outra estiveram envolvidos no desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente estudou-se de maneira geral o contexto de armazenamento subterrâneo de gás no mundo e os tipos de estocagem existentes, as características físicas, químicas e mecânicas das rochas evaporíticas que fazem a estas locais adequados para armazenamento de hidrocarbonetos com uma pequena descrição dos processos construtivos de cavernas em este tipo de materiais. Em seguida estudou-se em profundidade cada um dos temas relacionados ao comportamento de fluência presente neste tipo de materiais e finalmente analisou-se as equações constitutivas de fluência implementadas no software de elementos finitos a ser utilizado (*Abaqus*).

O Capítulo 3 destina-se à validação do uso do software *Abaqus* em sua formulação elástica por meio da simulação da perfuração de um poço de petróleo. E a formulação de fluência através do ajuste paramétrico para equação potencial proposta por Lomenick (1971) e a reprodução de um dos ensaios de fluência feitos por Cella (2003).

No Capítulo 4 são realizadas as modelagens de convergência de uma caverna construída a 3.500 m de profundidade sob um estrato de halita com a utilização de uma análise axissimétrica. No início do capítulo é descrito o estudo de caso e a localização do problema, além da definição do estado de tensões *in situ* no corpo salino. Seguidamente é feita uma análise do tamanho dos elementos que compõem a malha a ser utilizada e uma análise que implica a variações de temperatura do maciço hospedeiro da caverna e as pressões no interior desta. Finalmente é feita uma simulação na condição de convergência encontrada como ótima.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais obtidas com a pesquisa e faz umas breves recomendações sobre pesquisas futuras relacionadas ao tema de comportamento de evaporitos

Finalmente é apresentada a documentação estudada e citada neste trabalho.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma síntese da fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa.

Inicialmente se faz uma introdução ao armazenamento subterrâneo abordando temáticas desde os conhecimentos gerais até chegar a uma descrição do processo construtivo destes locais. Em seguida é tratado o tema dos evaporitos como rochas constrictivas dos locais mais propícios para armazenamento de hidrocarbonetos. Nesta seção é descrito a fundo tanto suas características físicas, químicas e mecânicas como seu comportamento de fluência dando passo ao estudo dos principais modelos presentes na literatura para descrever o comportamento viscoelástico dos materiais.

Dado a característica uniaxial destes modelos também é estudada neste capítulo a expansão das formulações uniaxiais para multiaxiais. Finalmente são expostas as equações presentes no programa de elementos finito comercial *Abaqus* para descrever o comportamento de fluência de diversos materiais.

2.1- ARMAZENAMENTO SUBTERRÂNEO DE GÁS NATURAL

O armazenamento de gás natural em espaços subterrâneo é o tipo de estocagem mais utilizado dentre os existentes, sendo até agora mais bem desenvolvido em países que possuem uma dependência bem definida deste produto. Este tipo de armazenamento até agora é estabelecido em 37 países, e são especialmente bem desenvolvidos nos Estados Unidos (EUA), Rússia, Ucrânia, Alemanha, Canadá, França e Itália os quais contam com 589 instalações de 679 existentes no mundo (Confort & Mothe, 2014).

A Figura 2-1 apresenta a distribuição por número de locais dos principais países com armazenagem subterrânea de gás natural, onde é possível observar como os Estados Unidos no ano 2012 conta com o maior número de sítios de estocagem (414), com uma capacidade de trabalho de 129.580 bilhões de m³. Na América do Sul, o único país com este sistema de armazenamento de gás natural, é a Argentina que tem um local e uma capacidade de trabalho de 0,10 bilhões de m³.

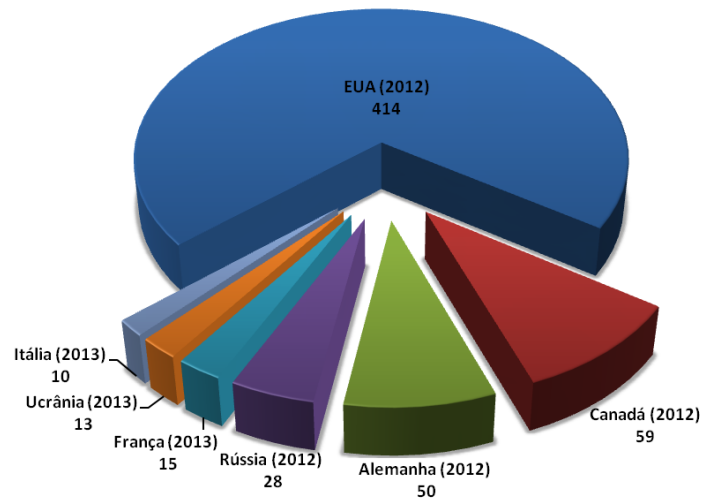


Figura 2-1 Distribuição por número de sítios de armazenagem subterrânea dos principais países. (Modificado de Confort & Mothe 2014).

No Brasil, segundo Costa (2013), o papel da atividade de exploração e produção de gás natural até a década de 90 era muito mais de complementar e auxiliar a produção de petróleo do que de suprir o mercado de gás, mas no momento o setor está passando por mudanças significativas. Ao longo das últimas duas décadas, o consumo e a produção de gás natural cresceram 11% e 8,4% ao ano, respectivamente, e as reservas provadas aumentaram de 181 (1991) a 459 bilhões de m³ (2012), indicando um crescimento anual de 4,5%. (Confort & Mothe, 2014). Estudos recentes sugerem que as reservas brasileiras conhecidas irão aumentar ainda mais acentuadamente no futuro. Em conformidade com a *Energy Information Administration* EIA (2013), a recente descoberta dos campos de petróleo nas bacias brasileiras chamada de pré-sal podem aumentar o volume de reservas provadas de gás natural em 50%. EIA (2013b) também menciona o país entre os 10 países no mundo com maiores recursos de gás e petróleo de xisto, o que permite afirmar que tal categoria de gás não convencional e as novas reservas geraram um aumento significativo na produção nacional.

Considerando essas variações de consumo, produção, infraestrutura e as reservas, é inquestionável a importância do armazenamento de gás no Brasil, pois atualmente, o gás é produzido e diretamente enviado pela rede de gasodutos para as unidades de tratamento de gás para ser especificado e posteriormente distribuído. De acordo com o estudo feito por Confort & Mothe (2014) o Brasil requer uma capacidade de armazenamento subterrâneo de cerca de 4.810 milhões m³ e pode variar entre 0,34 e 9,22 bilhões de m³. Se diz subterrâneo com o fim de ressaltar as vantagens da utilização deste método, em comparação com a armazenagem em tranques terrestres; que são os volumes de armazenamento subterrâneos

significativamente maiores e mais baratos, além dos ganhos em segurança quando cuidadosamente construídos e monitorados.

A principal função do armazenamento de gás natural no mundo além de ser um pulmão contingencial relaciona-se com a necessidade de manter um equilíbrio entre a demanda e a oferta de gás. Instituições como a *Federal Energy Regulatory Commission* FERC (2004) destacam os diferentes usos e justificativas que podem ter as reservas de gás; entre os quais é possível mencionar os seguintes:

- O fornecimento de gás durante picos de demanda incomum;
- O armazenamento de gás durante o verão para ser entregue durante o inverno, especialmente em países de clima temperado;
- Assegurar fornecimento de gás durante os problemas operacionais, econômicos ou políticos que possam interromper o fluxo de gás do gasoduto (situações de emergência);
- Assegurar que as pressões ao interior dos gasodutos se mantenham dentro dos parâmetros de segurança;
- Otimizar o tamanho das redes de transmissão;
- Garantir com o cumprimento dos contratos efetuados, mantendo o volume de entrega constante e salvaguardando qualquer imprevisto que possa levar à aplicação de multas;
- Como ferramenta de especulação de mercado, permitindo a compra durante épocas de preços baixos e a venda quando o preço subir;
- Para reduzir a volatilidade do preço dentro do país.

2.2- TIPO DE ESTOCAGEM SUBTERRÂNEA DE GÁS

Petróleo e gás podem ser armazenados no subsolo por diversos meios, como em campos de petróleo e gás esgotados, em aquíferos, em cavernas de sal, em cavernas de rocha de mineração sem revestimento, em cavernas revestidas e minas abandonadas. Diferentes tipos de armazenamentos subterrâneos exigem diferentes condições geológicas e hidrogeológicas e estão associados a diferentes problemas da engenharia de rochas (Lu, 2010). A Figura 2-2 representa os três principais locais de armazenamento subterrâneo de gás.

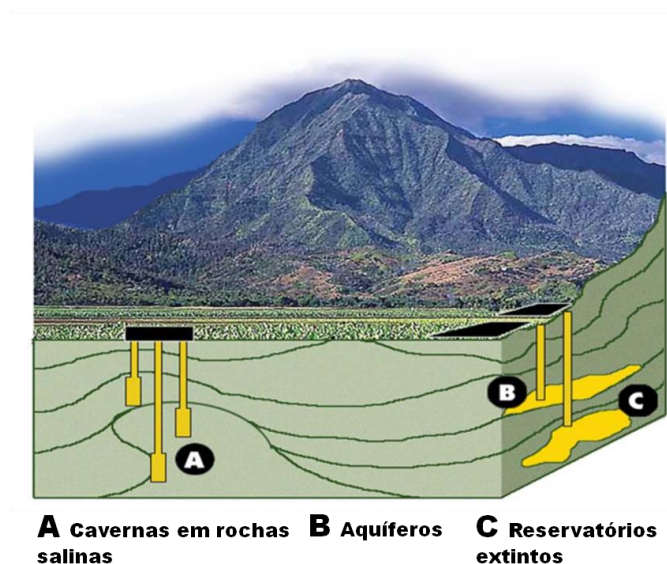


Figura 2-2 Principais locais de armazenamento subterrâneo de gás (Modificado de FERC, 2004).

A característica mais importante de uma instalação de armazenamento subterrâneo de gás natural é a sua capacidade de armazenar o gás natural para entrega futura, ou seja, sua capacidade de gás útil, no entanto, isto leva a outros questionamentos como: por quanto tempo o gás pode permanecer no reservatório antes de ser entregue e em quanto tempo pode ser reabastecido. Considerando estas características e questionamentos a Tabela 2-1 faz um resumo das propriedades operacionais básicas para os três principais locais de estocagem.

Tabela 2-1 Propriedades operacionais dos principais locais de armazenamento subterrâneo de gás. (Modificado de FERC 2004).

Tipo	Gás de Colchão	Período de Injeção [dias]	Período de extração [dia]
Aquíferos	50% a 80%	200 a 250	100 a 150
Reservatórios extintos de gás e petróleo	50%	200 a 250	100 a 150
Cavernas de sal	20% a 30%	20 a 40	10 a 20

Segundo Giouse (2012) no relatório de armazenagem subterrâneo de gás, feito para *Kuala Lumpur 2012 World Gas Conference* a distribuição mundial do volume de gás de trabalho por tipo de armazenamento tem como local principal os reservatórios de gás esgotados com uma porcentagem de 76% como mostrado na Figura 2-3. Isso pode ter sido causado pelo fato que

desde 1916 até 1950 este foi o único tipo de armazenamento subterrâneo de gás existente no mundo e muitos deles continuam em funcionamento (Lindblom, 1994).

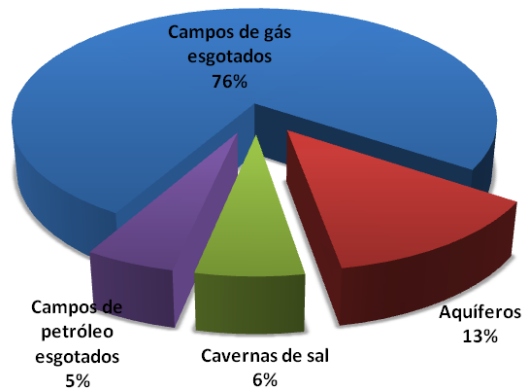


Figura 2-3 Distribuição mundial de armazenagem subterrânea de gás por tipo. (Modificado de Giouse 2012).

Reservatórios esgotados são essas formações nas quais já foram aproveitados todos os hidrocarbonetos recuperáveis. Isto deixa uma formação subterrânea geologicamente capaz de reter o gás natural. Além disso, utilizando um reservatório já explorado para fins de armazenamento permite a utilização dos equipamentos de extração e distribuição que sobraram de quando o campo foi produtivo o que reduz o custo de converter um reservatório extinto numa instalação de armazenamento; isto e o extenso conhecimento alcançado da estrutura geológica e do fluido armazenado nos processo de extração são outras das razões pelas quais estes são os locais mais utilizados atualmente no mundo (Correa & Castrillón, 2008).

No entanto, nos últimos anos, diversos autores como: Bary et al. (2002), Brown et al. (2008), Costa Leite et al. (2009), Lu (2010), Giouse (2012), Costa et al. (2012) e Ozarslan (2012) tem destacado o incremento no uso de cavernas de rochas salinas para o armazenamento devido às características deste tipo de rochas facilitarem o aprisionamento de hidrocarbonetos. Entre as quais é possível destacar as seguintes:

- Menores custos econômicos nas etapas de operação e manutenção;
- Menor tempo de instalação;
- Áreas superficiais necessárias para o monitoramento menores;
- Pressões do terreno ao redor do reservatório e a porosidade e permeabilidade de este tipo de rochas em relação a líquidos e hidrocarbonetos gasosos próximos à zero, evitam possíveis vazamentos;

- A diferença de temperaturas nas cavernas subterrâneas permite manter o óleo circulando o que contribui para conservar sua qualidade;
- Uma taxa de injeção/retirada maior que reflete num tempo menor de injeção/retirada quando comparado com o armazenamento em reservatórios esgotados e aquíferos;
- A quantidade de gás que deve ficar armazenada (gás de colchão) para manter a estabilidade estrutural é aproximadamente entre 20 e 30% da capacidade total o que torna com maior eficiência em comparação com os reservatórios de gás e petróleo esgotados que estão acima de 50%;
- Gás de trabalho pode, geralmente, ser reciclado dez ou doze vezes por ano neste tipo de instalação de armazenagem.

Entretanto, estes autores também apresentam condições desfavoráveis no comportamento das formações de sal, como sua propriedade de fluência, o que pode levar a muitos problemas nas diversas etapas dos projetos relacionados a escavações e a uma diminuição no volume de armazenamento causado por uma convergência natural das paredes ao longo do tempo.

Em segundo lugar, na Europa, as cavernas em rochas evaporíticas para o armazenamento de gás têm proliferado, graças à abundância de depósitos naturais de sal e a sua trajetória na extração deste mineral (Bary et al., 2002). Em 2012 o armazenamento em cavernas de sal equivaleu a 14% da capacidade total de armazenamento, enquanto no EUA o equivalente é de 9% em relação ao crescimento dos últimos anos com um total de doze novas construções das dezessete planejadas. Este crescimento é mostrado na Figura 2-4 (CODIGAZ, 2013).

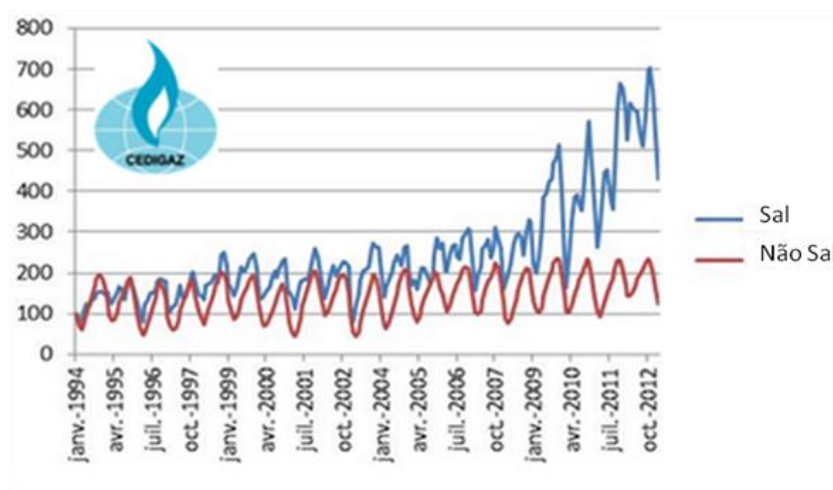


Figura 2-4 Evolução histórica do armazenamento de gás de trabalho dos EUA em cavernas de sal e não sal. (Modificado de CODIGAZ 2013).

2.3- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E MECÂNICAS DAS ROCHAS EVAPORÍTICAS.

As rochas salinas pertencem a um grupo de rochas sedimentares, chamados de evaporitos, formadas pela cristalização e precipitação química dos sais dissolvidos em meios aquosos, devido a um processo de evaporação, apresentando camadas de minerais salinos, e são nomeadas de acordo com o seu mineral dominante.

Os ambientes de formação destas rochas podem ser de origem continental ou marinha onde há aporte periódico de água salgada. A precipitação do sal acontece quando o soluto atinge o ponto de saturação salina daquele componente gerando depósito de cloretos, sulfatos, nitratos e carbonatos. Desta maneira, a deposição de camadas salinas ocorre em uma sequência ou sucessão de salinização progressiva da bacia de deposição, dos sais menos solúveis para os mais solúveis (Botelho, 2008).

Os evaporitos, considerados como rochas sedimentares químicas podem ser encontrados de forma comum, devido a seus usos em diferentes indústrias e a seu valor econômico.

A Tabela 2-2 apresenta os minerais que são considerados os mais representativos nas formações evaporíticas.

Tabela 2-2 Minerais mais comuns nos depósitos evaporíticos.

Mineral	Composição
Halita	NaCl
Silvita	KCl
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O
Anidrita	CaSO ₄
Carnalita	KMgCl ₃ .6H ₂ O
Taquidrita	CaMg ₂ Cl ₆ .12H ₂ O
Dolomita	Ca(Fe,Mg)(CO ₃) ₂

Desse conjunto de minerais evaporíticos, a mais adequada para hospedar grandes cavernas, abertas por dissolução, para estocagem de hidrocarbonetos, é a halita. Estas rochas são de maior espessura dentro dos depósitos evaporíticos e apresentam algumas características básicas favoráveis que são consequências de sua gênese. Em primeiro lugar, elas são facilmente dissolvidas em água; em segundo lugar, elas têm a capacidade de deformar-se permanentemente ao longo de uma ampla gama de tensão e temperatura, o que pode evitar falhas e juntas de abertura que implica uma terceira característica básica que é a porosidade e permeabilidade praticamente nulas, garantindo excelente estanqueidade para maioria dos fluidos e gases.

Mohriak et al. (2008) dizem que quando se observa uma camada de halita em uma sequência de rochas, ela é formada por pequenos cristais cúbicos que obedecem à estrutura atômica do mineral. Devido a esta estrutura cristalina estão sujeita ao fenômeno de fluência, deformação lenta sob tensão constante. Esse fenômeno físico de fluência é sensivelmente influenciado pela espessura da camada de sal, temperatura de formação, composição mineralógica, conteúdo de água, presença de impurezas, tensão desviatória aplicada ao corpo salino. Algumas rochas compostas principalmente por carnalita, silvita e taquidrita apresentam as maiores taxas de fluência e a calcita e dolomita são essencialmente imóveis. A halita é menos móvel, entretanto, dependendo das condições de tensão e temperatura a que está submetida, pode apresentar taxas de movimentação consideráveis.

Segundo Gravina (1997) em estudos feitos por Serata et al. (1968) um corpo de prova de halita submetida a um teste de compressão triaxial com grandes pressões de confinamento ou um teste de compressão uniaxial sob temperaturas elevadas tende a se deformar de maneira bastante acentuada através do escorregamento entre os planos dos cristais, podendo haver grandes deformações sem ocorrência da ruptura.

Dada à importância de compreender o fenômeno de fluência e os modelos constitutivos utilizados atualmente para descrever este comportamento neste trabalho serão estudados de maneira mais detalhada num próximo item.

Características mecânicas como à resistência a compressão das rochas evaporíticas pode ser altamente variável de um tipo de rocha para outra, para ensaios feitos com as mesmas condições de tensão e temperatura. A Figura 2-5 mostra a comparação de resistência à compressão simples obtida para três diferentes tipos de rochas evaporíticas e sua comparação com o obtido em corpo de prova de concreto armado.

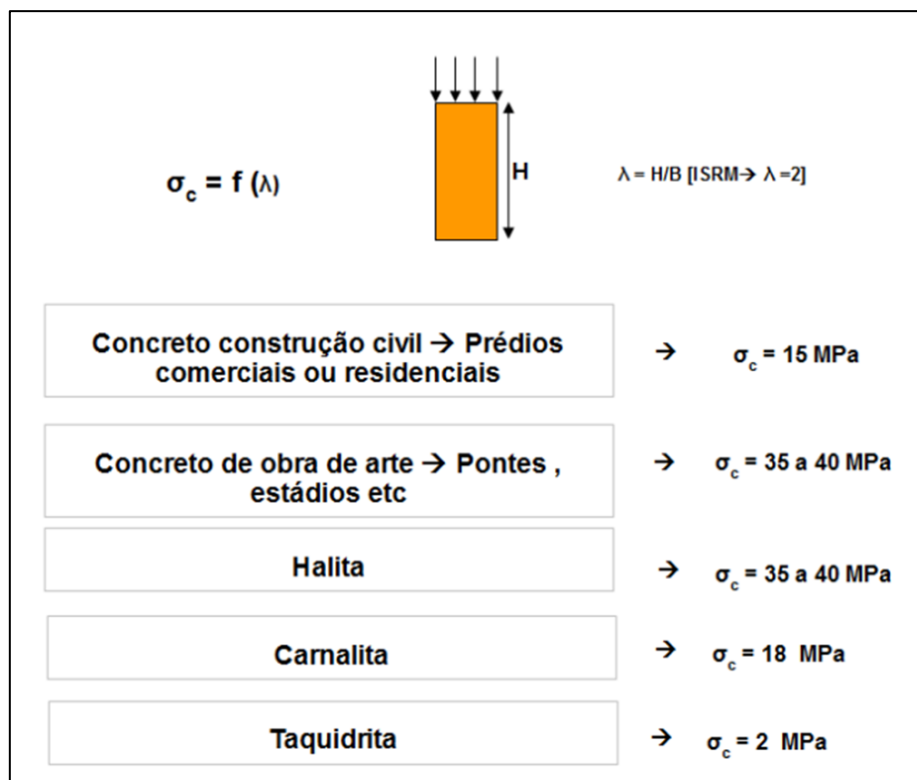


Figura 2-5 Comparação de resistência à compressão simples obtida para três diferentes tipos de rochas evaporíticas e sua comparação com o obtido em corpo de prova de concreto armado. (Costa, 2013)

O valor de resistência à compressão da halita obtido nos ensaio da Figura 2-5 e outros parâmetros mecânicos, tais como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson resumidos na Tabela 2-3 encontrados nos evaporitos da mina Taquari-Vassouras no Nordeste Brasileiro permitem ratificar a halita como o melhor tipo de rocha evaporítica a ser utilizada na construção de cavernas para estocagem de hidrocarbonetos quando é comparada com outras rochas evaporíticas.

Tabela 2-3 Parâmetros elásticos determinados nos evaporitos da mina Taquari-Vassouras.

Rocha	Módulo de Elasticidade E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν
Halita	20,40	0,36
Silvinita	15,74	0,33
Taquidrita	4,92	0,33
Carnalita	4,02	0,36

2.4- CONSTRUÇÃO DE CAVERNAS EM DEPÓSITOS EVAPORÍTICOS “OFFSHORE”

Os evaporitos são encontrados em várias bacias de hidrocarbonetos ao redor do mundo, como pode ser visualizado na Figura 2-6. Existem depósitos significantes nas águas profundas do Golfo do México e em regiões *offshore* do oeste da África e leste do Brasil, no Sul do Mar do Norte, Egito e Oriente Médio.



Figura 2-6 Depósitos de sal “*offshore*” (Farmer & Miller, 1996)

A principal zona de ocorrência de evaporitos no Brasil situa-se na Costa Leste, desde Santos até Sergipe-Alagoas, e as maiores extensões de evaporitos se encontram sobre o Platô de São Paulo, na Bacia de Santos (Bresolin, 2010).

Considerando a grande espessura e continuidade da camada de sal na província petrolífera da Bacia de Santos apresentada na Figura 2-7, estudos estratégicos e de viabilidade técnica e econômica estão sendo feitos para a avaliação do uso de cavernas subterrâneas no mar aberto para armazenamento de produtos petrolíferos (Costa et al., 2012).

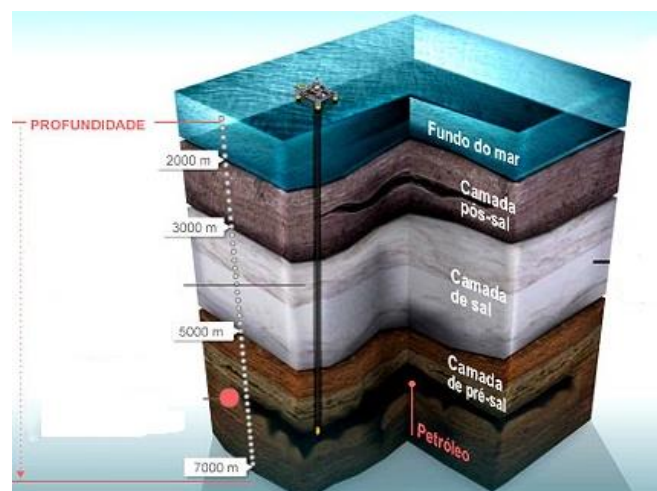


Figura 2-7 Camada de sal que compõe os reservatórios do pré-sal. (Modificado de Coppe/UFRJ 2014).

Tendo como argumento os estudos mencionados acima é considerado importante fazer uma breve descrição do processo de construção dessas cavernas somente em ambientes *offshore* deixando de lado à possibilidade de cavernas feitas em espaços *onshore* como locais de armazenamento de gás para o país.

A metodologia utilizada para construção de cavernas em depósitos evaporíticos *offshore* é chamada de Mineração por Dissolução e seguindo o mesmo procedimento adotado em terra, tendo como diferencial a utilização de água do mar no processo de lixiviação e um sistema de bombeamento submarino chamado de *Raw water injection*.

No processo de construção até encontrar a formação evaporítica, é necessário desenvolver a perfuração por um método convencional a poço revestido até que se encontre o topo da camada de rocha salina. O poço perfurado para a construção da caverna é o mesmo que será mais tarde utilizado para a extração e injeção de gás na etapa de operação da caverna.

Uma vez que o poço foi devidamente revestido e estabilizado, inicia-se a segunda fase do processo de abertura da caverna de sal. Uma tubulação de menor diâmetro que a largura do poço é introduzida e posicionada no centro do revestimento, de forma a gerar um anular entre o tubo e a face interna do revestimento de produção. Através dessa composição a caverna pode ser aberta na rocha de sal segundo dois métodos distintos: Circulação Direta ou Circulação Reversa.

No procedimento conhecido como Circulação Reversa, a água é injetada pela tubulação de maior diâmetro e a salmoura gerada nesse processo é então retirada pelo tubo central; dessa forma, a caverna se forma através da transformação do sal em salmoura com a circulação da água na rocha. No outro método Circulação Direta, a água é injetada pelo tubo central e retirada pelo anular entre o tubo injetor e o revestimento de produção. Estes dois métodos são apresentados na Figura 2-8.

Warren (2006) afirma que o processo de circulação direta favorece a expansão inferior da caverna e, inversamente, o processo de circulação reversa favorece a expansão da parte superior. Segundo Costa (2013) a alternância entre os dois métodos é conhecida como Circulação Direta e Reversa, na qual a água é circulada em tempos diferentes pelos dois métodos, de forma a gerar o formato desejado para a caverna.

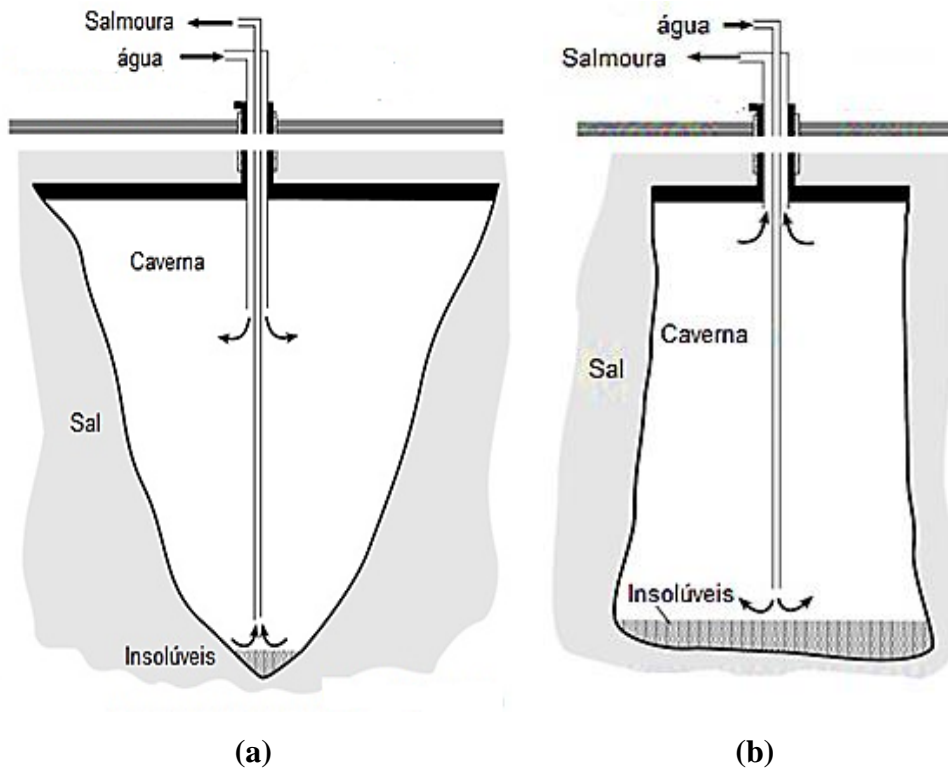


Figura 2-8 Processos de abertura de caverna em rochas salinas (a) Circulação Reversa (b) Circulação Direta. (Modificado de Warren 2006).

De modo semelhante o processo inicial de construção das cavernas até o ponto de encontro da perfuração com a camada evaporítica, também pode ser dividido em dois métodos distintos. No primeiro, os tubos injetor e de retorno de salmoura encontram-se no mesmo poço. Nesse caso, em função dos diâmetros viáveis de serem utilizados e o espaço anular entre os tubos injetor e de retorno, tem-se tempos maiores para o desenvolvimento das cavernas.

A Figura 2-9 esquematiza o processo de construção da caverna para o método em que se tem um único poço; a distância entre os tubos de injeção e retorno definirá a forma e dimensões da caverna. Se o tubo injetor for mantido próximo ao tubo de retorno durante o processo de dissolução tem-se uma caverna com maior diâmetro e menor altura, o que pode comprometer sua estabilidade. Se pelo contrário durante o desenvolvimento das cavernas os dois tubos ficam-se longe um do outro, pode-se chegar a uma forma cilíndrica, que possui maior estabilidade estrutural.

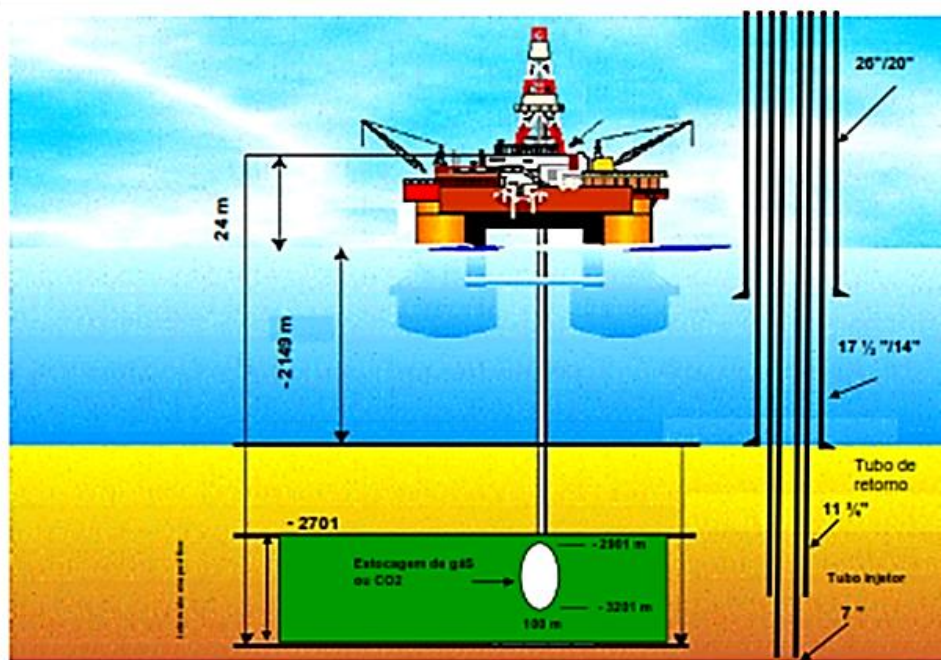


Figura 2-9 Processo construtivo de uma caverna em depósitos evaporíticos *offshore* por um único poço. (Costa, 2013).

No segundo método são executados dois poços para o desenvolvimento das cavernas. Um dos poços será usado para a injeção da água do mar para dissolução do sal e o segundo poço será usado para o retorno da salmoura. Este procedimento tem um tempo de execução menor, isso se dá em função da circulação semicircular da água, de um poço para o outro. O maior volume de água em circulação resulta em uma maior taxa de dissolução.

A Figura 2-10 expõe a configuração final das cavernas para estes dois processos construtivos.

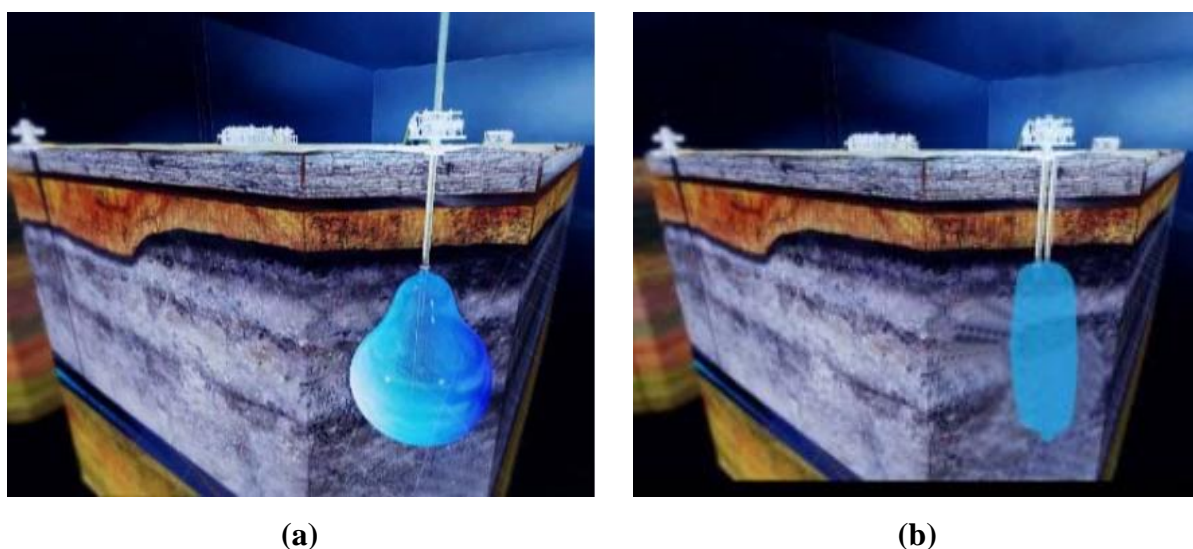


Figura 2-10 configuração final das cavernas para os processos construtivos (a) somente um poço para injeção e retirada da salmoura (b) dois poços, um de injeção e outro de retirada da salmoura (Costa et al., 2012).

Costa (2013) argumenta a utilização do bombeio submerso através da utilização da água do fundo do mar no processo de lixiviação, como uma alternativa para diminuição dos custos gerados pela permanência de uma sonda de águas profundas, devido a que este processo pode levar meses ou anos, a depender do procedimento adotado e o tamanho da caverna.

Finalmente concluído o desenvolvimento da caverna inicia-se o processo de substituição da salmoura pelo gás natural em altas pressões seguindo as recomendações dos estudos de estabilidade para as pressões internas.

