

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO DA SILVA PARANHOS SOBRINHO

CONSIDERAÇÃO DO REPASSE NA MODELAGEM DO FECHAMENTO DE POÇOS  
VERTICAIS EM ROCHAS SALINAS

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages  
Coorientador: Prof. Dr. Romildo dos Santos  
Escarpini Filho

MACEIÓ-AL  
2019

EDUARDO DA SILVA PARANHOS SOBRINHO

CONSIDERAÇÃO DO REPASSE NA MODELAGEM DO FECHAMENTO DE POÇOS  
VERTICAIS EM ROCHAS SALINAS

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages

Coorientador: Prof. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho

MACEIÓ-AL  
2019

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale - CRB4 - 661

- P223c Paranhos Sobrinho, Eduardo da Silva.  
Consideração do repasse à modelagem do fechamento de poços verticais em rochas salinas / Eduardo da Silva Paranhos Sobrinho. – 2019.  
107 f. : il.
- Orientador: Eduardo Nobre Lages.  
Co-orientador: Romildo dos Santos Escarpini Filho.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2019.
- Bibliografia: f. 105-107.
1. Rochas salinas. 2. Poços – Fechamento – Repasse. 3. Viscoelasticidade. 4. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDU: 624:622.24



## CONSIDERAÇÃO DO REPASSE À MODELAGEM DO FECHAMENTO DE POÇOS VERTICAIS EM ROCHAS SALINAS

**EDUARDO DA SILVA PARANHOS SOBRINHO**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 24 do mês de setembro do ano de 2019.

Banca Examinadora:

*Eduardo Nobre Lages*

**Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages**  
(Orientador – PPGEC/UFAL)

*Romildo S. Escarpini Filho*

**Prof. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho**  
(Coorientador – LCCV/UFAL)

*Eduardo Toledo de Lima Junior*

**Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior**  
(Avaliador Interno – PPGEC/UFAL)

*Emílio César Cavalcante Melo da Silva*

**Pesquisador Dr. Emílio César Cavalcante Melo da Silva**  
(Avaliador Externo – CENPES/PETROBRAS)

## AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento é a Deus por tudo que tem feito em minha vida, cujas bênçãos têm me acompanhado durante a minha jornada em todas as áreas, toda honra e glória a Ele. Tenho fé que Ele sempre me ajudará, pois não esquecerei das respostas que me foram dadas enquanto orava a Ele por auxílio em momentos de dificuldades.

Aos meu pais, Eliel e Rute, pelo incentivo constante e por toda a base que me foi dada ao longo dos anos, certamente eu não alcançaria esta vitória sem eles. A cobrança que um dia não foi compreendida se torna um resultado satisfatório acompanhado do entendimento de sua necessidade. Sei que as orações de minha mãe também foram fundamentais para chegar até aqui.

À minha esposa Vaniele, por sempre me incentivar e acreditar em mim, mesmo quando eu não acreditei que conseguiria, vou sempre lembrar de suas palavras: "Você não sabe que vai conseguir? É sempre assim!". Pela companhia maravilhosa e por ser a pessoa que equilibra a minha vida, por todas as brincadeiras e saídas (continuam sendo muitas pizzas). Ao meu Chico pelas brincadeiras e carinho.

Aos meus familiares pelo apoio e confiança que sempre depositaram em mim, os quais compartilham comigo a alegria das minhas vitórias. Sei que posso contar com minha família e isso não tem preço.

Aos meus companheiros Eduardo Nobre e Romildo Escarpini pela orientação neste trabalho, os quais foram essenciais para alcançar esta conquista. Durante o dia a dia só aumentou a minha admiração pelos profissionais e pessoas que são, serei eternamente grato. Aos colegas de projeto, em especial, Themisson Vasconcelos, Ricardo Fernandes e Catarina Nogueira que me ajudaram em diversos momentos. À Petrobras pelo apoio financeiro por meio do termo de cooperação (5850.0104857.17.9), pelo qual fui bolsista.

A todas as pessoas que compõem o LCCV em todos os setores, as quais fazem do ambiente de trabalho um local muito bom e pelo companheirismo que existe entre as pessoas. Agradeço por ter me dado a oportunidade de crescer como indivíduo tanto pessoalmente quanto profissionalmente.

À Universidade Federal de Alagoas e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil por proporcionar um curso de excelência. Agradeço aos professores do PPGEC pela dedicação exemplar que contribuiu para o meu crescimento. Ao professor João Paulo Lima pelo suporte no estágio de docência.

À igreja Assembleia de Deus pelas orações, em especial à Orquestra Filarmônica Vencendo com Deus que tem me proporcionado experiências maravilhosos, as quais me ajudaram em momentos de angústia. Somente Deus pode recompensar.

"Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos."

Provérbios 16:3.

## RESUMO

PARANHOS SOBRINHO, Eduardo da Silva. *CONSIDERAÇÃO DO REPASSE NA MODELAGEM DO FECHAMENTO DE POÇOS VERTICAIS EM ROCHAS SALINAS*. 2019. 121f. Dissertação – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2019.

Um dos desafios na exploração de petróleo em águas profundas consiste na presença das rochas salinas durante a perfuração, as quais implicam em possíveis complicações operacionais durante a perfuração de poços. Devido a sua mobilidade, as rochas salinas podem ocasionar problemas como o aprisionamento da coluna de perfuração, torques elevados, colapso do revestimento e o fechamento do poço, os quais geram enormes prejuízos em diferentes segmentos. O peso do fluido gera a pressão hidrostática que serve como contrapressão ao deslocamento do sal, às vezes essa medida não é suficiente, o que leva à realização da operação de repasse de broca. Dessa forma, o diâmetro do poço é recondicionado ao seu estado originalmente previsto. Dada a importância do repasse durante as operações de perfuração em rochas salinas, a sua incorporação às ferramentas computacionais de forma eficiente é necessária, visto que a tomada de decisão na iminência de um evento indesejado deve ser rápida. Como as rochas salinas possuem comportamento viscoelástico, o Mecanismo Duplo de Deformação é adotado para representar a deformabilidade da parede da formação salina. Por meio do Método dos Elementos Finitos, é desenvolvido um programa capaz de identificar e simular os efeitos do repasse em poços verticais com a presença de camadas de sal. A simulação pode ser feita com a adoção de uma camada unidimensional axissimétrica de espessura unitária ou com a associação de multicamadas unidimensionais por meio de uma estratégia de acoplamento entre elas. São verificados os efeitos das propriedades físicas do evaporito e as propriedades da malha, assim como o desempenho da estratégia de multicamadas ao ser comparada com uma modelagem bidimensional axissimétrica do problema de fechamento de poços no *software* comercial ABAQUS, para o qual são gerados cenários fictícios. O comparativo baseado nos históricos de deslocamento radial da estratégia de multicamadas com e sem a consideração de interação indica semelhança com o ABAQUS para os casos que consideram interação, enquanto as curvas do caso sem interação exibiram um afastamento, principalmente em zonas próximas à interface entre materiais.

**Palavras-chave:** Repasse; Rochas Salinas; Viscoelasticidade; Método dos Elementos Finitos.

## ABSTRACT

PARANHOS SOBRINHO, Eduardo da Silva. CONSIDERATION OF BACKREAMING IN VERTICAL WELLS CLOSURE MODELLING IN SALT ROCKS. 2019. 121f. Dissertation – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2019.

One of the challenges in petroleum exploration in deep water is the presence of salt rocks during drilling, which implies possible operational complications during the drilling of wells. Due to their mobility, the salt rocks may cause problems such as the stuck pipe, high torques, casing collapse and closure of the well promoting enormous losses in different areas. The mud weight generates a hydrostatic pressure that serves as a counterpressure to the displacement of the salt, sometimes this measure is not sufficient, which leads to the backreaming operation. Thus, the diameter of the well is reconditioned to its original predicted state. Given the importance of backreaming during drilling operations in salt rocks, its incorporation into computational tools efficiently is necessary, since decision making in the face of imminent event unwanted must be rapid. As the salt rocks have the viscoelastic behavior, the double deformation mechanism is adopted to represent the deformability of the wall of the saline formation. Through the Finite Element Method, a program is developed to identify and simulate the effects of the backreaming in vertical wells with the presence of salt layers. The simulation may be done by adoption of a one-dimensional axisymmetric layer with unit thickness or an association of one-dimensional multilayers through a coupling strategy between them. The effects of physical properties of the evaporite and the properties of the mesh are checked, as well as the performance of multilayers strategy when compared with a two-dimensional axisymmetric modeling of the problem of closing wells in the commercial *software* ABAQUS, for which fictitious scenarios were generated. The comparison is based on the radial displacement histories of the multilayer strategy with and without the interaction consideration indicates similarity with ABAQUS for cases that consider interaction, while the curves of cases without interaction exhibited a difference, mainly in zones near to material interfaces.

**Keywords:** Backreaming; Salt Rocks; Viscoelasticity; Finite Element Method.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Produção de petróleo do pré-sal. . . . .	17
Figura 1.2 – Evolução da produção onshore e offshore – Pré-sal x Pós-sal (Mboe/d). . . . .	18
Figura 1.3 – Localização dos blocos do Pré-Sal na Bacia de Santos. . . . .	19
Figura 1.4 – Modelo de janela operacional. . . . .	21
Figura 1.5 – Problemas relacionados a perfuração de rochas salinas. . . . .	22
Figura 1.6 – Flexão do revestimento devido à fluência do sal. . . . .	23
Figura 2.1 – Esquema de uma operação de repasse em um poço desviado. . . . .	28
Figura 2.2 – Esquema com movimentação de cascalhos em poços desviados. . . . .	30
Figura 2.3 – Árvore de decisão quanto a realização de repasse quando há indícios de aprisionamento da coluna. . . . .	32
Figura 3.1 – Esquema do posicionamento da camada salina entre as demais. . . . .	33
Figura 3.2 – Amostras de rochas salinas: a) intercalações de halita e anidrita; b) intercalações de halita e material argiláceo; c) silvinita. . . . .	34
Figura 3.3 – Cicatrização de amostra sob condições equivalentes a 3000 m. . . . .	35
Figura 3.4 – Etapas do processo de cicatrização do sal para geração de barreira no poço. . . . .	36
Figura 3.5 – Estágios do fenômeno de fluência. . . . .	38
Figura 3.6 – Efeito da temperatura sobre a fluência. . . . .	38
Figura 3.7 – Modelos reológicos básicos: a) Hooke; b) Newton; c) Saint-Venant. . . . .	39
Figura 3.8 – Modelo de Maxwell. . . . .	40
Figura 3.9 – Comportamento da Tensão para o Teste de Fluência. . . . .	41
Figura 3.10–Curva de Fluência no Modelo de Maxwell. . . . .	41
Figura 3.11–Comportamento da Deformação no Teste de Relaxação. . . . .	42
Figura 3.12–Curva de Relaxação no Modelo de Maxwell. . . . .	42
Figura 3.13–Modelo de Kelvin. . . . .	42
Figura 3.14–Curva de Fluência no Modelo de Kelvin. . . . .	43
Figura 3.15–Curva de Relaxação no Modelo de Kelvin. . . . .	44
Figura 3.16–Modelo de Sólido Padrão. . . . .	44
Figura 3.17–Comportamento da Deformação no Modelo de Sólido Padrão. . . . .	45
Figura 3.18–Modelos de Burgers. . . . .	46
Figura 3.19–Comportamento da Deformação no Modelo de Burgers. . . . .	47
Figura 4.1 – Camada de rocha com espessura unitária e com poço em evidência. . . . .	54
Figura 4.2 – Esquema simplificado de uma perfuração e das camadas que determinantes para a tensão geostática. . . . .	56
Figura 4.3 – Estado de tensão: a) Antes da perfuração; b) Depois da perfuração. . . . .	57
Figura 4.4 – Elemento infinitesimal e componentes do tensor de tensões em coordenadas cilíndricas. . . . .	61