2.5- COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA DOS EVAPORITOS

As rochas, de modo geral, sofrem fluência quando submetidas a uma variação de carregamento. Entretanto, a deformação por fluência cessa em poucos minutos ou horas, ou ela é reduzida a tal ponto que pode ser ignorada para propósitos práticos. A maioria das rochas deforma-se em regime de fluência apenas em temperaturas e tensões além dos limites usuais de aplicações em estruturas de engenharia (Dusseault & Fordham, 1993). Mas as rochas salinas, ou evaporitos sofrem fluência apreciável em faixas de tensão e temperatura usuais na prática da mecânica de rochas; dado este fato Cella (2003) afirma que o estudo deste tipo de rochas teve início no decorrer do século XIX e esse interesse mantém-se ativo até os dias presentes.

Findley et al. (1976) definem a fluência como a deformação contínua e lenta que o material sofre quando nele atua uma tensão e temperatura constante ao longo do tempo. Costa (1984) explica que fluência e plasticidade (deformações irreversíveis) não podem ser consideradas fenômenos independentes. Eles estudaram as deformações permanentes de um corpo sólido que ocorrem com o tempo, mas com taxas diferentes, mas por simplicidade matemática estes dois são separados.

Boulianne et al. (2004) fizeram uma descrição de maneira geral das deformações que ocorrem no corpo sólido como é mostrado na equação:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{cr} \quad (2.1)$$

sendo ε^e a parcela elástica; ε^p corresponde à parte plástica e finalmente ε^{cr} é relacionada com a deformação por fluência; os dois primeiros termos ocorrem de maneira instantânea enquanto a terceira porção pode ser definida como um comportamento dependente do tempo.

Hudec & Jackson (2007) afirmam que devido à alta velocidade de relaxamento do material, o comportamento elástico da deformação pode ser ignorado, e a deformação pode ser tratada como puramente viscosa. Sendo assim as deformações por fluência para o restante do presente capítulo serão denotadas simplesmente por $\varepsilon^{cr} = \varepsilon$.

Findley et al. (1976) dizem que o fenômeno de fluência pode ser descrito por três estágios de comportamento diferentes como é mostrado na Figura 2-11, na qual é ilustrada uma curva de evolução da deformação de um corpo de prova versus tempo, quando submetido a um estado de tensões desviatório constante no tempo.

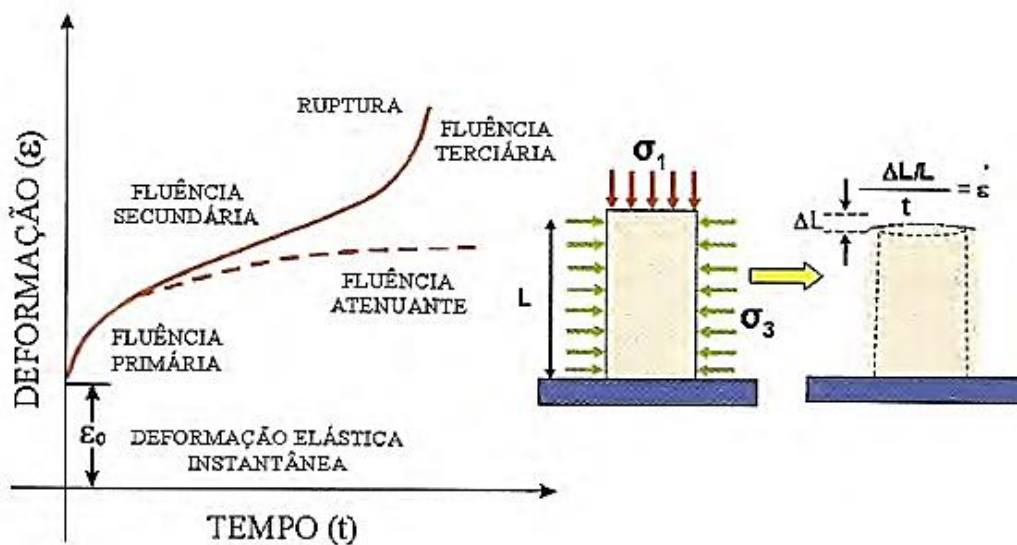


Figura 2-11 Deformação típica no tempo em três estágios de fluência: Primária (desaceleração da deformação), estacionária ou secundária (taxa constante) e terciária (aceleração e ruptura). (Costa & Poiate, 2008).

De acordo com Costa (1984), Dusseault & Fordham (1993) e Gravina (1997) os três estágios de fluência que podem ocorrer num corpo sólido poderiam ser descrito como segue:

- O primeiro estágio é chamado de fluência Primária (ou transiente) ocorre depois da aplicação de um nível constante de tensão, após a deformação elástica instantânea, e se caracteriza pela diminuição da velocidade de deformação, que representa a redistribuição da tensão aplicada no esqueleto mineral, apenas parcialmente acomodada na deformação elástica inicial.
- O segundo é chamado de fluência secundária (ou estacionária) neste estágio, a rocha deforma-se sob uma velocidade de deformação aproximadamente constante, ocorrendo logo após a fluência primária. Nesta fase, se o nível de tensão for repentinamente reduzido

a zero, ocorrerá inicialmente uma recuperação imediata da deformação elástica e, em seguida, uma recuperação lenta, tendendo assintoticamente para uma deformação permanente. Inversamente, se a tensão é mantida constante depois de certo tempo a deformação lenta é contínua que caracteriza o regime de fluência estacionária tomará um valor constante; essa fase pode durar algum tempo (de meses a anos) e levar o maciço à ruptura.

- E finalmente a fluência terciária ocorre logo após a fluência secundária, neste estágio há um aumento crescente da velocidade de deformação, aceleração da taxa de fluência do corpo sólido, conduzindo-o rapidamente à ruptura do material; esta ruptura na prática da engenharia é representada matematicamente como o dano do esqueleto mineral da rocha salina por acúmulo de deformações. Por outro lado dependendo do estado de tensão e temperatura, também pode ocorrer uma diminuição da velocidade até não haver mais deformações por fluência conhecido como atenuação.

De maneira direta, a fluência é geralmente descrita em termos da velocidade de deformação, ou taxa de deformação, na condição tensão deviatória ($\sigma_1 - \sigma_3$) e temperatura (T) constantes pela equação:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.2)$$

sendo $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação ou de fluência e $d\varepsilon$ é a variação da deformação no intervalo de tempo dt .

Diversos autores entre eles Costa (1984), Assis (1990), Gravina (1997) asseguram que a velocidade de deformação por fluência ($\dot{\varepsilon}$) é fortemente dependente do nível de tensão aplicada e também da temperatura.

A Figura 2-12 apresenta um gráfico para diferentes níveis de tensão, em que $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$, e um gráfico para diferentes valores de temperatura, em que $T_1 < T_2 < T_3$. Observa-se que, quanto maior o nível de tensão, ou a temperatura no corpo sólido, maior será a velocidade de deformação por fluência ou taxa de deformação, o que pode ser comprovado pelas inclinações das curvas destes gráficos.

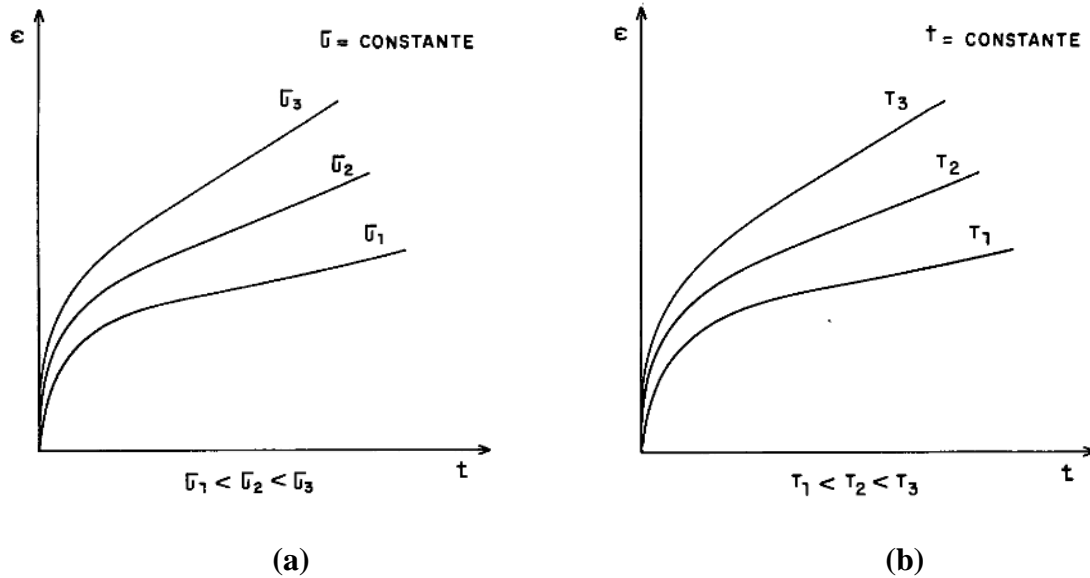


Figura 2-12 Curvas de fluência para diferentes níveis de (a) Tensão e (b) Temperatura. (Costa, 1984)

2.6- MODELOS CONSTITUTIVOS DE FLUÊNCIA

Para descrever a fluência das rochas, muitos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para correlacionar estados de tensão, deformação e tempo; estes foram inicialmente derivados dos estudos de metais e depois adaptados para a mecânica das rochas. Segundo Cella (2003) os modelos de estudo da fluência para finalidades práticas incluem leis empíricas de fluência, leis fundamentadas em modelos reológicos e leis baseadas nos mecanismos físicos de deformação da matriz rochosa.

De acordo com Botelho (2008), os modelos constitutivos geralmente descrevem somente uma parte da curva de fluência, apresentada na Figura 2-11. Alguns modelos representam somente o regime transiente; outros, somente o regime permanente. Existem também modelos que são a combinação das deformações de fluência primária e secundária. No entanto, a modelagem da terceira fase de fluência é muito complexa.

2.6.1- MODELOS EMPÍRICOS

Os modelos empíricos são equações matemáticas deduzidas a partir da observação e ajuste entre o comportamento de uma curva típica de fluência e o seu resultado experimental. Devido a que a grande maioria dos estudos experimentais com materiais viscoelásticos terem sido realizados em condições unidimensionais, os modelos matemáticos mais difundidos (empíricos e reológicos) foram desenvolvidos para essas condições, ou seja, estado de tensão e deformação uniaxial (Gravina, 1997). Outro aspecto importante é que as equações empíricas

normalmente são provenientes do estudo dos metais. Para a utilização na representação do comportamento das rochas, as constantes empíricas são ajustadas em função dos resultados experimentais.

Nos modelos empíricos para descrever o comportamento de fluência uma suposição comum é que a deformação depende apenas dos valores de tensão e temperatura aplicados em um determinado momento. Portanto, é independente das trajetórias de tensão e de temperatura que foram seguidos para chegar a esse determinado estado, como com qualquer outro modelo de ajuste de curva, essas funções de resposta são dependentes das condições de estado de excitação externa, do material e das características do ensaio. O número de modelos empíricos na literatura pode ser igual ao número de combinações entre os níveis de tensão, estados de excitação externa, condições do ensaio e o material (Assis, 1990).

Independentemente do grande número de equações, as leis de fluência empíricas podem ser divididos em três grupos principais, de acordo com a como a função matemática governante. Eles são potencial, logarítmica e exponencial.

- **Lei Potencial**

O modelo empírico potencial geralmente é o mais empregado na literatura sendo utilizado até os dias de hoje. Os trabalhos feitos por Costa (1984), Assis (1990), Gravina (1997), Botelho (2008) e Cavalcante (2012) são exemplos disso; em virtude da sua simplicidade e do seu bom ajuste aos resultados obtidos.

A equação mais utilizada para representar o comportamento de fluência das rochas evaporíticas foi desenvolvida por Lomenick (1971), que relaciona a deformação ocorrida durante a fluência primária com a tensão, tempo e temperatura:

$$\varepsilon_t = k\sigma^c t^b T^a \quad (2.3)$$

Sendo ε_t a deformação medida durante a fluência transiente, σ a tensão desviatória, T a temperatura, t o tempo, k é o parâmetro que depende das condições do ensaio e do sistema de unidades empregado, e a , b e c parâmetros determinados experimentalmente.

Assis (1990) afirma que ao manter constante a tensão e a temperatura a Equação 2.3 pode ser reduzida a:

$$\varepsilon_t = At^b \quad (2.4)$$

Onde,

$$A = k\sigma^c T^a \quad (2.5)$$

Além de ser puramente empírico, o modelo de potência traz dois inconvenientes em sua equação constitutiva:

- A velocidade de deformação torna-se infinita quando o a variável tempo (t) tende a zero
- Quando o tempo é muito grande, a velocidade de deformação tende a zero, ou seja, a curva de fluência é assíntota com a horizontal.

Esses dois inconvenientes acontecem pelo fato do expoente do tempo (b) varia entre 0,3 e 0,5.

Como a lei potencial é aplicada à fase transiente da curva de deformação por fluência, existem algumas sugestões para incorporação da fase permanente. Por outro lado, segundo Costa & Poiate (2008) na atualidade a fluência secundária está sendo representada por leis mais avançadas, baseadas em mecanismos de deformação estudados ao final da década 80.

- **Lei Logarítmica**

A lei logarítmica tem uma forma semelhante à lei potencial, mas a variável tempo é regida por uma função logarítmica. A expressão geral é:

$$\varepsilon_t = k\sigma^c T^a \ln(t) \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 pode ser reduzida, considerando a tensão e a temperatura constantes:

$$\varepsilon_t = k \ln(t) \quad (2.7)$$

Esta expressão é um caso especial da lei potencial, em que o expoente da variável tempo é igual a -1 na versão da lei potencial para a equação da taxa de fluência, e igual que ela descreve somente o comportamento transiente da curva de fluência.

A lei logarítmica também sofre a desvantagem da velocidade de deformação torna-se infinita quando a variável t tende a zero. Para evitar esta condição limite indesejada, modificações são propostas pela literatura. Um exemplo de isso é a seguinte equação:

$$\varepsilon_t = K \ln(1 + \alpha t) \quad (2.8)$$

Sendo α igual que os outros parâmetros uma constante obtida de maneira experimental e depende das condições do ensaio e do sistema de unidades.

Autores como Assis (1990) afirmam que esta lei apresenta um bom ajuste em relação à curva experimental em condições de baixa temperatura e períodos de tempo curtos. Para os outros cenários, a lei logarítmica não descreve satisfatoriamente o comportamento do material.

- **Lei Exponencial**

A lei exponencial, assim como os outros modelos empíricos apresentados, descreve o comportamento transiente de fluência como uma função exponencial da temperatura por meio da equação:

$$\varepsilon_t = k\sigma^c t^b \exp(-\lambda/T) \quad (2.9)$$

Sendo, λ uma constante empírica a mais.

Segundo Gravina (1997) a lei de temperatura exponencial geralmente é utilizada para modelar o comportamento de fluência de evaporitos em altas temperaturas, como por exemplo, depósitos de lixo atômico, onde o desprendimento de calor é muito elevado devido à radioatividade.

A primeira vista, os modelos empíricos parecem ter sido derivados de forma a descrever apenas a fase de fluência transiente, mas modificações são introduzidas para incluir o estado estacionário; o termo adicional representa uma taxa de deformação constante que pode ser definida por outras equações empíricas, mas mais comumente por métodos baseados em mecanismo físicos. No entanto Assis (1990) afirma que um dos principais problemas é o método para determinar a velocidade de fluência no estado estacionário e o tempo em que está estabelecida; pois esta é muito difícil de estabelecer a partir de testes mais curtos do que alguns meses, nos níveis de tensão geralmente encontrados em aplicações de engenharia. Mesmo assim alguns investigadores defendem que a deformação em estado estacionário pode ser conseguida em poucas horas ou dias.

2.6.2- MODELOS REOLÓGICOS

A reologia que estuda o escoamento em geral tem utilizado modelos simples para simular tipos fundamentais de comportamento de fluência de diversos materiais. Estes modelos

constituem-se da associação em série ou paralelo de elementos simples como molas, amortecedores e deslizantes como é mostrado na Figura 2-13.

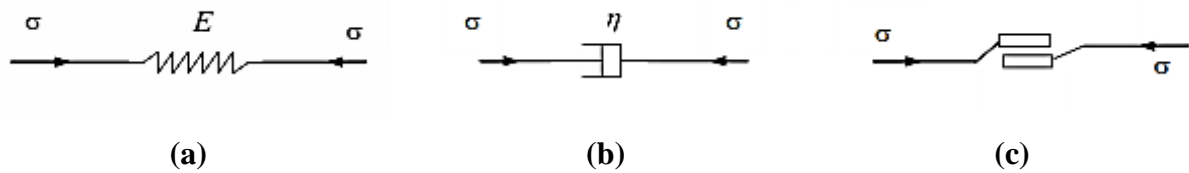


Figura 2-13 Modelos reológicos básicos (a) Modelo mola (Hooke) (b) Modelo amortecedor (Newton) (c) Modelo deslizante (Saint-Venant). (Cavalcante, 2012).

O elemento mola representa a deformação elástica descrita por um módulo de rigidez constante (elasticidade linear), ou um módulo de tensão deformação dependente (elasticidade não linear). Ao aplicar uma tensão à mola, ela se deforma e caso a tensão seja removida, ela retornará a sua configuração inicial. Esse modelo, proposto por Hooke, é representado pela equação:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.10)$$

Sendo E o módulo de elasticidade (constante da mola) que relaciona a tensão unidimensional σ atuante num sólido elástico linear como a deformação ε .

O elemento amortecedor representa o comportamento perfeitamente viscoso. Neste caso, quando uma tensão é aplicada, o elemento deforma-se gradualmente com o tempo sob taxa de deformação constante; quando ela é retirada, o corpo não retorna a sua configuração inicial, ou seja, sofre uma deformação irreversível. A taxa de deformação é proporcional à tensão (fluido Newtoniano), ou a viscosidade pode ser não linear, dependendo da tensão desviatória ou da taxa de deformação. A equação é a expressão proposta por Newton para esta condição é:

$$\sigma = \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \eta \dot{\varepsilon} \quad (2.11)$$

Sendo η a constante de viscosidade (constante do amortecedor) e $\partial \varepsilon / \partial t$ ou $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação (ou velocidade de deformação).

O elemento deslizante simula a deformação plástica. Na simulação da deformação plástica é necessária que uma tensão, no mínimo equivalente à tensão de cedência (tensão necessária para que ocorra o deslizamento) seja aplicada, do contrário a tensão de escoamento σ^y não

será atingida ($\sigma < \sigma^y$), portanto não haverá deformação. Caso essa tensão seja atingida a deformação sofrida será irreversível e o comportamento tensão deformação será independente do tempo. Este modelo é conhecido pelo nome de modelo de Saint-Venant.

Segundo Cella (2003), referenciando a Dusseault & Fordham (1993), a tensão de cedência poderá ser a tensão de cisalhamento média constante (modelo de Von Misses), uma tensão desviatória constante (Modelo de Tresca), ou um valor relacionado com a tensão normal (Modelos de Drucker-Prager, Mohr Coulomb, ou outro dependente da tensão).

Os modelos reológicos básicos anteriores permitem formar modelos analógicos capazes de se ajustarem as curvas experimentais de fluência obtidas em ensaios uniaxiais. As equações obtidas para o estado unidimensional de tensão e deformação se estendem para um estado multiaxial de tensão e deformação como é mostrado no item 2.8-.

Na literatura é ressaltada a capacidade dos modelos reológicos de permitir a decomposição do comportamento real do material em componentes elásticas, viscosas, plásticas e de ruptura. No entanto também são apresentadas algumas deficiências destes modelos como que eles não fornecem estimativas diretas de valores sem uma devida calibração experimental dos elementos que compõem o modelo, além de não levar em conta o efeito da temperatura ou estrutura intrínseca da rocha, o que faz que não forneçam a compreensão essencial dos mecanismos de fluência e finalmente que são válidos somente para períodos curtos de tempo ou intervalos limitados de tensões.

Alguns dos modelos reológicos mais utilizados para descrever o comportamento de fluência dos materiais são: Modelo de Maxwell, de Kelvin, de Burgers. Eles serão descritos seguindo o procedimento feito por Gravina (1997) e Cavalcante (2012) assim como o modelo reológico elaborado para descrever o comportamento de fluência das rochas salinas.

- **Modelo de Maxwell**

O modelo de Maxwell é a combinação em série do um elemento de mola com um elemento amortecedor, conforme mostra a Figura 2-14. Nela é possível ver além da representação gráfica ,do modelo os gráficos de tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) e deformação-tempo ($\varepsilon - t$).

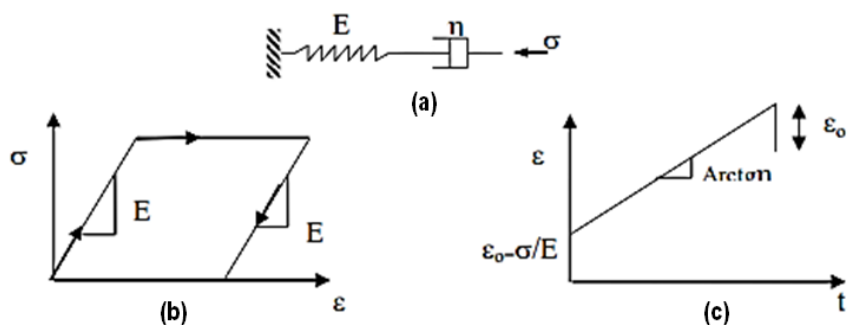


Figura 2-14 Modelo de Maxwell (a) Representação gráfica (b) Gráficos de tensão-deformação ($\sigma - \epsilon$) (c) Gráfico de deformação-tempo ($\epsilon - t$). (Modificado de Cavalcante 2012).

A Tabela 2-4 reúne as equações deduzidas a partir do comportamento e combinação dos elementos que conformam o modelo de Maxwell, sabendo que a deformação total é a soma das deformações em cada elemento e a tensão é a mesma em ambos.

Tabela 2-4 Equações básicas necessárias para chegar ao modelo de Maxwell

Condição	Equação
Equação de equilíbrio	$\sigma^e = \sigma^v = \sigma$
Equação de compatibilidade	$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^v$
Equação constitutiva para o elemento elástico	$\sigma^e = E\epsilon^e$
Equação constitutiva para o elemento viscoso	$\sigma^v = \eta\dot{\epsilon}^v$

Com o rearranjo das equações acima é possível chegar à equação diferencial para o modelo de Maxwell:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.12)$$

Impondo-se uma condição de tensão constante σ_c ao modelo tem-se:

$$\dot{\sigma} = 0 \Rightarrow \dot{\epsilon} = \frac{\sigma_c}{\eta} \quad (2.13)$$

Integrando-se com respeito ao tempo tem-se:

$$\epsilon = \frac{\sigma_c}{\eta} \cdot t + C \quad (2.14)$$

Para $t = 0$, $\varepsilon(0) = \sigma_c/E \Rightarrow C = \sigma_c/E$

Finalmente,

$$\varepsilon = \sigma_c \left(\frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right) \quad (2.15)$$

Na Equação 2.15, a deformação elástica inicial é dada por σ_c/E , sendo $\frac{\sigma_c}{\eta} \cdot t$ a evolução da deformação com o tempo devido à fluência, mostrado na Figura 2-14 (c). Dado isto o modelo de Maxwell, num ensaio de fluência, mostra a deformação crescendo linearmente com o tempo a partir de uma deformação elástica inicial. A fluência primária ou transiente não é percebida pelo modelo, que representa somente a fase de fluência estacionária.

- **Modelo de Kelvin**

A combinação do elemento de Hooke com o de Newton, em paralelo, dá origem ao modelo de Kelvin como é mostrado na Figura 2-15. O modelo de Kelvin representa bem a fluência transiente dos materiais viscoelásticos, mas não prevê a deformação elástica inicial. A figura também apresenta a representação gráfica do comportamento tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) e deformação-tempo ($\varepsilon - t$) deste modelo reológico.

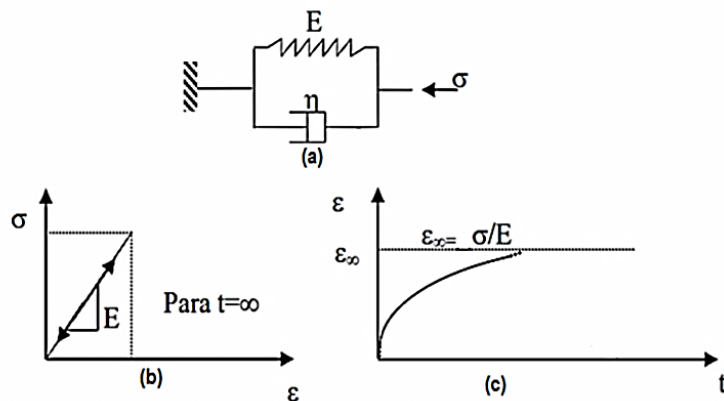


Figura 2-15 Modelo de Kelvin (a) Representação gráfica (b) Gráficos de tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) (c) Gráfico de deformação-tempo ($\varepsilon - t$). (Modificado de Cavalcante 2012).

Assim como para o modelo de Maxwell a Tabela 2-5 reúne as equações deduzidas a partir do comportamento e combinação dos elementos que conformam o modelo, sabendo que neste caso a tensão total é equilibrada pela contribuição de cada um dos elementos e a deformação é a mesma em ambos.

Tabela 2-5 Equações básicas necessárias para chegar ao modelo de Kelvin

Condição	Equação
Equação de equilíbrio	$\sigma = \sigma^e + \sigma^v$
Equação de compatibilidade	$\varepsilon = \varepsilon^e = \varepsilon^v$
Equação constitutiva para o elemento elástico	$\sigma^e = E\varepsilon^e$
Equação constitutiva para o elemento viscoso	$\sigma^v = \eta\dot{\varepsilon}^v$

Com a combinação das equações acima é possível chegar à equação diferencial para o modelo de Kelvin:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} - \frac{E}{\eta} \cdot \varepsilon \quad (2.16)$$

Na representação do ensaio de fluência é dizer a deformação visco elástica sob tensão constante, faz-se $\sigma = \sigma_c$ na Equação 2.16, obtendo-se:

$$\sigma_c = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (2.17)$$

A solução da Equação diferencial 2.17 tem como resultado:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E} \left(1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right) \right) \quad (2.18)$$

A Equação 2.18 representa satisfatoriamente a fluência primária nas rochas, onde a velocidade de deformação tende a zero como o tempo, assíntota com a horizontal e a deformação total que ocorre no material esta representada por σ_c/E como é mostrado na Figura 2-15 (c).

- **Modelos Generalizados de Kelvin**

Segundo Assis (1990) os modelos generalizados de Kelvin de três parâmetros podem ser utilizados para elementos sólidos ou fluidos. No caso de elementos sólidos um elemento de mola é adicionado em série ao modelo de Kelvin com o propósito de descrever a deformação inicial ou instantânea. Por outro lado a adição do elemento Newtoniano (amortecedor) em série ao modelo geral de Kelvin permite descrever a deformação por fluência estacionária dos

materiais. Na Figura 2-16 é possível observar as representações gráficas destes dois casos. É evidente que a generalização de modelos torna a descrição do comportamento de fluência mais próxima da realidade.

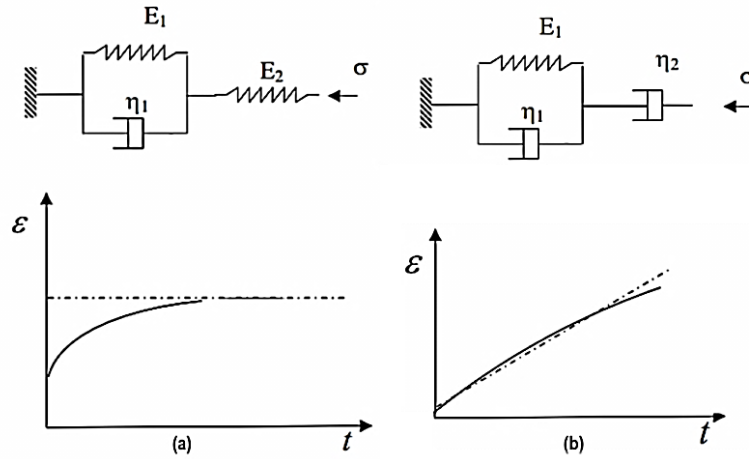


Figura 2-16 Modelo Generalizado de Kelvin (a) Elementos sólidos (b) Elemento fluido. (Modificado de Cavalcante 2012).

Utilizando o mesmo raciocínio dos itens anteriores e admitindo que a tensão seja constante no tempo $\sigma = \sigma_c$ é possível encontrar as equações para as generalizações do modelo de Kelvin:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_1} + \frac{\sigma_c}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} \cdot t\right) \right] \quad (2.19)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right] + \frac{\sigma_c}{\eta_1} \cdot t \quad (2.20)$$

É preciso lembrar que a Equação 2.19 permite descrever a deformação instantânea e a fase transiente do comportamento de fluência, mas não a deformação estacionária. De igual modo a Equação 2.20 descreve as deformações transientes e estacionária do comportamento de fluência, mas não pode ajustar a deformação instantânea como é mostrado na Figura 2-16 (a) e (b).

- **Modelo de Burgers**

O modelo de quatro parâmetros (ou modelo de Burgers) consiste na associação em série do modelo de Kelvin e o modelo de Maxwell, conforme é mostrado na Figura 2-17.

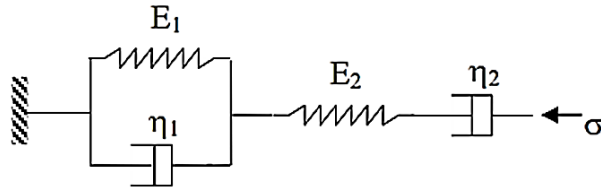


Figura 2-17 Modelo de Burgers. (Cavalcante, 2012)

A deformação total do sistema (modelo de Burgers) é dada pela soma das deformações do modelo de Kelvin e o modelo de Maxwell do seguinte modo:

$$\varepsilon = \varepsilon_K + \varepsilon_M \quad (2.21)$$

A tensão atuante na entrada de cada um dos dois modelos é a mesma

$$\sigma = \sigma_K = \sigma_M \quad (2.22)$$

Com isso é possível substituir as equações constitutivas de Maxwell, Equação 2.15 e de Kelvin, Equação 2.18, na equação de deformação total do sistema, Equação 2.21, junto com a equação de tensão atuante de entrada, Equação 2.22 é possível chegar à equação constitutiva para o modelo de Burgers:

$$\eta_1 \ddot{\varepsilon} + E_1 \dot{\varepsilon} = \left(\frac{\eta_1}{E_2} \right) \ddot{\sigma} + \left[1 + \frac{E_1}{E_2} + \frac{\eta_1}{\eta_2} \right] \dot{\sigma} + \left(\frac{E_1}{\eta_2} \right) \sigma \quad (2.23)$$

Para uma tensão constante $\sigma = \sigma_c$ aplicada, a Equação 2.23 se reduz a:

$$\eta_1 \ddot{\varepsilon} + E_1 \dot{\varepsilon} = \left(\frac{E_1}{\eta_2} \right) \sigma_c \quad (2.24)$$

A solução da Equação diferencial 2.24 tem como resultado:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_2} + \frac{\sigma_c}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} \cdot t \right) \right] + \frac{\sigma_c}{\eta_2} \cdot t \quad (2.25)$$

A representação da Equação 2.25, mostrada na Figura 2-18, constitui o comportamento do modelo de Burgers em um ensaio de fluência, onde é possível observar como o modelo consegue reproduzir a deformação instantânea elástica inicial $\varepsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_2}$, a deformação na fase

de fluência transiente e a deformação na fase de fluência secundária, com uma taxa de deformação constante $\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_c}{\eta_2}$.

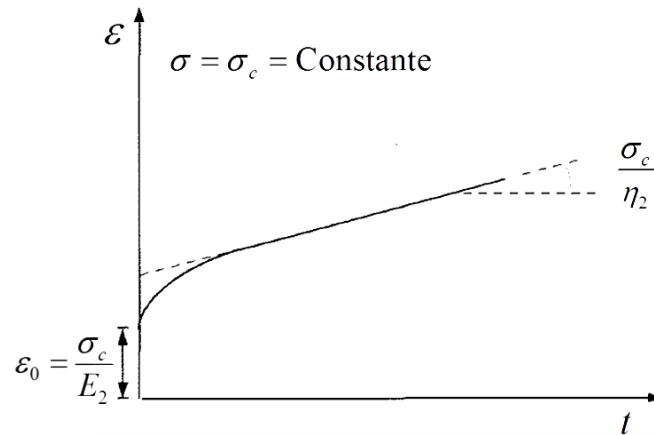


Figura 2-18 Representação do comportamento de fluência por meio do modelo de Burgers. (Modificado de Gravina 1997).

Entre os modelos reológicos vistos, o modelo de Burgers é aquele que reúne todas as características básicas encontradas, de maneira geral nos materiais com comportamento viscoelástico. Costa (1984) afirma que o modelo de Burgers é o mais representativo das curvas experimentais obtidas em ensaios de laboratoriais realizados sobre corpos de prova dos evaporitos. No entanto o modelo apresenta um inconveniente ao tentar-se ajustar sua equação matemática as curvas experimentais, uma vez que é necessária a fase de descarregamento durante a execução dos ensaios para isolar corretamente os parâmetros da equação.

- **Modelo reológico elaborado de rochas salinas**

O modelo reológico apresentado por Dusseault & Mraz (1987) apud Dusseault & Fordham (1993) apresentado na Figura 2-19 é utilizado para representar o comportamento geral de fluência em rochas evaporíticas. Este modelo inclui as fases de deformação elástica instantânea, fluência primária, fluência secundária e recuperação, e retomada com ciclos de carga e descarga.

De acordo com Cavalcante (2012) é fácil perceber que à medida que a combinação de modelos se torna mais complexas, a quantidade de parâmetros aumenta de modo a dificultar o estudo.

Goodman (1989) afirma que muitos modelos podem ser invocados por meio da adição de molas e amortecedores, mas o modelo de Burgers será suficiente e preferível para descrever o

comportamento de fluência em rochas com este tipo de características, em muitas situações práticas.

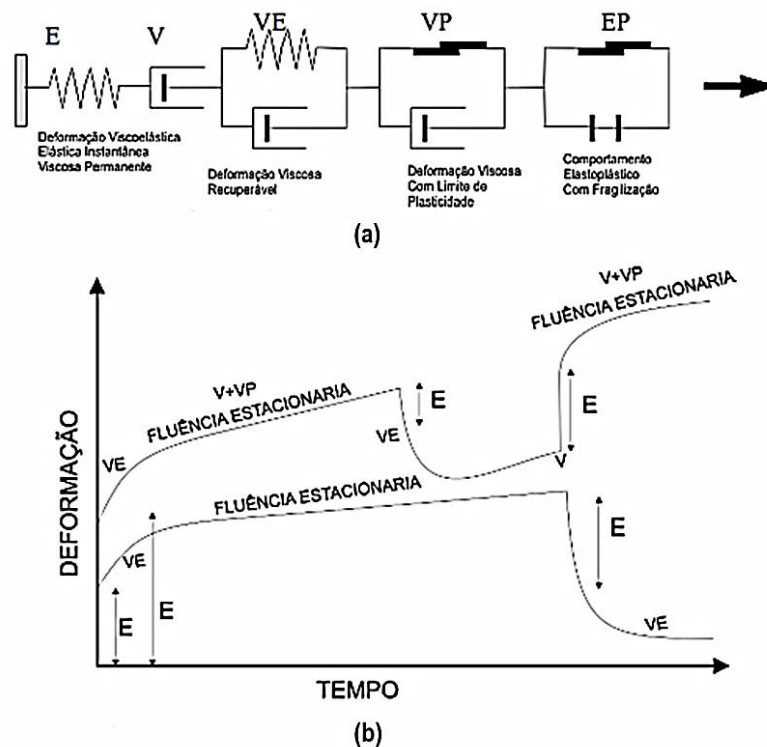


Figura 2-19 Modelo reológico utilizado para representar o comportamento geral de fluência em rochas evaporíticas (a) Associação de elementos para formação do modelo (b) Gráfico de comportamento de deformação-tempo ($\epsilon - t$). (Modificado de Cavalcante 2012).