Figura 4.5 – Camadas unidimensionais axissimétricas e região. . . . .	62
Figura 4.6 – Composição do modelo com camadas unidimensionais axissimétricas e regiões de influência. . . . .	62
Figura 4.7 – Deformações angulares das regiões intermediárias com materiais diferentes. . . . .	64
Figura 4.8 – Esquema da atuação da força de interação radial distribuída. . . . .	65
Figura 4.9 – Esquema da malha composta por elementos uniformes e não uniformes. . . . .	66
Figura 4.10– <i>Gap</i> entre o raio inicial do poço e o primeiro nó da malha após o repasse. . . . .	70
Figura 4.11–Repasse na modelagem de multicamadas. . . . .	71
Figura 5.1 – Esquema geométrico do poço logo após a passagem da broca. . . . .	72
Figura 5.2 – Histórico do raio do poço com repasse para os cenários 1 e 2. . . . .	75
Figura 5.3 – Histórico do raio do poço com repasse para os cenários 2 e 3. . . . .	76
Figura 5.4 – Histórico do raio do poço com repasse para os cenários 3 e 4. . . . .	77
Figura 5.5 – Evidência do <i>gap</i> no comparativo entre os cenários 3 e 4. . . . .	78
Figura 5.6 – <i>Gaps</i> em função do tamanho do elemento uniforme. . . . .	79
Figura 5.7 – Esquema geométrico e litológico do cenário 1. . . . .	81
Figura 5.8 – 1ª camada do cenário 1 composta por halita a -5248,5 m. . . . .	82
Figura 5.9 – 2ª camada do cenário 1 composta por halita a -5273,5 m. . . . .	82
Figura 5.10–Força de interação das camadas do cenário 1. . . . .	83
Figura 5.11–Erro relativo das camadas do cenário 1. . . . .	84
Figura 5.12–Esquema geométrico e litológico do cenário 2. . . . .	84
Figura 5.13–1ª camada do cenário 2 composta por halita a -5241 m. . . . .	85
Figura 5.14–2ª camada do cenário 2 composta por halita a -5251 m. . . . .	85
Figura 5.15–3ª camada do cenário 2 composta por halita a -5261 m. . . . .	86
Figura 5.16–4ª camada do cenário 2 composta por halita a -5271 m. . . . .	86
Figura 5.17–5ª camada do cenário 2 composta por halita a -5281 m. . . . .	87
Figura 5.18–Força de interação das camadas do cenário 2. . . . .	87
Figura 5.19–Erro relativo das camadas do cenário 2. . . . .	88
Figura 5.20–1ª camada do cenário 3 composta por taquidrita a -5248,5 m. . . . .	89
Figura 5.21–2ª camada do cenário 3 composta por taquidrita a -5273,5 m. . . . .	89
Figura 5.22–Força de interação das camadas do cenário 3. . . . .	90
Figura 5.23–Erro relativo das camadas do cenário 3. . . . .	90
Figura 5.24–1ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5241 m. . . . .	91
Figura 5.25–2ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5251 m. . . . .	91
Figura 5.26–3ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5261 m. . . . .	92
Figura 5.27–4ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5271 m. . . . .	92
Figura 5.28–5ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5281 m. . . . .	93
Figura 5.29–Força de interação das camadas do cenário 4. . . . .	93
Figura 5.30–Erro relativo das camadas do cenário 4. . . . .	94
Figura 5.31–Esquema geométrico e litológico do cenário 5. . . . .	95

Figura 5.32–1ª camada do cenário 5 composta por halita a -5238 m. . . . .	96
Figura 5.33–2ª camada do cenário 5 composta por halita a -5242 m. . . . .	96
Figura 5.34–3ª camada do cenário 5 composta por taquidrita a -5246 m. . . . .	97
Figura 5.35–4ª camada do cenário 5 composta por halita a -5250 m. . . . .	98
Figura 5.36–5ª camada do cenário 5 composta por halita a -5254 m. . . . .	98
Figura 5.37–Força de interação das camadas do cenário 5. . . . .	99
Figura 5.38–Erro relativo das camadas do cenário 5. . . . .	99
Figura 5.39–Esquema geométrico e litológico do cenário 6. . . . .	100
Figura 5.40–1ª camada do cenário 6 composta por halita a -5238 m. . . . .	101
Figura 5.41–2ª camada do cenário 6 composta por halita a -5242 m. . . . .	101
Figura 5.42–3ª camada do cenário 6 composta por halita a -5246 m. . . . .	102
Figura 5.43–4ª camada do cenário 6 composta por taquidrita a -5250 m. . . . .	102
Figura 5.44–5ª camada do cenário 6 composta por halita a -5254 m. . . . .	103
Figura 5.45–6ª camada do cenário 6 composta por taquidrita a -5258 m. . . . .	103
Figura 5.46–7ª camada do cenário 6 composta por halita a -5262 m. . . . .	104
Figura 5.47–8ª camada do cenário 6 composta por halita a -5266 m. . . . .	104
Figura 5.48–Força de interação das camadas do cenário 6. . . . .	105
Figura 5.49–Erro relativo das camadas do cenário 6. . . . .	105
Figura 5.50–Esquema geométrico e litológico do cenário 7. . . . .	106
Figura 5.51–1ª camada do cenário 7 composta por halita a -5238 m. . . . .	107
Figura 5.52–2ª camada do cenário 7 composta por halita a -5242 m. . . . .	107
Figura 5.53–3ª camada do cenário 7 composta por carnalita a -5246 m. . . . .	108
Figura 5.54–4ª camada do cenário 7 composta por halita a -5250 m. . . . .	108
Figura 5.55–5ª camada do cenário 7 composta por halita a -5254 m. . . . .	109
Figura 5.56–6ª camada do cenário 7 composta por halita a -5258 m. . . . .	109
Figura 5.57–7ª camada do cenário 7 composta por taquidrita a -5262 m. . . . .	110
Figura 5.58–8ª camada do cenário 7 composta por halita a -5266 m. . . . .	110
Figura 5.59–Força de interação das camadas do cenário 7. . . . .	111
Figura 5.60–Erro relativo das camadas do cenário 7. . . . .	112
Figura 5.61–Esquema geométrico e litológico do cenário. . . . .	114
Figura 5.62–Comparativo entre a consideração e não consideração da interação na ope- ração de repasse com acoplamento multicamadas. . . . .	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Propriedades comuns a todos os cenários com uma camada unidimensional. . . . .	74
Tabela 5.2 – Parâmetros fixos da malha para avaliação das propriedades físicas. . . . .	74
Tabela 5.3 – Parâmetros dos cenários fictícios 1 e 2. . . . .	75
Tabela 5.4 – Parâmetros dos cenários fictícios 2 e 3. . . . .	76
Tabela 5.5 – Parâmetros físicos fixos. . . . .	77
Tabela 5.6 – Parâmetros dos cenários 3 e 4. . . . .	77
Tabela 5.7 – Propriedades elásticas e viscosas dos evaporitos. . . . .	80
Tabela 5.8 – Propriedades comuns a todos os cenários. . . . .	81
Tabela 5.9 – Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 1. . . . .	82
Tabela 5.10–Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 2. . . . .	85
Tabela 5.11–Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 5. . . . .	95
Tabela 5.12–Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 6. . . . .	100
Tabela 5.13–Propriedades do cenário com repasse em multicamadas. . . . .	113

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	Módulo de elasticidade
$\eta$	Constante de amortecimento
$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\sigma$	Tensão
$\varepsilon$	Deformação
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
$\dot{\sigma}$	Taxa de tensão
$\sigma_0$	Tensão inicial
$t$	Tempo
$\varepsilon_0$	Deformação inicial
$\delta$	Função delta de Dirac
$T$	Temperatura
$P$	Constante empírica da Equação (3.32) da lei empírica de Potência
$\varepsilon_s$	Velocidade de deformação secundária
$\sigma_c$	Tensão constante
$A_p$	Constante empírica da Equação (3.35) da lei empírica de Potência
$L$	Constante empírica da Equação (3.37) da lei empírica Logarítmica
$\alpha_L$	Constante empírica da Equação (3.39) da lei empírica Logarítmica
$c_L$	Constante empírica da Equação (3.39) da lei empírica Logarítmica
$t_0$	Tempo de referência
$p$	Pressão de confinamento
$\sigma_d$	Tensão desviadora
$A_E$	Constante empírica da Equação (3.40) da lei empírica Exponencial
$\beta$	Constante empírica da Equação (3.40) da lei empírica Exponencial
$C_E$	Constante empírica da Equação (3.40) da lei empírica Exponencial

$n_E$	Constante empírica da Equação (3.40) da lei empírica Exponencial
$m_E$	Constante empírica da Equação (3.40) da lei empírica Exponencial
$a_E$	Constante empírica da Equação (3.41) da lei empírica Exponencial
$b_E$	Constante empírica da Equação (3.41) da lei empírica Exponencial
$c_E$	Constante empírica da Equação (3.41) da lei empírica Exponencial
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{total}$	Taxa de deformação total
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$	Taxa de deformação elástica
$\dot{\varepsilon}_{ij}^{flu}$	Taxa de deformação fluência
$\sigma_{kk}$	Tensor de tensão hidrostático
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_{ij}$	Tensor de tensão
$\dot{\varepsilon}_{ef}^{flu}$	Taxa de deformação efetiva de fluência
$\sigma_{ef}$	Tensão efetiva
$s_{ij}$	Tensor de Tensão desviadora
$\dot{\varepsilon}_0$	Taxa de deformação de referência
$Q$	Energia de ativação
$n$	Expoente de tensão das rochas salinas
$R$	Constante universal dos gases
$T_0$	Temperatura de referência
$P_f$	Pressão do fluido
$LDA$	Lâmina de água
$H_{sot}$	Espessura do soterramento
$H_{sal}$	Espessura do sal
$\gamma_{fluido}$	Peso específico do fluido
$T_i$	Temperatura inicial

$T_{FM}$	Temperatura do fundo do mar
$GT_{sot}$	Gradiente térmico do soterramento
$GT_{sal}$	Gradiente térmico do sal
$\sigma_0^v$	Tensão geostática vertical
$\gamma_{\text{água}}$	Peso específico da água
$\gamma_{sot}$	Peso específico do soterramento
$\gamma_{sal}$	Peso específico do sal
$\sigma_0^h$	Tensão geostática horizontal
$k_0$	Coefficiente de empuxo horizontal
$V'$	Domínio antes da perfuração
$B'$	Matriz de correlação dos graus de liberdade dos elementos
$f_g$	Vetor de forças geostáticas
$V$	Domínio depois da perfuração
$f_{e0}$	Vetor de forças externas iniciais
$f_{ac}$	Força de acoplamento entre camadas
$D$	Matriz constitutiva
$d_0$	Vetor de deslocamentos elásticos nodais
$K$	Matriz de rigidez elástica
$\varepsilon_\nu$	Deformação viscosa
$b_i$	Componentes da força de volume
$g$	Aceleração da gravidade
$\rho$	Densidade da formação salina
$\sigma_{rr}$	Tensão normal na direção $r$
$\sigma_{\theta\theta}$	Tensão normal na direção $\theta$
$\sigma_{zz}$	Tensão normal na direção $z$
$\sigma_{rz}$	Tensão de cisalhamento no plano $rz$

$\gamma_{rz}$	Deformação angular nas direções $r$ e $z$
$G$	Módulo de elasticidade transversal do material
$L$	Comprimento dos elementos não uniformes
$l_u$	Comprimento dos elementos uniformes
$neu$	Número de elementos uniformes
$i$	Identificador dos nós
$\delta t$	Tolerância
$d_g$	Solução grosseira
$d_r$	Solução refinada
$vel_{(t)}$	Velocidade de avanço na borda do poço
$d_{(t)}$	Deslocamento do passo de tempo atual
$d_{(t-\Delta t)}$	Deslocamento do passo de tempo anterior
$Dt_{(t)}$	Incremento de tempo do passo corrente
$Dt_{in}$	Incremento de tempo inicial
$Dt_{(t+\Delta t)}^p$	Próximo incremento de tempo proposto



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	<b>23</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>25</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>OPERAÇÃO DE REPASSE</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>ROCHAS SALINAS</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelos Constitutivos para Rochas Salinas</b>	<b>37</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Modelos Reológicos</b>	<b>39</b>
<b>3.1.1.1</b>	<b>Modelo de Maxwell</b>	<b>40</b>
<b>3.1.1.2</b>	<b>Modelo de Kelvin</b>	<b>42</b>
<b>3.1.1.3</b>	<b>Modelo de Sólido Padrão</b>	<b>44</b>
<b>3.1.1.4</b>	<b>Modelo de Burgers</b>	<b>46</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Modelos Empíricos</b>	<b>47</b>
<b>3.1.2.1</b>	<b>Lei de Potência</b>	<b>48</b>
<b>3.1.2.2</b>	<b>Lei Logarítmica</b>	<b>49</b>
<b>3.1.2.3</b>	<b>Lei Exponencial</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Leis de Fluência Associadas a Processos Físicos</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3.1</b>	<b>Modelo de Günther/Salzer</b>	<b>51</b>
<b>3.1.3.2</b>	<b>Mecanismo Duplo de Deformação</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>FORMULAÇÃO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo Unidimensional Axissimétrico</b>	<b>56</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelo Multicamadas Unidimensionais Axissimétricas</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>Geração da Malha</b>	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Incremento de Tempo Adaptativo</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>Repasse na Malha</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Estudo Paramétrico do Repasse em Camadas Unidimensionais</b>	<b>72</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Influência das Propriedades Físicas</b>	<b>74</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Influência do comprimento do elemento uniforme sobre o <i>gap</i></b>	<b>76</b>
<b>5.2</b>	<b>Comportamento Viscoelástico com uso da Estratégia de Multicamadas</b>	<b>79</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Camadas Homogêneas</b>	<b>80</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Camadas Heterogêneas</b>	<b>94</b>
<b>5.3</b>	<b>Operação de Repasse com a Estratégia de Multicamadas</b>	<b>112</b>

<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>116</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>119</b>

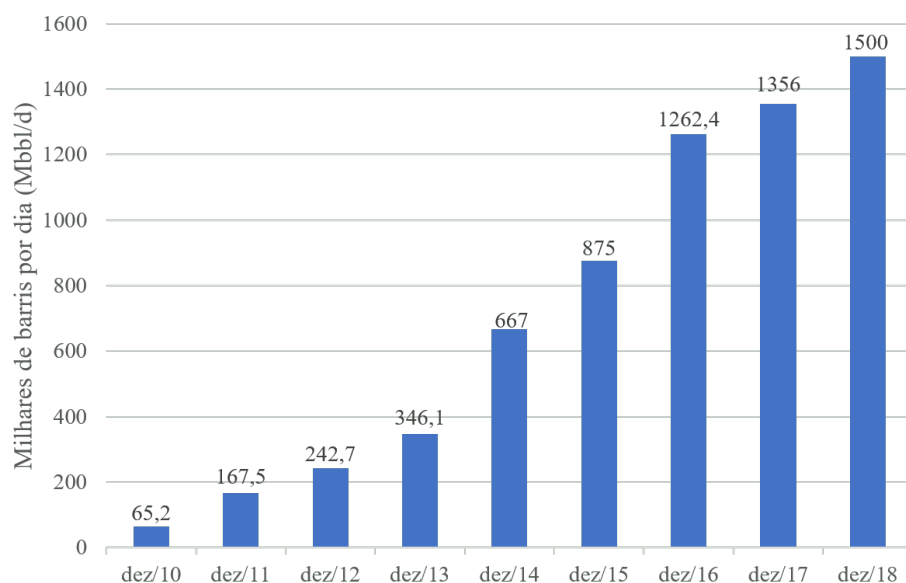
## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia aumenta continuamente, assim como os desafios das empresas do setor no avanço de novas descobertas, dentre elas, a petrolífera, que tenta viabilizar explorações de petróleo e gás em condições cada vez mais adversas. Uma das mais recentes e promissoras investidas é o pré-sal no Brasil, no qual foram estimadas grandes quantidades de hidrocarbonetos, que eleva o Brasil a um patamar nunca antes alcançado em termos de reservas.

Somente o campo de Lula na Bacia de Santos, por exemplo, tem reservas recuperáveis estimadas de 5 a 8 bboe (bilhões de barris de óleo equivalente) (BELTRÃO *et al.*, 2009). Já o campo de Libra, um dos maiores descobertos, tem estimativas que vão de 8 a 12 bilhões de barris recuperáveis (KEMPKEY, 2017). As estimativas sobre reservas recuperáveis impulsionaram o aumento do investimento em pesquisas sobre os desafios da exploração no pré-sal, de forma a viabilizar projetos cada vez mais ambiciosos.

Iniciado em setembro de 2008 no campo de Jubarte, o pré-sal brasileiro já está em produção há mais de dez anos e tem elevado a produção de petróleo nesse período. O avanço da exploração nos campos do pré-sal é notável em termos de volume de produção, visto que em cerca de seis anos de produção se alcançou a marca de 500 mil bpd (barris por dia), em oito anos 1 milhão de bpd e, por fim, em dez anos 1,5 milhões de bpd (PETROBRAS, 2018). A Figura 1.1 mostra o aumento da produção de petróleo proveniente do pré-sal, conforme consta nos boletins de produção da Superintendência de Desenvolvimento e Produção da ANP (2019) de 2010 a 2018.

Figura 1.1 – Produção de petróleo do pré-sal.



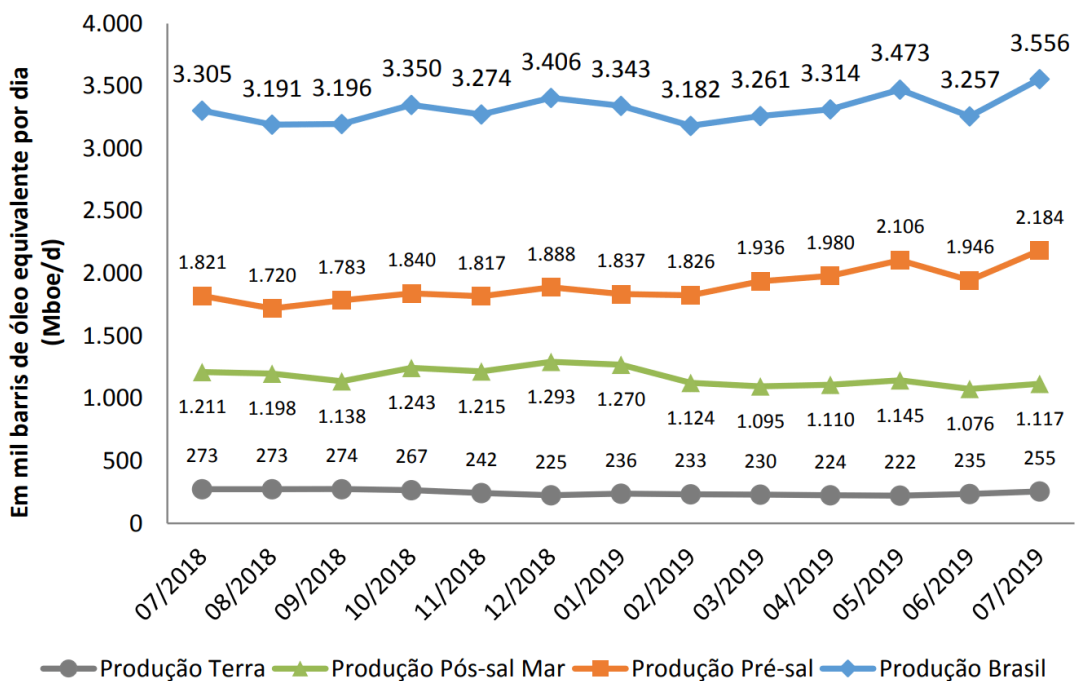
Fonte – Adaptado de ANP (2019)

Além do fato do volume de barris diários ser relevante, os poços do pré-sal tem alta produtividade, fato que os tornam bastante atrativos. Segundo a Petrobras (2019), em 1984 foram

necessários 4108 poços da companhia para atingir a marca de 500 mil bpd, já com o pré-sal a empresa precisou de apenas 77 poços para produzir o triplo desse volume de produção.

De acordo com o boletim de produção da Superintendência de Desenvolvimento e Produção da ANP de julho de 2019, a produção proveniente dos campos do pré-sal já corresponde a mais da metade da produção nacional, marca atingida em maio de 2017, e continua a crescer, conforme mostra a Figura 1.2. Dentre todos os campos do pré-sal, o de Lula teve, em julho de 2019, uma produção de 1177 Mboe/d, o que o torna o maior campo produtor do Brasil com folga, visto que o segundo maior foi Búzios com 360 Mboe/d, que também é um campo do pré-sal. Esses dados mostram quão promissora é a exploração do pré-sal e justificam o aumento do número de pesquisas sobre o mesmo (ANP, 2018).

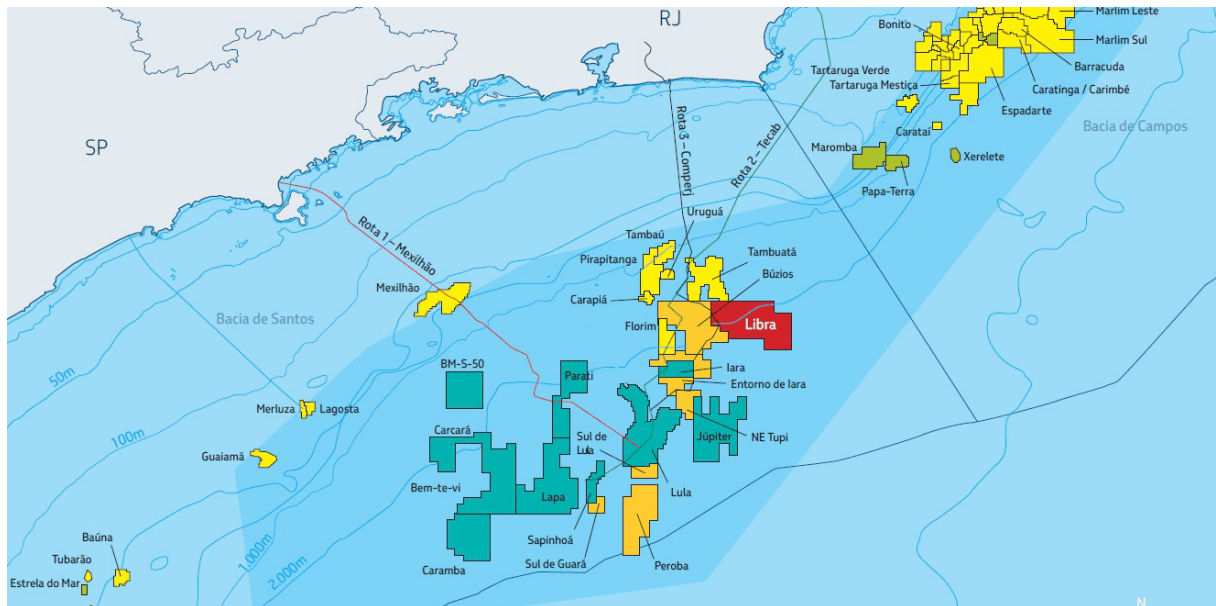
Figura 1.2 – Evolução da produção onshore e offshore – Pré-sal x Pós-sal (Mboe/d).



Fonte – ANP (2018)

Embora os resultados alcançados nas bacias do pré-sal sejam muito bons e promissores, grandes desafios ainda precisam ser superados para que a produção atinja os valores esperados, pois as reservas estão localizadas em profundidades superiores a 5000 metros abaixo do nível do mar. A grande lâmina de água, cerca de 2000 m como mostra a Figura 1.3, acrescenta incertezas quanto às condições ambientais, além disso, a distância para a costa chega a cerca de 300 km (FRAGA *et al.*, 2014), o que aumenta ainda mais a dificuldade da logística operacional envolvida.

Figura 1.3 – Localização dos blocos do Pré-Sal na Bacia de Santos.



Fonte – Fraga *et al.* (2014)

O escoamento da produção dos campos mais afastados é majoritariamente feito por navios aliviadores, uma vez que a construção de dutos até a costa ainda é um grande desafio logístico e econômico, devido a condições severas do solo marinho. Outro aspecto da logística refere-se à gestão do grande número de pessoas nas unidades produtoras, pois o transporte aéreo, comumente utilizado nas plataformas *offshore*, deve apresentar autonomia suficiente para o trajeto (TERRA; FERREIRA; NASCIMENTO, 2014).

A exploração de reservatórios localizados na camada pré-sal se mostra um desafio considerável em vários aspectos, como a de construção de poços em que são transpassadas diversas formações até alcançar a zona produtora, dentre elas as camadas de rochas salinas. Esse tipo de rocha apresenta um comportamento diferenciado das demais, pois possui como uma das suas principais características a grande mobilidade (por exemplo, a carnalita, a bishofita e a taquidrita), tanto fisicamente, por meio do fenômeno conhecido como fluência ou *creep*, quanto quimicamente, devido à grande solubilidade em água, segundo Falcão (2008 *apud* GONÇALVES, 2011).

Rochas salinas com elevada solubilidade em água podem trazer alguns problemas à perfuração, pois a presença de um fluido de perfuração a base de água pode causar *washouts*, que consistem na erosão excessiva da parede do poço. Essa erosão gera irregularidades no perfil *caliper* do poço, o que pode ocasionar uma má eficiência no carregamento de cascalhos. Já para um cenário que contenha evaporitos solúveis e insolúveis em água, pode ocorrer a formação de cavernas na região solúvel, o que aumenta o risco de queda de blocos que resultem no aprisionamento da coluna por acunhamento (BORGES, 2008).

De acordo com Poiate Júnior, Costa e Falcão (2006), as bacias *offshore* do Brasil costumam apresentar gradientes geotérmicos altos, espessas camadas de sedimentos acima das formações salinas e ainda atuante movimentação dos diápiros de sal, comprovados pelo mapeamento das

falhas do tipo *crestal* em decorrência da presença do sal nas Bacias de Campos e Santos. Por essas características, com base em informações de poços perfurados em profundas zonas de sal, a velocidade de fechamento de poços pela mobilidade do sal pode atingir valores da ordem de 0,05 pol/h.

Apesar dessa característica das camadas salíferas, alguns tipos de sal apresentam baixa mobilidade se comparados aos demais, como é o caso da halita. Nessa condição, encontram-se bons resultados na perfuração por apresentar características ideais para uma formação como homogeneidade, baixa porosidade, elevado gradiente de fratura e, normalmente, uma boa taxa de penetração. De acordo com Falcão (2008 *apud* GONÇALVES, 2011), existem ainda os sais essencialmente imóveis, como carbonatos e sulfatos.