2.6.3- MODELOS BASEADOS EM LEIS FÍSICAS

A partir do início da década de 90, leis constitutivas de fluência, baseadas em mecanismos de deformação, passaram a ser recomendadas pela literatura técnica internacional, por representar o comportamento intrínseco do material Munson & Devries (1991), Munson (1997) apud Costa & Poiate (2008). Estes modelos baseados em processos físicos geralmente são associados à fase estacionária de fluência e surgiram com objetivo de representar o comportamento dos evaporitos baseados em mecanismos de interação por meio de certos intervalos de tensões, de estado de deformação, de taxa de deformação, de temperatura e de microestrutura formadora da rocha (Cavalcante, 2012).

Estudos detalhados sobre as leis de fluência associadas a processos físicos podem ser encontrados nos trabalhos feitos por Munson & Devries (1991); Cella (2003); Costa & Poiate (2008); e Silva (2010). No entanto alguns conceitos serão introduzidos.

No processo de formação das rochas salinas, frequentemente defeitos e imperfeições nos retículos cristalinos são desenvolvidos, resultando em zonas de fraqueza que controlam o mecanismo de deformação através de deslocamentos nesses defeitos cristalinos. Esses mecanismos consistem, em essência, na redistribuição de átomos na estrutura cristalina, em busca do equilíbrio ótimo das forças interatômicas, perturbadas originalmente pela presença dos defeitos, imperfeições ou assimetrias no retículo cristalino. A migração dos átomos provoca uma reorganização na estrutura cristalina que envolve a mudança da forma dos cristais e progressivamente dos agregados granulares da rocha salina (Cella, 2003).

A estrutura cristalina de um sólido contém imperfeições no arranjo atômico ao longo de uma aresta ou de um plano do retículo que são denominadas de discordância (*Dislocation*). Essas distorções deformam o arranjo atômico planar típico do cristal, gerando forças atômicas localizadas muito elevadas na estrutura do cristal.

Quando a resistência da ligação atômica é superada sob tensão, o equilíbrio interatômico é rompido, e a discordância se propaga como uma frente de deslocamento, inicialmente através de compensações atômicas planares por deslizamento (*Glide*), até que se atinja um novo estado de imbricamento e a criação de novas interfaces subgranulares. Se essa imbricação não é superada, há tendência de desaceleração contínua da fluência, conhecida como *Hardening* (endurecimento), até a atenuação completa da deformação ao longo do tempo.

Ocorre, porém, que o estado de imbricamento pode ser superado em certas condições através de movimentação escalonada (*Climb*) de átomos no retículo cristalino, que tende a manter a deformação, num processo conhecido como *Dynamic Recovery* (recuperação dinâmica).

De acordo com Hunsche & Hampel (1999), é do equilíbrio entre o processo de bloqueio das discordâncias (*hardening*) e o de galgamento (*climb*) que a fluência estacionária se estabelece. Segundo os autores, quando os dois processos não estão em equilíbrio, a fluência varia no tempo e a rocha encontra-se no regime transiente

A fluência, portanto, é causada por diferentes mecanismos físicos correlacionados a estrutura interna dos agregados policristalinos e às variáveis de estado como a pressão e temperatura. Na atualidade são estudados três mecanismos básicos: *Dislocation glide*, *Dislocation Climb* e um mecanismo indefinido.

- **Mecanismo *Dislocation Climb***

Controlado pelo fenômeno de ativação térmica, oscilação de átomos em torno de uma posição de equilíbrio devido ao aumento de da temperatura de um corpo sólido. Simultaneamente a esse processo, ocorre também a redistribuição molecular da estrutura do material, que provoca o aumento da capacidade de fluência. Sendo assim, quanto maior a temperatura a que o material está submetido, maior será a velocidade de fluência para um determinado estado de tensão.

A expressão para o mecanismo *Dislocation Climb* mais comumente encontrada para descrever a velocidade de deformação por fluência em estado estacionário é apresentada a seguir:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A_1 \left(\frac{\sigma}{G} \right)^{n_1} e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (2.26)$$

Sendo, $\dot{\epsilon}_{ss}$ a taxa de deformação por fluência na condição de regime permanente, A_1 e n_1 constantes, σ é a tensão desviatória, G o módulo de cisalhamento, Q a energia de ativação, R a constante universal dos gases, T a temperatura absoluta.

- **Mecanismo *Dislocation Glide***

O mecanismo *Dislocation Glide* se relaciona à fluência estacionária quando o corpo está submetido a elevados níveis de tensão. Esse modelo é caracterizado pela superposição de vários mecanismos de deslizamentos durante o processo de fluência.

Com base em Munson & Devries (1991) este mecanismo pode ser representado por uma função seno-hiperbólica do nível de tensão desviadora aliada a fatores de ativação térmica como é apresentado na seguinte equação:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = |H| \cdot \left(B_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} + B_2 e^{-\frac{Q_2}{RT}} \right) \sinh \left(\frac{q(\sigma - \sigma_0)}{G} \right) \quad (2.27)$$

Sendo, $\dot{\epsilon}_{ss}$ a taxa de deformação por fluência na condição de regime permanente, H a função degrau de Heaviside, σ é a tensão desviatória, σ_0 tensão desviadora de referência, G o módulo de cisalhamento, Q a energia de ativação, R a constante universal dos gases, T a temperatura absoluta e B_1 , B_2 e q constantes.

- **Mecanismo indefinido**

O mecanismo indefinido é assim denominado por não estar associado a nenhum modelo micromecânico, mas pode ser explicitamente definido baseado em ensaios de laboratório e apresenta a mesma expressão matemática do mecanismo *Dislocation Climb*:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A_2 \left(\frac{\sigma}{G} \right)^{n_2} e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (2.28)$$

A velocidade de deformação por fluência em estado estacionário é controlada por este mecanismo em situações de baixa temperatura e baixo regime de fluência

- **Mecanismo duplo de deformação**

Cella (2003) afirma que a equação correspondente à lei de fluência de mecanismo duplo de deformação utilizada na prática constitui uma simplificação das equações propostas por Munson & Devries e originalmente abrange os mecanismos de fluência *Dislocation Glide* e Mecanismo Indefinido, mas recentemente identificado como sendo fluência nos contatos dos grãos de halita, provocada por dissolução, em função do aumento da solubilidade do sal as altas pressões que atuam nos contatos entre os grãos. É o dominado de *Pressure Solution*.

A equação constitutiva de fluência estacionária de mecanismo duplo de deformação é dada por:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = \dot{\epsilon}_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n \exp \left[\frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT} \right] \quad (2.29)$$

Sendo, $\dot{\epsilon}_{ss}$ taxa de deformação por fluência em estado estacionário, $\dot{\epsilon}_0$ a taxa de deformação por fluência de referência, σ_{ef} tensão efetiva de fluência, σ_0 tensão efetiva de referência, Q energia de ativação (para a halita $Q=12Kcal/mol$), R constante universal dos gases ($R=1,9858E-3Kcal/mol \cdot K$), T_0 temperatura de referência [K], T temperatura absoluta da rocha na profundidade em estudo [K], n coeficiente que depende do nível de tensões aplicadas:

$$\begin{aligned} n_1 : \sigma_{ef} &\leq \sigma_0 \\ n_2 : \sigma_{ef} &\geq \sigma_0 \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.7- FLUÊNCIA SOB TENSÃO VARIÁVEL COM O TEMPO

Enquanto as hipóteses de fluência secundária são adequadas a muitos problemas práticos, existem casos em que esta hipótese não é suficiente, afirma Costa (1984). Quando o estado de tensão varia com o tempo, tal como na redistribuição das tensões em estruturas sujeitas ao fenômeno de fluência, o estágio inicial da curva de fluência é muito importante.

O procedimento para simular a evolução real com o tempo das deformações nas estruturas pode tornar-se complicado. Esta condição pode ser ilustrada por um caso simples de um ensaio de compressão uniaxial, onde são aplicados dois níveis de tensão σ_1 e σ_2 . A Figura 2-20 ilustra as curvas típicas de fluência quando o corpo de prova é submetido somente a cada um dos níveis de tensão.

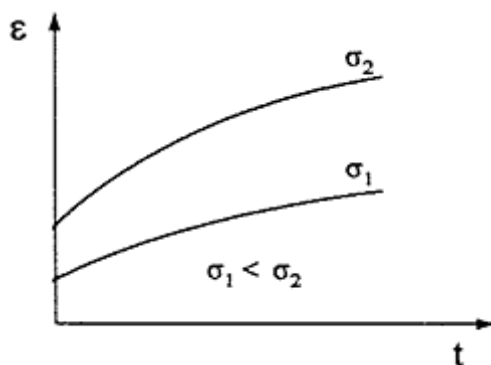


Figura 2-20 Curvas de fluência para um corpo de prova submetido a dois níveis de tensões σ_1 e σ_2 . (Gravina, 1997).

O questionamento é como poderiam ser representadas as condições onde o corpo de prova é submetido à tensão σ_1 durante um intervalo de tempo t_1 e após este intervalo de tempo submetido à tensão σ_2 , como é apresentado na Figura 2-21.

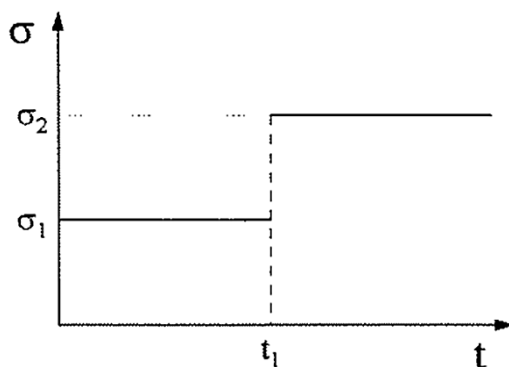


Figura 2-21 Tensões aplicadas num corpo de prova para diferentes intervalos de tempo. (Gravina, 1997).

Diferentes autores, entre os quais é possível destacar a Costa (1984) afixam isso como uma questão difícil, desde que o comportamento do material do corpo de prova quando é submetido à tensão σ_2 dependerá das mudanças estruturais que tomaram lugar no material, durante a história de deformações precedentes. Em outras palavras, o comportamento do material dependerá das condições atuais de carregamento e, também, da sua história de carregamento.

Por outro lado, o comportamento dos evaporitos, onde diferentes níveis de tensão aplicada conferem diferentes contornos às curvas de fluência, e para o mesmo nível de tensão têm-se curvas distintas para o ensaio de fluência e para o ensaio de recuperação de deformações o que torna o material nitidamente não linear, invalidando a utilização do princípio de superposição.

Na literatura pesquisada aparecem dois artifícios habituais empregados na previsão das deformações por fluência de um corpo sólido sujeito a variação contínua, no tempo, das variáveis tensão e temperatura. Tais métodos são chamados de *Time Hardening* (endurecimento por tempo transcorrido) e *Strain Hardening* (Endurecimento por deformação).

A diferença entre os dois métodos reside na forma como as taxas de deformação por fluência, obtidas de qualquer uma das equações constitutivas dos modelos vistos no item 2.6- são integradas no tempo.

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) dt \quad (2.31)$$

De forma semelhante ao considerado por Costa (1984) toma-se a equação da lei potencial, Equação 2.3, desenvolvida por Lomenick (1971). No caso do método *Time Hardening* a velocidade de formação $d\varepsilon/dt$ é obtida diretamente pela diferenciação da equação em relação ao tempo do seguinte modo:

$$\dot{\varepsilon}_t = k \sigma^c b t^{b-1} T^a \quad (2.32)$$

Sendo $\dot{\varepsilon}_t$ a taxa de deformação por fluência primária.

Neste método a velocidade de deformação por fluência em um instante t qualquer depende dos valores atualizados das variáveis de estado naquele instante. Este modelo é aconselhável

para prever deformações em longos períodos de tempo, nos quais o estado de tensões não varia muito rapidamente neste período.

Por outro lado, no caso do método de integração *Strain Hardening* a velocidade de deformação é função da deformação por fluência acumulada até o instante considerado:

$$\begin{aligned}\varepsilon_t &= k\sigma^c t^b T^a \Rightarrow \\ t &= \left(\frac{\varepsilon_t}{k\sigma^c T^a} \right)^{\frac{1}{b}}\end{aligned}\quad (2.33)$$

Substituindo a Equação 2.33 na Equação 2.32:

$$\dot{\varepsilon}_t = bk\sigma^c T^a \left(\frac{\varepsilon_t}{k\sigma^c T^a} \right)^{\left(1-\frac{1}{b}\right)}\quad (2.34)$$

Após algum algebrismo chega-se à equação da velocidade de fluência derivado do modelo de potência, característica do método de integração *Strain Hardening*. Este método é aconselhável para prever deformações em que o estado de tensão varia no período de tempo analisado.

$$\dot{\varepsilon}_t = b \left[k\sigma^c T^a (\varepsilon_t)^{b-1} \right]^{\frac{1}{b}}\quad (2.35)$$

As teorias mencionadas acima têm sido amplamente utilizadas na previsão das deformações por fluência. No entanto, na literatura pesquisada diferentes autores ressaltam que ao observar os testes de fluência muitas vezes o método *Strain Hardening* produz melhor concordância com os resultados de ensaios reais sob tensão variável quando comparado com o método *Time Hardening*. Apesar disso, este último vem sendo mais utilizado por causa da sua simplicidade matemática.

As diferenças entre estes dois métodos de integração são apresentadas esquematicamente na Figura 2-22. Nela é possível observar as trajetórias da deformação por fluência que ocorrem num corpo sólido ao aplicar durante um intervalo de tempo t_1 uma tensão σ_1 e depois uma tensão σ_2 . As mudanças que acontecem na curva de fluência podem ser notadas a partir do ponto A.

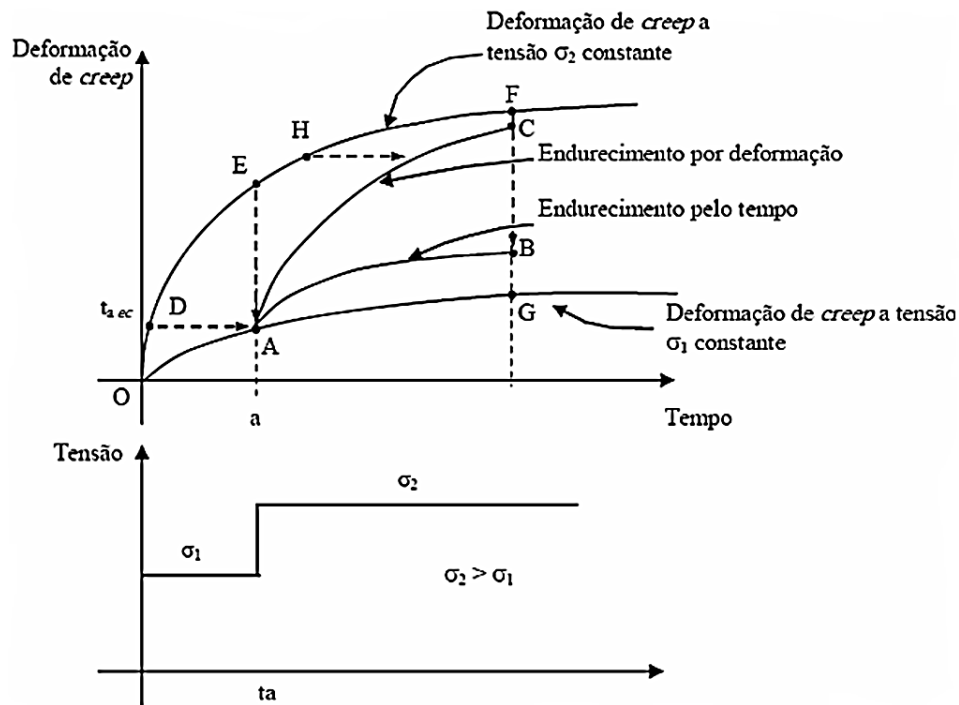


Figura 2-22 Evolução das deformações por fluência segundo os métodos de integração Time Hardening e Strain Hardening para um corpo de prova submetido às tensões σ_1 e σ_2 . (Oliveira, 2004).

2.8- EXPANSÃO DAS FORMULAÇÕES UNIAXIAL PARA MULTIAXIAL

Em conformidade com Gravina (1997) no desenvolvimento de uma formulação tridimensional consistente, baseada nos modelos matemáticos uniaxiais, dois aspectos fundamentais devem ser considerados: o princípio da objetividade e a representação adequada dos casos particulares.

O princípio da objetividade é a exigência imposta às equações constitutivas para que elas traduzam propriedades intrínsecas dos materiais que representam, ou seja, propriedades que independam do referencial adotado para observá-las. A formulação tridimensional das equações constitutivas unidimensionais se faz, portanto, sob a forma de invariantes de tensão e deformação.

A formulação tridimensional deve ainda representar adequadamente o caso particular unidimensional. Neste caso, tal formulação simplifica-se para a equação constitutiva unidimensional original, que é a condição existente nos testes de laboratório durante a calibração dos modelos unidimensionais.

Na expansão das teorias de fluência unidimensionais para a multiaxial, algumas hipóteses sobre o comportamento do material (evaporito) devem ser assumidas:

- Isotropia
- Existências de coaxialidade entre o tensor de velocidade de deformação por fluência $\dot{\varepsilon}_{ij}$ e o tensor de tensões desviatórias S_{ij} , ou seja, para um instante t qualquer, é válida a relação apresentada na seguinte equação:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = k S_{ij} \quad (2.36)$$

A notação indicial para a Equação 2.36 indica que ela é válida para todos os componentes dos tensores envolvidos. A grandeza k é o fator de proporcionalidade.

- A fluência não altera o volume do corpo deformado, ou seja, a deformação volumétrica de fluência é igual a zero como dado por:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \Rightarrow \dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y + \dot{\varepsilon}_z = 0 \quad (2.37)$$

- A fluência é causada apenas pelas tensões desviatórias, a deformação por fluência altera a forma, mas não o volume do corpo, a velocidade de deformação por fluência independe da tensão hidrostática.

Para que se possa determinar o fator de proporcionalidade k , é necessário definir a tensão de Von Mises ou tensão efetiva σ_e , que é utilizada para prever comportamentos sob carregamentos triaxiais a partir de ensaios uniaxiais, o que é representada por:

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} \quad (2.38)$$

J_2 é o segundo invariante do tensor de tensões, que pode ser expresso por:

$$J_2 = \frac{S_{ij}S_{ji}}{2} \quad (2.39)$$

E o segundo invariante do tensor desviador de tensões pode ser representado por:

$$J_{2D} = \frac{1}{6} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right] \quad (2.40)$$

Da mesma forma, pode-se definir a taxa de deformação efetiva de fluência pela seguinte equação:

$$\dot{\varepsilon}_e = \sqrt{\frac{4}{3} I_2} \quad (2.41)$$

Em que I_2 é o segundo invariante do tensor taxa de deformação e pode ser expresso por:

$$I_2 = \frac{\dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ji}}{2} \quad (2.42)$$

E o segundo invariante do tensor desviador de taxa de deformação pode ser representado por:

$$I_{2D} = \frac{1}{6} \left[(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y)^2 + (\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_x)^2 + 6(\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2 + \dot{\varepsilon}_{xz}^2) \right] \quad (2.43)$$

Portanto, a tensão efetiva σ_e e a taxa de deformação efetiva de fluência $\dot{\varepsilon}_e$ também podem ser apresentadas como na seguinte equação:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \\ \dot{\varepsilon}_e &= \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\dot{\varepsilon}_x - \dot{\varepsilon}_y)^2 + (\dot{\varepsilon}_y - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_x)^2 + 6(\dot{\varepsilon}_{xy}^2 + \dot{\varepsilon}_{yz}^2 + \dot{\varepsilon}_{xz}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Finalmente os tensores de velocidade de deformação $\dot{\varepsilon}_{ij}$ e as tensões desviatórias S_{ij} podem ser escritos em função da tensão efetiva σ_e e da taxa de deformação efetiva de fluência $\dot{\varepsilon}_e$ como é mostrado na seguinte equação:

$$\begin{aligned} S_{ij} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_e \\ \dot{\varepsilon}_{ij} &= \sqrt{\frac{3}{2}} \dot{\varepsilon}_e \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.9- EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DE FLUÊNCIA NO ABAQUS

A solução de problemas estruturais complexos, os quais podem envolver geometrias complicadas, condições de contorno variáveis no tempo e materiais cujo comportamento mecânico é função de diversos parâmetros vem sendo feita nos últimos anos com ajuda de ferramentas numéricas. Dentre as diversas ferramentas numéricas disponíveis para a solução deste tipo de problemas, o método dos elementos finitos (MEF) tem grande destaque.

Softwares de elementos finitos como Abaqus-6.10 (2010) são empregados para a modelagem de diversos tipos de materiais e simulação numérica de seu comportamento. Este programa vem sendo cada vez mais popular e de uso frequente, devido, principalmente, à grande disponibilidade de modelos constitutivos.

Para o estudo do fenômeno da fluência nos materiais o *Abaqus* apresenta um modelo de comportamento denominado de *creep* o qual pode ser encontrado na forma de duas leis fundamentais: potencial e seno-hiperbólica. Estas duas leis são usadas para modelar a fluência de um material nos estágios transiente e ou estacionário, além destas duas leis o *Abaqus* também permite que outros modelos de fluência sejam inseridos pelo usuário. (Abaqus-6.10, 2010).

2.9.1- LEI POTENCIAL - *POWER LAW MODEL*

O modelo constitutivo de fluência potencial empírico é chamada de *power law model* pelo programa e pode ser encontrada em duas versões de integração: *Time Hardening* e *Strain Hardening* debatidas no item 2.7-.

- **Teoria de endurecimento por tempo transcorrido *Time Hardening***

A equação abaixo expõe a forma como o *Abaqus* calcula a taxa de deformações por fluência equivalente para a versão *time-hardening*

$$\dot{\epsilon}_e = A\sigma_e^n t^m \quad (2.46)$$

sendo $\dot{\epsilon}_e$ é a taxa de deformações por fluência efetiva e σ_e a tensão desviadora efetiva uniaxial, ambos apresentados na Equação 2.44, A , n e m são as constantes empíricas definidas a partir de um ajuste paramétrico em função da tensão, tempo, temperatura e tipo de material ensaiado.

Devem-se fazer os seguintes esclarecimentos: σ_e é a tensão equivalente de von Mises ou a tensão anisotrópica desviadora de Hill, a depender, respectivamente, se o comportamento de *creep* é definido como isotrópico ou como anisotrópico. Por razões físicas, as constantes A e n devem ser positivas e $-1 < m < 0$.

A notação apresentada neste item é a utilizada pelo software, onde a constante A depende diretamente da temperatura, da constante potencial do tempo b e da constante k da seguinte

maneira: $A = kbT^a$. Esta estratégia permite considerar a dependência da taxa de deformação com o efeito da temperatura. As constantes m e n seriam $m=b-1$ e $n=c$ quando vai se referir à equação genérica proposta por Lomenick (1971).

- **Teoria do endurecimento por deformação *Strain Hardening***

No *Abaqus*, para esta versão, a equação de taxa de deformação por fluência, assim como na teoria *time-hardening* é semelhante à formulação do Item 2.7- e para as notações utilizadas pelo *Abaqus* será demonstrado a seguir:

Integrando-se a Equação 2.46 em função do tempo obtém-se:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_e &= A\sigma_e^n t^m \Rightarrow \\ \varepsilon_e &= \frac{A\sigma_e^n t^{m+1}}{m+1}\end{aligned}\quad (2.47)$$

Isola-se o tempo t da Equação 2.47:

$$t = \left(\frac{\varepsilon_e (m+1)}{A\sigma_e^n} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (2.48)$$

Ao substituir a Equação 2.48 na Equação 2.47, se resulta a seguinte expressão proposta pelo *Abaqus*:

$$\dot{\varepsilon}_e = \left(A\sigma_e^n [(m+1)\varepsilon_e]^m \right)^{\frac{1}{m+1}} \quad (2.49)$$

A depender do sistema de unidades escolhido para cada forma da lei potencial, o valor do parâmetro A pode ser muito pequeno para as taxas de deformação por fluência típicas, por isso o manual do programa recomenda que o valor de A seja maior que 10^{-27} evitando assim erros numéricos.

2.9.2- LEI SENO-HIPERBÓLICA - HYPERBOLIC-SINE LAW MODEL

A lei seno-hiperbólico pode simular o comportamento estacionário de fluência, que leva em conta o efeito do gradiente de temperatura em sua equação matemática, portanto a mesma pode ser indicada em situações em que a taxa de deformação está diretamente ligada à

temperatura. Esta lei é fundamentada no modelo constitutivo de fluência baseado em leis físicas, nos mecanismos *Dislocation Climb* e *Dislocation Glide*.

A equação abaixo apresenta o modo como o *Abaqus* determina a taxa de deformação por fluência equivalente para esta lei:

$$\dot{\varepsilon}_e = A(\sinh B\sigma_e)^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{R(\theta - \theta^z)}\right) \quad (50)$$

sendo, θ a temperatura, θ^z o valor de temperatura definido pelo usuário como zero absoluto, ΔH energia de ativação, R constante universal de gases, A , B e n constantes do material.

Por se tratar de um modelo que inclui a dependência da temperatura em sua equação, os parâmetros ΔH , R , A , B e n não podem ser definidos em função da temperatura.

Assim como para o modelo potencial neste caso o manual do programa recomenda que o valor de A seja maior a 10^{-27} , lembrando que no caso em que este parâmetro seja menor que o valor sugerido, a solução pode deixar de convergir e então será necessário adotar um novo sistema de unidades de modo a evitar tais impasses no cálculo das taxas de deformação.

3- VALIDAÇÃO DO USO DO PROGRAMA ABAQUS

Antes da utilização de qualquer um programa, seja de elementos finitos ou não, deve-se fazer sua validação com o objetivo de verificar que os valores encontrados estão de acordo com as equações matemáticas que descrevem o problema ilustrado. Além disso, este capítulo tem como propósito a familiarização com o software.

3.1- FORMULAÇÃO ELÁSTICA

Para a validação do uso do software *Abaqus* na fase elástica foi utilizado, como exemplo, a perfuração de um poço de petróleo com 0,31 m (12¼") de diâmetro numa seção em 2D (duas dimensões) situada num maciço evaporítico composto principalmente por Halita. A profundidade de estudo foi 3.500 m abaixo do nível do mar, considerando algumas características da estratigrafia típica da Bacia de Santos. O modelo através do qual foram verificados os deslocamentos e as tensões radiais e tangenciais corresponde a um modelo Plano de Deformação.

Na determinação das tensões in situ tendo como base a profundidade de estudo é considerado que a tensão horizontal inicial σ_H tem o mesmo valor que a tensão vertical σ_v . Além disso, o módulo de elasticidade (E) é constante em toda camada do material, ou seja, o meio é homogêneo e também isotrópico. Os parâmetros elásticos foram adotados da análise do fechamento de um poço apresentada por Poiate et al. (2006) e têm como valor para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson $E=20,4$ GPa e $\nu=0,36$ respectivamente. Esses valores foram obtidos a partir de estudos relacionados ao comportamento mecânico do sal na mina Taquari-Vassouras no Nordeste Brasileiro.

A estratigrafia considerada na simulação numérica foi dividida em três regiões. A primeira corresponde a uma lâmina de água de 2.000 m de espessura com peso específico de $10,18 \text{ kN/m}^3$, a segunda representa um estrato de 1.000 m de espessura composto por rochas sedimentares entre as quais se destacam o Argilito, o Xisto e o Arenito para o qual pode ser considerado um peso específico médio de $22,56 \text{ kN/m}^3$ segundo Poiate et al. (2006) e Costa et al. (2012). Finalmente, para o estrato de Halita de 500 m de espessura foi considerado um peso específico de $21,00 \text{ kN/m}^3$ correspondente aos estudos feitos por Cella (2003) neste material. A Tabela 3-1 apresenta a tensão in situ na profundidade do estudo de caso.

Tabela 3-1 Tensão *in situ* na profundidade de 3500m

Tipo de Material	Profundidade	Peso Específico	Tensão Vertical σ_v
Lâmina de Água	0m a -2000m	10,18 kN/m ³	20,36 MPa
Estrato Sedimentar	-2000m a - 3000m	22,56 kN/m ³	22,56 MPa
Estrato de sal (Halita)	-3000m a - 3500m	21,00 kN/m ³	10,50 MPa
Total tensão vertical σ_v na profundidade de estudo			53,42 MPa

Para realizar a comparação dos resultados da resposta elástica do programa Abaqus, foi utilizada a solução analítica de Kirsch.

3.1.1- SOLUÇÃO CLÁSSICA DE KIRSCH

Conforme Goodman (1989), a solução clássica de Kirsch para os deslocamentos radiais e estado de tensões normais e cisalhantes resultantes da retirada de material, na forma de uma circunferência de raio a , de um meio homogêneo, isotrópico, contínuo e linear elástico para um estado de deformações planas e submetido a um estado de tensões principais iniciais p_1 e p_2 , pode ser representado pelas seguintes equações:

$$\sigma_r = \frac{p_1 + p_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{p_1 - p_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (3.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_1 + p_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p_1 - p_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (3.2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p_1 - p_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (3.3)$$

$$u_r = \frac{p_1 + p_2}{4G} \frac{a^2}{r} + \frac{p_1 - p_2}{4G} \frac{a^2}{r} \left(4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (3.4)$$

$$u_\theta = -\frac{p_1 - p_2}{4G} \frac{a^2}{r} \left(2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad (3.5)$$

sendo, σ_r é a tensão normal efetiva na direção radial, σ_θ é a tensão normal efetiva na direção tangencial, $\tau_{r\theta}$ é a tensão cisalhante no plano $r\theta$, p_1 é a tensão inicial na direção Y, p_2 é a tensão inicial na direção X, u_r é o deslocamento radial, u_θ é o deslocamento tangencial, G é o módulo de cisalhamento do maciço, a raio do poço, r é a distancia a partir do eixo do poço, θ é o ângulo medido no sentido anti-horário do plano YX a partir do eixo Y.

3.1.2- DESCRIÇÃO DO MODELO E A MALHA UTILIZADA

O modelo corresponde a um plano de vinte vezes o raio do poço perfurado, o que perfaz 3,1 m x 3,1 m. Na parte lateral esquerda e inferior são considerados dois apoios do primeiro gênero de modo a impedir os deslocamentos nas direções X e Y, respectivamente. Na superfície do modelo e na lateral direita são aplicadas as tensões de compressão nas direções Y e X, calculadas para a profundidade de 3.500 m abaixo da superfície e correspondentes a $p_1 = p_2 = 53,42MPa$ como mostra a Figura 3-1

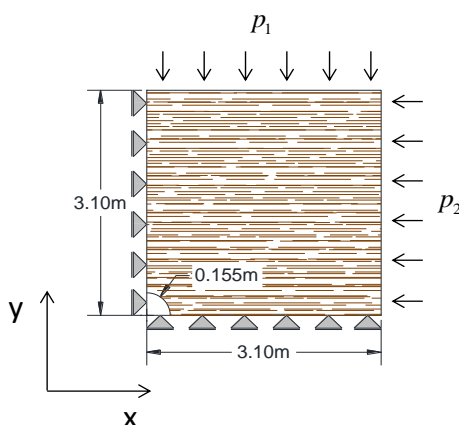


Figura 3-1 Modelo plano de deformação

Foi construída uma malha de elementos finitos em 2D, composta por 294 elementos e 308 nós para simular o comportamento elástico da perfuração do poço de petróleo na camada evaporítica por uma análise de deformação plana. Na Figura 3-2, pode ser vista a representação gráfica da malha de elementos finitos utilizada na comparação dos resultados obtidos de maneira analítica e numérica.

Na construção da malha foram utilizados dois tipos de elementos finitos para simular o estrato de sal, na zona de perfuração assim como no canto superior direito, foram utilizados 24 elementos triangulares lineares de três nós e no resto da malha foram utilizados 270 elementos

quadriláteros lineares de quatro nós os quais são denominados no *Abaqus* por CPE3 e CPE4 respectivamente. Estes elementos foram escolhidos pelas seguintes características:

C: *continuum stress/displacement* meio contínuo em análises de tensão/deslocamento

PE: *plane strain* deformação plana

3 ou 4: número de nós

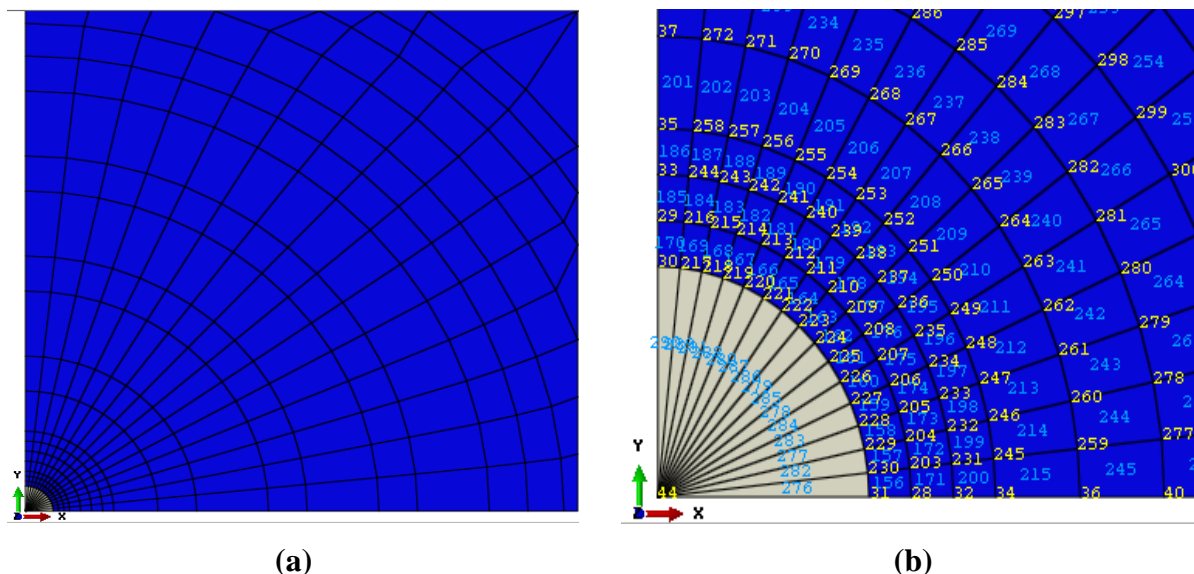


Figura 3-2 Malha de elementos finitos utilizada (a) malha completa (b) zoom na zona da perfuração

3.1.3- PASSOS DE ANÁLISES E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A simulação foi dividida em duas etapas que correspondem a cada passo de análise. Na primeira etapa é feito o uso da função *goestática* do *Abaqus* em que são aplicadas as tensões iniciais como uma força externa e definidas as condições de contorno. Na segunda etapa é feita a simulação da resposta elástica ao desativar os elementos que compõem o poço. Os resultados da simulação, em comparação como a solução clássica de Kirsch, são apresentados nas Figura 3-3 e Figura 3-5.

A Figura 3-3 apresenta as tensões tangenciais e radiais à profundidade de estudo 3.500 m ao longo do eixo X, nela é possível observar que as tensões são maiores na zona próxima ao poço e vão diminuindo até tomar um valor igual à tensão inicial na zona mais longe da perfuração. Por outro lado, as tensões radiais são nulas nas proximidades do poço e tendem do mesmo modo que as tensões tangenciais a um valor igual às tensões iniciais nas posições mais distantes.

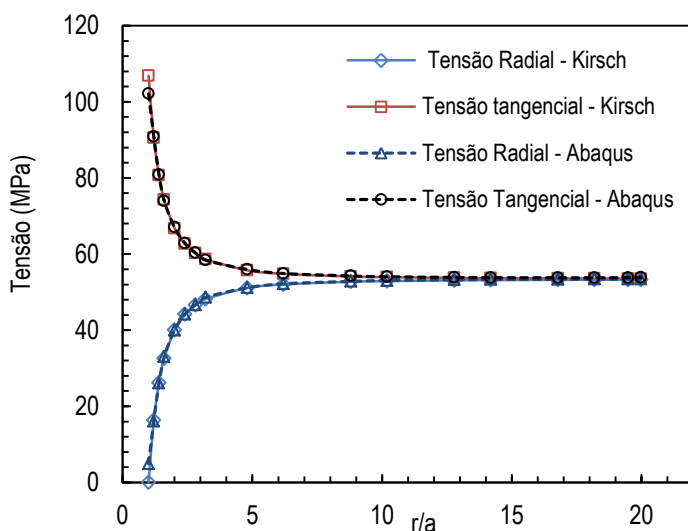


Figura 3-3 Tensões tangenciais e radiais a 3.500m de profundidade

Comparando os resultados para as tensões tangenciais e radiais obtidos com a solução clássica de Kirsch e o *Abaqus*, os erros relativos precisam ser o mais baixo possível. Eles são apresentados na Figura 3-4, onde se pode notar como reduz ao longo do eixo r/a . Além disso, é possível ver que para a tensão tangencial o valor máximo de erro relativo encontrado é de 1,6% para a relação $r/a=1,6$ e a partir de $r/a=2,8$ menor que 1%. Em consequência para a tensão radial ocorre um valor máximo na parede do poço equivalente a 4,4% e menos de 0,5% para os dados restantes.