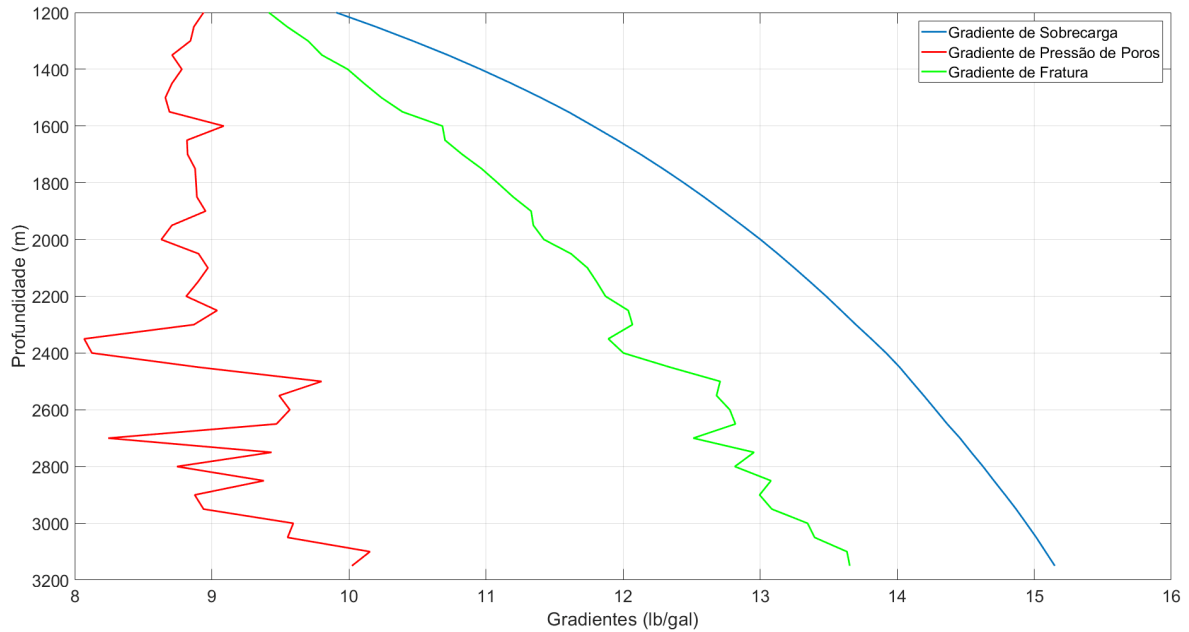
As rochas salinas de grande mobilidade podem se deformar lentamente com o tempo devido à fluência, as quais apresentam o comportamento viscoelástico. Durante a perfuração de poços, altera-se o estado de tensões, o que leva a rocha salina a sofrer a deformação, elástica e viscosa, pela ação do estado de tensão desviador, ao qual as formações salinas não conseguem suportar. Além disso, a temperatura é agente influenciador no quesito taxa de deformação das rochas salinas, já que à medida que a temperatura aumenta a taxa de deformação também aumenta (GONÇALVES, 2011).

As deformações decorrentes da fluência nas camadas salíferas ocorrem em direção ao centro do poço e diminuem o seu diâmetro. Logo, esse efeito pode gerar alguns problemas operacionais como fechamento do poço, torques elevados, aprisionamento de coluna, desvios, colapso do revestimento e necessidade de repasse (BORGES, 2008). Todos esses impasses geram custos, seja pelo aumento do NPT (*non productive time*), seja pela perda de equipamentos.

De acordo com Yarim, Ritchie e May (2008), alguns operadores de petróleo em todo o mundo relataram que, durante os anos 90, o custo operacional relacionado ao aprisionamento de coluna girava em torno de 250 milhões de dólares por ano. Embora não se saiba o valor exato, os autores supracitados estimaram que esse valor já ultrapassou 1 bilhão de dólares por ano.

Embora o fluido de perfuração tenha como uma de suas funções garantir a estabilidade da parede da formação e, conseqüentemente, conter o avanço de formações com maior mobilidade, como as rochas salinas e alguns folhelhos, o uso de fluidos mais pesados deve ser feito com cautela, visto que os mesmos podem ocasionar a perda de circulação pela entrada do fluido na formação. Dessa forma, a lama de perfuração deve ser dimensionada com base na janela operacional de acordo com os gradientes de sobrecarga, pressão de poros e de fratura, conforme mostra a Figura 1.4, e assim evitar outros problemas operacionais.

Figura 1.4 – Modelo de janela operacional.



Fonte – Autor (2019)

A fim de impedir que a deformação da parede da formação salina alcance níveis problemáticos, uma das estratégias durante a perfuração é a utilização de alargadores (*underreamers*), dessa forma, garante-se um diâmetro maior e mais tempo para finalizar a seção. No entanto, o uso de alargadores pode gerar outros problemas operacionais, a depender do tipo de alargador (excêntrico ou concêntrico), como diâmetros maiores que os centralizadores, tendência de desvio em poços verticais, dificuldade de controle em poços direcionais, vibrações indesejadas e, em modelos com partes móveis, falhas com possibilidade de rompimento de algum dos braços (SOUZA, 2011).

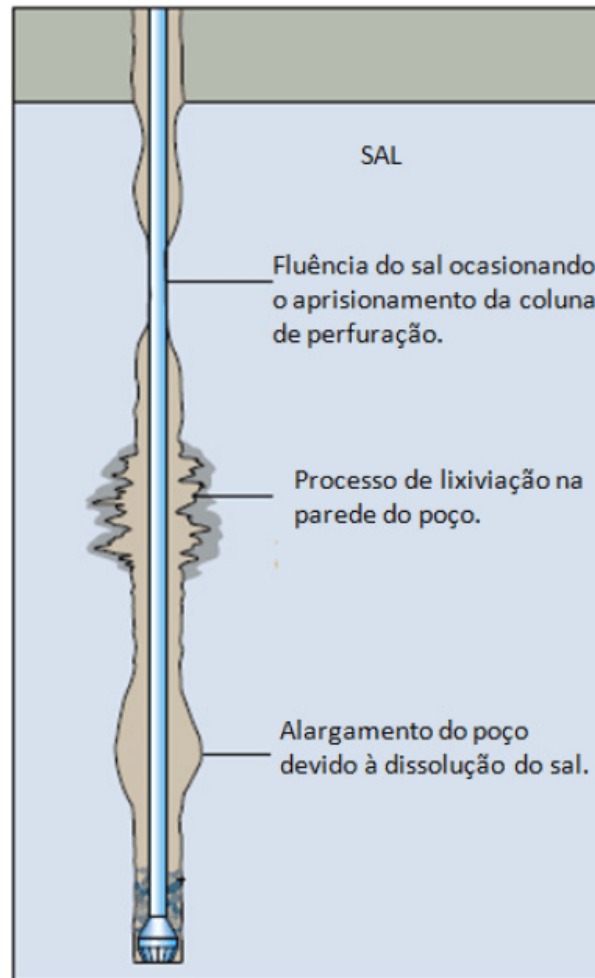
Outra estratégia para evitar os problemas operacionais causados pela deformação excessiva das rochas salinas é a realização da manobra de repasse, a qual, de acordo com Agostini (2015), consiste na retirada da coluna de perfuração do poço com rotação e bombeamento de fluido. Dessa forma, o diâmetro do poço é reconicionado ao estado previsto em projeto após alcançar um nível crítico. De acordo com Tavares (2006), essas manobras são comumente programadas, como por exemplo no término de uma seção, a fim de limpar e condicionar o poço para a descida do revestimento.

Além da aplicação do repasse usualmente após o término de uma fase da perfuração, esta manobra também pode ser requisitada antes devido à diminuição do diâmetro do poço. Este problema operacional é frequente em formações que tenham elevada mobilidade, como as rochas salinas. A elevada velocidade no avanço do sal em direção ao centro do poço torna a operação de repasse mais recorrente, inclusive, pode ser necessária mais de uma vez antes do fim da fase.

Além das preocupações oriundas da deformação do sal, existem possíveis situações indesejáveis relacionadas à interação do sal com o fluido de perfuração, visto que é bastante comum

os mesmos serem à base de água. A dissolução do sal pode provocar o alargamento do poço, além disso, existe a possibilidade da ocorrência de lixiviação e consequente enfraquecimento da parede da formação, como é mostrado na Figura 1.5 (GONÇALVES, 2011).

Figura 1.5 – Problemas relacionados a perfuração de rochas salinas.

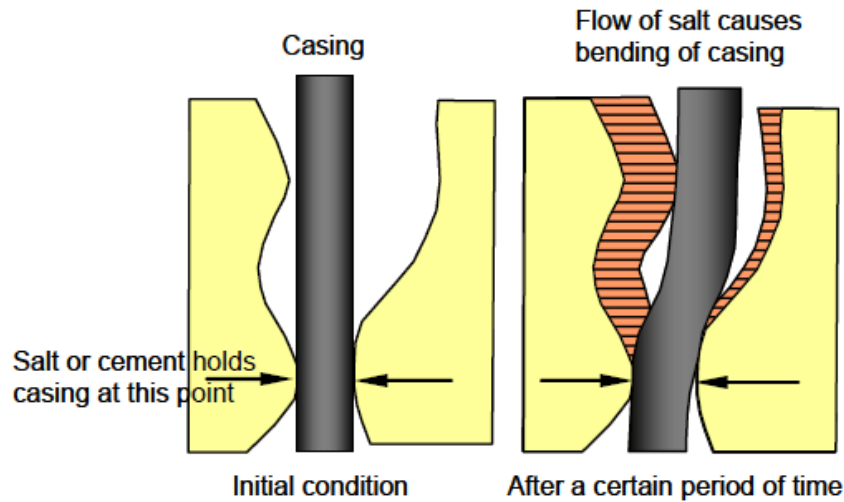


Fonte – Gonçalves (2011)

A geração de espaços indesejados em decorrência desses problemas pode prejudicar a eficiência da cimentação e comprometer a integridade do revestimento nas fases situadas nas camadas salinas. Nessas condições, os revestimentos podem estar expostos a esforços não previstos que, como já dito anteriormente, podem levá-los ao colapso (Figura 1.6). Por isso se faz necessário um bom monitoramento do diâmetro do poço, por meio do caliper, e da tortuosidade durante a perfuração, a fim de identificar qualquer irregularidade o mais rápido possível e garantir uma tomada de decisão mais eficiente.



Figura 1.6 – Flexão do revestimento devido à fluência do sal.



Fonte – Beltrão *et al.* (2009)

## 1.1 Motivação

Com o processo de modernização das indústrias ao longo dos anos, a automação tem ganhado espaços cada vez maiores no setor de óleo de gás, visto que o custo associado depende diretamente do tempo de execução das operações. O avanço das tecnologias de informação promove uma transformação digital nesse setor, visto que o mesmo incorpora cada vez mais ferramentas capazes de transmitir dados em tempo real.

O processo de construção de um poço de petróleo é algo desafiador, pois existem diversas etapas a serem executadas, as quais exigem precisão, por isso as ferramentas de monitoramento precisam fornecer informações precisas rapidamente. Dessa forma, o surgimento de ferramentas eficientes e de baixo custo computacional é importante para o acompanhamento de informações em tempo real, as quais auxiliam a tomada de decisão diante de uma ocorrência indesejada.

Muitos estudos sobre o comportamento de rochas salinas continuam surgindo a fim de entender melhor o fenômeno da fluência nesse tipo de formação, e buscar melhores resultados em modelagens computacionais, tanto em termos de desempenho, como em qualidade de resultados. Dessa forma, é possível prever mais eficientemente problemas operacionais que possam ocorrer durante as fases de perfuração e produção.

Em uma abordagem mais específica, quando se trata de rochas salinas, a preocupação se dá pela tendência de fechamento de poços na direção radial. Diante disso, o estudo do comportamento desse tipo de rocha é importante para compreender e planejar de forma mais eficiente a execução de um projeto, a fim de mitigar o número de ocorrências indesejadas durante a perfuração.

Nessa linha, Costa (1984) estudou o comportamento de rochas salinas na perfuração de poços considerando leis constitutivas elasto/viscoelástica e elasto/viscoplástica, que têm como referência ensaios experimentais realizados na mina de Taquari-Vassouras (Sergipe). Por meio

do Método de Elementos Finitos, foram feitas simulações para analisar a deformação em função do tempo.

Gravina (1997) desenvolveu um programa computacional que estima o fechamento de um poço ao longo do tempo, que leva em consideração a evolução do deslocamento das formações salinas por fluência. Nesse trabalho foi estudado apenas o fenômeno da fluência no seu estágio primário, pois a análise consistia no período entre o início da perfuração e o término da cimentação, o que corresponde a alguns dias de operação cujo período não passa de 1 mês.

Por meio do programa comercial de elementos finitos ABAQUS®, Botelho (2008) estudou o comportamento mecânico de rochas salinas submetidas a diferentes pesos de fluidos de perfuração. A fim de prever o fechamento de poços verticais que atravessem camadas de rochas salinas, Araújo (2009) desenvolveu uma ferramenta simplificada de baixo custo computacional em MATLAB® baseada na formulação axissimétrica de elementos finitos, na qual são adotados elementos unidimensionais.

Gonçalves (2011) deu continuidade a essa linha de trabalho e incorporou a transferência de calor por intermédio de um acoplamento termomecânico fraco, além disso, expandiu a formulação para elementos bidimensionais. Já Araújo (2012) incorporou a esse modelo um elemento finito capaz de representar o problema de fechamento de poços, devido à fluência do sal, ainda mais eficiente. Para tal, foram adotadas funções interpoladoras não polinomiais que resultam em menos graus de liberdade, a fim de obter resultados mais rápidos e precisos.