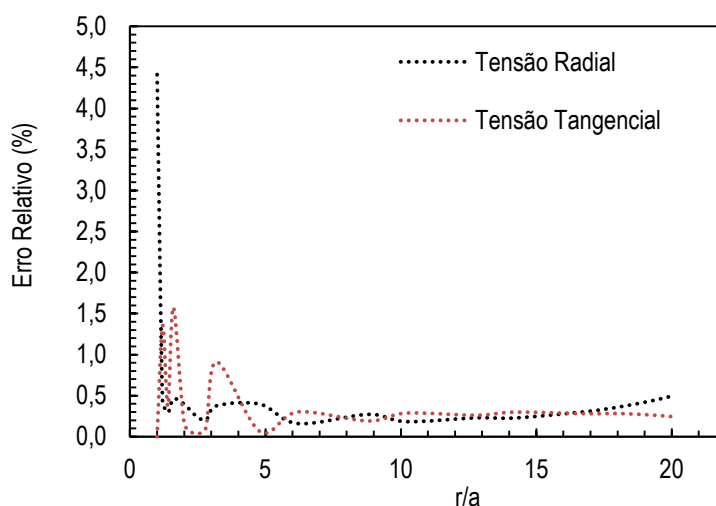


Figura 3-4 Erro relativo ao comparar os resultados para as tensões radiais e tangencias, obtidos com a solução clássica de Kirsch e o *Abaqus*.

Na Figura 3-5 observam-se os deslocamentos tangenciais e radiais na profundidade de estudo a 3.500 m e assim como no caso das tensões foram calculados ao longo do eixo X. O valor de deslocamento tangencial foi constante e igual à zero ao longo de todo o eixo horizontal

enquanto o deslocamento radial alcança seu valor máximo na região próxima à escavação e tende a zero à medida que se afasta desta região.

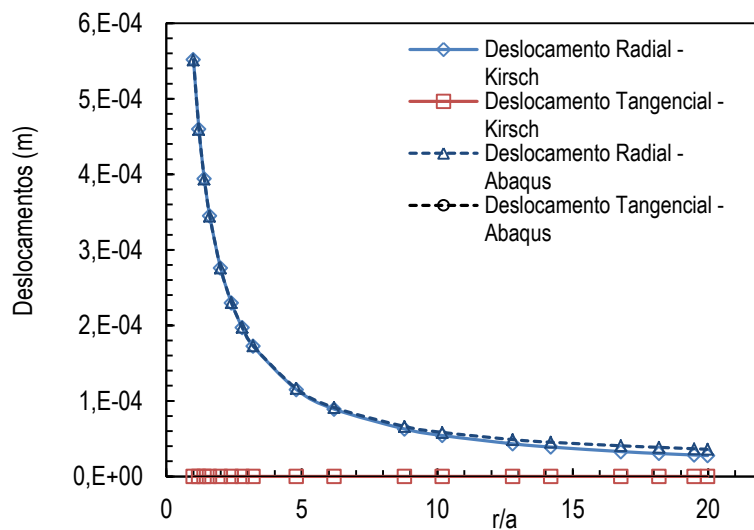


Figura 3-5 Deslocamentos tangenciais e radiais a 3500m

Em relação ao erro relativo máximo calculado entre os resultados de deslocamentos radiais, o mesmo foi de até 30% para um valor de $r=3,1\text{ m}$ esta porcentagem é equivalente a $8,29 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$ de diferença entre as medições; valor considerado pequeno para as magnitudes a ser usadas. Inicialmente o erro relativo calculado é igual ao zero e aumenta à medida que se afasta da parede da escavação, no final da curva pode ser observado como este valor tende a estabilizar-se como é apresentado na Figura 3-6. Para o caso dos deslocamentos tangenciais tanto o erro relativo como os erros absolutos são muito pequenos para serem levados em consideração.

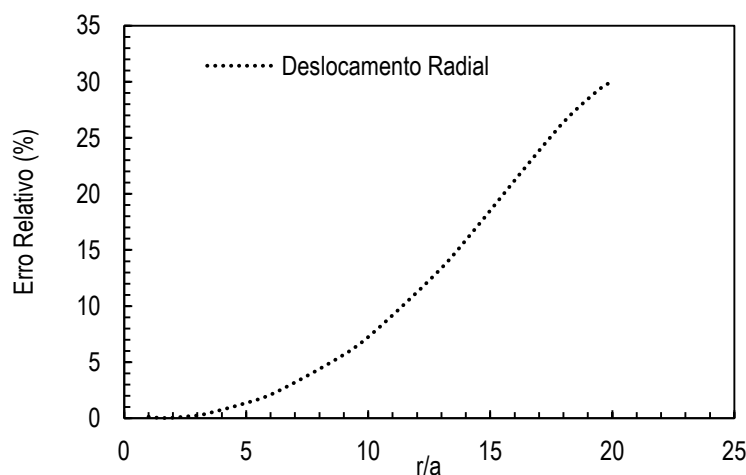


Figura 3-6 Erro relativo ao comparar os resultados para os deslocamentos radiais, obtidos com a solução clássica de Kirsch e o Abaqus.

3.2- FORMULAÇÃO DE FLUÊNCIA

A falta de parâmetros e a dificuldade de obtê-los pode tornar inviável a utilização de um modelo constitutivo. Nos casos práticos, as leis de fluência utilizadas na representação do comportamento de materiais viscoelástico com aplicação aos evaporitos estudadas no Item 2.6-, podem ter uma configuração complexa, difícil de ajustar-se a os dados experimentais. Em virtude disso, dentre dos modelos estudados a lei empírica do modelo de potência foi a escolhida e será utilizada no prosseguir deste trabalho.

Entre as considerações que levaram a esta escolha estão à facilidade do uso do modelo, sua larga utilização na representação do comportamento mecânico de fluência dos evaporitos encontrada na literatura técnica nacional e internacional pesquisada, na qual se afirma que esta lei tem fornecido resultados satisfatórios quando à representatividade da simulação numérica do comportamento de cavidades em minas subterrâneas. Finalmente aos ótimos ajustes às curvas experimentais encontrados por diferentes autores como Starfield & McClain (1973), Hansen & Mellegard (1977) e Costa (1984) entre outros.

Outra razão importante para esta escolha que não deve ser ignorada é a integração do modelo no software de elementos finitos a ser utilizado (*Abaqus*), o que implica uma diminuição no tempo de execução da pesquisa.

Na procura de bons resultados ao representar o comportamento mecânico do sal com a lei empírica de potência, foi considerada necessária à obtenção do maior número possível de informações e dados experimentais sobre o material em questão, buscando assim ajustar e validar melhor o modelo e o software a utilizar.

3.2.1- AJUSTES PARAMÉTRICOS PARA A EQUAÇÃO POTENCIAL

Para a obtenção dos valores dos parâmetros k , a , b , e c que constituem a equação potencial proposta por Lomenick (1971), Equação 3.6, que descreve o comportamento de fluência dos evaporitos na fase transiente, muitos trabalhos foram feitos.

$$\varepsilon_f = k\sigma^c t^b T^a \quad 3.6$$

Nesta seção três trabalhos que têm sido significativos no estudo deste material por meio da lei de potência serão discutidos.

O primeiro deles a ser mencionado corresponde ao estudo feito por Starfield & McClain (1973) no projeto *salt Vault* uma mina de sal na cidade de Lyons, Kansas, Estados Unidos. Nesta investigação foram feitos testes de fluência sob condições de carregamento uniaxial constante. A duração dos ensaios foi de 500 a 1.000 horas, embora alguns ensaios tiveram uma duração de até três anos e meio. Um total de 110 ensaios foi realizado em amostras de diferentes regiões. As tensões axiais impostas foram de 13,79 MPa (2.000psi), 27,58 MPa (4.000 psi), 41,37MPa (6.000 psi), 55,16MPa (8.000 psi) e 68,95MPa (10.000 psi) e temperaturas de 22,5 °C, 60 °C e 100 °C.

A Figura 3-7 apresenta a deformação sob várias combinações de tensão e temperatura, em pilares ensaiados em modelos com uma relação largura/altura de 4 feito de sal estratigraficamente idêntico ao do pilar na área experimental do projeto *Satl Vault*.

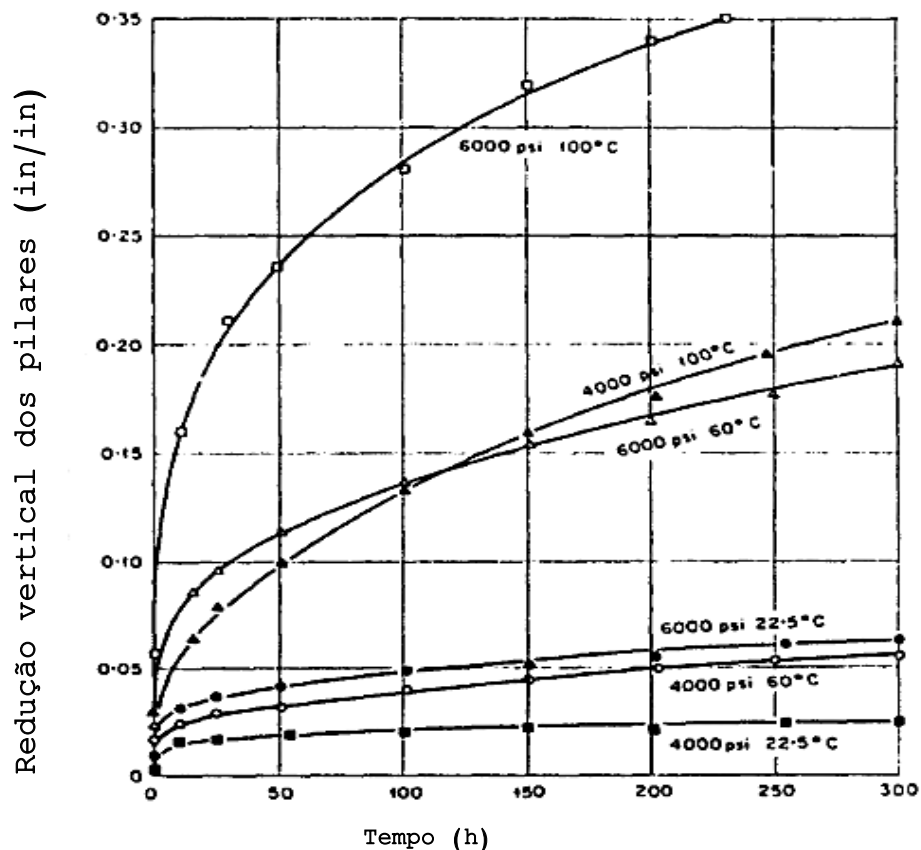


Figura 3-7 Deformação dos pilares na área experimental do projeto Salt Vault sob várias combinações de tensão e temperatura. (Modificado de Starfield & McClain 1973).

Os autores mencionam que todas as curvas têm a mesma forma independente das condições de tensão e temperatura, e da grande diferença na deformação total. Eles também afirmam que esta mesma forma das curvas de deformação foram observada em todos os resultados dos

ensaios, e os dados foram suficientes para permitir a redução das várias curvas para uma única expressão algébrica expressa pela seguinte equação:

$$\varepsilon = 1,3 \cdot 10^{-37} t^{0,3} T^{9,5} \sigma^{3,0} \quad (3.7)$$

sendo, ε a deformação acumulada (adimensional) após a remoção dos dois primeiros minutos de deformação, t tempo [h], T a temperatura absoluta [K], σ a tensão média [psi].

O segundo trabalho corresponde o relatório feito por Hansen & Mellegard (1977) como resumo dos resultados obtidos a partir de uma série de ensaios de fluência triaxiais em amostras de sal recuperadas de uma profundidade média de 2.640 m no sudoeste do Novo Mexico (EUA). O objetivo destes ensaios foi determinar as características do comportamento dependente do tempo do sal sob condições de tensão e temperatura elevadas.

Os ensaios foram feitos para diferentes níveis de tensão axial num intervalo de 10,34MPa (1.500 psi) a 41,37 MPa (6000 psi) e tensão de confinamento de zero a 20,68 MPa (3000 psi). As temperaturas utilizadas foram de 24 °C, 70 °C e 100 °C e a duração dos testes de 15 min até 500 horas. No total foram quatorze corpos de prova ensaiados.

O ajuste paramétrico encontrado para a equação potencial por estes autores é apresentado na seguinte equação:

$$\varepsilon = 1,1 \cdot 10^{-35} t^{0,4656} \sigma^{2,475} T^{8,969} \quad (3.8)$$

sendo, ε a deformação por fluência, t tempo [h], T a temperatura absoluta [K], σ a tensão média [psi]. Como observação os autores dizem que a Equação 3.7 se ajusta melhor aos ensaios com 20,68 MPa (3.000 psi) de tensão desviatória e temperatura de 100 °C, porque a maior parte deste ensaio corresponde à fase de fluência primária que é bem modelada com a equação da lei potencial.

Finalmente para o Brasil deve ser mencionado o trabalho feito por Costa (1984). Ele fez ensaios de fluência uniaxiais e de fluência confinada ou triaxial e obteve alguns parâmetros para a equação da lei potencial. Os ensaios foram realizados em diferentes tipos de rochas evaporíticas extraídas da Mina de Taquari-Vassouras, como taquidrita, silvinita, halita e carnalita em diferentes temperaturas (23 °C, 33 °C, e 43 °C). Os ensaios de fluência confinada ou triaxial foram aplicados somente sobre amostras de taquidrita, devido à baixa resistência

mecânica das amostras e sua granulometria. Os ensaios eram considerados encerrados quando não se observava aumento na velocidade de deformação específica estabelecida em $d\varepsilon/dt = 10^{-4} / \text{dia}$. Esse valor era observado, no mínimo, por dez dias. No entanto as curvas médias de deformação por fluência correspondente aos ensaios feitos apresentadas pelo autor têm uma duração aproximada de 70 dias.

Para a determinação dos parâmetros de fluência Costa (1984) calculou as curvas médias de deformação por fluência, obtendo uma curva interpolada segundo a equação $\varepsilon = Ct^\gamma$. Para determinação das constantes C e γ foi subtraída da deformação total registrada, a parcela elástica. O autor afirma que no caso dos evaporitos é, praticamente, impossível separar a deformação inicial instantânea da deformação total e ao verificar a influência dessa parcela nos valores das constantes C e γ não foi encontrada uma forte sensibilidade. Dado isso foram fixados dois valores constantes para a parcela elástica de deformação um deles é $\varepsilon_{elástica} = \varepsilon_0$ e outro $\varepsilon_{elástica} = \varepsilon_0/3$ onde ε_0 corresponde à deformação ocorrida durante a fase de carregamento do corpo de prova.

A equação utilizada neste trabalho para o ajuste de parâmetros foi:

$$\varepsilon = \varepsilon_{elástica} + A\Delta\sigma^c T^b t^a \quad (3.9)$$

sendo, A , a , b e c constantes obtidas dos ensaios, $\Delta\sigma$ a diferença de tensões, T a temperatura e t o tempo. Em todos os ensaios feitos a tensão desviatória aplicada ao corpo de prova e a temperatura foram quantidades mantidas constantes, logo:

$$\Delta\sigma^c T^b = k \quad (3.10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{elástica} + Akt^a \quad (3.11)$$

Chamando $Ak = C$ o autor chegou à equação básica $\varepsilon = \varepsilon_{elástica} + Ct^\gamma$ utilizada na interpolação das curvas de fluência.

Devido ao razoável número de ensaios de fluência uniaxiais realizados foi possível a compilação estatística dos resultados dos ensaios, obtendo as constantes A , a , b e c ,

representativas do comportamento de fluência de cada grupo litológico. Os resultados obtidos pelo autor são apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2 Ajuste paramétrico obtido por Costa (1984) para diferentes tipos de rochas evaporíticas.

Tipo de Rocha	Equação*	r
Halita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 1,02 \cdot 10^{-14} \Delta\sigma^{2,22} T^{4,68} t^{0,209}$	0,833
	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3} + 2,85 \cdot 10^{-14} \Delta\sigma^{1,99} T^{4,78} t^{0,101}$	0,861
Silvinita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,132 \Delta\sigma^{1,08} t^{0,359}$	0,474
	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3} + 0,234 \Delta\sigma^{1,19} t^{0,254}$	0,502
Taquidrita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 1,57 \cdot 10^{-4} \Delta\sigma^{0,388} T^{1,58} t^{0,218}$	0,386
	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3} + 1,82 \Delta\sigma^{0,527} T^{0,053} t^{0,155}$	0,399
Carnalita fina com pouca halita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 5,394 \sigma^{1,6508} T^{1,58} t^{0,3}$	**
	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,0936 \Delta\sigma^{1,54} T^{0,0085} t^{0,222}$	--
Carnalita fina com muita halita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 2,94 \cdot 10^{-8} \Delta\sigma^{1,50} T^{2,65} t^{0,186}$	0,843
	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3} + 1,07 \cdot 10^{-4} \Delta\sigma^{1,51} T^{1,33} t^{0,114}$	0,871
Carnalita grosseira com pouca halita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 4,09 \cdot 10^{-6} \Delta\sigma^{1,37} T^{1,84} t^{0,77}$	0,738
	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3} + 6,71 \cdot 10^{-11} \Delta\sigma^{1,51} T^{3,82} t^{0,116}$	0,818
Carnalita grosseira com muita halita	$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,070 \Delta\sigma^{1,68} t^{0,176}$	0,792
	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3} + 0,153 \Delta\sigma^{1,65} t^{0,103}$	0,0823

* O sistema de unidades utilizado é: $\Delta\sigma$ [MPa], t [dias], T [K], $\varepsilon = \varepsilon \cdot 10^{-3}$

**Equação obtida a partir do ajuste do parâmetro A por meio dos ensaios triaxiais

Em conclusão Costa (1984) fez as seguintes observações:

- A maior influência sobre estas equações se deve à tensão desviatória seguida pelo tempo. O fator temperatura é sempre o menos influente, e muitas vezes, desprezível em relação

aos outros. Este fato, entretanto, não implica que a temperatura não seja uma variável de estado, de influência significativa no fenômeno de fluência dos evaporitos, mas nas análises estatísticas suas variações são pequenas, o que torna isto um parâmetro pouco sensível.

- Apesar do grande esforço humano e computacional empregado na determinação dos coeficientes da equação de fluência, no caso da silvinita e halita, a prática tem demonstrado que os coeficientes que melhor representam o comportamento de fluência in situ de cavidades nesses dois tipos de evaporitos são:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,3303 \cdot 10^{-9} \Delta\sigma^3 t^{0,4} T^{9,5} \quad (3.12)$$

O valor do coeficiente $A = 0,3303 \times 10^{-9}$ restringe-se à temperatura da mina de Taquari-Vassouras de 43°C, $\Delta\sigma$ [tf/mm²], t [horas], T [°C]

- As curvas experimentais servem, como elementos calibradores da constante A, sendo esta calibração realizada através de simulações numéricas do ensaio de fluência.

3.2.2- COMPARAÇÃO DAS EQUAÇÕES ENCONTRADAS COM DADOS DE ENSAIO TRIAXIAIS DE FLUÊNCIA

No item anterior foram descritos os trabalhos feitos por Starfield & McClain (1973), Hansen & Mellegard (1977) e Costa (1984) com o propósito de determinar as constantes paramétricas que constituem a equação empírica potencial. A Tabela 3-3 reúne quatro das cinco equações encontradas por estes autores para descrever o comportamento de fluência da halita.

Algumas observações devem-se fazer sobre estas equações: primeiramente como o objetivo é fazer uma comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes autores, será considera a parcela elástica de deformação proposta por Costa (1984) igual a zero. O sistema de unidades definitivo para todas as equações é: σ [kPa], t [hora], T [K]. A Equação 3.11 não será utilizada nesta comparação pelo o fato do coeficiente A ser vinculado a somente a um valor de temperatura.

Tabela 3-3 Ajuste paramétrico feito por diferentes autores para descrever o comportamento de fluência da halita.

Autor	Equação
Starfield & McClain (1973)	$\varepsilon = 3,963 \cdot 10^{-40} t^{0,3} T^{9,5} \sigma^{3,0}$
Hansen & Mellegard (1977)	$\varepsilon = 9,242 \cdot 10^{-38} t^{0,4656} T^{8,969} \sigma^{2,475}$
Costa (1984)	$\varepsilon = 9,287 \cdot 10^{-27} t^{0,29} T^{4,68} \sigma^{2,22}$
	$\varepsilon = 2,215 \cdot 10^{-23} t^{0,101} T^{4,78} \sigma^{1,99}$

As equações da Tabela 3-3 serão comparadas com os ensaios triaxiais de fluência feitos por Cella (2003). Estes ensaios foram feitos todos na mesma temperatura de 86 °C aproximadamente 359 K; com uma tensão confinante constante de 10 MPa para diferentes níveis de tensões desviatórias. Iniciou-se com uma tensão de 6 MPa com incrementos de 2 MPa, o ensaio final foi feito com uma tensão inicial de 16 MPa e durante a execução do teste a tensão foi aumentada gradualmente até chegar a 17 MPa. Neste último ensaio, observou-se o possível desenvolvimento da fase de fluência terciária ou de ruptura, mas o Cella (2003) não acredita na ocorrência desta, devido a que a tensão desviatória corresponde somente a 45% da tensão de ruptura do corpo de prova, obtido pelo ensaio de compressão simples, ele acredita que este comportamento pode ter sido motivado pela temperatura do ensaio ou a existência de fissuras ou descontinuidades no corpo de prova.

A partir desta série de ensaios o autor pretendia determinar as taxas de deformação em regime estacionário, portanto eles têm diferentes durações, chegando uns deles até 2.700 horas.

A Figura 3-8 apresenta a comparação entre as equações numéricas e os dados experimentais obtido no ensaio triaxial na condição de tensão desviatória de 14 MPa. Este valor de tensão desviatória é o valor para o qual as equações apresentadas na Tabela 3-3 apresentam o melhor ajuste a os dados obtidos de maneira experimental, isto é considerado pelo fato que o ensaio tem uma baixa duração, 270 horas aproximadamente, o que permite considerar que a maior parte da fluência desenvolvida neste tempo corresponde à fase de fluência primária ou transiente.

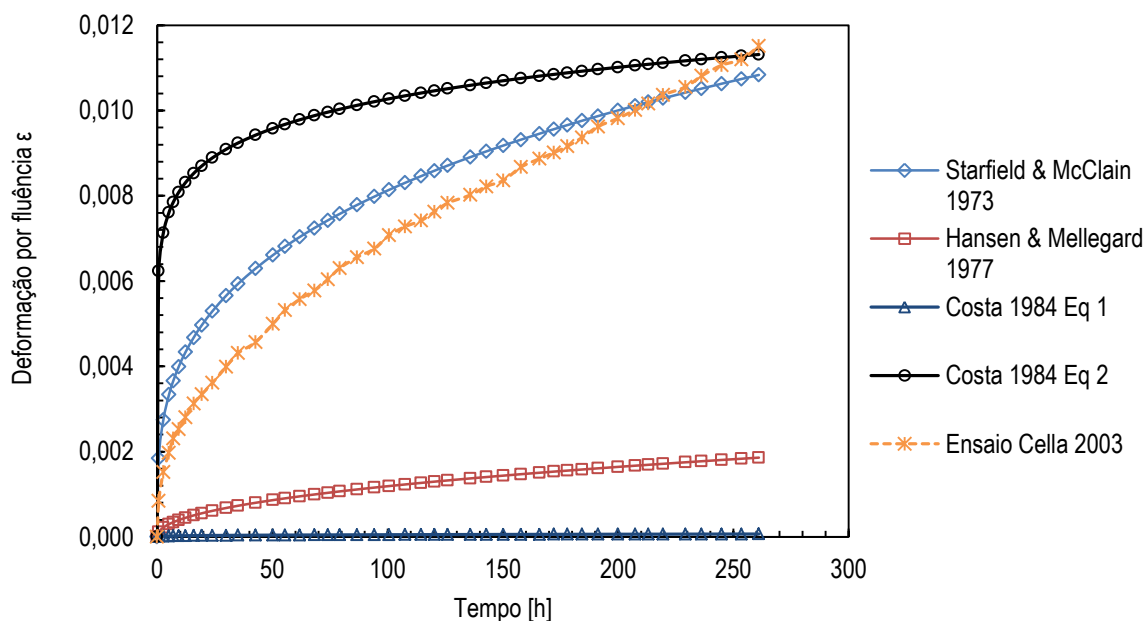


Figura 3-8 comparação entre as equações numéricas encontradas por Starfield & McClain (1973), Hansen & Mellegard (1977) e Costa (1984) e o ensaio de fluência feito por Cella (2003) numa amostra de halita.

A Tabela 3-4 mostra os valores para o coeficiente de determinação, também chamado de R^2 encontrados ao comparar as seis curvas de fluência obtidas por Cella (2003) com os valores calculados pelas equações da Tabela 3-3. Devido às condições de representatividade da equação potencial, foi considerado somente o primeiro estágio das curvas de deformação, ao tentar determinar o quanto cada um dos modelos consegue se ajustar aos valores reais.

Tabela 3-4 Coeficientes de determinação encontrados ao comparar as seis curvas de fluência obtidas por Cella (2003) com os valores calculados através das equações da Tabela 3-3 na fase transiente.

Autor	R^2
Starfield & McClain (1973)	0,872
Hansen & Mellegard (1977)	0,872
Costa (1984)	0,813
	0,651

Ao observar os valores encontrados do coeficiente R^2 com estas quatro equações decidiu-se fazer um ajuste paramétrico para a equação empírica potencial a partir desta serie de ensaios, buscando melhorar os resultados a obter; seguindo a observação feita por Boulianne et al. (2004) ao referirem à grande influência sobre os resultados calculados de maneira analítica ou numérica que tem a formulação matemática (ou modelo constitutivo) empregada para descrever o comportamento do material (halita).

3.2.3- DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE

Tendo como propósito determinar os parâmetros que melhor se ajustam a equação potencial proposta por Lomenick (1971) a partir dos ensaios feitos por Cella (2003) e seguindo as sugestões feitas por Costa (1984) em seu trabalho, optou-se por deixar a temperatura como um valor constante e fazer uma regressão múltipla admitindo como variáveis independentes a tensão e o tempo e a deformação por fluência como a variável dependente.

Como foi descrito anteriormente é necessário utilizar somente a fase de fluência transiente das curvas obtidas nos ensaios. O tempo médio no qual foi considerado alcançado o regime de fluência estacionária é de 210 horas. Outra consideração tida em conta, refere-se ao ensaio feito com uma variação de tensão, para isto foi considerado uma tensão média equivalente a 16,5 MPa.

A equação final examinada para interpolar os resultados dos ensaios, adotando o expoente da temperatura recomendado pela literatura é:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= k\sigma^c t^b T^a \Rightarrow \\ T &= 359K \\ a &= 9,5\end{aligned}\tag{3.13}$$

Deve-se esclarecer que na compilação estatística realizada a tensão σ é empregado em kPa, a temperatura em Kelvin e o tempo em horas.

Os parâmetros a determinar são k , b e c . Eles devem cumprir uma única restrição, sendo maiores que zero.

A regressão múltipla foi conduzida sobre os valores experimentais operados pela aplicação da função logaritmo como segue:

$$\log \varepsilon = \log k + c \log \sigma + b \log t + \log(T^a)\tag{3.14}$$

Esta equação é do tipo:

$$\bar{Y} = m + cx + by\tag{3.15}$$

Com a determinação de m , c , e b obtêm-se:

$$\begin{aligned}
m &= \log k + \log(T^a) \Rightarrow \\
k &= 10^{m-\log(T^a)} \\
c &= c \\
b &= b
\end{aligned}
\tag{3.16}$$

Finalmente, os resultados obtidos pelas regressões múltiplas são:

$$\varepsilon = 4,27 \times 10^{-46} \sigma^{4,337} t^{0,451} T^{9,5}
\tag{3.17}$$

E o coeficiente de determinação para o conjunto de dados em fase transiente de fluência é $R^2=0,968$ valor que representa um melhor ajuste para o comportamento observado do material a se tratar.

A Figura 3-9 apresenta a comparação para o ensaio de fluência com tensão desviatória de 14 MPa em regime transiente e os parâmetros obtidos por meio da regressão múltipla. Nela é possível observar a notória melhoria alcançada, ao se calcular valores de deformação bastante próximos aos obtidos no ensaio real.

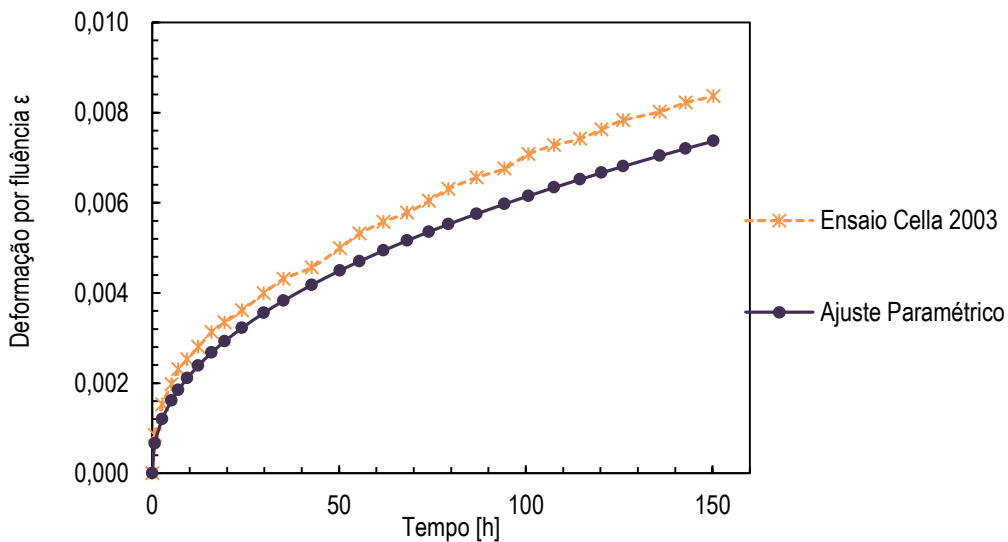


Figura 3-9 Comparação para o ensaio de fluência com tensão desviatória de 14 MPa em regime transiente e os parâmetros obtidos por meio da regressão múltipla.

3.2.4- VALIDAÇÃO DO SOFTWARE POR MEIO DA REPRODUÇÃO DOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA

A validação do modelo fluência implementado no software *Abaqus* utilizado neste estudo foi realizada a partir da reprodução de um dos ensaios triaxiais de fluência feitos por Cella (2003) em amostras de halita extraídas da Bacia de Sergipe, na Mina de Taquari-Vassouras, no

estado de Sergipe. Para a simulação foram consideradas as mesmas condições geométricas, térmicas, de tensão confinante e tensão desviatória do corpo de prova utilizado no ensaio definitivo, dados apresentados na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 Condições geométricas, térmicas e de tensão dos corpos de provas utilizadas na validação numérica.

Geometria	Temperatura	Tensão de confinamento	Tensão desviatória
Diâmetro 0,09m	86 °C	10 MPa	14 MPa;
Altura 0,18m			

Os parâmetros mecânicos utilizados durante esta etapa são iguais aos empregados na análise elástica e têm os seguintes valores para o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e peso específico $E=20,4$ GPa, $\nu=0,36$ e $\gamma=21,00\text{kN}/3^3$ respectivamente.

Na reprodução do ensaio triaxiais de fluência pelo software *Abaqus* foi considerada somente a versão *time-hardening* da lei potencial. Lembre-se que esta versão é indicada para prever deformações em longos períodos de tempo nos quais o estado de tensões não varia muito rapidamente, condição semelhante à sofrida pelos corpos de prova ensaiados por Cella (2003) nos quais a tensão desviatória foi mantida constante na maioria dos ensaios.

A Equação 3.18 lembra a forma como o *Abaqus* calcula as deformações por fluência para a versão *time-hardening*:

$$\varepsilon = \frac{A\sigma^n t^{m+1}}{m+1} \quad 3.18$$

Os valores para as variáveis A , n e m apresentados a seguir foram determinados a partir do ajuste paramétrico feito no item 3.2.3-.

$$\begin{aligned} A &= kbT^a = 3,61 \times 10^{-22} \\ m &= -0,549 \\ n &= 4,337 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Observa-se que os valores encontrados para A , n e m seguem as sugestões feitas no *Abaqus*-6.10 (2010).

Além disso, para a simulação do ensaio, foi considerada uma condição real, na que um corpo de prova é submetido a uma tensão de confinamento, σ_c , e logo depois uma tensão desviadora, $\Delta\sigma$, é aplicada e mantida constante durante todo o ensaio, como é mostrado na Figura 3-10.

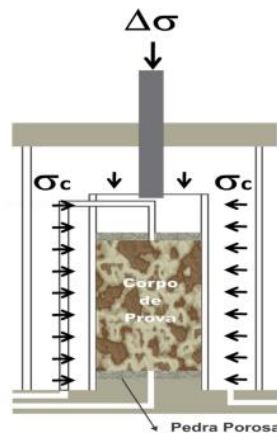


Figura 3-10 Esquemática ensaio de fluência. (Cavalcante, 2012).

Um modelo axissimétrico correspondente a um 1/4 do corpo de prova real foi considerado na validação, as condições de contorno propostas foram apoios do primeiro gênero na parte inferior e lateral esquerda de modo a impedir os deslocamentos verticais e horizontais, respectivamente. Na lateral direita foi aplicada uma tensão $\sigma_3 = \sigma_c = 10.000 \text{ kPa}$, equivalente à tensão de confinamento, na superfície do modelo foi aplicada uma tensão axial que corresponde à tensão confinante mais o acréscimo de tensão desviatória $\sigma_1 = \sigma_c + \Delta\sigma = 24.000 \text{ kPa}$. A Figura 3-11 representa o modelo utilizado.

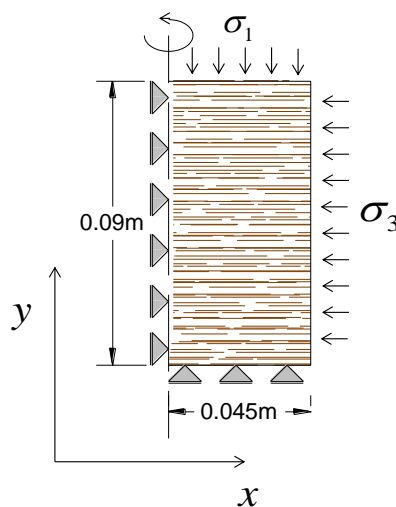


Figura 3-11 Modelo axissimétrico.

Foram consideradas três etapas de análise para a reprodução do ensaio. A primeira delas corresponde à função goestática do *Abaqus* quando foi aplicada a tensão de confinamento e definidas as condições de contorno no corpo de prova. Esta etapa por *default* tem uma duração igual a um, independente do sistema de unidades empregado. A segunda etapa corresponde à aplicação da tensão desviadora, quando é feita a simulação da resposta elástica dos carregamentos aplicados. Nesta etapa as deformações não dependem do tempo, o que, torna necessária a colocação de um tempo de análise muito pequeno para que o mesmo não interfira nos resultados, o valor utilizado foi de 0,001 horas. Finalmente, a terceira etapa estuda o comportamento viscoso do material através da formulação de fluência. Para esta etapa utilizou-se um tempo de 160 horas que corresponde à duração do ensaio em fase transiente.

Em seguida, a malha utilizada no modelo possui 162 elementos do tipo CAX4, onde C assim como na formulação elástica é referente ao meio contínuo em análise de tensão/deslocamento, AX se refere o tipo axissimétrico e 4 ao número de nós de cada elemento. A Figura 3-12 apresenta a malha de elementos finitos a utilizar.