Os trabalhos sobre a temática de fechamento de poços verticais em trechos com rochas salinas desenvolvidos por Araújo (2009), Gonçalves (2011) e Araújo (2012) culminaram no surgimento de um termo de cooperação (5850.0104857.17.9) juntamente com a Petrobras. Dentre as atividades presentes nessa parceria, consta o estudo da operação de repasse de broca em trechos com rochas de alta mobilidade, no qual o presente trabalho está inserido.

Dada a acentuada deformação em rochas salinas devido ao fenômeno de fluência, ferramentas capazes de prever o fechamento de poços tornam-se essenciais no desenvolvimento de projetos mais complexos. Tendo em mãos dados referentes às formações em subsuperfície, por meio dessas ferramentas, pode-se fazer estudos de comportamento das rochas no intuito de dirimir alguns dos problemas operacionais que ocasionam o NPT.

Durante a perfuração, após a passagem da broca nos intervalos que contêm depósitos salinos, o estado de tensão desviador gerado provoca a deformação nas rochas em direção ao centro do poço. Embora o fluido de perfuração sirva como contrapressão, existe a recorrente preocupação com a deformação do sal para que não alcance um estágio avançado e promova os problemas já mencionados como aumento de torque, desvio de trajeto e impossibilidade de retirada da broca (*tripping out*) no trecho deformado, o que pode levar à perda do poço.

Ciente dos problemas relacionados ao fechamento de poços decorrente da deformação em rochas salinas, fazem-se necessários o constante monitoramento do poço e a agilidade na análise da deformação do sal, de modo que se tenha tempo hábil para decidir qual a melhor estratégia diante de uma situação de risco. Uma das operações realizadas para impedir que a deformação atinja um estágio avançado é o repasse da broca (*backreaming*) na região de potencial obstrução.

Dessa forma, segue-se a linha de trabalho que foi desenvolvida por Araújo (2009), Gonçalves (2011) e Araújo (2012) a fim de contribuir com uma das atividades do termo de cooperação (5850.0104857.17.9), em que se faz necessária a incorporação da estratégia de repasse de broca na ferramenta computacional desenvolvida. Dessa forma, garante-se mais robustez ao *software* e possibilita prever problemas operacionais para resolvê-los de forma mais eficaz.

## 1.2 Objetivos

Com a finalidade de melhorar a capacidade de análise do *software* fruto do projeto de geomecânica que culminou em um termo de cooperação com a Petrobras, o qual iniciou com Araújo (2009) e foi aprimorado em Gonçalves (2011) e Araújo (2012), a estratégia de repasse de broca deve ser incorporada para que se possa garantir mais robustez ao *software* e representar mais fielmente o problema de perfuração de poços de petróleo em regiões com camadas de rochas salinas.

Como objetivos específicos deste trabalho, deve-se mencionar:

- Desenvolver uma ferramenta capaz de identificar a necessidade do repasse da broca com base no raio do poço e modelar o comportamento das rochas salinas por meio de camadas unidimensionais de espessura unitária;
- Criar uma estratégia capaz de acoplar as camadas unidimensionais e levar em consideração a interação entre elas no problema de fechamento de poços;
- Implementar uma estratégia de geração de malha com elementos de comprimento uniforme e não uniforme a fim de oferecer à modelagem do repasse resultados mais precisos;
- Aplicar uma metodologia de cálculo de incremento de tempo adaptativo, no intuito de garantir uma evolução temporal bem descrita e mais rápida.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Nesta seção são apresentados, de forma resumida, os assuntos que serão tratados com mais detalhes em cada capítulo do presente trabalho. No capítulo introdutório apresenta-se o contexto no qual o problema está inserido, bem como algumas informações relevantes para reforçar a importância do tema em estudo. Além disso, são definidos alguns conceitos iniciais a fim de garantir uma melhor compreensão do que está sendo tratado.

No segundo capítulo aborda-se a operação de repasse de uma forma geral, o qual discorre sobre o conceito da operação, os principais motivos e situações para sua devida aplicação, bem como os cenários em que não é recomendado a sua adoção. Além disso, é mostrada uma árvore de decisão para realização ou não da operação de repasse.

No terceiro capítulo são apresentadas as principais características das rochas salinas, bem como os tipos mais comuns encontrados no Brasil. Posteriormente, são abordados os conceitos

sobre o fenômeno de fluência e algumas relações constitutivas capazes de representar o comportamento de rochas salinas. São apresentados modelos reológicos, tanto os básicos quanto alguns complexos, com foco no comportamento viscoelástico, além desses são apresentados também leis empíricas e leis associadas a processos físicos.

O capítulo quatro trata dos aspectos computacionais do programa, além das formulações adotadas baseadas no Método dos Elementos Finitos, tanto para malha unidimensional quanto para a estratégia de acoplamento de multicamadas. Adicionalmente, são apresentadas algumas simplificações do problema e metodologias aplicadas para melhoria do desempenho como a geração de malha e cálculo do incremento de tempo de forma adaptativa. Nesse capítulo também é abordada a metodologia aplicada para modelagem da operação de repasse para as duas configurações de malha.

No capítulo cinco, avalia-se a influência de alguns dos parâmetros relacionados às propriedades físicas do problema e da malha de elementos finitos. Tal avaliação é feita com a criação de cenários fictícios que exploram os efeitos de determinadas propriedades, a fim de evidenciar como se dá a influência da mesma. Também é feito um comparativo entre a estratégia de acoplamento de multicamadas e a modelagem em uma bidimensional no *software* comercial Abaqus, a fim de verificar o comportamento das curvas de deslocamento radial ao longo do tempo. Adicionalmente, é feita uma análise da influência da interação entre camadas sob a operação de repasse.

No sexto capítulo são tratadas as considerações finais do trabalho, bem como são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 OPERAÇÃO DE REPASSE

Durante as etapas de construção de um poço são realizadas diversas movimentações na coluna de perfuração, as quais são caracterizadas como manobras de execução. À medida que uma situação se desenha durante a perfuração, os operadores realizam uma determinada manobra, como também, em alguns casos, existem manobras já previstas no conjunto de ações de uma determinada etapa da perfuração.

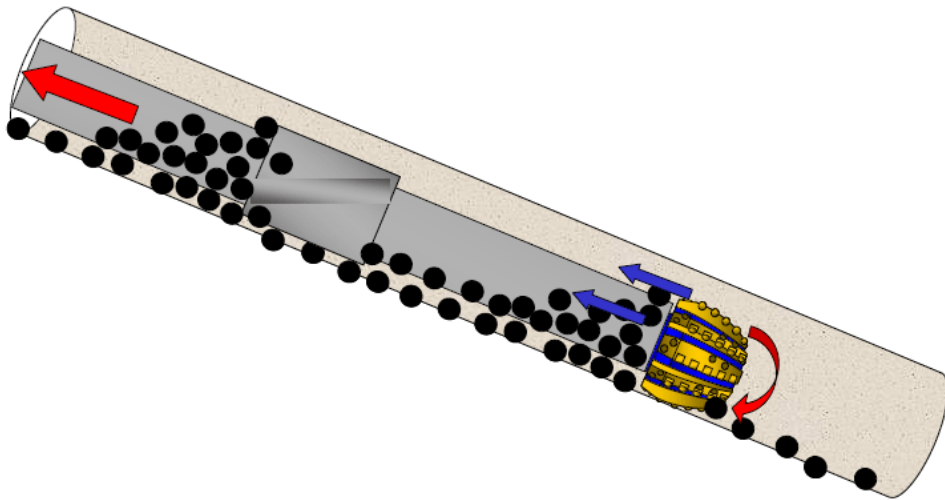
Após o término de alguma fase da perfuração, é necessário realizar uma manobra de limpeza no poço antes da retirada da broca, a fim de remover os cascalhos que estejam entre a coluna e a formação. Dessa forma, evitam-se problemas nas etapas seguintes como a cimentação e a descida do revestimento, pois a presença de cascalhos pode comprometer a funcionalidade estrutural do cimento.

De acordo com Agostini (2015), a limpeza consiste na circulação do fluido, tanto com rotação para aumentar a eficiência, quanto com movimentação ascendente e descendente da coluna de perfuração para evitar desgaste da formação devido ao fluxo do fluido em um ponto fixo. Normalmente, após a limpeza, a broca pode ser retirada livremente (*tripping out*), porém existem casos em que ao tentar realizar essa manobra percebe-se uma resistência.

Diversos problemas operacionais podem causar o aprisionamento da coluna como acúmulo de cascalhos, desmoronamento da formação, atritos elevados em poços desviados ou ainda diminuição do diâmetro do poço em formações com elevada mobilidade, como rochas salinas e folhelhos. Durante a perfuração, esses problemas operacionais podem ocorrer tanto de forma isolada, quanto em conjunto.

A resistência durante a tentativa de retirada da coluna é percebida por meio da ocorrência de trações anormais no indicador de peso da mesma. Dessa forma, para corrigir possíveis problemas estruturais no poço e recondicioná-lo ao seu estado de projeto, pode-se utilizar a operação de repasse, a qual consiste na remoção da coluna de perfuração com rotação e bombeamento de fluido, como sugere a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Esquema de uma operação de repasse em um poço desviado.



Fonte – Adaptado de Yarim, Ritchie e May (2008)

A operação de repasse, também chamado de *backreaming*, é um recurso bastante conhecido na indústria petrolífera. De acordo com Yarim, Ritchie e May (2008), após o desenvolvimento dos sistemas de *top drive* durante a década de 80, a operação de repasse passou a ser mais comum, visto que antes era realizado com o *kelly* sem muita eficiência. Yarim, Ritchie e May (2008) listaram algumas das principais situações em que é aplicado o repasse da broca:

- Ocorrer problemas na retirada da coluna sem rotação e circulação;
- Preparar o poço para realização de perfilagem;
- Condicionar o poço para a descida do revestimento;
- Eliminar trechos com diâmetros apertados, quando não se resolve apenas com a circulação do fluido;
- Corrigir o avanço de formações com grande mobilidade como rochas salinas e folhelhos móveis quando não são contidos com o peso da lama de perfuração;
- Remover os cascalhos do poço, principalmente em poços horizontais.

Embora se trate de uma operação que tem como objetivo recondicionar o poço a um estado adequado, existem algumas situações para as quais não é recomendada realização do repasse. Yarim, Ritchie e May (2008) citaram algumas delas:

- Quando é possível remover a coluna sem rotação e circulação, afinal o repasse não deve ser uma operação automática, principalmente em poços com inclinação menor que 30°;

- Se existe o risco do repasse ocasionar o desmoronamento da formação, quando se tem rochas fraturadas ou com falhas pré-existentes;
- Em poços com grande inclinação em que os cascalhos se aglomeram na parte de baixo (*cuttings beds*), devido ao diâmetro maior da broca e dos estabilizadores, tem-se grande risco de aprisionamento da coluna;
- Quando as bombas da sonda de perfuração não tem capacidade suficiente para realizar a limpeza adequadamente.

O repasse da broca deve ser operado com bastante cuidado, pois uma manobra mal sucedida pode acarretar no aprisionamento da coluna, embora seja esse o problema que se deseja evitar. Segundo Yarim *et al.* (2007), 54% dos problemas de aprisionamento de coluna avaliados em companhias da América Latina ocorreram durante a retirada da coluna com ou sem rotação e circulação de fluido. Em geral, os operadores envolvidos diminuem a atenção durante essas operações, o que aumenta ainda mais o risco de acontecer alguma falha.

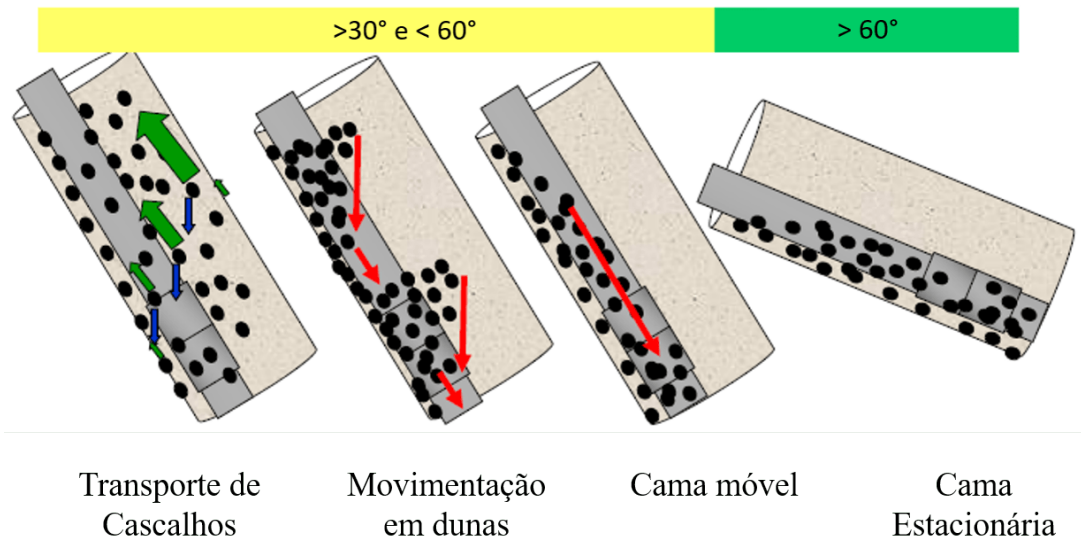
Um outro problema relacionado à manobra de repasse é quando a broca deixa o contato com o fundo do poço, visto que essa condição garante mais estabilidade a coluna durante sua rotação. Sem esse contato, o giro da coluna provoca problemas devido ao aumento da vibração na mesma, o que pode ocasionar impactos na parede do poço e, conseqüentemente, aumentar a presença de fragmentos de rocha no mesmo (AGOSTINI, 2015).