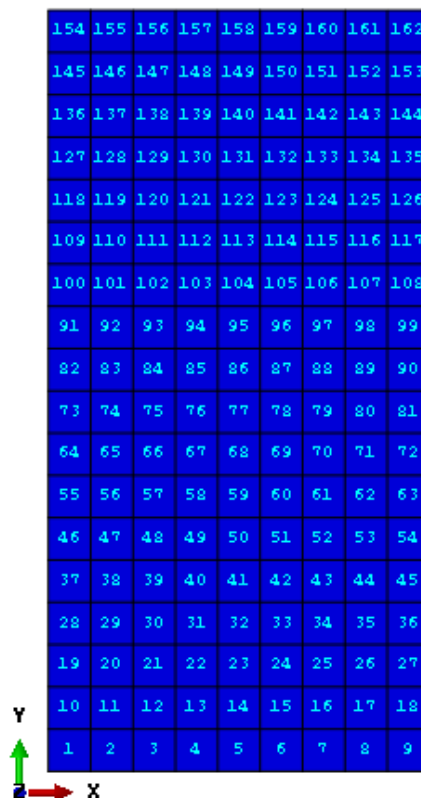


Figura 3-12 malha de elementos finitos utilizada na reprodução do ensaio de fluência.

A Figura 3-13 representa a forma como o *Abaqus* apresenta as curvas de deformação equivalente por fluência para todos os elementos da malha apresentada na Figura 3-12.

Notou-se que o tempo no qual inicia o comportamento de fluência é diferente de zero, isto é devido a que o tempo é acumulativo em cada uma das etapas de análise, então o comportamento de fluência representado nesta curva inicia-se em 1,001 horas. Dado o anterior, para a comparação dos dados encontrados por meio do software e os calculados utilizando a equação proposta através do ajuste paramétrico é necessário à diminuição do tempo correspondente às etapas um e dois (geoestático e elástico).

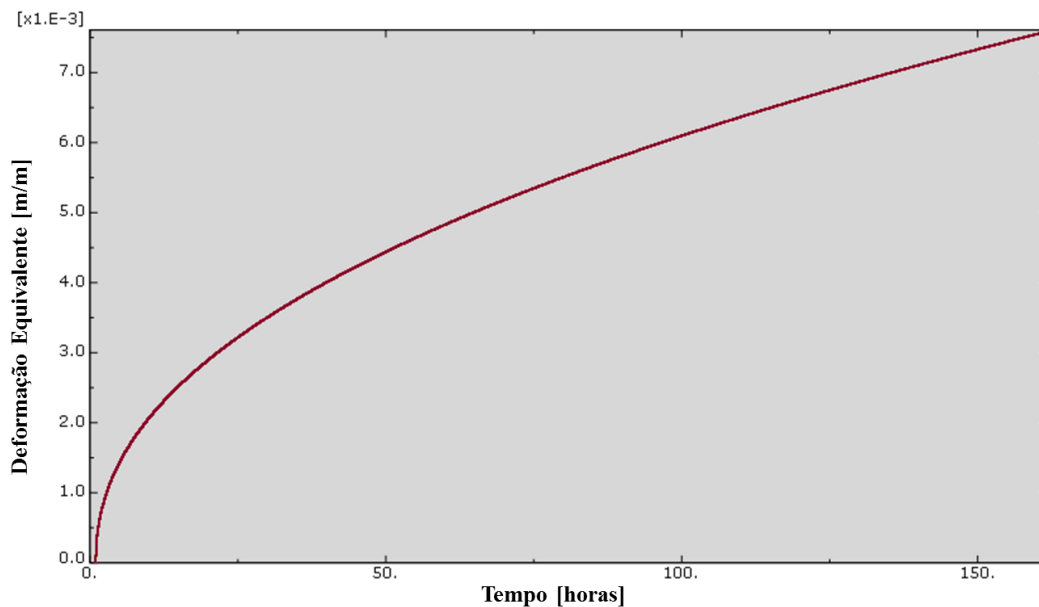


Figura 3-13 Curva de deformação equivalente por fluência apresentada pelo software *Abaqus* para o corpo de prova submetido a uma tensão desviadora de 14 MPa.

A Figura 3-14 mostra a comparação entre os dados encontrados por meio do software *Abaqus* e os calculados utilizando a equação proposta através do ajuste paramétrico para as deformações equivalente por fluência na reprodução do ensaio de tensão desviadora de 14 MPa. Nela observa-se que os valores são iguais em quase toda a curva. Os valores de erro relativo encontrados tomam um valor de 5,3% num tempo de 30 segundos desde o início das deformações, tempo considerado bastante baixo para a duração do ensaio. Este fato valida a utilização do modelo potencial implementado no software *Abaqus* na versão *time hardening* para a simulação de fluência em maciços evaporíticos.

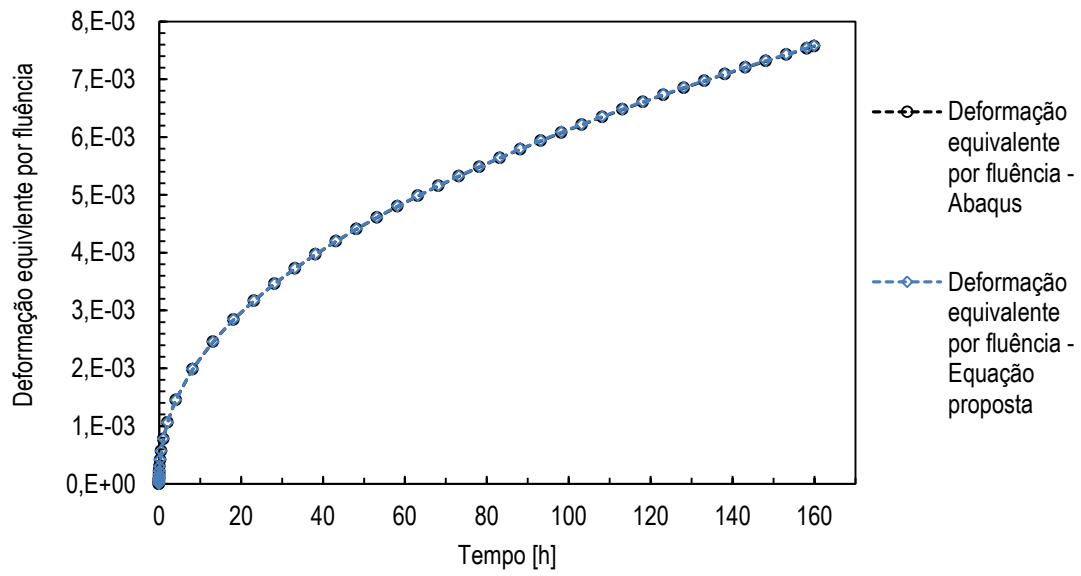


Figura 3-14 Comparação entre os dados encontrados por meio do software *Abaqus* e os calculados utilizando a equação proposta através do ajuste paramétrico para as deformações equivalente por fluência na reprodução do ensaio de tensão desviadora de 14 MPa.

4- MODELAGEM DE CONVERGÊNCIA DE CAVERNAS EM ROCHAS EVAPORÍTICAS

Considerando as grandes espessuras e continuidade regional de rocha salina existente na Bacia de Santos, localizada entre os Estados de Santa Catarina e Espírito Santo, nos últimos anos estuda-se a estratégia e viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento desse espaço subterrâneo para armazenamento de produtos petrolíferos.

Cavernas abertas por dissolução em rochas evaporíticas como halita, em águas profundas e ultra profundas são uma proposta inédita a nível mundial. Dado o avanço destes estudos o objetivo principal deste capítulo é compreender a variação da taxa de convergência no tempo de uma caverna construída sob certas condições de geometria e tensão; além de compreender a influência de parâmetros como a temperatura dentro destes níveis de convergência.

4.1- ESTUDO DE CASO

A forma da caverna foi escolhida seguindo as recomendações de construção, na qual se afirma a forma cilíndrica como a forma que proporciona uma maior estabilidade. As dimensões correspondentes a um diâmetro de 60 m e altura de 150 m foram escolhidas de acordo ao trabalho feito por Zhao & Zhang (2011) no qual é analisada a convergência de uma caverna de um volume de 424.115 m³ para um tempo de operação de 10 anos.

Para as simulações foi adotada uma profundidade que respeitasse as variações do campo de tensões a fim de evitar alterações na zona de contato do domo salino e a rocha sedimentar. A profundidade determinada corresponde a 3.500 m desde a superfície do mar.

Finalmente as análises de convergência foram feitas num modelo axisimétrico bi dimensional de 1.750 m de altura e 900 m de longitude.

4.1.1- LOCALIZAÇÃO

Com o objetivo de simular uma caverna sob condições reais de tensão, foi levada em consideração a estratigrafia apresentada por Costa et al. (2012) de um domo salino localizado próximo às unidades de produção da Bacia de Santos e ao gasoduto que interliga o campo de Lula à plataforma fixa de Mexilhão em águas rasas; além de também ser próximo ao poço descobridor do pré-sal, o poço RJS 628A no campo de Lula como é apresentado na Figura 4-1 (Costa, 2013).

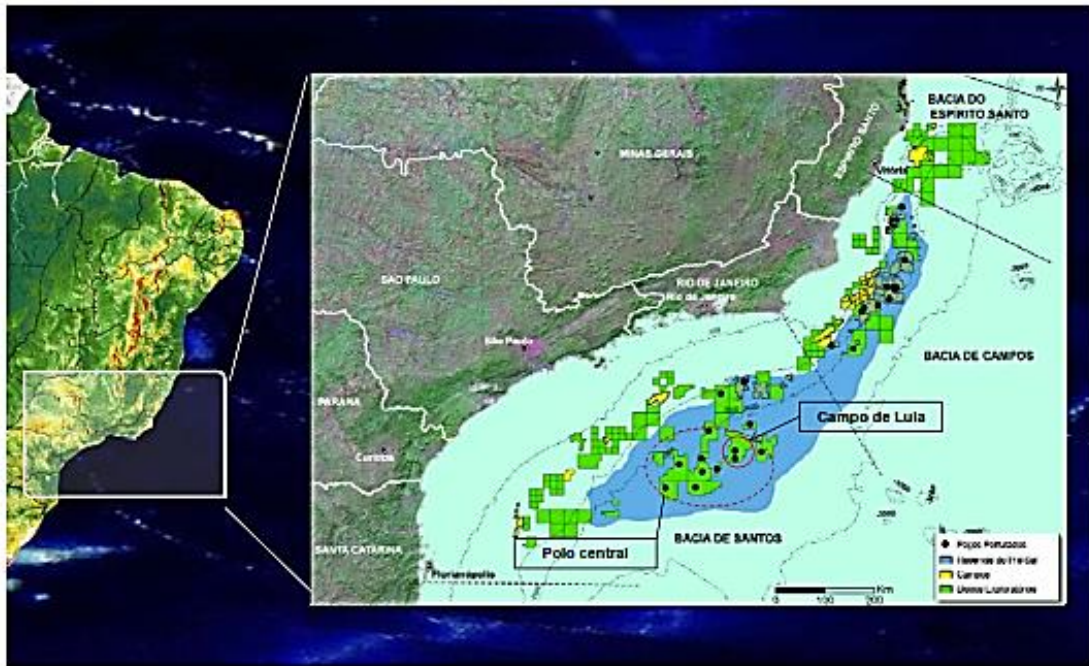


Figura 4-1 Província dos reservatórios do pré –sal, polo central de produção da Bacia de Santos e Campo de Lula. (Mohriak et al., 2008)

A Figura 4-2 apresenta o mapa de espessuras estratigráficas verdadeiras; é dizer, linhas perpendiculares à superfície de estratificação (isopacas) de halita na região do domo salino selecionado.

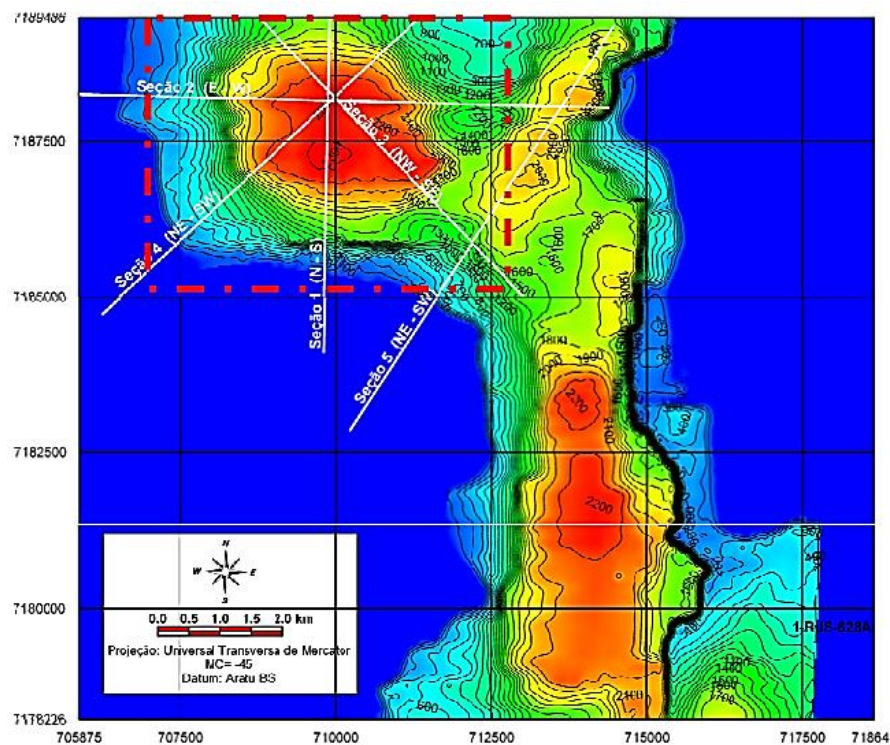


Figura 4-2 Mapa de isopacas de halita a 10 km noroeste do poço descobridor. (Costa, 2013)

A Figura 4-3 mostra a estratigrafia da região marcada com a cor vermelha no mapa da Figura 4-2, local escolhido para a localização da caverna a ser estudada.

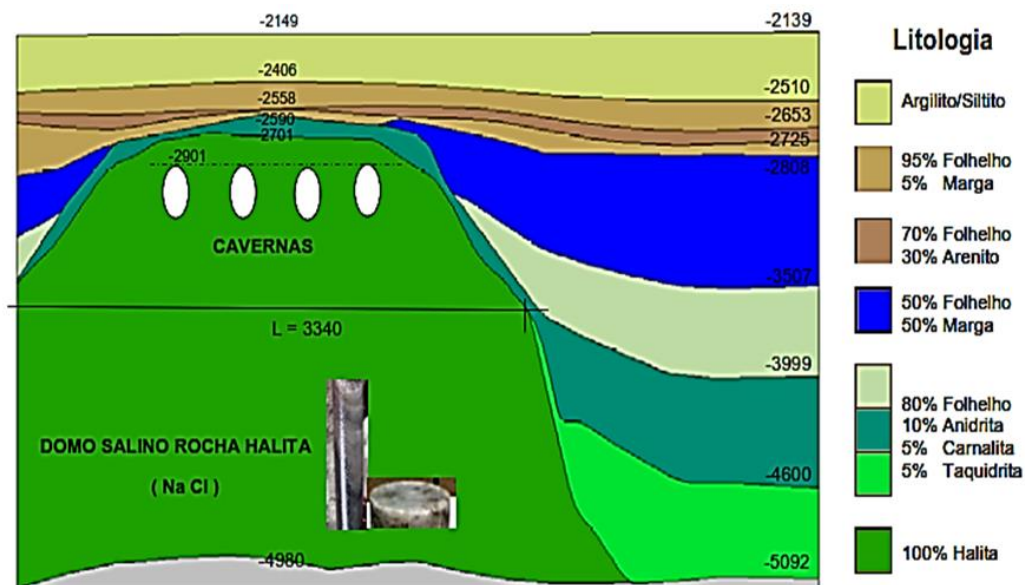


Figura 4-3 Estratigrafia do domo salino no local de estudo. (Costa et al., 2012)

4.1.2- ESTADO DE TENSÕES IN SITU EM CORPOS SALINOS

A perturbação das tensões in situ em torno de estruturas salinas apresentada pelo movimento do sal tem sido estudada por diferentes autores dentre os quais é possível destacar Luo et al. (2011) e Fredrich et al. (2003)

Segundo Sanz & Dasari (2010), quando o sal é submetido ao diferencial de carga, flui com o tempo até relaxar as tensões e alcançar um estado isotrópico de tensões; produzindo geometrias altamente irregulares e complexas. Os autores afirmam que a presença de corpos de sal modifica o campo de tensões in situ porque o sal não pode sustentar cisalhamento; o que permite gerar mudanças nas magnitudes e direções das tensões in situ.

Sanz & Dasari (2010) também afirmam que embora o comportamento do sal é bem descrito do ponto de vista geológico e mecânico e é amplamente reconhecido que os corpos de sal perturbam o campo de tensões perto deles, mas não há uma compreensão clara dos principais controles in situ insiste em torno de corpos de sal.

Atualmente diferentes modelos de elementos finitos são utilizados para investigar os fatores de controle sobre o campo de tensões próximo e dentro dos domos salinos. Estes modelos apresentam geometrias idealizadas da formação salina para investigar a perturbações das

tensões nas zonas de contato, mas estas perturbações são influenciadas por um grande número de variáveis, incluindo a geometria do sal, os ambientes tectônicos de formação e contraste de densidade, que não estão sendo consideradas nas modelagens deste comportamento.

Fredrich et al. (2003) afirmam que em bacias sedimentares passivas, o estado de tensões é controlado pelo carregamento gravitacional, de tal modo que a tensão vertical σ_v é causada pelo peso das camadas acima, enquanto que a tensão horizontal σ_H é igual a uma fração da tensão vertical σ_v . No entanto, as estruturas de sal no subsolo não conseguem suportar esse estado de tensões, desta forma as tensões dentro dessas estruturas de sal se relaxam até atingir um estado de tensões isotrópico, onde $\sigma_v = \sigma_H$. Embora para algumas geometrias estas tensões não seja igual ao carregamento gravitacional por o efeito de arqueamento de tensões.

Luo et al. (2011) mostram como para geometrias irregulares para corpos salinos as tensões podem alcançar um estado de tensões litoestático. Estas são mostradas na Figura 4-4, Figura 4-5 e Figura 4-6.

Observa-se que na Figura 4-5 e Figura 4-6 os valores de tensão de von Mises são zero na zona de sal. As tensões de von Mises são consideradas como um indicador conveniente do estado de tensões cisalhantes dentro do maciço rochoso, dado que corresponde a uma medida invariante das tensões cisalhantes (Orozco, 2013; Orozco et al., 2013; Fredrich et al., 2003).

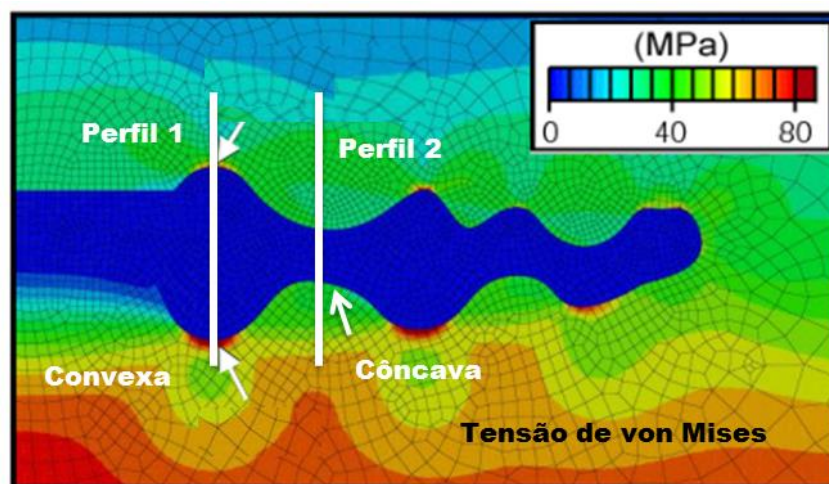


Figura 4-4 Corpo de sal de geometria irregular perfil 1 e perfil 2. Modificado de Luo et al. (2011)

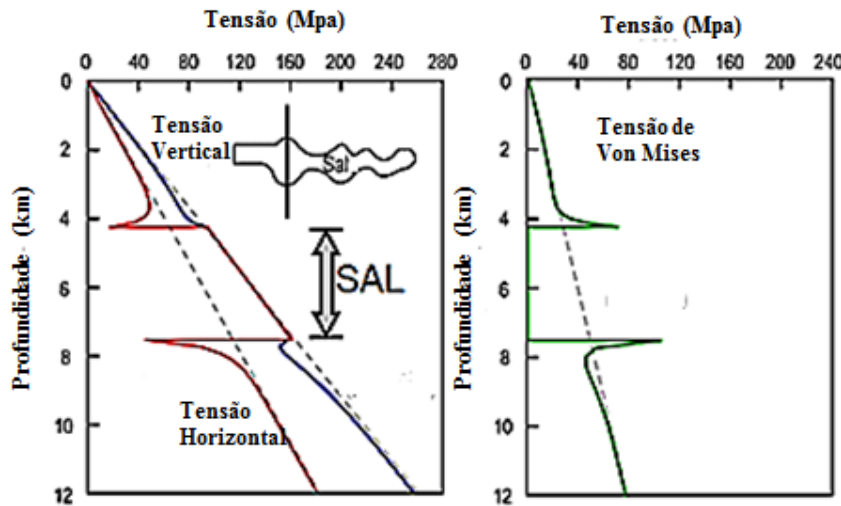


Figura 4-5 Tensões no corpo de sal para o perfil 1. (Luo et al., 2011)

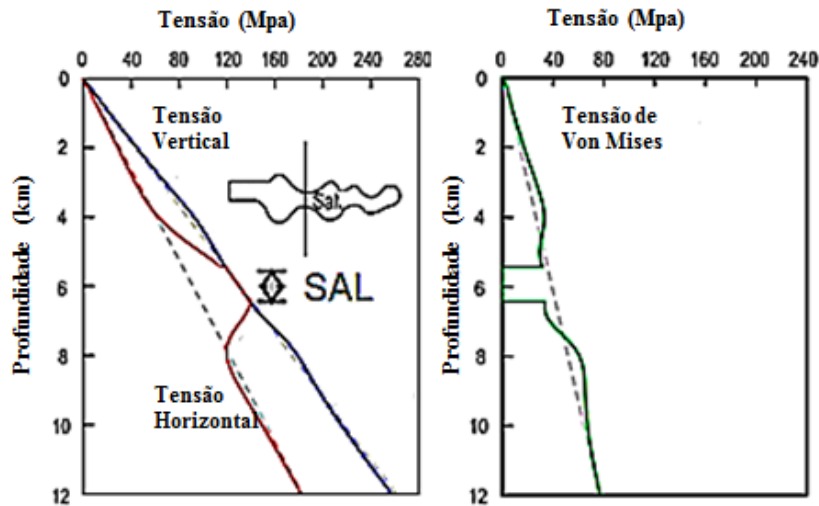


Figura 4-6 Tensões no corpo de sal para o perfil 2. (Luo et al., 2011)

A Equação 4.1 representa a formulação numérica para o cálculo das tensões de von Mises. Quanto maior for a condição de isotropia de tensões dentro do corpo salino, mais próximo a zero será o valor da tensão de Von Mises pela redução gradual das tensões cisalhantes no processo de equilíbrio de tensões.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad 4.1$$

O modelo analisado foi considerado dentro de um domo salino irregular no qual as tensões correspondem a um estado litoestático. A Tabela 4-1 apresenta as tensões iniciais aplicadas no modelo a uma profundidade de 2.701 m correspondente ao início da camada de halita como foi apresentado na Figura 4-3

Tabela 4-1 Tensões iniciais na superfície do modelo

Tipo de Material	Profundidade	Peso Específico	Tensão Vertical σ_v
Lâmina de Água	0m a -2149m	10,18 kN/m ³	21876,82 kPa
Estrato Sedimentar	-2149m a -2701m	22,56 kN/m ³	12453,12 kPa
Total tensão vertical σ_v na profundidade de estudo			34329,94kPa

4.2- CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES

Conforme mencionado acima para estudar o comportamento de convergência da caverna na profundidade de estudo, foi construído um modelo axissimétrico de geometria retangular com 1.750 m de altura e 900 m de longitude. O teto da caverna se encontra a 799 m desde a parte superior do modelo e o piso a 801 m desde a parte inferior.

4.2.1- DADOS DA MALHA

Inicialmente foram estudadas três tipos de malhas de diferentes densidades, compostas por elemento do tipo CAX4, onde C é referente ao meio contínuo em análise de tensão/deslocamento, AX se refere o tipo axissimétrico e 4 ao número de nós de cada elemento.

Para cada malha foram utilizados elementos de diferentes dimensões, respeitando as recomendações de relação entre elementos menor a 1:4. Empregaram-se elementos de menor tamanho na zona a ser escavada e perto desta zona, onde são esperadas as maiores variações de tensão, deformação e deslocamentos. E elementos maiores nas áreas de menor interesse; ou seja, perto das bordas do modelo geral.

A Tabela 4-2 apresenta a descrição das malhas analisadas e tempo de execução do modelo. Deve-se esclarecer que o custo computacional é muito variável e depende das propriedades da malha que compõem o modelo e seu tamanho, ou seja, da quantidade de equações que têm que ser resolvidas, portanto não deve ser uma variável de importância na escolha definitiva da malha a se utilizar, deve somente servir como uma medida de dimensionamento.

O tempo de execução foi o requerido para processar os dados de fluência num tempo total de 50 anos, utilizou-se dois tamanhos de passos diferentes, o primeiro corresponde a medições no máximo cada 12 horas para o tempo correspondente ao primeiro ano e cada 10 dias para os anos restantes.

Tabela 4-2 Descrição das malhas analisadas

Malha	Tamanho dos elementos dentro da caverna	Número de Nós	Número de Elementos	Tempo de Execução
M1	3x5 m	7.874	7.686	54,73 min
M2	5x10 m	2.728	2.623	20,02 min
M3	10x15 m	1.378	1.300	9,90 min

A Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9 mostram cada uma das malhas analisadas, onde é possível ver uma maior densidade na zona de escavação como foi mencionado acima.

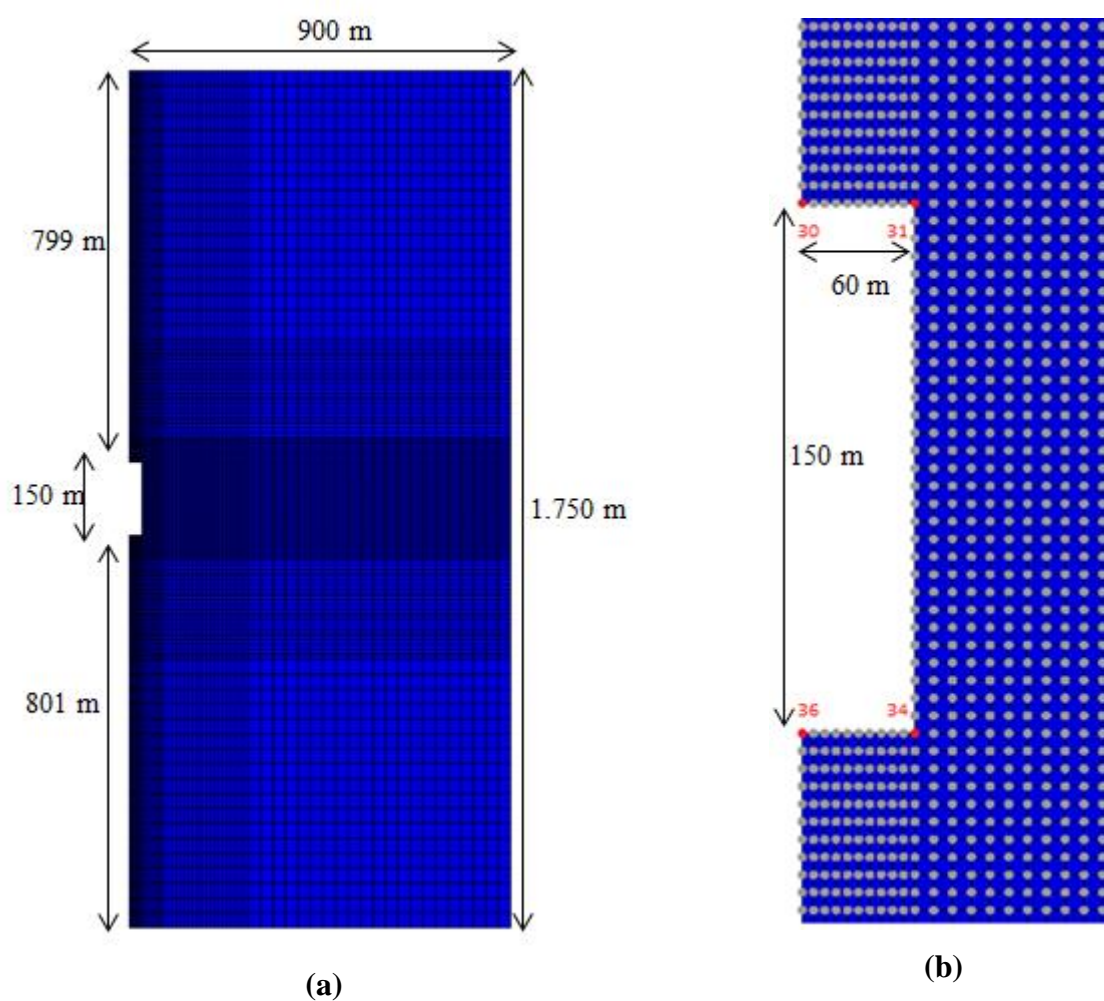


Figura 4-7 Malha de elementos finitos número 1. (a) Vista geral de toda a malha (b) zoom na zona da escavação da caverna (os pontos cinza correspondem aos nós do elemento).

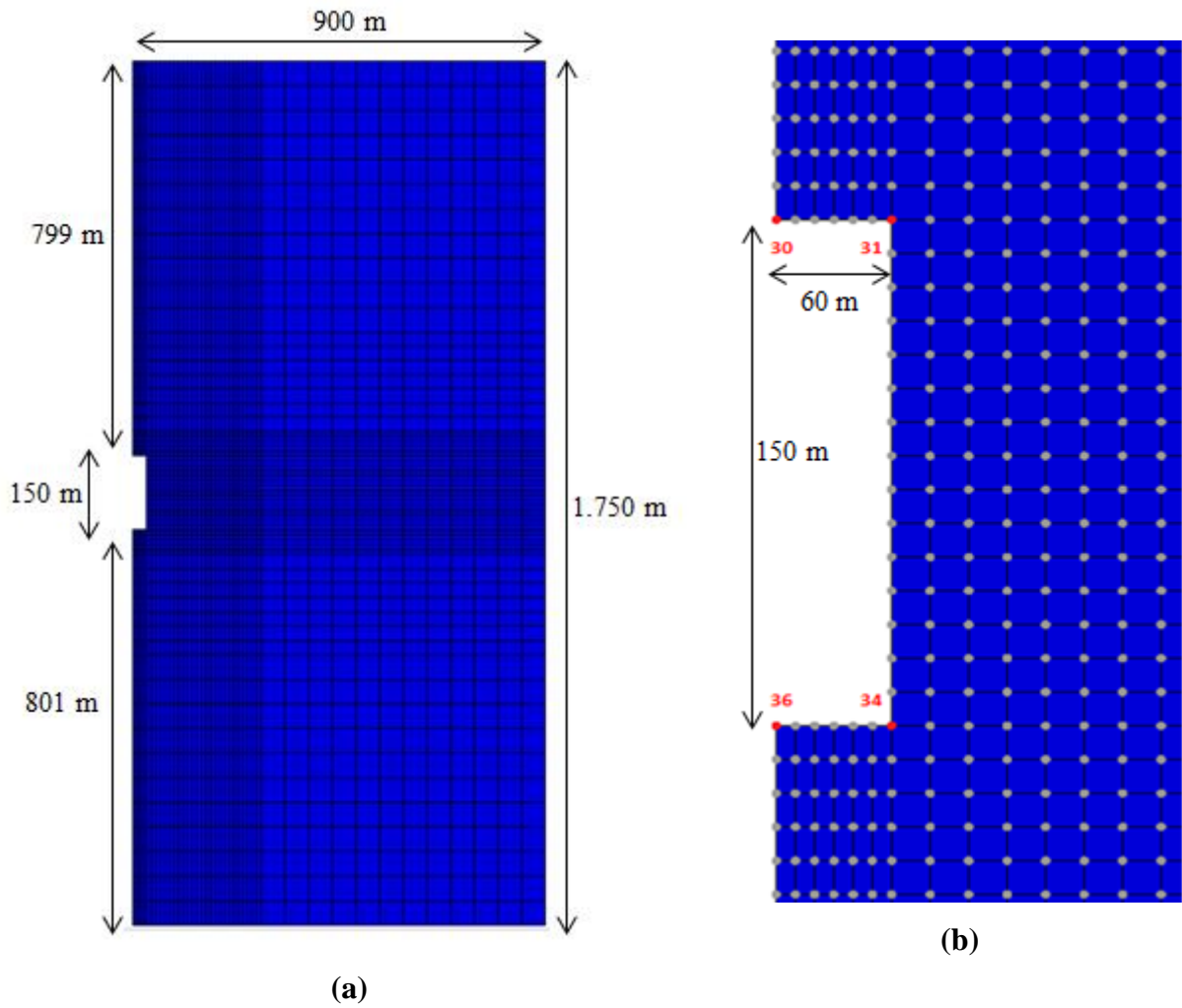


Figura 4-8 Malha de elementos finitos número 2. (a) Vista geral de toda a malha (b) *zoom* na zona da escavação da caverna (os pontos cinza correspondem aos nós do elemento).

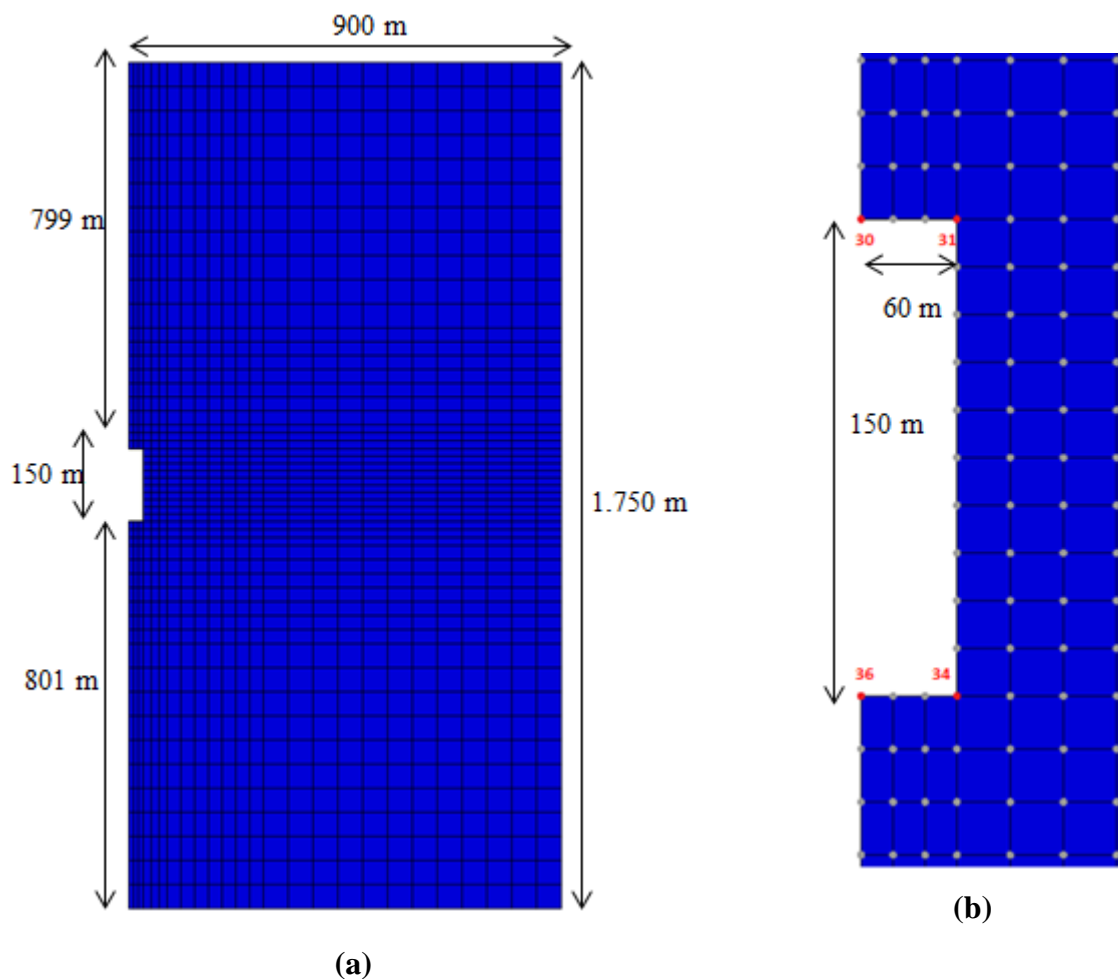


Figura 4-9 Malha de elementos finitos número 3. (a) Vista geral de toda a malha (b) *zoom* na zona da escavação da caverna (os pontos cinza correspondem aos nós do elemento).

A escolha da malha definitiva foi feita por meio da análise de deslocamentos nos cantos superiores e inferiores da zona de escavação correspondente à caverna.

Para cada uma das malhas estudou-se os nós 30 e 31 no teto e 34 e 36 no piso, pontos marcados com a cor vermelha na Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9; apresentadas anteriormente.

Estas análises preliminares foram feitas na versão *Time Hardeing* tendo como parâmetros elásticos e de fluência os mesmos empregados para a validação do software *Abaqus*. A Tabela 4-3 representa os parâmetros utilizados.

Tabela 4-3 Parâmetros utilizados nas análises de densidade de malha

Parâmetros Elásticos		Peso Específico	Constantes Empíricas		
E	ν	γ	A	m	n
20,4 GPa	0,36	$21 \frac{kN}{m^3}$	$3,61 \times 10^{-22}$	-0,549	4,337

As condições de contorno utilizadas são: na parte lateral direita e esquerda do modelo geral são impedidos os deslocamentos horizontais e na parte inferior são impedidos os deslocamentos verticais e horizontais.

Na parte superior do modelo é imposta uma carga externa correspondente ao peso do material até a profundidade de 2.701 m. Finalmente como o propósito é analisar a densidade adequada para a malha; a caverna foi simulada em uma condição hipotética de zero pressão interna. Condição impossível de se executar na prática, fato possível de verificar pela observação dos valores de deslocamentos encontrados.

A Tabela 4-4 apresenta os deslocamentos encontrados para cada uma das malhas utilizadas, ao final do ciclo de fluência (50 anos). A notação empregada para os deslocamentos u_1 e u_2 refere-se aos deslocamentos sofridos no nó de análise na direção horizontal e vertical respectivamente.

Tabela 4-4 Deslocamento nos pontos de análises (Magnitude, direção horizontal u_1 e vertical u_2)

Malha	Nó Número	Magnitude [m]	u_1 [m]	u_2 [m]
M1	30	36,2039	0	-36,2039
	31	20,7005	-15,2769	-13,9698
	34	23,7281	-17,8843	15,5940
	36	42,2595	0	42,2595
M2	30	35,5797	0	-35,5797
	31	19,6859	-14,8561	-12,9163
	34	22,5472	-17,4121	14,3247
	36	41,5218	0	41,5218
M3	30	36,5635	0	-36,5635
	31	18,3099	-13,8581	-11,9669
	34	20,9215	-16,2408	13,1888
	36	42,7306	0	42,7306

Estudou-se a variabilidade dos resultados encontrados pelo cálculo do erro absoluto entre os valores de deslocamentos. Tomaram-se como valores de referência as medidas correspondentes à malha um (M1) devido ao fato de ter elementos de tamanho menor, e assim, os pontos de integração estão mais próximos aos nós, calculando valores de maior precisão.

A Tabela 4-5 representa os valores de erro absoluto calculados para as medições da Tabela 4-4 em cada um dos nós.

Tabela 4-5 Erros absolutos entre as medições calculadas para cada uma das malhas

Malha de Medições	Nó Número	Magnitude [m]	u_1 [m]	u_2 [m]
M1-M2	30	0,6242	0	0,6242
	31	1,0146	0,4208	1,0535
	34	1,1809	0,4722	1,2693
	36	0,7377	0	0,7377
M1-M3	30	0,3596	0	0,3596
	31	2,3906	1,4188	2,0029
	34	2,8066	1,6435	2,4052
	36	0,4711	0	0,4711

Na Tabela 4-5 é possível observar que os maiores erros entre as medições correspondem aos nós número 31 e 34; isto é devido a sua localização, pois estes nós tem mais elementos perto deles, o que gera mais equações para se resolver e maior interferência no resultado final. Deve-se fazer uma pausa para observar a magnitude dos valores de erros calculados.

Ao fazer a comparação entre as malhas um (01) e dois (02) se percebe um valor de 1,27 m como o maior erro absoluto constatado correspondente ao deslocamento do nó 34 em direção vertical. Este valor corresponde a um erro relativo do 8% . Ao comparar o mesmo nó e valor entre as malhas um e três se percebe que esta cifra corresponde a 2,40 m e erro relativo é de 15%

A Figura 4-10 mostra as curvas de deslocamento vertical no tempo do nó 34 para as três malhas analisadas. Nesta figura aprecia-se que as variações entre as medidas são perceptíveis desde os primeiros anos de análises fato influente na escolha adequada da malha a se utilizar nas simulações definitivas.

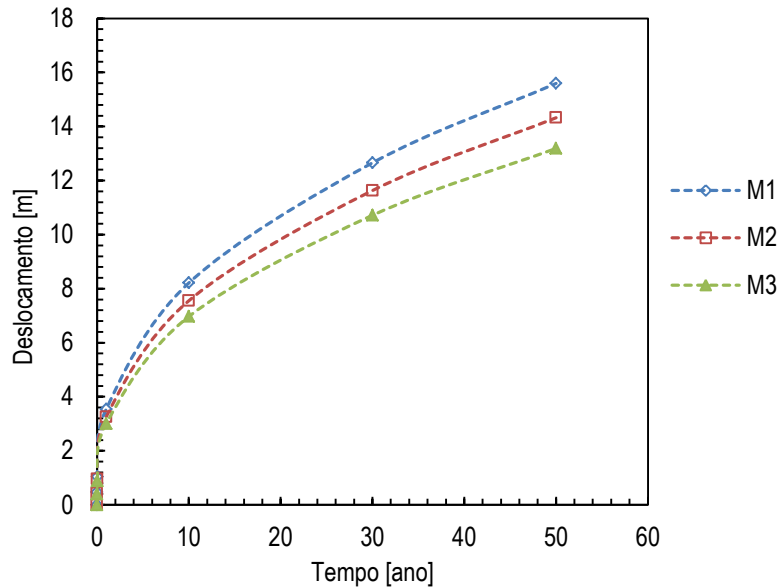


Figura 4-10 Variações do deslocamento vertical do nó 34 com o tempo para as malhas estudadas

Finalmente, as variações nas medições e tempo de execução das simulações encontradas no estudo do uso de tamanhos diferentes de elementos na zona de escavação da caverna, foram uma ferramenta útil que permitiu optar pelo uso da malha de menor tamanho (M1). Raciocínios como, por exemplo, se o deslocamento ao final do tempo de estudo quando a caverna se encontra em condições reais de operação é de 5 m, e estaria se referindo a um erro de 40 cm neste deslocamento por uma economia em tempo de execução de aproximadamente 35 minutos. Deve-se lembrar que este erro é somente referido à densidade da malha e não a outras condições como uso de um modelo constitutivo de fluência adequado ou de parâmetros que representem as condições reais do problema estudado.

4.2.2- VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

Os gradientes geotérmicos de uma bacia sedimentar podem ter variações a depender dos casos de estudos. Estes gradientes podem ter valores diferentes de um local a outro. Autores como Costa et al. (2012), Botelho (2008) e Poiate et al. (2006) mencionam valores diferentes em cada um de seus estudos.

A razão do anterior nesta parte da pesquisa se procura determinar a influência de diferentes valores de temperatura para as mesmas condições de tempo de operação (30 anos), profundidade (3.500 m), tensão in situ ($\sigma_v = 51.108,94 \text{ kPa}$ no topo da caverna) e pressão interna (0% da tensão in situ no topo da caverna), a partir da malha definida no item anterior;

em variáveis como a tensão de von Mises, a deformação por fluência e, portanto na convergência da caverna.

Inicialmente tomou-se 359 K (86 °C) como a temperatura de referência, dado que é a temperatura para a qual se fez o ajuste paramétrico da equação potencial utilizada nesta pesquisa.

A segunda temperatura avaliada corresponde à determinada segundo a proposta por Costa et al. (2012). Estes autores recomendam um gradiente geotérmico de 30 °C/1km para a rocha sedimentar localizada acima da camada de halita na estratigrafia apresentada na Figura 4-3; um gradiente geotérmico de 12 °C/1km para a rocha halita e uma temperatura de 4 °C para o leito do fundo marinho. O valor de temperatura foi calculado como a média entre o valor encontrado na parte superior da caverna e valor na parte inferior. Este valor corresponde a 304 K (31 °C).

A terceira temperatura corresponde à calculada seguindo o gradiente de bacia sedimentar utilizado por Botelho (2008) de 23,6 °C/1km e 4 °C para o leito do fundo marinho. Esta temperatura é de 311 K (38 °C)

A quarta e última temperatura analisada é de 334 K (61 °C) calculada assim como as anteriores, como um valor médio, seguindo as proposta de Poiate et al. (2006) de um gradiente de bacia evaporítica de 40 °C/1km e 4 °C para o leito do fundo marinho.

Além dos valores de temperatura descritos anteriormente é necessário lembrar a equação empregada pelo software *Abaqus* no cálculo das deformações de fluência na versão *time-hardening*, versão utilizada nesta análise:

$$\varepsilon = \frac{A\sigma^n t^{m+1}}{m+1} \quad 4.2$$

Os valores para as variáveis n e m foram determinados a partir do ajuste paramétrico feito no item 3.2.3-. E o valor do parâmetro A estará diretamente influenciado pelas temperaturas acima. A Tabela 4-6 apresenta as equações finais no cálculo destas deformações. As unidades utilizadas são: a tensão σ é utilizada em kPa, a temperatura em Kelvin e o tempo em horas.

Tabela 4-6 Equações de fluência empregada pelo software *Abaqus* na versão *time-hardening* para diferentes temperaturas

Temperatura	Equação
359° K	$\varepsilon = \frac{3,61 \times 10^{-22} \sigma^{4,337} t^{-0,549+1}}{-0,549 + 1}$
334° K	$\varepsilon = \frac{1,82 \times 10^{-22} \sigma^{4,337} t^{-0,549+1}}{-0,549 + 1}$
311° K	$\varepsilon = \frac{9,25 \times 10^{-23} \sigma^{4,337} t^{-0,549+1}}{-0,549 + 1}$
304° K	$\varepsilon = \frac{7,45 \times 10^{-23} \sigma^{4,337} t^{-0,549+1}}{-0,549 + 1}$

As deformações de fluência analisadas correspondem ao nó 891 local que apresenta o valor maior de deformação. Os deslocamentos também foram analisados em seus pontos máximos os quais correspondem ao nó 30 no teto, 36 no piso e 805 na parede da caverna, cujos locais são apresentados nas Figura 4-11 à Figura 4-15

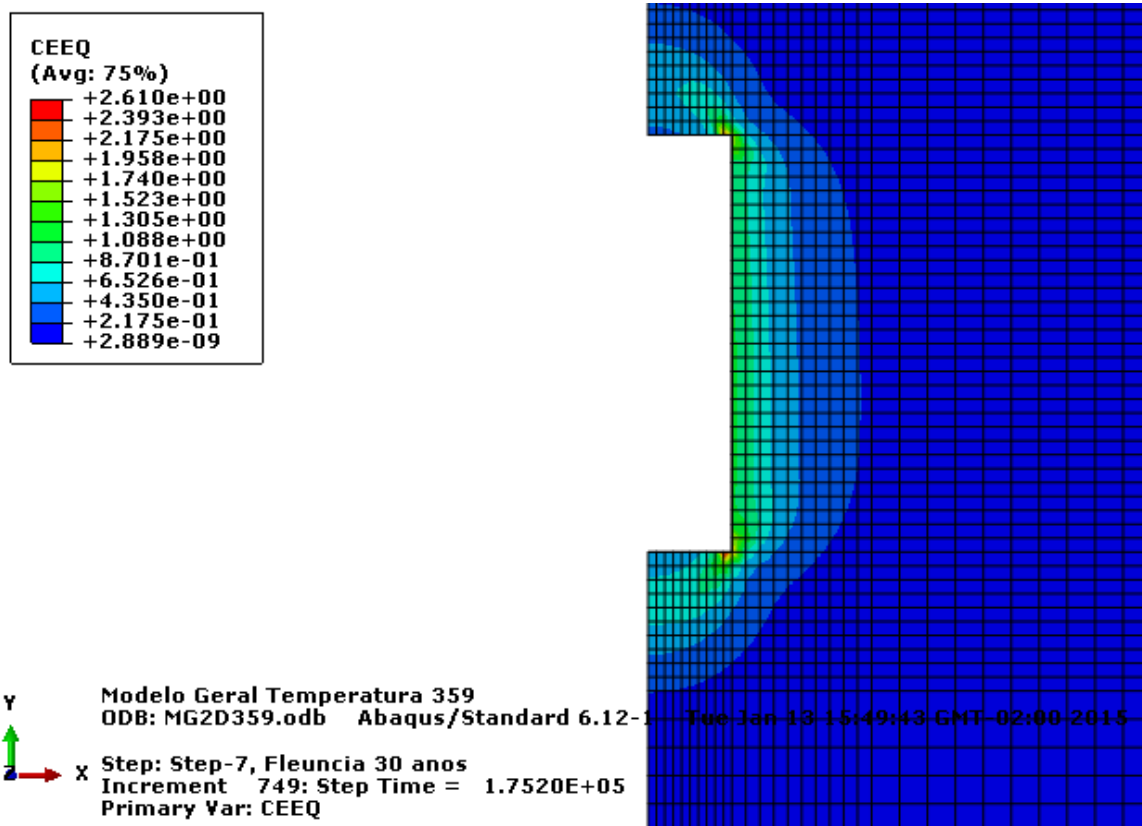


Figura 4-11 Vista geral na zona de influência das deformações por fluência na caverna. Temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos

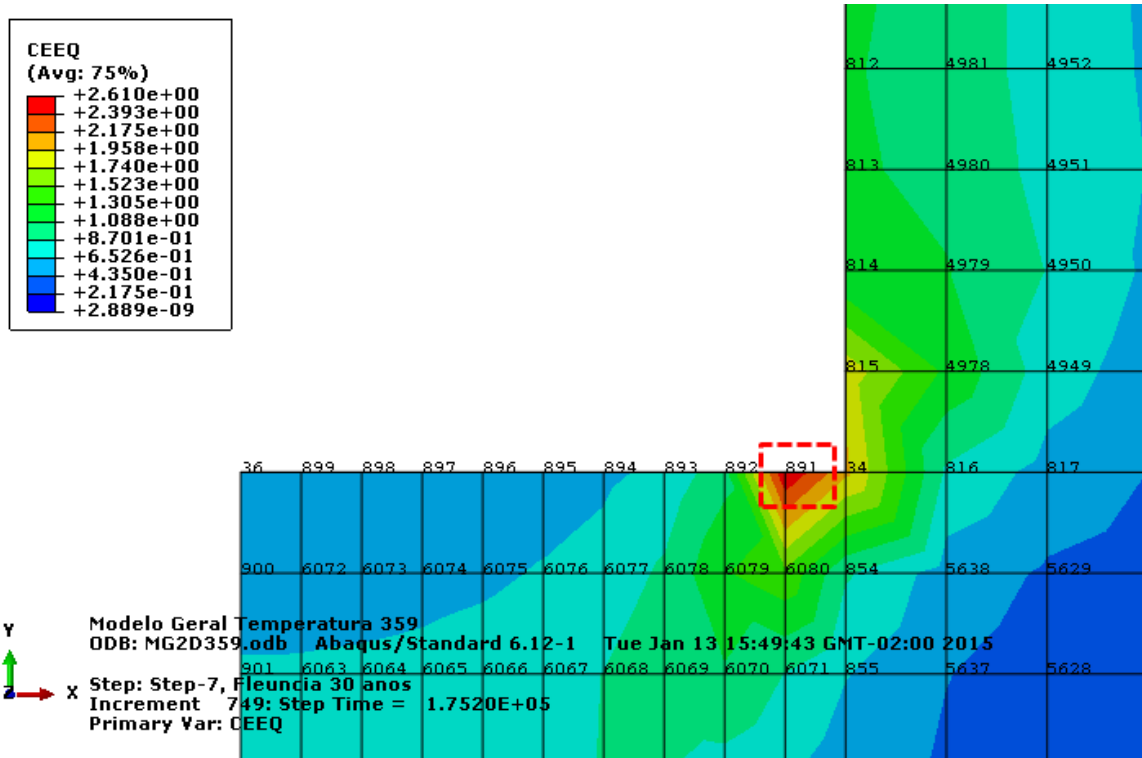


Figura 4-12 Zoom no nó de maior deformação por fluência para as condições de temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos

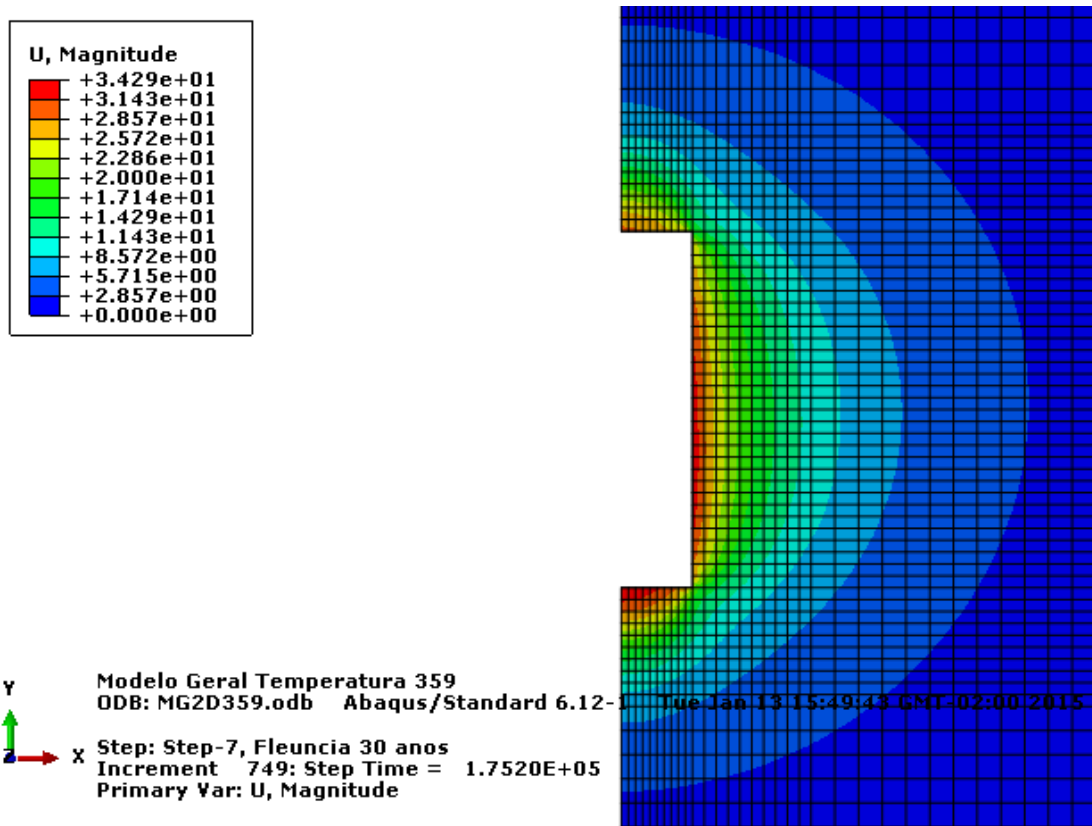
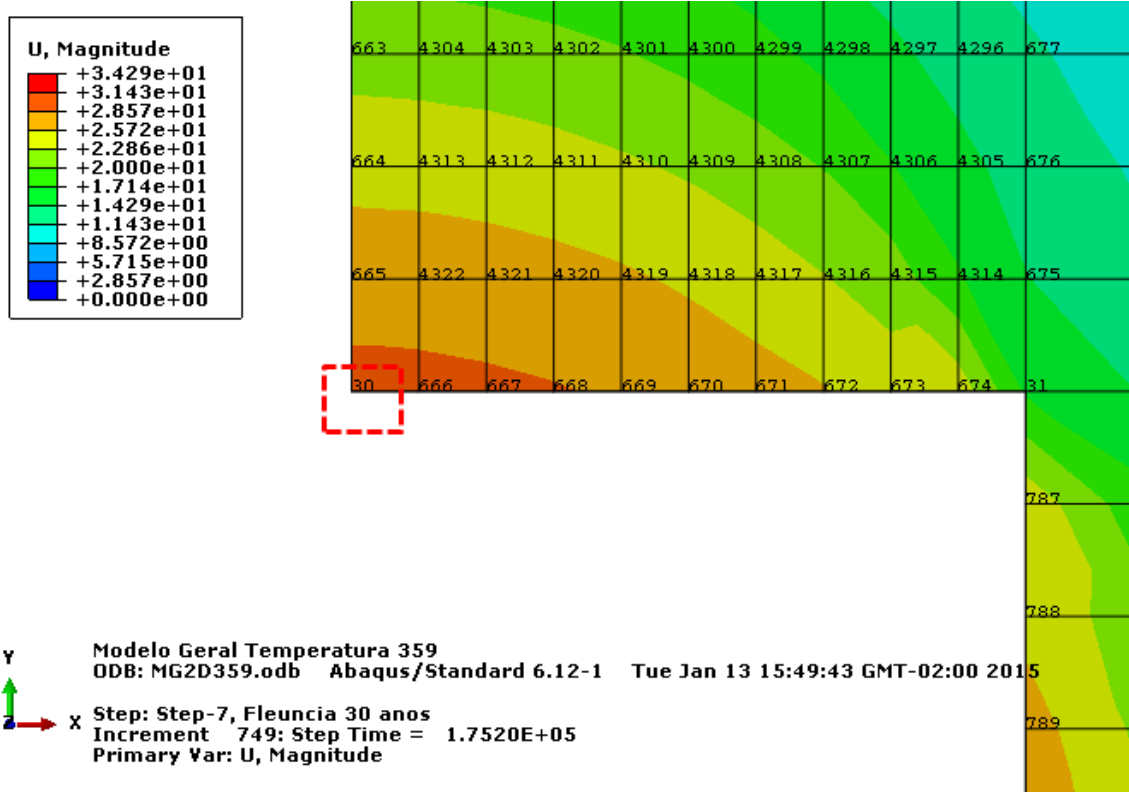
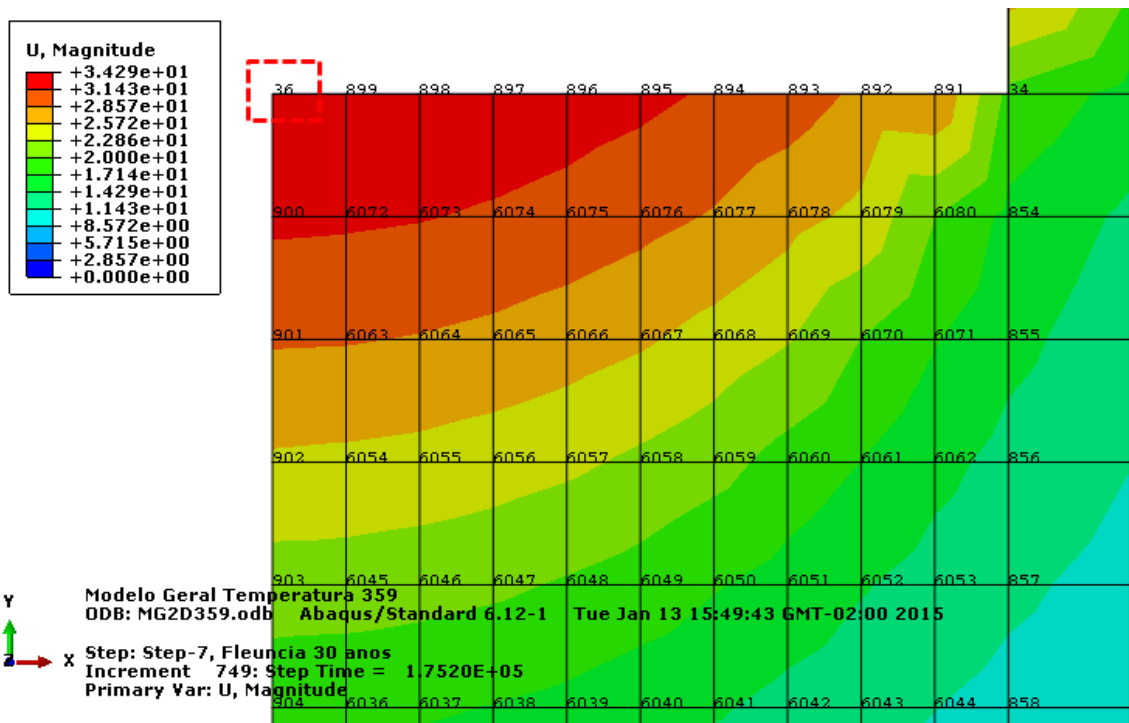


Figura 4-13 Vista geral na zona de influência da magnitude dos deslocamentos da caverna para a condição de temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos



(a)



(b)

Figura 4-14 Magnitude dos deslocamentos da caverna. Temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos (a) Zoom no nó de maior deslocamento no teto (b) Zoom no nó de maior deslocamento no piso.

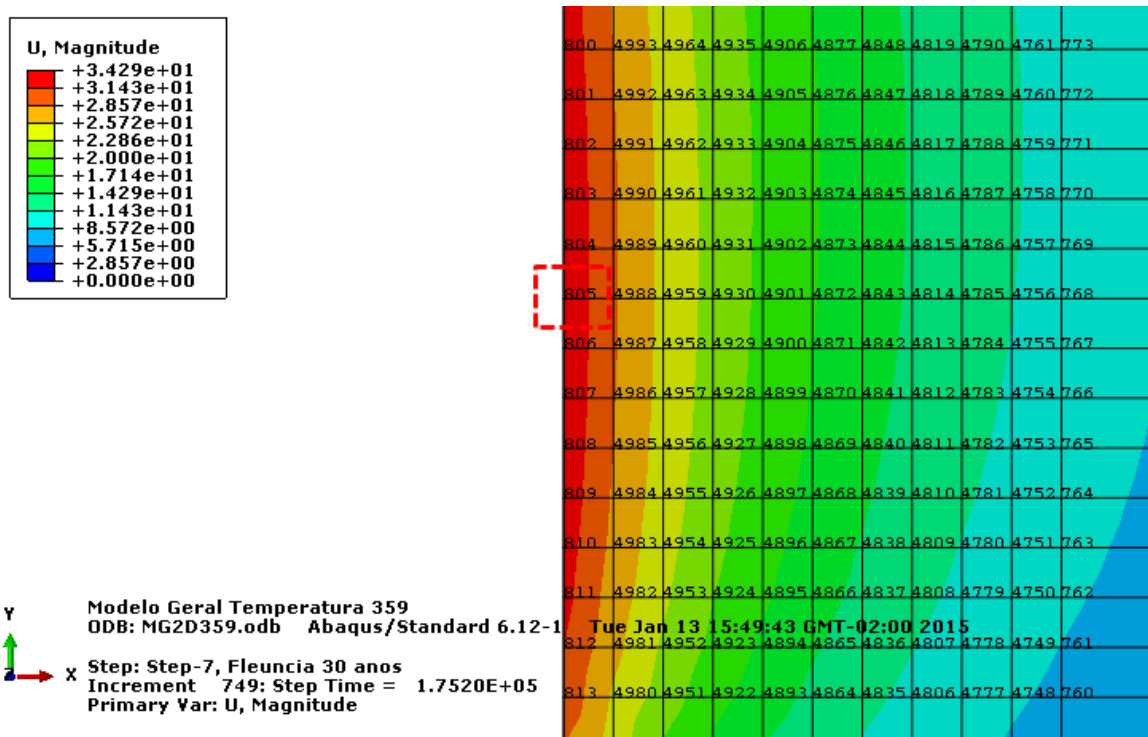


Figura 4-15 Zoom no nó de maior deslocamento na parede para as condições de temperatura de 359 K e tempo de operação 30 anos.

Os locais mostrados nas Figura 4-11 à Figura 4-15 para uma temperatura de 359 K são os mesmos para as outras temperaturas. Já a Figura 4-16 apresenta as variações nas curvas de fluência (deformação equivalente) em metros do nó 891 para as diferentes temperaturas de análises.

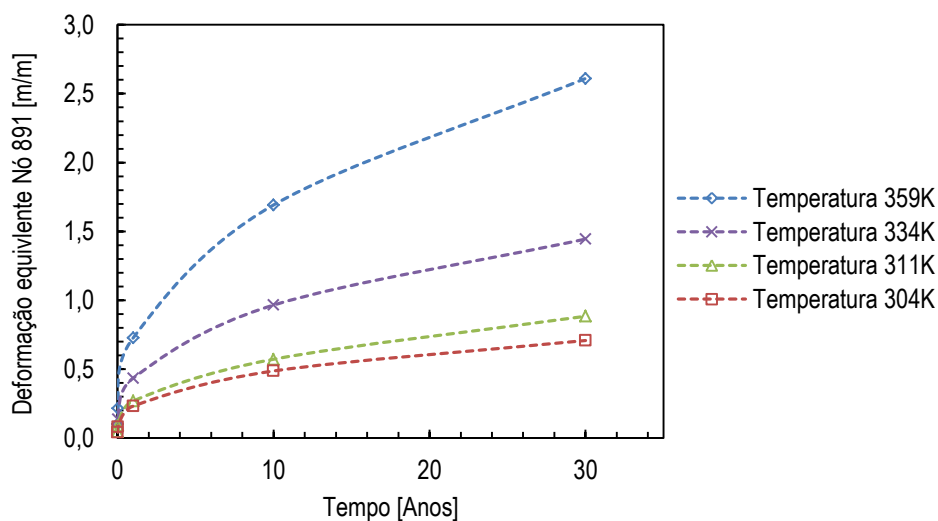
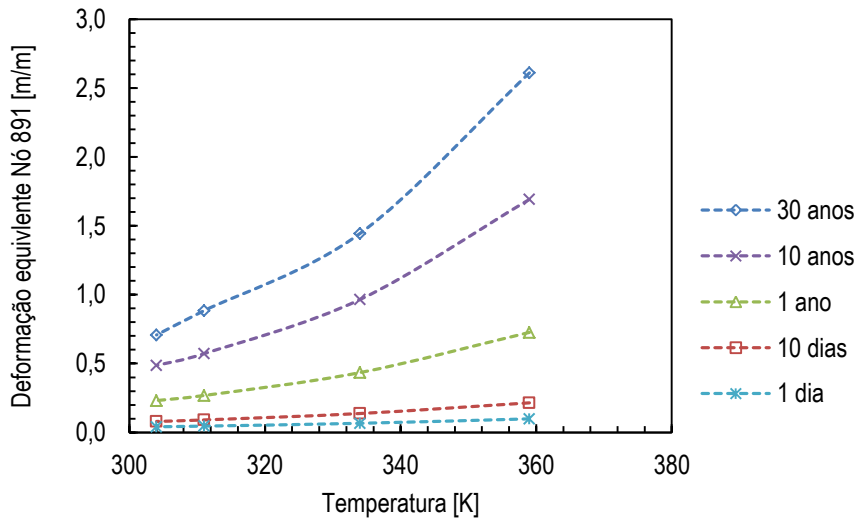
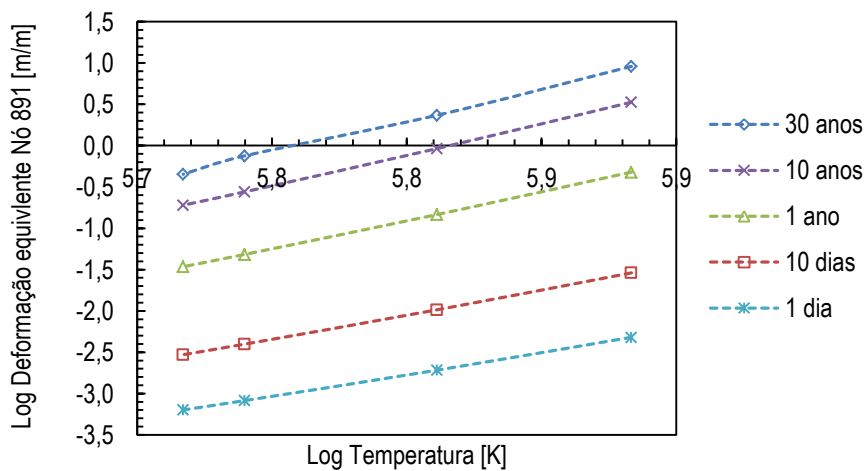


Figura 4-16 Deformação equivalente do nó 891 em metros para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.

A Figura 4-16 apresenta o comportamento esperado de deformação por influência da temperatura, ou seja, quanto maior é a temperatura do corpo analisado maior deve ser sua deformação por fluência. A partir da Figura 4-17 se conclui que o efeito da temperatura nas deformações por fluência é do tipo potencial, e está fortemente ligada ao tempo de análise.



(a)



(b)

Figura 4-17 Variação das deformações por fluência sofridas num mesmo tempo de análise para as temperaturas de 359 K, 334 K, 311 K e 304 K. (a) Dados em escala real (b) Dados em escala log.

A Figura 4-18 representa as variações na tensão de von Mises para as temperaturas de análise na qual é possível observar que as variações desta tensão são baixas para os tempos de análises estudados, permitindo referir-se a variações de 4,8 MPa a 8,3 MPa da temperatura maior para a menor o que em média corresponde ao 12% da tensão vertical in situ no topo da caverna.

Quando são observadas as mudanças na tensão de von Mises com a temperatura, são encontrados valores muito próximos com uma diferença de 4 MPa para um tempo de operação de um dia e caindo até um valor muito próximo de zero em um tempo de operação igual a trinta anos.

O exposto anteriormente permite a utilização da versão *time hardening* do *Abaqus* com liberdade, pois esta é a recomendação principal para o uso desta versão.

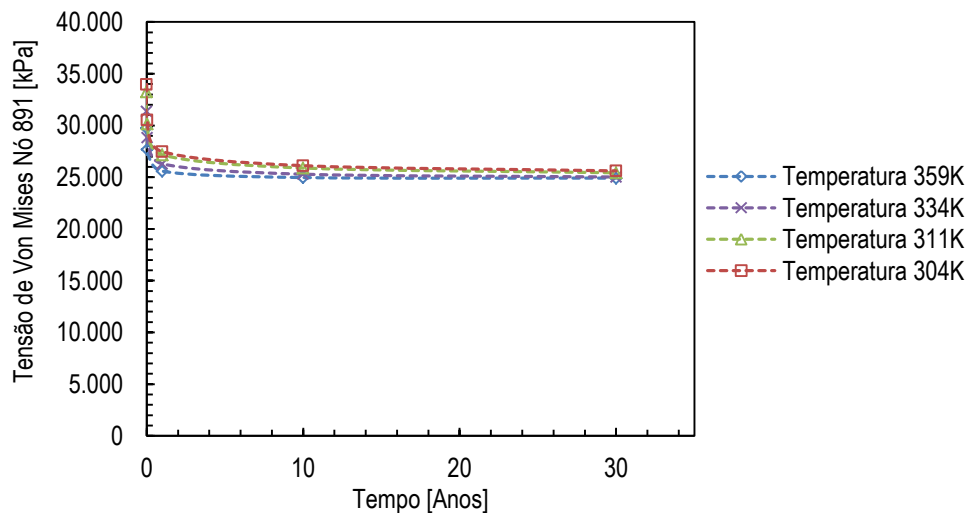
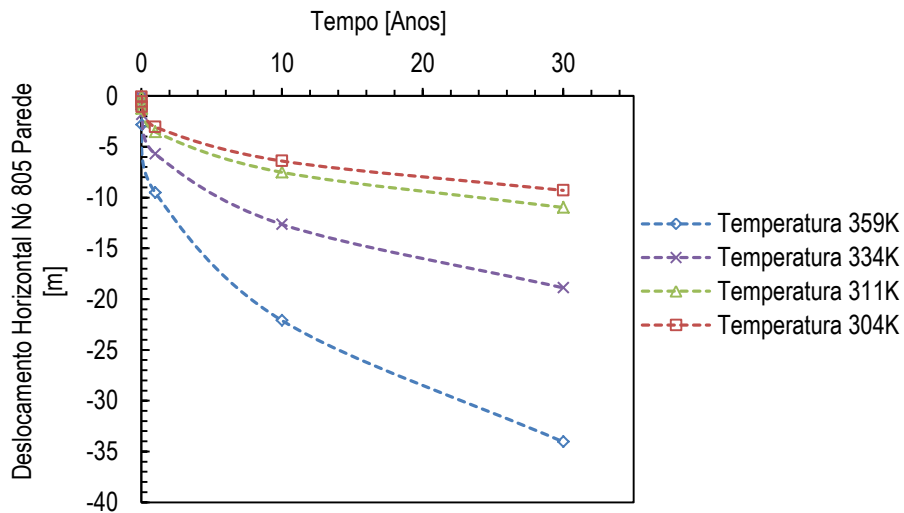


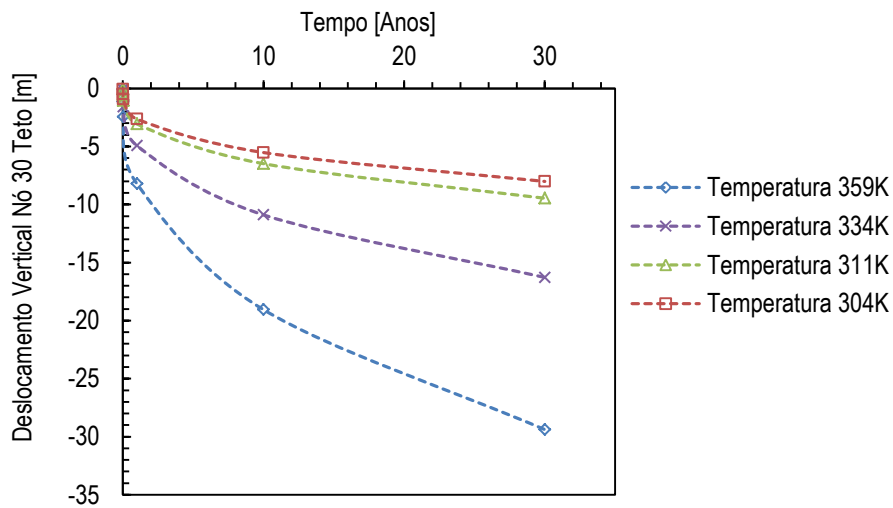
Figura 4-18 Variação da tensão de von Mises no nó 891 em kPa para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.