As vibrações na coluna de perfuração provocam diversos problemas operacionais, além do possível aumento de cascalhos, uma série de equipamentos presentes na coluna estão sujeitos a danos severos. Agostini (2015) afirma que os efeitos da vibração interferem diretamente na eficiência na taxa de penetração durante a perfuração do poço. Segundo Samuel e Mirani (2015), as vibrações dificilmente são levadas em consideração durante a operação de repasse, além disso, a forma complexa dos equipamentos da coluna torna-se fonte adicional para provocar vibrações.

Uma grande quantidade de cascalhos acumulados pode gerar problemas durante a operação de repasse. Tavares (2006) comenta que o acúmulo de cascalhos dentro do poço congestiona o espaço anular, assim como um *packer*, dessa forma, o movimento longitudinal da coluna pode ser comprometido. A intensidade desse congestionamento pode causar apenas o aumento na carga necessária para movimentar a coluna, ou até mesmo a prisão da coluna.

Yarim, Ritchie e May (2008) afirmam que em poços desviados o risco de ocorrer o aprisionamento da coluna é maior, pois à medida que aumenta a inclinação do poço, principalmente entre 30-60°, a limpeza do poço se torna mais crítica. Com o nível de inclinação alto, os cascalhos ficam mais propensos a formar camas e até mesmo causar avalanches dentro do poço. A Figura 2.2 mostra algumas movimentações dos cascalhos de acordo com a inclinação do poço.

Figura 2.2 – Esquema com movimentação de cascalhos em poços desviados.



Fonte – Adaptado de Yarim, Ritchie e May (2008)

Um fator importante quanto ao problema de congestionamento de cascalhos no espaço anular é a velocidade da manobra de repasse. É comum que essa velocidade seja menor que a da coluna sem rotação e circulação de fluido, no entanto, garantir que a movimentação ascendente da coluna durante o repasse respeite a velocidade de transporte de cascalhos. O descumprimento dessa premissa resulta no acúmulo dos cascalhos e possível queda de blocos, o que contribui para o efeito pistão ou aprisionamento da coluna (AGOSTINI, 2015).

Yarim, Ritchie e May (2008) descreveram um caso real durante uma operação de repasse no México, na qual ocorreu o aprisionamento da coluna. Segundo descrição, o poço era desviado (em forma de "S") e o aprisionamento da coluna ocorreu devido a aglomeração de cascalhos ter formado uma cama por causa do trecho inclinado. Na análise geomecânica indicou-se que a parede do poço tinha instabilidade mecânica (possível presença de uma falha geológica), com risco de desmoronamento, além disso, os responsáveis pela perfuração não seguiram as melhores práticas ao forçar a subida da coluna ao invés de voltar e limpar o poço. Foi concluído que o ocorrido era previsível e que haviam claras indicações de problemas na limpeza do poço.

Diferentemente das práticas do operador do repasse no caso citado, o seguimento dos procedimentos operacionais é imprescindível para obter sucesso e evitar o surgimento de novos problemas. De acordo com Yarim, Ritchie e May (2008), é preciso "escutar o poço" por meio das informações disponíveis e determinar se o repasse é realmente necessário. Se confirmada a demanda do repasse, os principais parâmetros que devem ser acompanhados são:

- Pressão da bomba, vazão e RPM;
- Velocidade do repasse;
- Torque e arrasto da coluna;
- Taxa de cascalhos em função do tempo;

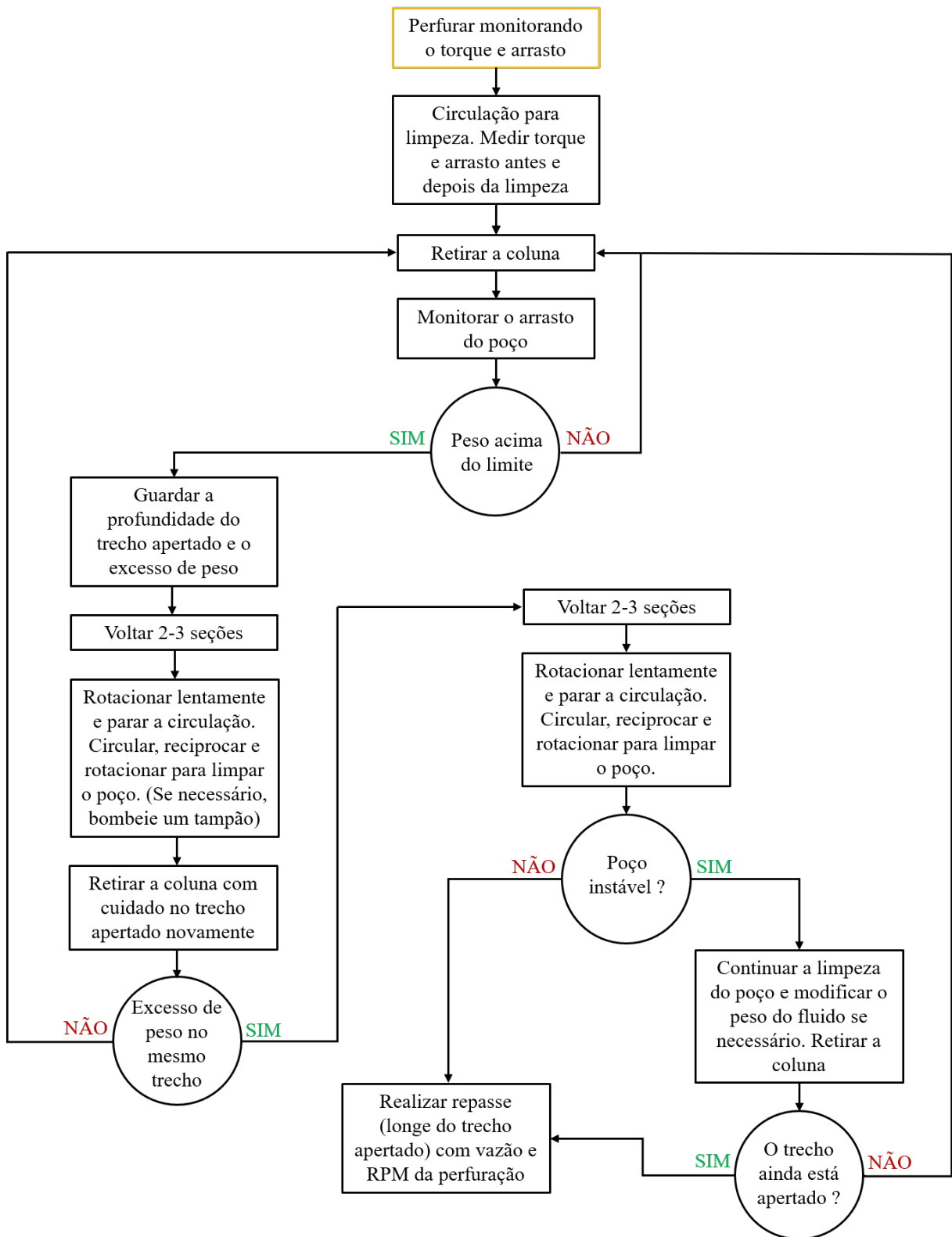


- Dados da pressão no anular durante a perfuração (APWD) coletada as ferramentas de MWD.

De acordo com esses parâmetros, algumas práticas gerais podem ser aplicadas para assegurar uma operação de repasse com sucesso, como por exemplo a velocidade do repasse, a qual não deve ultrapassar 4 seções (conjuntos de 2 ou 3 tubos de perfuração) por hora. A definição dos valores padrões de torque, arrasto, pressão na bomba para se ter como referência no acompanhamento da operação. Por conta da geração de mais cascalhos durante o repasse, é preciso ter bastante atenção no peso efetivo do fluido (ECD - Equivalent Circulating Density), visto que a tendência é que o mesmo aumente.

No intuito de auxiliar a tomada de decisão quanto a escolha de repassar ou não um determinado trecho de rocha que apresente indícios de aprisionamento, Yarim, Ritchie e May (2008) desenvolveram uma árvore de decisão para necessidade de repasse nessa situação, a qual se inicia com o monitoramento durante a perfuração (em amarelo) com o objetivo de retirar a coluna após a finalização da etapa, conforme é mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Árvore de decisão quanto a realização de repasse quando há indícios de aprisionamento da coluna.



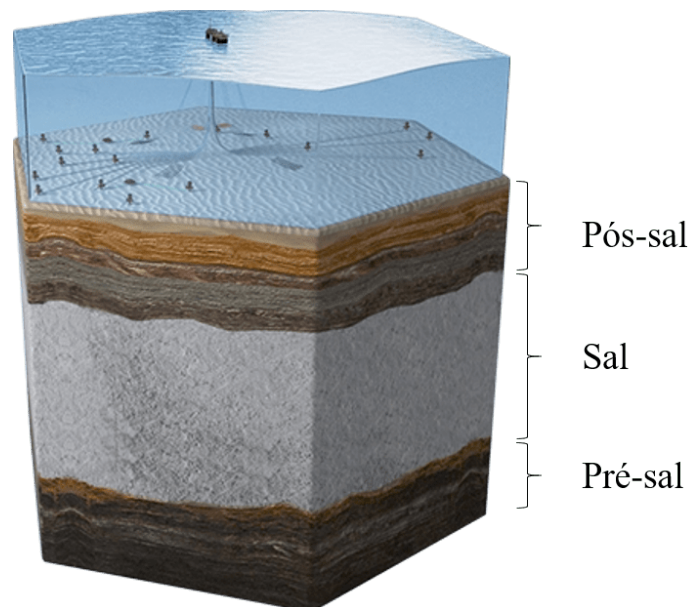
Fonte – Adaptado de Yarim, Ritchie e May (2008)

### 3 ROCHAS SALINAS

As rochas salinas ou evaporitos são compostas por minerais salinos, os quais precipitam durante um processo de evaporação na região de acúmulo, o que caracteriza a formação de uma rocha sedimentar. De acordo com Bresolin (2010), a presença de uma solução salina concentrada (salmoura) é essencial para formar uma rocha salina. Além disso, a evaporação deve ocorrer em uma região de baixo aporte terrígeno cujo influxo de água seja menor que a perda da mesma por evaporação.

Segundo Gravina (1997), os oceanos são as fontes dos depósitos de evaporitos, por isso a incidência de rochas salinas em regiões marinhas é maior que no continente. As precipitações oriundas do mar formam os depósitos primários, a partir dos quais surgem depósitos menores e mais finos, chamados secundários, por meio da dissolução e redeposição dos mesmos. A Figura 3.1 exibe um esquema do posicionamento das rochas salinas entre as demais formações, as quais são divididas em pré-sal e pós-sal, conforme o período de deposição ter ocorrido antes ou depois da deposição salina, respectivamente.

Figura 3.1 – Esquema do posicionamento da camada salina entre as demais.



Fonte – Petrobras (2019)

Os evaporitos apresentam características que os diferem da maioria das rochas. De acordo com Mohriak e Szatmari (2009 *apud* FIRME *et al.*, 2014), os evaporitos podem ser considerados como rochas temporárias ou móveis, tanto em termos químicos devido a dissolução, quanto em termos físicos por conta da deformação por fluência. Apesar do recente interesse, no Brasil, em estudar esse tema em decorrência da exploração nos campos do pré-sal, desde dos anos 50 os evaporitos já são conhecidos como ótimos selantes devido as suas baixas porosidade e permeabilidade (OSTADHASSAN; TAMINI, 2014).

A baixa porosidade das rochas salinas indica que as mesmas não sofrem o efeito de compac-

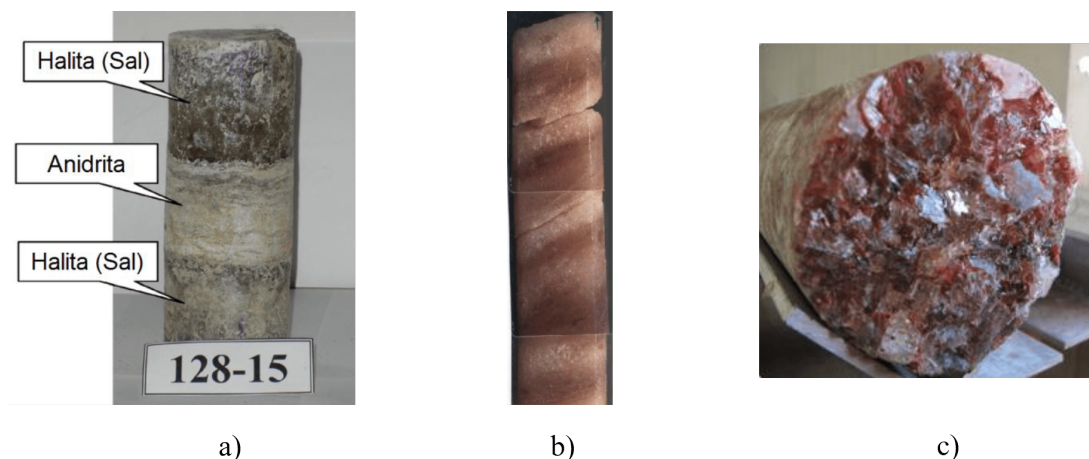
tação, dessa forma, podem ser consideradas como incompressíveis e com densidade constante ao longo da profundidade. Uma das propriedades peculiares das rochas salinas é a capacidade de cicatrização (*self-healing*), a qual garante que descontinuidades, trincas e fraturas podem ser fechadas naturalmente (FIRME, 2013).

Vale citar outras características presentes nas rochas salinas como a solubilidade em água, que possibilita desgastes por erosão, lixiviação e dissolução quando em contato com a água. Segundo Mohriak e Szatmari (2009 *apud* FIRME *et al.*, 2014), a baixa dureza facilita as operações de perfuração e escavação nesse tipo de rocha. Em termos geotérmicos, os evaporitos apresentam alta condutividade térmica.

Embora essas rochas apresentem comportamentos semelhantes em diversos aspectos, essas características se manifestam em intensidades diferentes devido às particularidades de cada evaporito, como composição, nível de solubilidade, mobilidade, propriedades elásticas, viscosas e térmicas. As particularidades de cada evaporito interferem diretamente desde a sua geração até a perfuração de poços em trechos com esse tipo de rocha, visto que cada uma responde às etapas de construção do poço de uma forma diferente.

A solubilidade de cada tipo de rocha salina interfere diretamente na composição litológica, pois durante a evaporação a precipitação dos sais ocorrem dos menos solúveis, como gipsita, anidrita e halita, aos mais solúveis, como taquidrita, carnalita e silvita. Normalmente, a halita é o evaporito mais frequente em acumulações de sal (BRESOLIN, 2010). A Figura 3.2 apresenta algumas amostras de rochas salinas.

Figura 3.2 – Amostras de rochas salinas: a) intercalações de halita e anidrita; b) intercalações de halita e material argiláceo; c) silvinita.



Fonte – Firme (2013)

Segundo Gravina (1997), a composição dos evaporitos é bastante variada, visto que podem conter cloretos, sulfatos de sódio, de potássio, de cálcio, de magnésio, nitratos de sódio e de potássio. A halita, cuja composição é do mineral cloreto de sódio (NaCl), apresenta uma baixa mobilidade, porém essa propriedade pode variar de acordo com o nível de pureza do evaporito, já que a halita pode conter intercalações de outros tipos de rochas, como ocorre no Brasil

(FIRME, 2013).

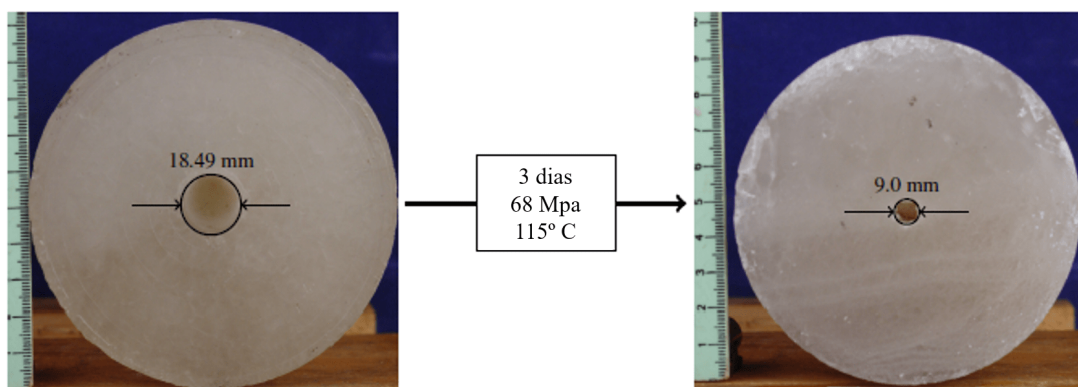
A silvinita é formada pela mistura dos cristais de cloretos de sódio e de potássio (KCl), este último mineral também chamado de silvita. Em termos de mobilidade, é comparável ao que se observa na halita, segundo Baar (1977 *apud* FIRME *et al.*, 2014). A carnalita ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) é resultado da cristalização dos minerais cloreto de potássio e magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), além disso, apresenta uma estrutura cristalina que facilita a formação de planos translacionais de mobilidade, por isso é considerada uma rocha de alta mobilidade de acordo com Baar (1977 *apud* FIRME *et al.*, 2014).

A taquidrita ( $\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ) é uma variação da carnalita e é resultante da cristalização dos minerais cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) e magnésio e água. Assim como a carnalita, a taquidrita apresenta alta mobilidade, segundo Mohriak e Szatmari (2009 *apud* FIRME *et al.*, 2014). A gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 72 \text{H}_2\text{O}$ ) é um sulfato altamente insolúvel e, conseqüentemente, um dos primeiros sais a precipitar durante o processo de evaporação. O mesmo ocorre com a anidrita cuja formação é dada pela precipitação de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) ou pela desidratação da gipsita (SCHLUMBERGER, 2019).

A capacidade de isolamento, devido às baixas permeabilidade e porosidade, torna os evaporitos candidatos a servirem como depósitos, visto que essas rochas desempenham bem o papel de selante para os reservatórios de petróleo e gás natural. De acordo com Minkley e Lüdeling (2015), as rochas salinas seriam eficientes hospedeiras de resíduos nucleares por conta da sua tendência de fechamento de espaços abertos, característica que garante o isolamento do material nuclear.

Outra característica que favorece às rochas salinas servirem de depósito de determinada substância é a cicatrização. Minkley e Lüdeling (2015) pôs uma amostra em condições de sub-superfície equivalente a 3000 m de profundidade, impondo à amostra uma condição de pressão de 68 MPa e temperatura de 115°C. A amostra apresentava um furo no centro de 18,49 mm de diâmetro e após três dias nas condições impostas, o furo reduziu para 9 mm de diâmetro, cerca de 50% do seu valor inicial, conforme é mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Cicatrização de amostra sob condições equivalentes a 3000 m.



Fonte – Adaptado de Minkley e Lüdeling (2015)

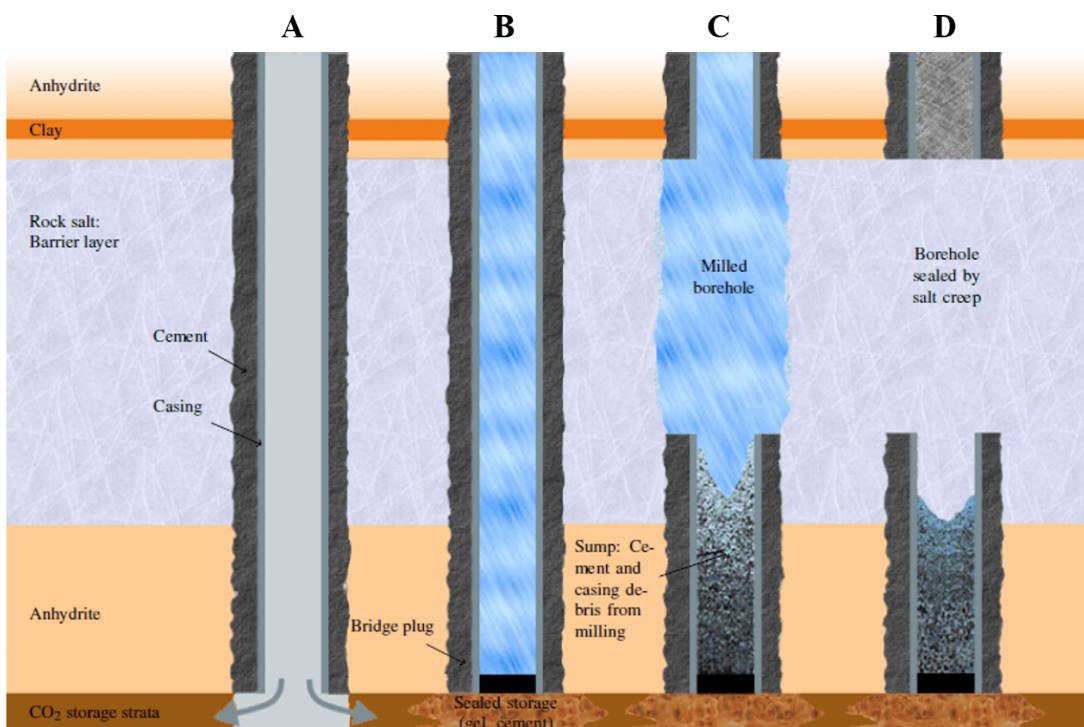
A mobilidade das rochas salinas, embora seja um problema a ser contornado durante a

perfuração, pode ser útil no processo de abandono de poços, o qual se utiliza do fenômeno de fluência do sal para selar completamente o poço. De acordo com Vrålstad *et al.* (2019), os evaporitos se comportam como um fluido altamente viscoso cuja tendência é de sempre fechar o espaço anular após a diminuição da pressão exercida pelas barreiras de segurança atuantes durante as atividades no poço.

Dahmani e Hynes (2017) afirmam que uma formação de baixa permeabilidade pode servir como a barreira ideal no poço, pois o material da formação corresponde ao original antes de ocorrer a perfuração. Rochas com alta mobilidade, como evaporitos e alguns folhelhos, são capazes de se tornar barreiras ideais por meio da fluência, desde que não apresentem muitos danos causados pela perfuração, principalmente os folhelhos.

Segundo Minkley e Lüdeling (2015), a GDF SUEZ, atual Engie, realizou um teste em que uma seção de um poço foi completamente selada por ação da cicatrização do sal. Conforme é mostrado na Figura 3.4, na região de interesse, o revestimento e a cimentação foram moídos enquanto um plug selava o canal de fluxo, posteriormente, foi utilizada uma suspensão salina que consiste basicamente em sal fragmentado e se compacta mais rapidamente e, juntamente com os evaporitos daquela zona, forma a barreira do poço.

Figura 3.4 – Etapas do processo de cicatrização do sal para geração de barreira no poço.



Fonte – Adaptado de Minkley e Lüdeling (2015)

Minkley e Lüdeling (2015) apresentam também uma promissora forma de gerar barreiras com evaporitos em poços, que consiste na utilização de misturas de sal fundidas que apresentam pontos de fusão entre 100 e 220 °C. O calor necessário é obtido por meio de plantas de energia heliotérmica.

### 3.1 Modelos Constitutivos para Rochas Salinas

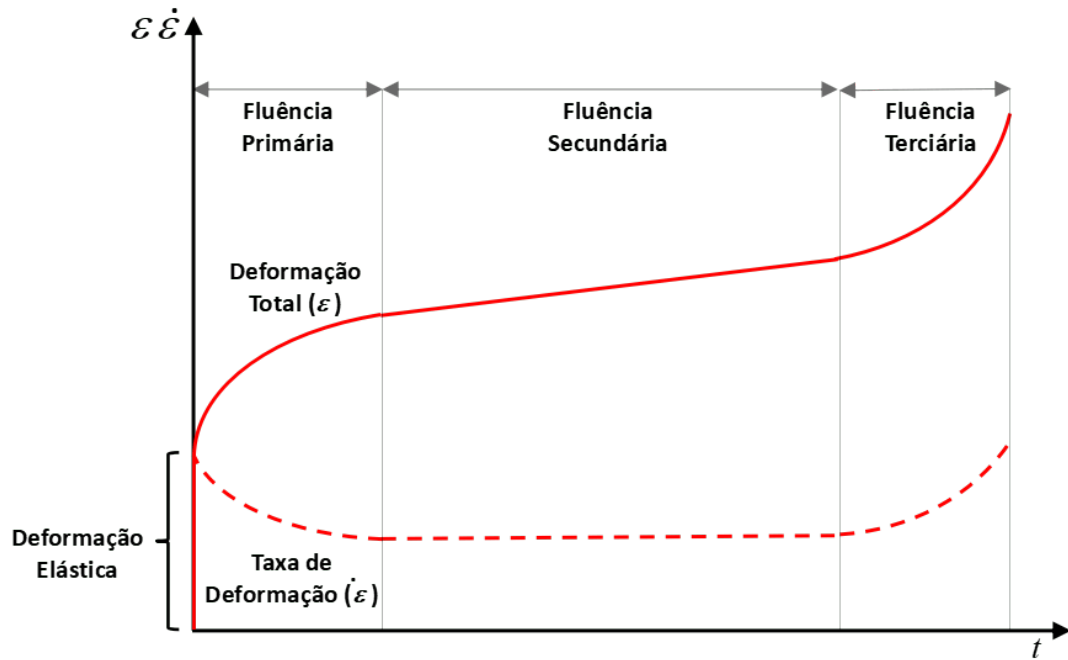
Os materiais são estudados desde muito tempo e as suas particularidades são exploradas para o benefício da humanidade. A partir desse estudo, modelos matemáticos são desenvolvidos para representar o comportamento dos materiais, que são chamados de modelos constitutivos. Para as mais variadas condições, existem vários modelos que podem representar o fenômeno fluência em rochas salinas. Esses modelos podem ser reológicos, leis empíricas ou leis associadas a processos físicos. Para entender esses modelos, antes é preciso esclarecer como a fluência atua nas rochas salinas.