A Figura 4-19 apresenta os deslocamentos verticais e horizontais sofridos nos nós de análise. A Figura 4-19 (a) mostra como é o comportamento do nó 805 localizado na parede da escavação; onde se permite observar a forte influência da temperatura no valor dos deslocamentos apresentando uma diferença de 24,7 m entre o valor correspondente à temperatura maior e a temperatura menor para o tempo final de operação, que é de 30 anos. Este valor diminui com a redução dos tempos de operações, o que ratifica a importância da variável tempo no comportamento deste tipo de materiais, fato que ajuda a compreender melhor o comportamento de auto cicatrização em materiais evaporíticos.

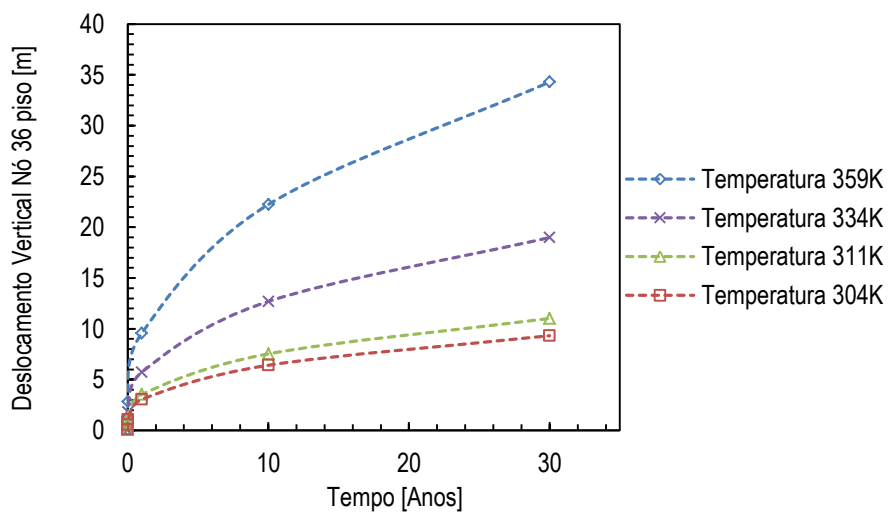
A Figura 4-19 (b) e Figura 4-19 (c) apresentam os deslocamentos sofridos pelos nós 30 e 36 localizados no teto e piso da caverna, respectivamente. As variações apresentadas por estes nós são de 21,3 m e 24,9 m representando o mesmo comportamento do nó 805 descrito no parágrafo anterior.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-19 Máximos deslocamentos apresentados na caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K. (a) Máximo deslocamento horizontal sofrido na parede. (b) Máximo deslocamento Vertical sofrido no teto. (c) Máximo deslocamento Vertical sofrido no piso.

A Figura 4-20 apresenta as variações da redução no volume da caverna com o tempo de operação para a condição de análise de 0% de pressão interna. Deve-se esclarecer de novo que esta condição é somente hipotética e se observa o erro de pretender ter a caverna sem pressão de suporte ao obter valores de convergência de mais do 100% para a temperatura de 359 K. Esta ilustração também permite exaltar a temperatura de 304 K como uma temperatura ideal na qual a redução do volume está em 58% ao final do tempo de operação, o que admite intuir que com poucos valores de pressão interna pode-se alcançar um valor de convergência mínima.

Ao comparar os valores obtidos de convergência geral no tempo de operação de 30 anos chega-se à conclusão que esta tem um comportamento linear com a temperatura. Isso é apresentado de forma mais clara pela Figura 4-21. Enquanto para uma mesma temperatura não é possível fazer a mesma afirmação, sendo este comportamento mais assemelhado a uma curva tipo potencial.

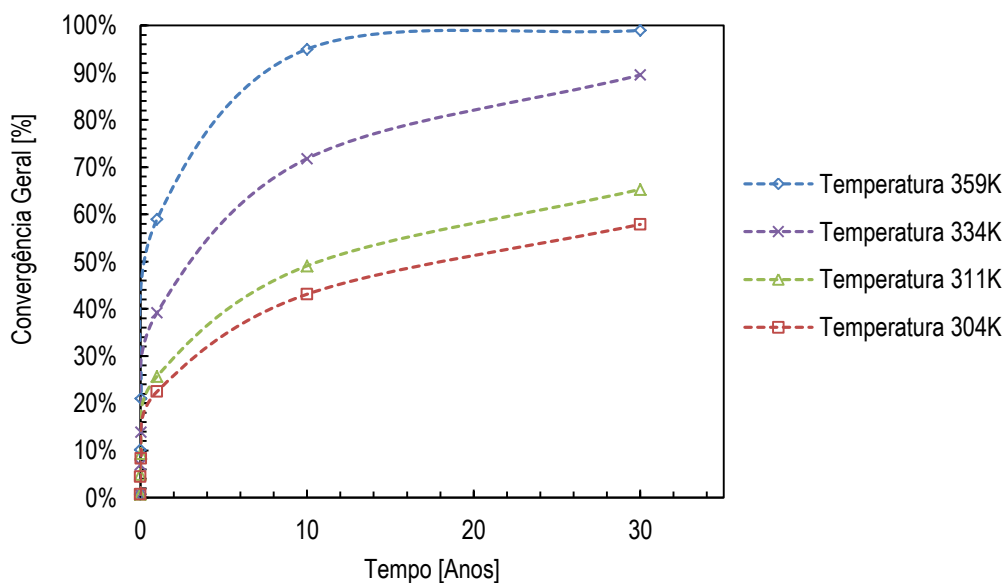


Figura 4-20 Convergência geral sofrida pela caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.

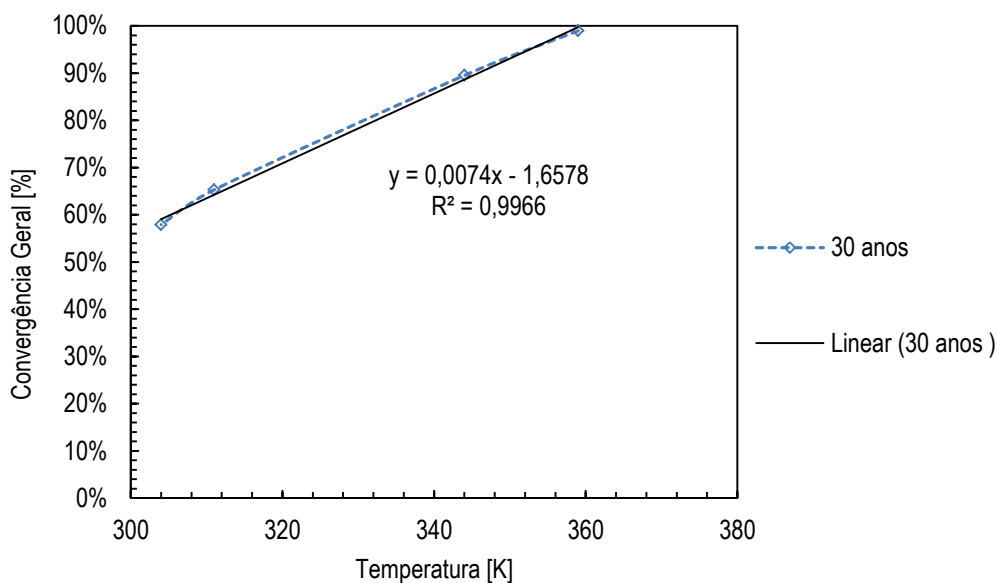


Figura 4-21 Convergência geral sofrida num tempo de operação de 30 anos da caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K.

4.2.3- VARIAÇÕES DA PRESSÃO INTERNA

Na procura da convergência ideal pra um tempo de análise igual a 30 anos optou-se por estudar o comportamento das curvas de fluência com variações da pressão interna; para isto foi necessária a aplicação de uma força externa do tipo pressão no passo de análise estático. Esta força foi definida a partir da tensão vertical in situ no topo da caverna equivalente a $\sigma_v = 51.108,94kPa$ em porcentagens de 0%, 10%, 30%, 50%, 70% e 90%.

Para o estudo das variáveis de investigação deslocamento horizontal e vertical nesta etapa decidiu-se estudar sete nós adicionais tendo no total de dez nós de estudo; três correspondentes aos de valores máximos e os outros com o propósito de compreender melhor as variações no perímetro da escavação. Para as variáveis fluência e tensão de von Mises se estudou somente o nó de valor máximo (Nó 891).

A Figura 4-22 apresenta a posição dos onze nós de estudo. Os nós 670 e 895 no teto e piso, respetivamente, estão localizados no meio do raio da caverna, ou seja, a uma distância de 15 m das bordas. Já os nós 792, 798 e 810 foram escolhidos de maneira aleatória na procura de obter valores equidistantes a 30 m aproximadamente.

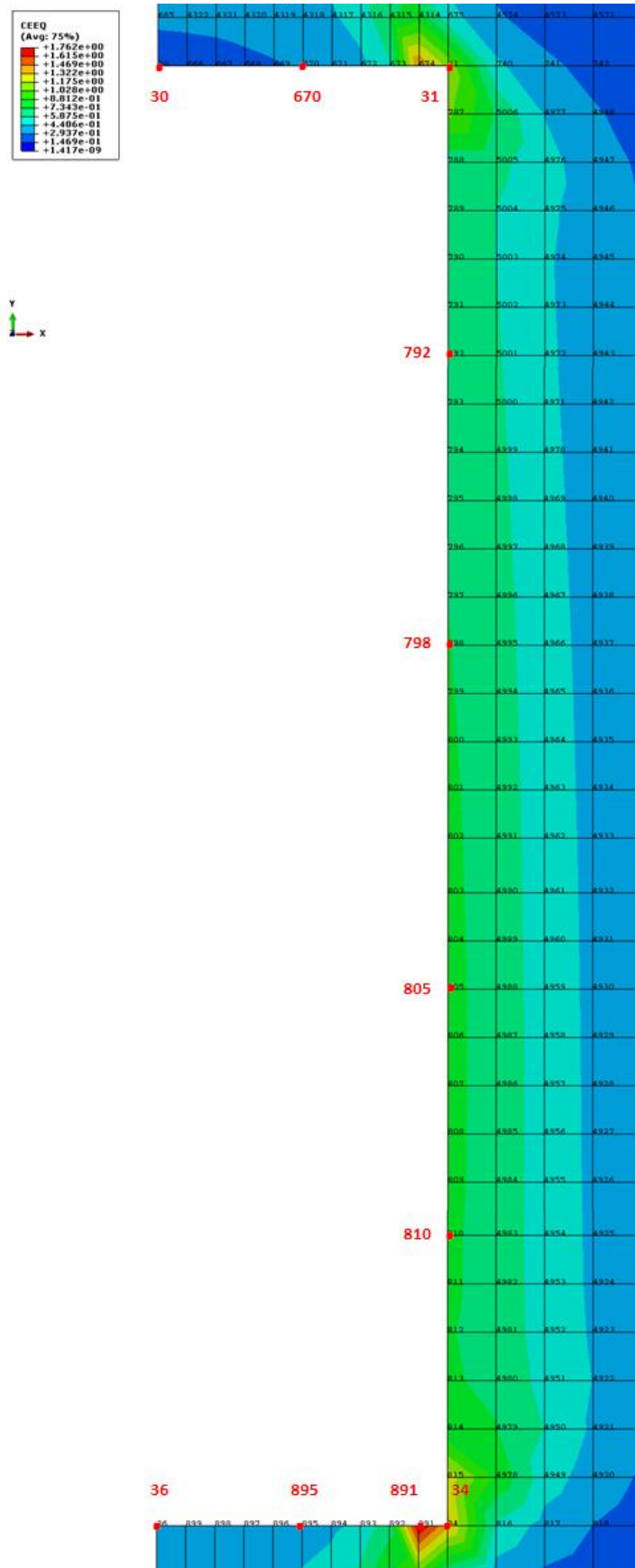


Figura 4-22 Localização dos onze nós de estudos na etapa de variação de pressão interna.

Primeiramente será discutido o comportamento da tensão de von Mises visando definir a viabilidade do uso da versão *time hardening* do *Abaqus* da lei potencial nesta etapa de estudo. A Figura 4-23 representa a variação da tensão de von Mises para os diferentes níveis de pressão interna, onde é possível observar pouca variação dentro de uma mesma curva de pressão, referindo-se numericamente a um valor máximo de 5,2 MPa apresentado entre o valor de tensão inicial com tempo de análise de um dia e final com tempo de análise de trinta anos, da curva de pressão interna equivalente a 30%, o que permite utilizar esta versão da lei potencial para todas as simulações. A Figura 4-24 enfatiza no comportamento linear desta tensão para os diferentes tempos de estudo.

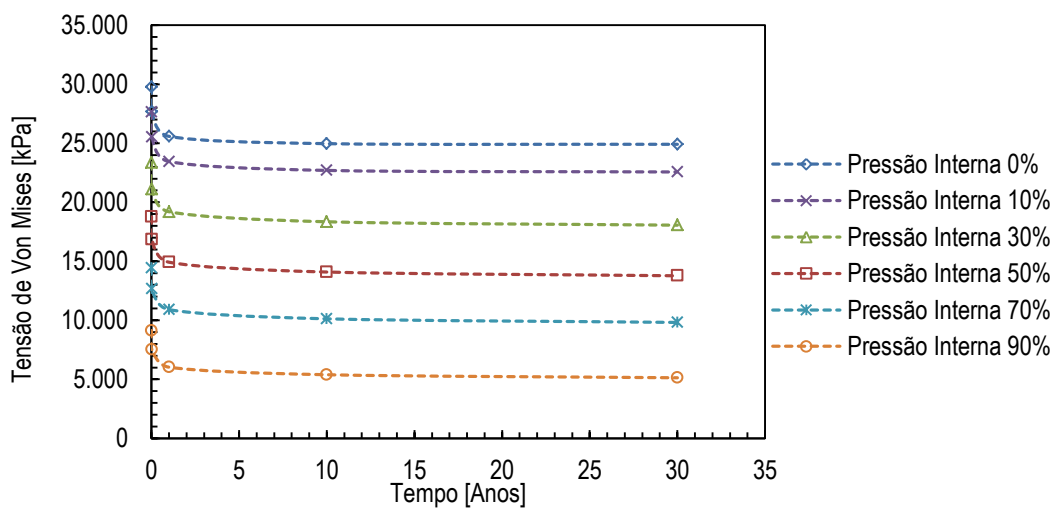


Figura 4-23 Variações da tensão de von Mises em kPa para as diferentes variações da pressão interna.

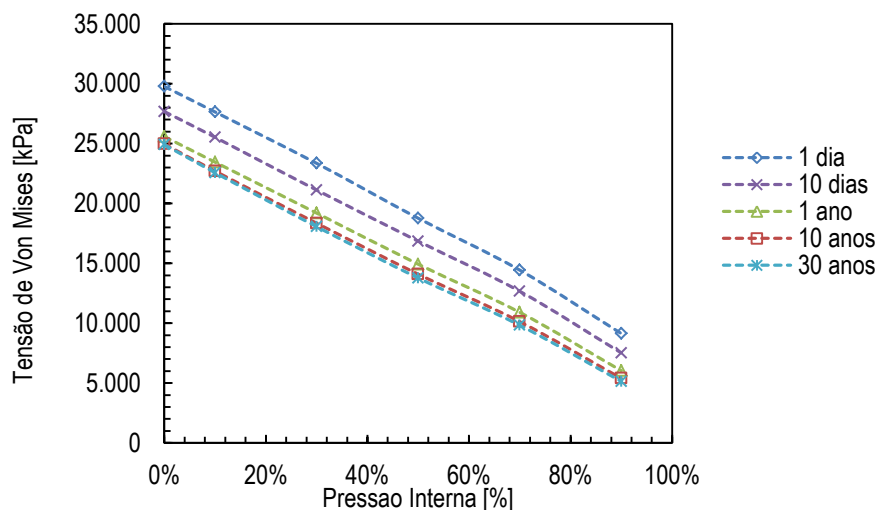


Figura 4-24 Variações da tensão de von Mises em kPa para as diferentes variações da pressão interna em tempos determinados.

Quando se observa a curva da Figura 4-25 verifica-se que a influência da pressão interna nas curvas de deformação equivalente ou de fluência é contrária à temperatura do maciço. Ou seja, para valores de pressões internas menores, a deformação é maior e para valores de pressões internas maiores, o valor de deformação por fluência é menor. No entanto as curvas apresentam um comportamento crescente no tempo, mas ao comparar para um mesmo tempo o efeito que tem a pressão interna como é apresentado na Figura 4-26 se observa um comportamento parabólico decrescente para valores muito próximos de zero para uma pressão interna de 90%.

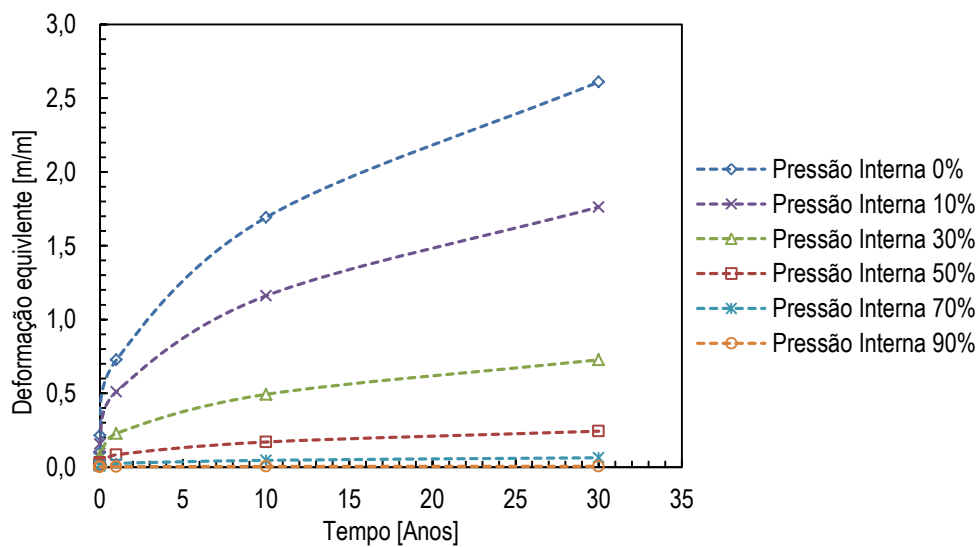


Figura 4-25 Deformação equivalente ou de fluência em metros para diferentes pressões internas.

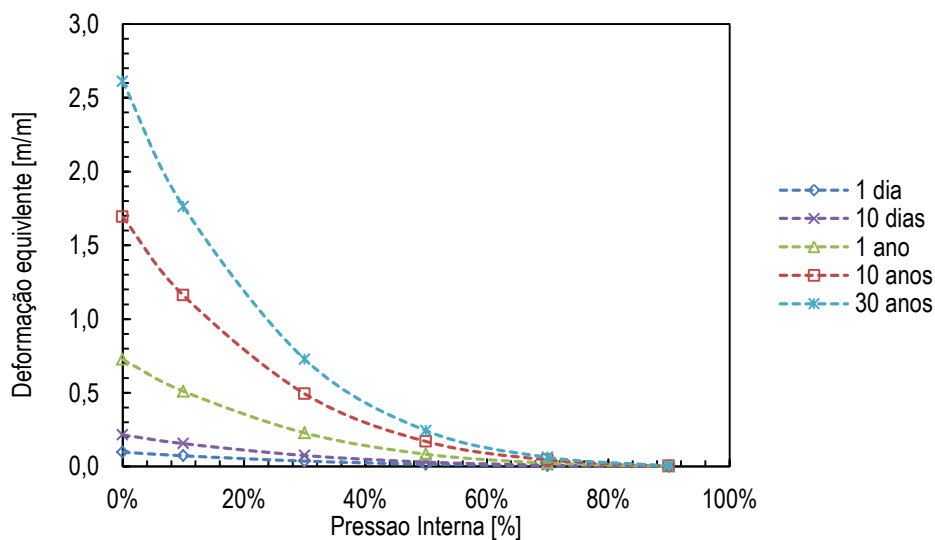


Figura 4-26 Deformação equivalente ou de fluência em metros para os diferentes tempos de análise.

Analisando a influência da pressão interna na redução do volume é apresentada a Figura 4-27, a qual mostra a convergência geral apresentada pela caverna, esta mostra a relação entre porcentagem da pressão interna e redução do volume da caverna em relação ao volume inicial. Desta figura é possível ressaltar como um valor de pressão interna mínima possível a utilizar em um projeto real. Por exemplo, o valor de 30% da tensão vertical in situ na profundidade de 3.500 m (curva verde) permite alcançar um valor de aproximadamente 58% de redução no volume ao final do tempo de operação com um valor de pressão relativamente baixo.

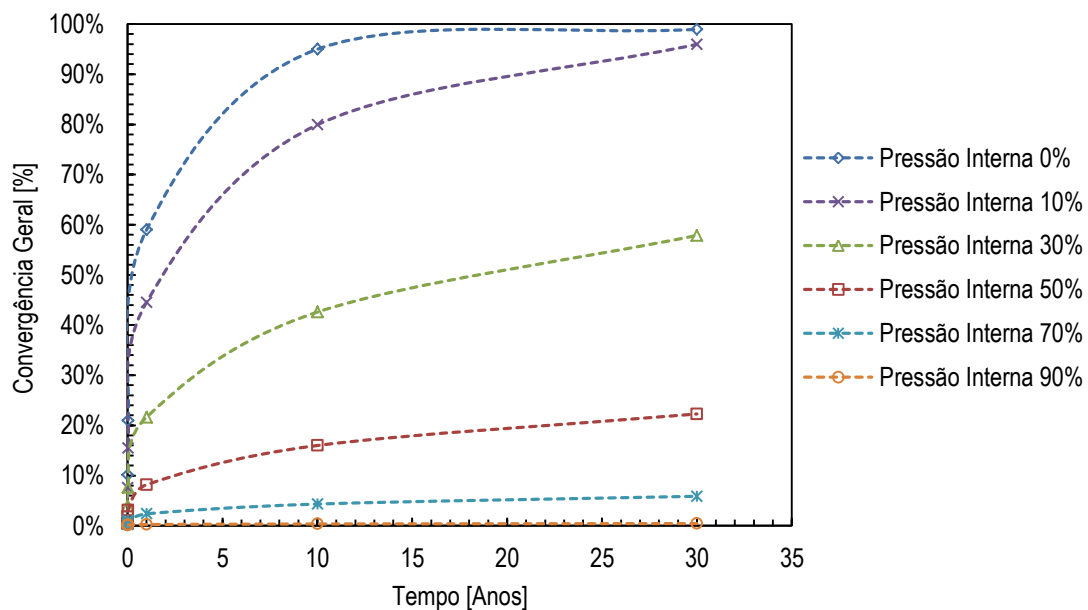


Figura 4-27 Convergência geral da caverna em porcentagem para as diferentes pressões internas.

O comportamento das curvas de convergência para os diferentes tempos de análises são apresentadas na Figura 4-28. Nesta se aprecia um comportamento decrescente, mas de difícil associação a uma tendência linear. Inicialmente pode-se assemelhar a uma curva polinomial de quarta ordem, mas com difícil associação a uma só equação matemática, pois cada uma destas curvas apresenta valores diferentes em sua descrição matemática.

Um exemplo do anterior é apresentado na Figura 4-29; onde é possível observar os valores diferentes de parâmetros que compõem a linha de tendência.

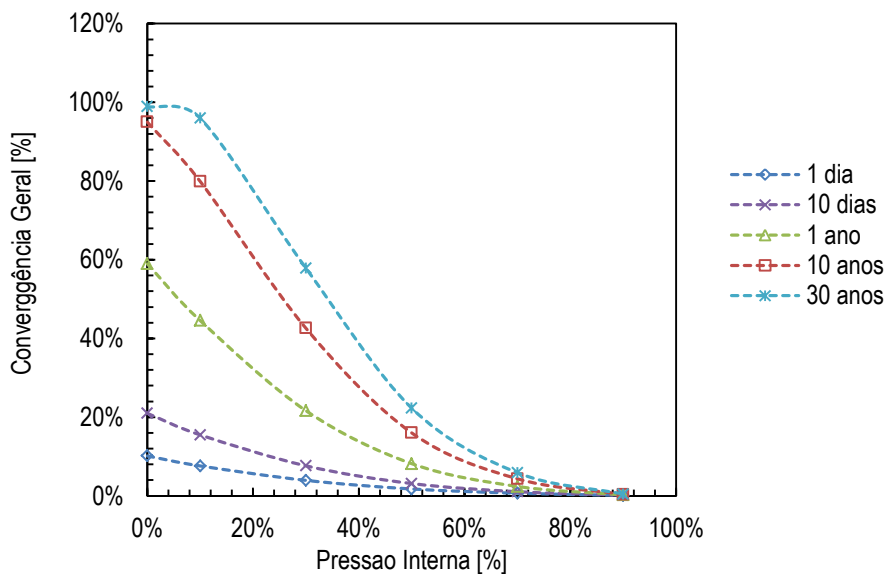


Figura 4-28 Convergência geral da caverna em porcentagem para os diferentes tempos de análises.

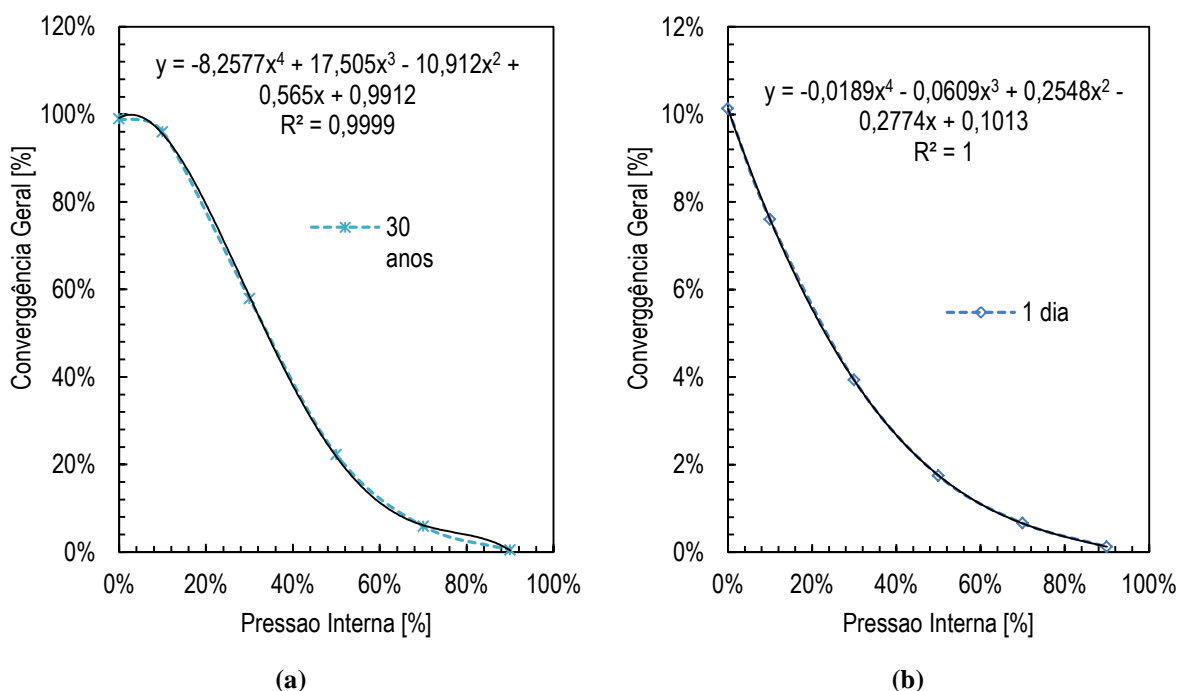


Figura 4-29 Associação de uma linha de tendência para o comportamento de convergência para diferentes pressões interna em um só tempo de análise. (a) trinta anos (b) um dia.

As velocidades de convergência anuais apresentadas na Figura 4-30 mostram valores muito altos para os primeiros dias de análise e um comportamento decrescente para o tempo posterior, dado que a escavação não pode ter uma convergência maior que 100% da taxa de convergência anual para o período de 30 anos de operação, ou seja, não pode ser maior que 3,33% como foi o valor alcançado para a pressão interna de 0%.

Os valores de velocidade de convergência anual ao final do tempo de operação são: 3,20%, 1,93%, 0,74%, 0,20% e 0,01% para as pressões de 10%, 30%, 50%, 70% e 90% respectivamente.

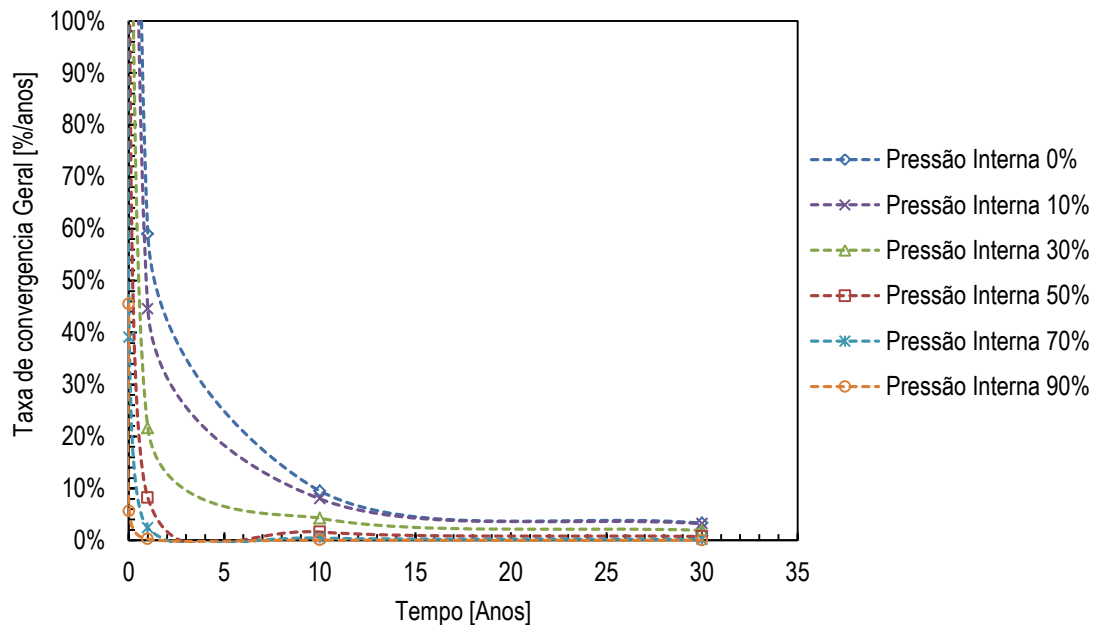
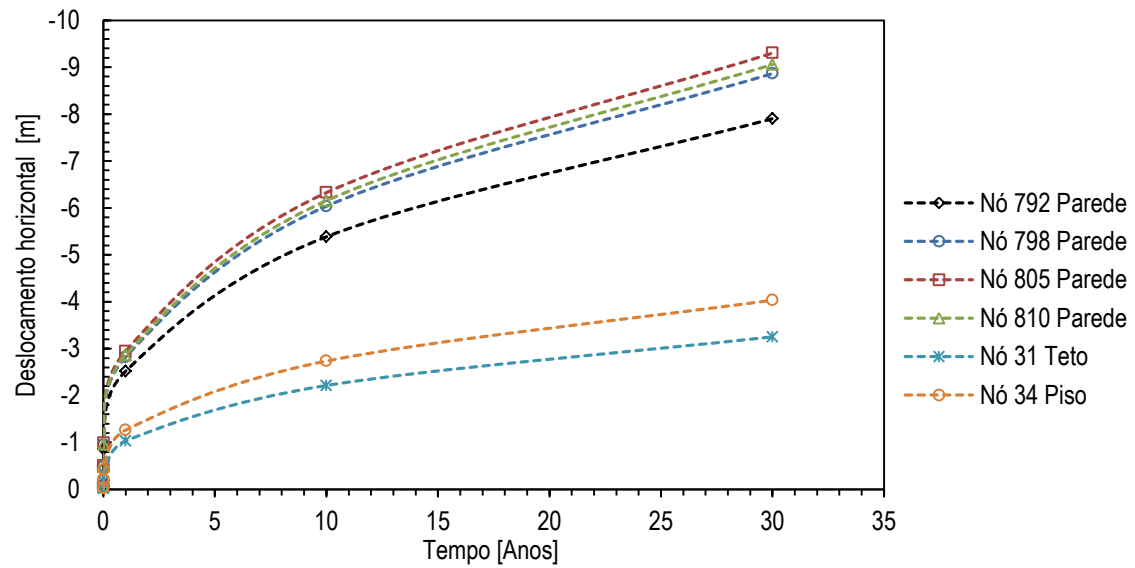


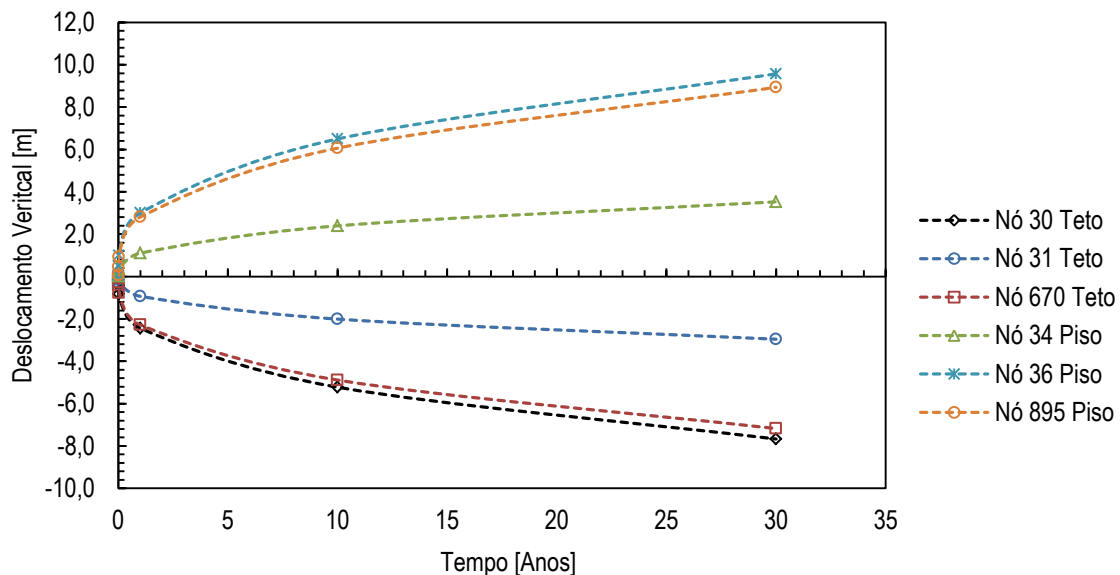
Figura 4-30 Velocidade de convergência geral em porcentagem por ano para as diferentes pressões internas.

A Figura 4-31 representa os deslocamentos horizontais e verticais apresentados na caverna para uma pressão interna de 30%. Observa-se que o maior deslocamento horizontal apresentado é de 9,3m no nó 805 na parede em valor negativo o que quer dizer que a parede se desloca à esquerda de sua posição original. Para os deslocamentos verticais os valores maiores correspondem ao nó 30 no teto com um valor negativo de 7,7m que indica que o teto da caverna se desloca para baixo; e o nó 36 no piso com um deslocamento de 9,6m. Todos estes deslocamentos reduzindo o volume da caverna.

Em conclusão o raio da caverna ao final do tempo de operação se reduz a 207 m e a altura a 132,7 m dando como resultado uma caverna com um volume de 178.693,9 m³, o que corresponde a um 42% do volume inicial.



(a)



(b)

Figura 4-31 Deslocamentos na caverna para uma pressão interna de 30% da tensão vertical in situ no topo da caverna. (a) Deslocamento Horizontal. (b) Deslocamento Vertical

4.2.4- ANÁLISES NA TEMPERATURA E PRESSÃO INTERNA IDEAL

Determinou-se como a temperatura e a pressão interna ideais aquelas que representam uma convergência próxima a 60%. Neste item da pesquisa pretende-se analisar o resultado da combinação destes dois parâmetros.

Lembrando a Figura 4-20 e Figura 4-27 que apresentam as curvas de convergência geral sofrida pela caverna para as temperaturas 359 K, 334 K, 311 K e 304 K e a Convergência geral da caverna para as diferentes pressões internas, respectivamente. Observa-se que a que a

temperatura de 304 K utilizada por Costa et al. (2012) em seu trabalho e a pressão interna da caverna correspondente a 30% da tensão vertical no topo da caverna, são os parâmetros que se ajustam ao propósito de uma análise em condição ideal, decidiu-se simular o comportamento da caverna com a combinação destes dois parâmetros.

Igualmente as análises anteriores simulou-se o comportamento da caverna na versão *time hardening* do software *Abaqus*. A Figura 4-32 apresenta os resultados obtidos para esta simulação na condição não deformada e a Figura 4-33 os deslocamentos na condição deformada.

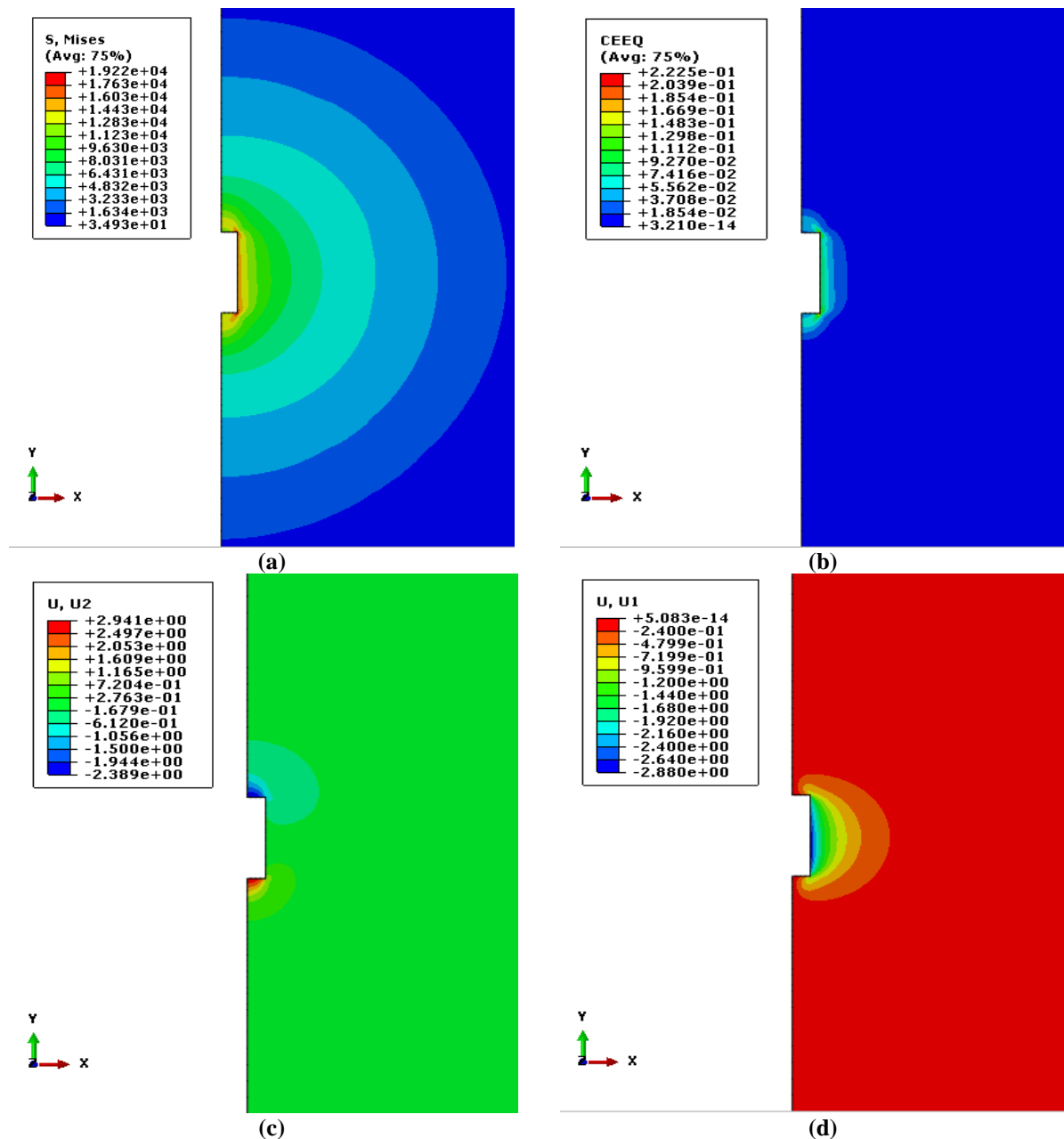


Figura 4-32 Resultados obtidos ao término de 30 anos na simulação de caverna com temperatura de 304 K e 30% da pressão interna na condição não deformada (a) Tensão de von Mises. (b) Deformação por fluência. (c) Deslocamento Vertical (d) Deslocamento Horizontal.

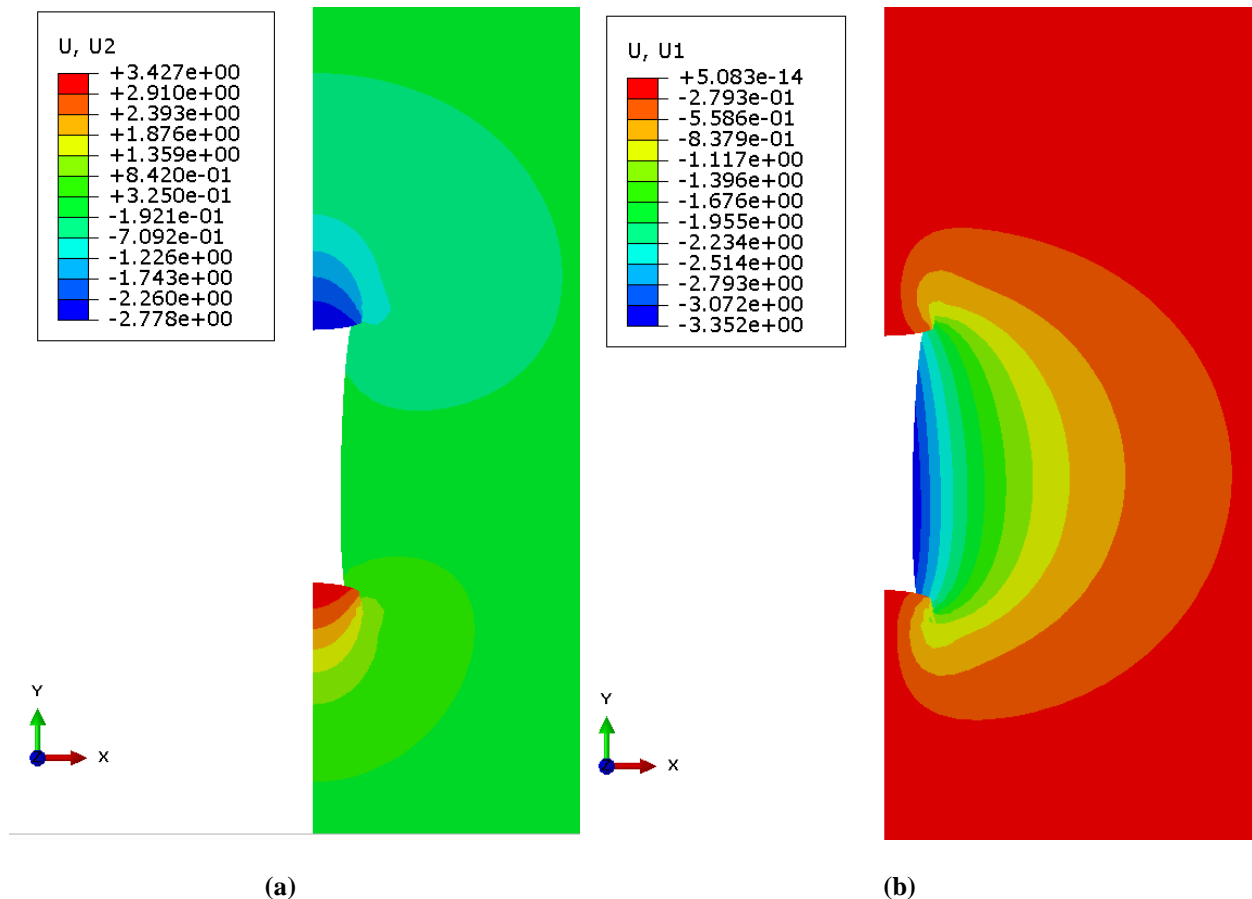


Figura 4-33 Resultados de deslocamentos ao término de 30 anos na simulação de caverna com temperatura de 304 K e 30% da pressão interna na condição deformada (a) Deslocamento Vertical . (b) Deslocamento horizontal

A Figura 4-34 representa a convergência geral para o caso de análise; nele se observa que o valor de redução no volume cai para 21% indicando que a combinação destes dois parâmetros produz uma redução de 37% o que equivale a uma taxa de convergência de 1,23%.

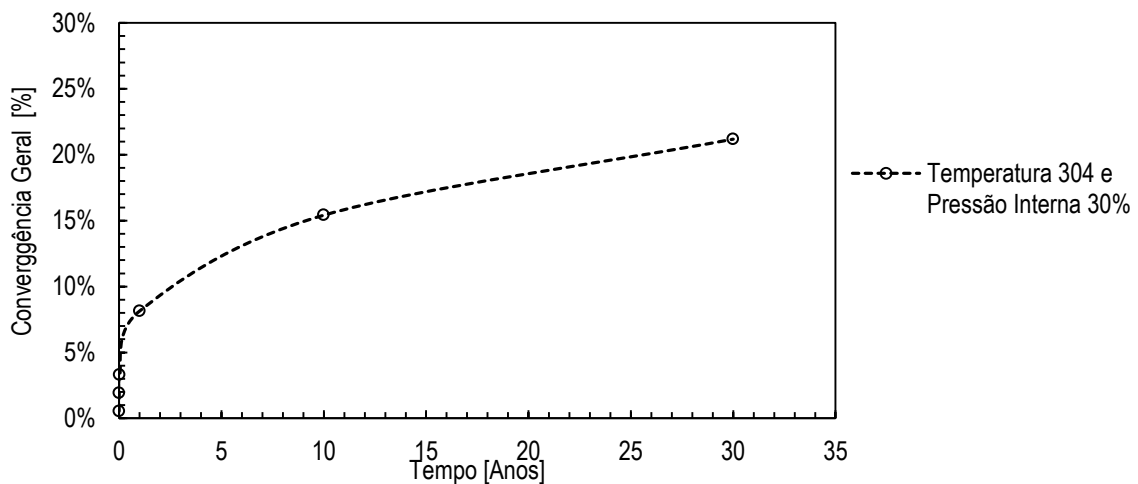


Figura 4-34 Convergência geral da caverna com temperatura de 304°K e pressão interna 30%.

Os valores de deformação por fluência também caíram de forma extrema de valores de 0,70 m/m para 0,22 m/m como é apresentado na Figura 4-35. Este valor de deformação está relacionado a uma tensão de von Mises de 19 MPa. Enquanto que para a condição de temperatura de 304 K e pressão interna igual a zero se encontrava uma tensão de von Mises ao final do período de 25,6 MPa e para a condição de pressão interna de 30% e temperatura de 359 K esta mesma tensão foi de 18 MPa. Destes resultados, conclui-se que pressão interna exerce maior efeito nesta variável que a temperatura.

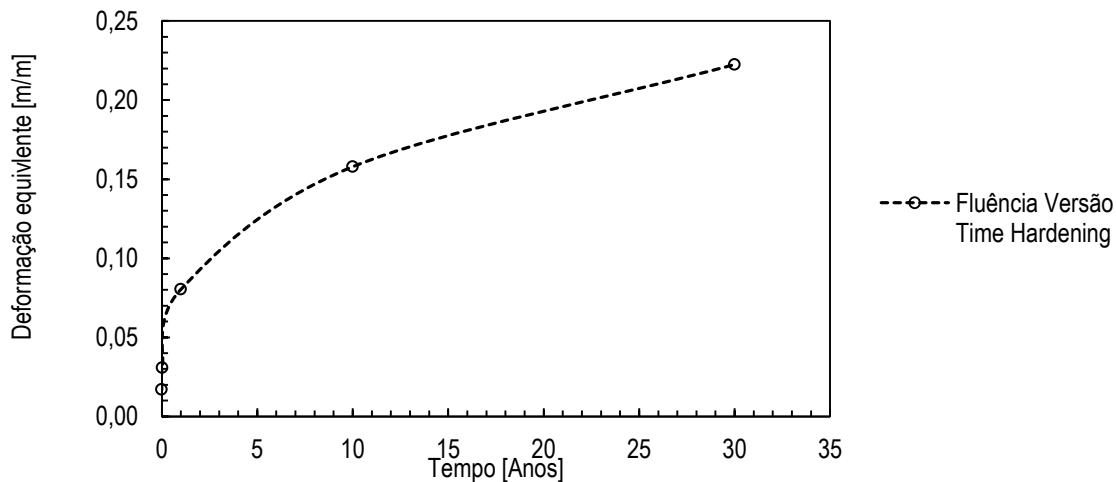
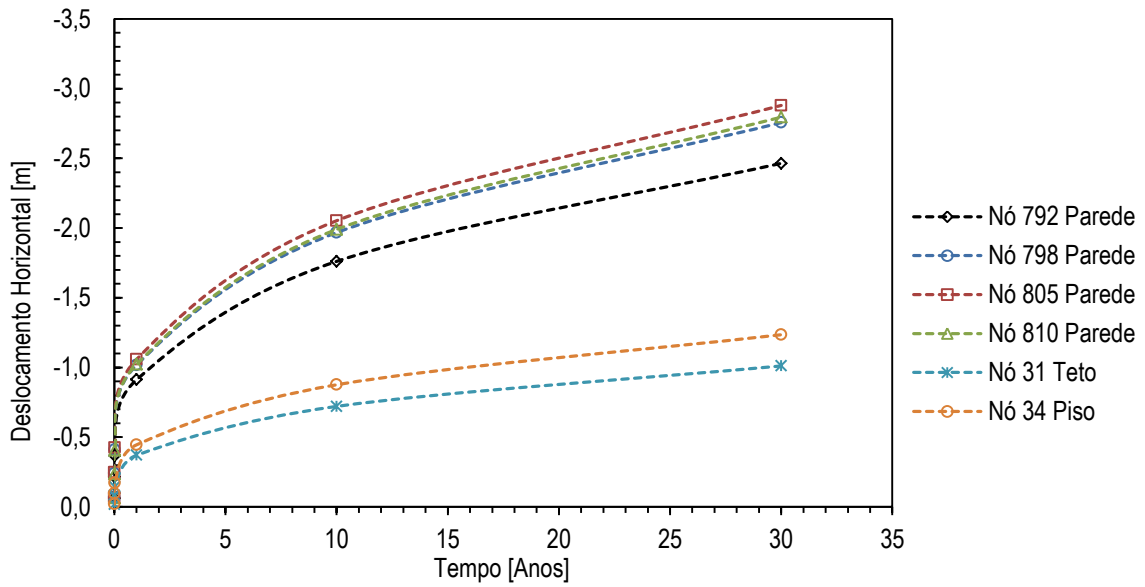
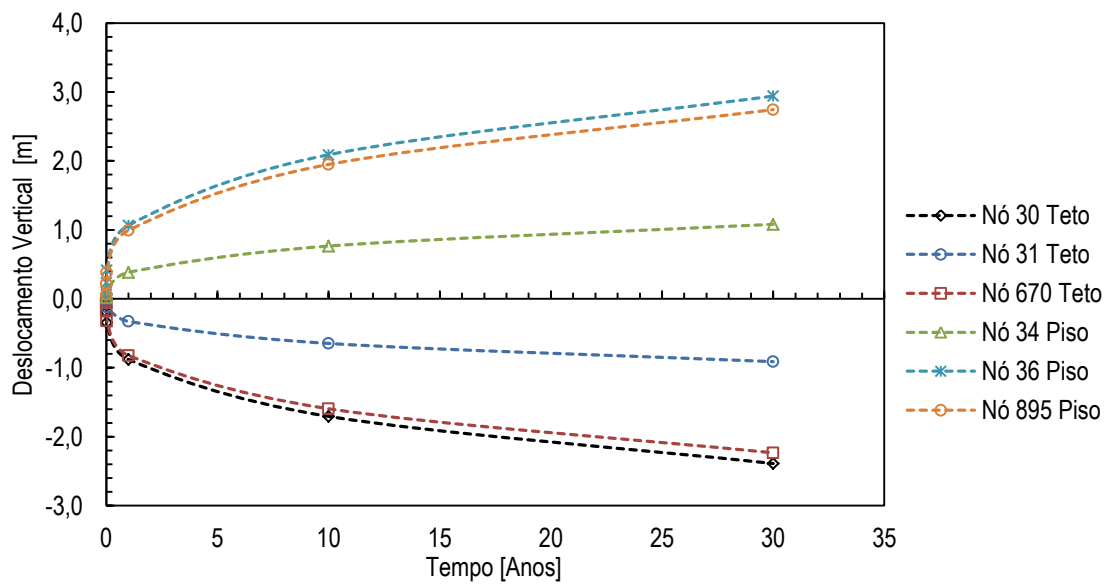


Figura 4-35 Curva de deformação por fluência da caverna com temperatura de 304 K e pressão interna 30%.

Para a análise dos deslocamentos neste novo caso de estudo é apresentada a Figura 4-36 onde se observa que os deslocamentos obtidos das duas situações anteriores diferenciam de 6,5 m aproximadamente, gerando nesta nova condição uma diminuição no raio de 2,88 m e na altura uma diminuição de 5,33 m. Estes valores correspondem a uma redução no volume ao final do tempo de operação de 89.828,11 m³ o que é equivalente a aproximadamente a 21% do volume total.



(a)



(b)

Figura 4-36 Deslocamentos na caverna para uma temperatura de 304 K e pressão interna de 30% da tensão vertical in situ no topo da caverna. (a) Deslocamento Horizontal. (b) Deslocamento Vertical

5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O comportamento dependente do tempo dos materiais evaporíticos é um tema complexo, que vem sendo estudado com frequência nos últimos anos, dado o vínculo destes materiais com grandes reservas de petróleo. Dentre as principais dificuldades assumidas durante esta investigação encontram-se os poucos dados experimentais disponíveis para uma correta compreensão do comportamento destes materiais.

Nesta pesquisa estudou-se de maneira satisfatória os modelos mais comumente utilizados para descrever o comportamento viscoelástico dos materiais salinos, o estudo permitiu adotar um modelo constitutivo eficiente na correlação dos estados de tensão, deformação, temperatura e tempo. Entre as leis matemáticas empregadas para o estudo da fluência incluem-se as leis empíricas, as leis fundamentadas em modelos reológicos e leis baseadas nos mecanismos físicos de deformação da matriz rochosa.

De cada uma destas divisões foi analisado um modelo que permite-se simular o comportamento de fluência de uma caverna construída em uma camada de halita de mais de 2.000 m de espessura. Os modelos estudados foram:

- O modelo do mecanismo duplo de deformação geralmente é empregado para descrever o comportamento em estado estacionário de fluência, mas na realidade é impossível saber o ponto de mudança no comportamento do material; ou seja, o material pode simplesmente ter durante todo o tempo de análise um comportamento crescente na taxa de deformação por fluência e finalmente romper ou ter um comportamento constante nesta taxa antes de romper. Esta condição e os resultados obtidos por Poiate (2012) sobre as alterações de mecanismos de deformação com a temperatura do maciço fizeram excluir este modelo.
- O modelo reológico de Burgers apresenta um inconveniente ao tentar ajustar sua equação matemática às curvas experimentais, uma vez que é necessária a fase de descarregamento durante a execução dos ensaios para isolar corretamente os parâmetros da equação, fato que gerou a exclusão do modelo, pois as curvas experimentais obtidas para o ajuste paramétrico da equação somente se dispõem da fase de carregamento.
- O modelo empírico potencial finalmente foi o escolhido nesta pesquisa. A equação potencial mais utilizada para representar o comportamento de fluência das rochas evaporíticas foi desenvolvida por Lomenick (1971). Esta equação geralmente é uma das mais usadas na literatura devido a sua simplicidade e a ter fornecido resultados satisfatórios em simulações de fluência em cavidades subterrâneas em evaporitos. Outras

considerações que fizeram empregar a lei potencial neste estudo estão os ótimos ajustes encontrados por autores nacionais e internacionais a dados experimentais e integração do modelo no software de elementos finitos utilizado (*Abaqus*), o que implicou uma diminuição no tempo de execução da pesquisa.

Ao comparar os ajustes feitos à equação potencial por autores como Starfield & McClain (1973), Hansen & Mellegard (1977) e Costa (1984) com os dados experimentais obtidos por Cella (2003) concluiu-se que estes não representavam um bom ajuste. Portanto decidiu-se fazer o ajuste paramétrico a partir destes dados experimentais; o que permitiu resultados satisfatórios do qual se conclui o seguinte:

- O parâmetro k da equação desenvolvida por Lomenick (1971) é uma variável de difícil determinação, pois esta sofre variações importantes a depender dos estados de tensão, temperatura e tempo de cada ensaio; quando se pretende compreender a dependência deste parâmetro com variáveis como a temperatura se encontrou um comportamento que tende a uma função potencial; no entanto esta afirmação não pode ser ratificada pela ausência de ensaio de fluência para diferentes temperaturas.
- Ao fazer um ajuste paramétrico para cada um dos níveis de tensão desviatória dos ensaios encontrou-se valores de coeficiente de determinação R^2 melhores, mas isso não representa a realidade de uma obra de engenharia, portanto este tipo de ajuste não foi utilizado; ele serviu como elemento na compreensão do comportamento dos parâmetros k, b com a tensão desviatória. Estas duas relações apresentaram um comportamento diferente, mas tendo em comum um ponto de inflexão em uma tensão desviatória de 10 MPa. Este ponto pode estar relacionado à mudança de mecanismo de deformação descrito por diferentes autores. Deve-se observar se este ponto de inflexão se apresenta em o mesmo local para ensaios de igual tensão desviatória e tempo, mas para uma temperatura diferente. Dado os resultados encontrados por Poiate (2012) pode-se adiantar uma conclusão encontrada desta afirmação.
- Quando analisadas as deformações por fluência sofridas em um tempo específico para os diferentes níveis de tensão desviadora se observou uma tendência crescente do tipo exponencial; indicando maiores deformações para valores maiores de tensão desviatória.
- A equação ajustada para ensaios a uma temperatura de 359 K é:

$$\varepsilon = 4,27 \cdot 10^{-46} \sigma^{4,337} t^{0,451} T^{9,5}$$

- Esta equação representou bons resultados ao comparar com a curva de fluência obtida através da reprodução de um dos ensaios feitos por Cella (2003) no software de elementos finitos Abaqus o que permitiu seu uso na modelagem de convergência.

Na modelagem de convergência foram consideradas quatro temperaturas diferentes e seis níveis de pressão interna. Estes dois casos foram simulados, o primeiro com uma pressão interna de 0% e o segundo com a temperatura de ajuste paramétrico de 359 K.

Os resultados mostram que a influência da temperatura na redução do volume da caverna é do tipo linear, enquanto as deformações apresentam um comportamento potencial conforme o esperado. As variações da tensão de von Mises, em ambos tipos de análise, permitiram ratificar a utilização da versão de integração *time hardening* como correta nestas simulações.

Por outro lado os resultados encontrados nas variações de pressão ao interior da caverna permite concluir um comportamento parabólico decrescente para a deformação com tendência a zero quando a pressão aumenta para o 90% da tensão vertical in situ no topo da caverna. É um comportamento parabólico de quarta ordem difícil de ajustar a uma só equação matemática para a convergência geral.

Com base nas conclusões anteriores e em procura da convergência mínima se fez uma última modelagem. Nela foi utilizada a temperatura de 304 K e a pressão interna de 30% as quais apresentarem uma convergência ao final do tempo de operação de 58%. Esta simulação forneceu como resultado uma convergência geral de 21% permitindo fazer a seguintes conclusões:

- Nos casos práticos as condições reais do projeto devem ser definidas com a melhor precisão, como no caso da temperatura do maciço hospedeiro, pois eles vão influenciar diretamente os resultados, sejam superestimados ou subestimados.
- A compreensão dos efeitos que exerce uma camada evaporítica nas rochas sedimentares comuns suprajacentes a ela é de importância na escolha dos locais de construção destas cavernas e sua simulação numérica, pois isto influi diretamente nas tensões no interior do maciço e, portanto nos deslocamentos que ele vai sofrer durante a etapa de operação.
- A aplicação da mecânica computacional serve como uma ferramenta de previsão do comportamento deformacional do material, mas para isso deve-se fazer um correto ajuste dos parâmetros e propriedades do maciço através de ensaio como, por exemplo, os ensaios de reflexão sísmica que permitam determinar parâmetros como o módulo de elasticidade E

e o coeficiente de Poisson ν ; ensaio que permitam a obtenção das tensões in situ recomendando o ensaio de Dilatômetro, além de ensaios de resistência à compressão na procura de resultados mais próximos à realidade.

Finalmente para pesquisas futuras encaminhadas a esta linha de investigação se propõe uma campanha de ensaio laboratoriais em diferentes condições de tensão de confinamento, tensão desviatória e temperatura que permitam a compreensão a fundo do comportamento complexo dos materiais evaporíticos. Sendo estes dados experimentais a base fundamental para as novas modelagens numéricas que busquem a previsão do desempenho destes materiais.

Uma campanha de ensaios de fluência e relaxação de tensões permitiria a utilização do modelo reológico de Burgers na procura de resultados mais próximos da realidade.

Em busca de resultados mais reais, simulações que levem em conta as perturbações das tensões in situ causadas pela presença de estruturas salinas em outras camadas que compõem a formação rochosa, e a utilização de uma técnica de transferências de tensões aplicada ao estudo de cavernas que dão origem a modelos com um custo computacional menor é uma proposta razoável para a continuação desta investigação que até agora se encontra em uma fase preliminar.

Em quanto à parte de simulações numéricas a seguir, se recomenda a utilização de gradientes geotérmicos dentro da camada analisada e utilização de pressões ao interior da caverna maiores a 100% com o propósito de gerar fraturas nas paredes e conhecer o ponto limite superior para este valor. Também são recomendadas simulações nas quais são tidos em conta os períodos de injeção e extração e os períodos de recesso nas operações da caverna, na procura de obter o maior tempo admissível para certos níveis de pressão interna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaqus-6.10. (2010). Abaqus analysis user's manual (No. III).
- Assis, A.P. (1990). A method for evaluating the transient creep of potash. PhD thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada, 502 p.
- Bary, A., Crotogino, F., Prevedel, B., Berger, H., Brown, K., Henzell, M., Mohmeyer, K.-U., Ren, N.-K. & Stiles, K. (2002). Storing natural gas underground. Oilf. Rev. - Schlumberger, 14(2): 16.
- Botelho, F.V.C. (2008). Análise numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 211 p.
- Boulianne, M., Polytechnique, É., Simon, R. & Aubertin, M. (2004). A numerical investigation of the creep (viscoplastic) behaviour of circular opening and pillar in rocksalt. 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec, 25–32.
- BP. (2013). BP Statistical review of world Energy.
- Bresolin, G. (2010). Simulação do comportamento dúctil de rochas salinas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 136 p.
- Brown, K., Chandler, K.W., Hopper, J.M. & Hawkins, J. (2008). Intelligent well technology in underground gas storage. Oilf. Rev. - Schlumberger, 20(1): 4–19.
- Cavalcante, A.D.S. (2012). Modelagem numérica de escavações de túneis em maciços evaporíticos. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 194 p.
- Cella, P.R. (2003). Desenvolvimento e execução de ensaios triaxiais de fluência estacionária em rochas salinas sob altas pressões e temperaturas. Teses de Doutorado, Universidade de São Paulo, 203 p.
- CODIGAZ, T. international association for natural gas. (2013). Underground gas storage in the world 2013 [WWW Document]. URL <http://www.cedigaz.org/products/underground-gas-storage/underground-gas-storage-executive-summary.aspx>
- Confort, M.J.F. & Mothe, C.G. (2014). Estimating the required underground natural gas storage capacity in brazil from the gas industry characteristics of countries with gas storage facilities. J. Nat. Gas Sci. Eng., 18: 120–130.
- Coppe/UFRJ. (2014). História do Petróleo [WWW Document]. URL <http://www.petroleo.coppe.ufrj.br/historia-do-petroleo/>
- Correa, T. & Castrillón, E. (2008). Stagem of natural gas (in spanish). Rev. Tecnológicas, (21): 143–67.

- Costa, A.M. (1984). Uma aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análise de escavações destinadas a mineração subterrânea. Teses de Doutorado, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1506 p.
- Costa, A.M., Amaral, C.S. & Poiate, E. (2012). Underground storage of natural gas and CO₂ in salt caverns in deep and ultra-deep water offshore Brazil. *Harmon. Rock Eng. Environ.*, : 1659–1664.
- Costa, A.M. & Poiate, E.J. (2008). Rochas salinas na indústria do petróleo: aspectos relacionados à reologia e à perfuração de rochas salinas. *Sal: Geologia e tectônica: Exemplos nas bacias Brasileiras*, Ltda, B.E. (Ed.), São Paulo, pp. 361–382.
- Costa Leite, M.E., Ramos Leão, V.C. & Lira Matos, W.W. (2009). Estudo dos evaporitos com ênfase na bacia Sergipe-Alagoas. 5º Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás, .
- Costa, P.V.M. da. (2013). Uso estratégico de espaço subterrâneo para estocagem de gás em cavernas abertas por dissolução de rocha salina. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidad Católica do Rio de Janeiro.
- Dusseault, M.B. & Fordham, C.J. (1993). Time-dependent behavior of rock. *Comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects: Rock testing and site characterization*, v. 3, pp. 119–149.
- Dusseault, M.B. & Mraz, D.M. (1987). Creep behaviour of salt rock. 40 th Canadian geotechnical conference, Regina, Saskatchewan, 11.
- EIA. (2013a). Brazil is the 8th largest total energy consumer and 10th largest producer in the world. *U.S. Energy Inf. Adm.*, 2013: 13.
- EIA. (2013b). Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources : An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States.
- Farmer, P. & Miller, D. (1996). Exploring the subsalt. *Oilf. Rev. - Schlumberger*, 40(1977): 68–69.
- FERC. (2004). Current state of and issues concerning underground natural gas storage.
- Findley, W.N., Lai, J.S. & Onaran, K. (1976). Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials: with an introduction to linear viscoelasticity. North - Holland Publishing, 344 p.
- Fredrich, J.T., Coblenz, D., Fossum, A.F. & Thorne, B.J. (2003). Stress perturbations adjacent to salt bodies in the deepwater gulf of Mexico. *Soc. Pet. Eng., SPE-84554-*: 14.
- Giouse, H. (2012). 2009-2012 Triennium work report Working committee 2: Underground gas storage.
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. Second Edi. Copyright, Berkeley, 562 p.

- Gravina, C.C. (1997). Simulação numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 168 p.
- Hansen, F.D. & Mellegard, K.D. (1977). Creep behavior of bedded salt from southeastern New Mexico at elevated temperature.
- Hudec, M.R. & Jackson, M.P. a. (2007). Terra infirma: understanding salt tectonics. *Earth-Science Rev.*, 82(1-2): 1–28.
- Hunsche, U. & Hampel, A. (1999). Rock salt — the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. *Eng. Geol.*, 52(3-4): 271–291.
- Lindblom, U.E. (1994). History and present status of hydrocarbon storage in excavated rock caverns. *Soc. Pet. Eng., SPE 28112*: 663–670.
- Lomenick, J.A. (1971). Project salt vault: a demonstration of the disposal of high-activity solidified wastes in underground salt mines.
- Lu, M. (2010). Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage. *Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2(4): 289–297.
- Luo, G., Nikolinakou, M., Flemings, P.B. & Hudec, M. (2011). Geomechanical modeling of stresses adjacent to salt bodies: uncoupled models. Adapt. from oral Present. *AAPG Annu. Conv. Exhib.*, 40777.
- Mohriak, W., Szatman, P. & Anjos Couto, S.M. (2008). *SAL Geologia e tectônica: Exemplos nas bacias Brasileiras*. Primeira e. São Paulo, 424 p.
- Munson, D.E. (1997). Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure. *Rock Mech. as a Multidiscip. Sci.*, 9062(96).
- Munson, D.E. & Devries, K. (1991). Development and validation of a predictive technology for creep closure of underground rooms in salt. *Int. Congr. Rock Mech.*, 7: 127–134.
- Oliveira, P.R. (2004). Análise não linear de deformação lenta utilizando o método dos elementos finitos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 106 p.
- Orozco, S.O. (2013). Estabilidade de poços em zonas de sal empregando técnicas de transferência de tensões. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 187 p.
- Orozco, S.O., Fontoura, S.A.B. & Inoue, N. (2013). Numerical 3d stability analysis of wells drilled through salt zones. *Am. Rock Mech. Assoc.*, 434(ARMA 13-434): 12.
- Ozarslan, A. (2012). Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *Int. J. Hydrogen Energy*, 37(19): 14265–14277.

- Petrobrás, C. (2014). Petrobras [WWW Document]. URL <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>
- Poiate, E.J. (2012). Mecânica das rochas e mecânica computacional para projeto de poços de petróleo em zonas de sal. Tese doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Poiate, E.J., Costa, A.M., Falcao, J.L. & Petrobrás, S.A. (2006). Well design for drilling through thick evaporite layers in santos basin- brazil. Soc. Pet. Eng., SPE 99161: 16.
- Sanz, P.F. & Dasari, G.R. (2010). Controls on in-situ stresses around salt bodies. Am. Rock Mech. Assoc., 169: 16–18.
- Serata, S., Adachi, T. & Saklurai, S. (1968). Theory of aggregate rock behavior based on absolute three-dimensional testing (att) of rock salt. Am. Rock Mech. Assoc., : 44.
- Silva, I.J.M. da. (2010). 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.
- Starfield, a. M. & McClain, W.C. (1973). Project salt vault: a case study in rock mechanics. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 10(6): 641–657.
- U.S. Departement of Energy. (2014). Strategic petroleum reserve annual report for calendar year 2012.
- Warren, J.K. (2006). Solution mining and cavern use. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons, Springer (Ed.), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 893–943.
- Zhao, Y. & Zhang, Y. (2011). Creep numerical analysis of bedded rock salt gas storage. Am. Soc. Civ. Eng., (222): 248–255.