A fluência é uma característica que alguns materiais apresentam de se deformar ao longo do tempo quando sujeitos a tensão constante, mesmo que essa tensão seja menor que seu limite último. Durante a perfuração em rochas salinas, a manifestação da fluência ocorre quando o estado de tensão é alterado pela passagem da broca, o que gera um desequilíbrio de forças. Nesse momento, ocorre a dissipação de uma grande quantidade de energia de deformação gerada pelo alívio de tensão após a perfuração (FIRME, 2013). A deformação viscoelástica ocorre quando existe um estado de tensão desviador atuante na formação salina, no entanto, as tensões volumétricas que compõem o estado de tensão total não contribuem para essa deformação.

De uma forma geral, o fenômeno da fluência pode ser dividido nos estágios primário ou transiente, secundário ou estacionário e terciário. Em alguns modelos viscoelásticos, antes mesmo de iniciar o estágio primário da fluência, ocorre uma deformação elástica instantânea logo após a aplicação da carga. Cada estágio apresenta comportamentos distintos, como mostra a Figura 3.5, para a deformação e a taxa de deformação em função do tempo. De acordo com Araújo (2012) e Gonçalves (2011):

- Estágio Primário ou Transiente: após a deformação elástica instantânea, tem-se uma taxa de deformação muito alta, que decresce continuamente até um determinado valor. Durante esse estágio, se a tensão for removida repentinamente, ocorrerá a recuperação da deformação elástica e a deformação passa a tender assintoticamente a zero até que não reste deformação permanente. Esse estágio é mais relevante para aplicação de carga durante um período curto de tempo;
- Estágio Secundário ou Estacionário: é iniciado quando a taxa de deformação atinge um valor constante ao longo do tempo, e assim permanece até o final deste estágio. Normalmente, é o estágio mais prolongado na curva de fluência, porém alguns materiais sob altas temperaturas e tensões pode passar rapidamente para o terceiro estágio. Se a tensão for removida repentinamente, ter-se-á a recuperação da deformação elástica, no entanto, continuará com uma deformação permanente.
- Estágio Terciário: a taxa de deformação passa a aumentar, o que leva o material a sua ruptura rapidamente.

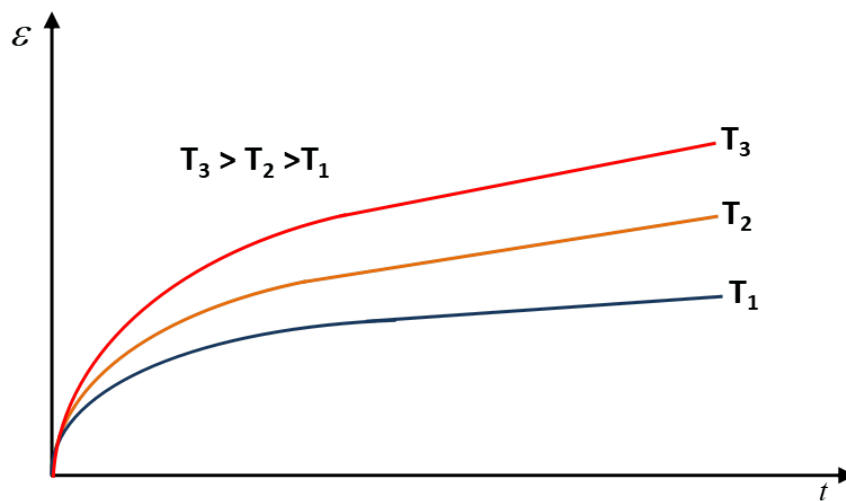
Figura 3.5 – Estágios do fenômeno de fluência.



Fonte – Autor (2019)

A exposição dos materiais a altas temperaturas por longos períodos de tempo tende a aumentar fortemente o efeito da fluência, pois eleva a taxa de deformação desses materiais, conforme mostra a Figura 3.6. Sabendo que os reservatórios localizados no pré-sal estão submetidos a altas pressões e temperaturas, torna-se ainda mais importante o estudo do comportamento das rochas salinas em poços de petróleo.

Figura 3.6 – Efeito da temperatura sobre a fluência.



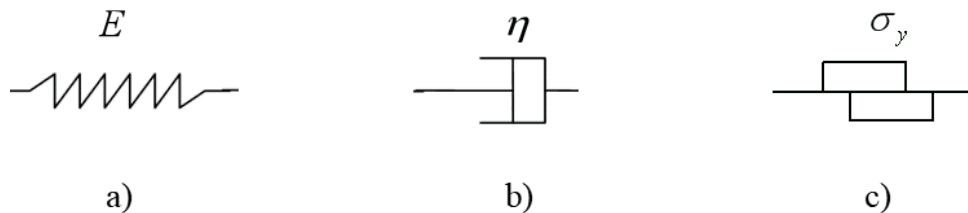
Fonte – Autor (2019)



### 3.1.1 Modelos Reológicos

Os modelos reológicos buscam representar o comportamento dos mais diversos materiais (elástico, viscoso e plástico) sujeitos a diferentes tipos de carregamentos. Essa representação leva em consideração aspectos macroscópicos dos materiais, em que são relacionados a tensão, a deformação e o tempo (COSTA, 1984). Alguns modelos básicos apresentam características particulares de materiais, como os modelos de Hooke, Newton e Saint-Venant que são apresentados na Figura 3.7

Figura 3.7 – Modelos reológicos básicos: a) Hooke; b) Newton; c) Saint-Venant.



Fonte – Autor (2019)

O modelo de Hooke (Figura 3.7a) é idealizado por uma mola e representa materiais com comportamento elástico linear. Nesse tipo de material a deformação  $\varepsilon$  se relaciona linearmente com a tensão  $\sigma$ , e após sua retirada o material recupera totalmente sua configuração inicial. A sua relação constitutiva é dada por

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.1)$$

em que  $E$  é o módulo de elasticidade, também chamado de módulo de Young, do material, o qual é equivalente à rigidez da mola.

O elemento amortecedor representa o modelo de Newton (Figura 3.7b), o qual descreve o comportamento viscoso linear, e portanto não há recuperação da deformação no material após a retirada da tensão. A relação constitutiva desse modelo relaciona a taxa de deformação  $\dot{\varepsilon}$  com a tensão  $\sigma$  de acordo com

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.2)$$

na qual  $\eta$  corresponde à constante de amortecimento do material ou o coeficiente de viscosidade.

O modelo de Saint-Venant (deslizante) é representado por um elemento de atrito, o qual idealiza um material perfeitamente plástico. As deformações nesse tipo de material são irreversíveis e só ocorrem após a tensão aplicada  $\sigma$  atingir o valor da tensão de escoamento.

Embora esses modelos básicos sejam representações de materiais mais simples, é possível associá-los, tanto em série quanto em paralelo, para formar modelos mais complexos (viscoelástico, elastoplástico, viscoelastoplásticos e outros), e assim agrupar características antes particulares (SHAMES; COZZARELLI, 1997). Sabendo que as rochas salinas possuem um

comportamento viscoelástico, serão apresentados alguns modelos que são capazes de representar o fenômeno de fluência.

### 3.1.1.1 Modelo de Maxwell

O modelo de Maxwell é composto pela associação em série dos elementos de mola e de amortecedor, como é exibido na Figura 3.8. Com essa configuração as tensões são iguais e as deformações diferentes para cada elemento básico, dessa forma as relações de equilíbrio e de compatibilidade são atendidas respectivamente.

Figura 3.8 – Modelo de Maxwell.



Fonte – Autor (2019)

O modelo de Maxwell consegue representar bem ensaios de relaxação, no qual é aplicada uma deformação inicial até que as tensões no sistema alcance um certo nível, a seguir são impedidas novas deformações, de modo que as tensões passam a diminuir gradativamente ao longo do tempo. No entanto, em termos de fluência, esse modelo consegue representar apenas a deformação elástica inicial seguida do estágio secundário (GRAVINA, 1997).

Para definir a equação constitutiva do modelo de Maxwell, parte-se, respectivamente, das relações de equilíbrio e de compatibilidade a seguir

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.4)$$

na qual  $\sigma$  e  $\varepsilon$  são a tensão e deformação totais, já  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  correspondem às tensões e deformações de cada elemento básico (mola e amortecedor, respectivamente). Conhecendo as relações constitutivas da mola e do amortecedor, apresentadas nas Equações (3.1) e (3.2), deriva-se a taxa de deformação como

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.5)$$

Nota-se que, na Equação (3.5), se o módulo de elasticidade  $E \rightarrow \infty$ , o comportamento do material seria puramente viscoso, e se o coeficiente de amortecimento  $\eta \rightarrow \infty$ , o comportamento do material passaria a ser puramente elástico (GONÇALVES, 2011). Para resolver essa equação, considera-se que no teste de fluência a condição de deformação inicial é dada por

$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma_0}{E} \quad (3.6)$$

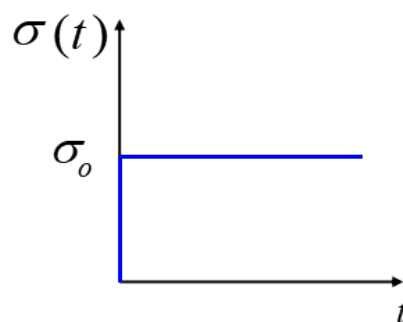
na qual  $\sigma_0$  corresponde a uma tensão inicial constante. A partir dessa condição, chega-se à solução da equação diferencial que representa a relação constitutiva do modelo de Maxwell

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta}t \quad (3.7)$$

em que  $t$  representa o tempo.

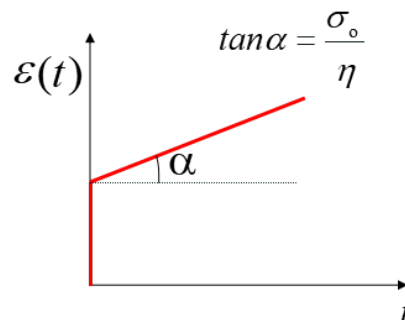
As Figuras 3.9 e 3.10 exibem as representações da tensão aplicada e da deformação ao longo do tempo para a fluência para o modelo de Maxwell.

Figura 3.9 – Comportamento da Tensão para o Teste de Fluência.



Fonte – Autor (2019)

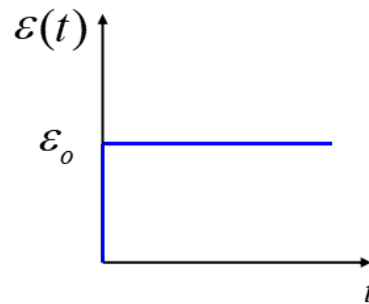
Figura 3.10 – Curva de Fluência no Modelo de Maxwell.



Fonte – Autor (2019)

Além das curvas de fluência, são feitos testes de relaxação para avaliar o comportamento do material diante da aplicação de uma deformação inicial constante  $\varepsilon_0$ , como mostra a Figura 3.11. Como efeito dessa deformação inicial, a tensão gerada passa a diminuir ao longo do tempo por conta da acomodação do material a essa nova configuração.

Figura 3.11 – Comportamento da Deformação no Teste de Relaxação.



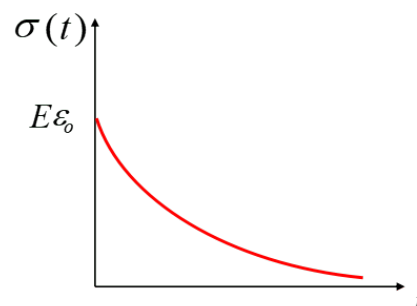
Fonte – Autor (2019)

Para o modelo de Maxwell, ao resolver a Equação (3.5) com a aplicação de uma deformação inicial constante, chega-se à seguinte expressão

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad (3.8)$$

cuja representação é mostrada na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Curva de Relaxação no Modelo de Maxwell.

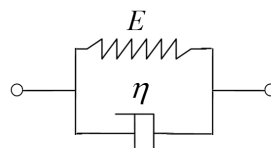


Fonte – Autor (2019)

### 3.1.1.2 Modelo de Kelvin

O modelo de Kelvin é mais um modelo viscoelástico linear, no qual a associação dos elementos básicos de mola e de amortecedor é feita em paralelo (Figura 3.13). Essa configuração, diferentemente da associação em série, gera deformações iguais e tensões distintas em cada elemento básico para atender as relações de compatibilidade e de equilíbrio respectivamente.

Figura 3.13 – Modelo de Kelvin.



Fonte – Autor (2019)

Este modelo consegue representar de forma satisfatória o estágio primário da fluência, porém não consegue reproduzir a deformação elástica inicial, condição que pode ser contornada com a adição de uma mola em série, o que resulta no modelo de Sólido Padrão que será discutido mais a frente. Para determinar a relação constitutiva desse modelo, consideram-se as relações de equilíbrio e de compatibilidade, respectivamente

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (3.9)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (3.10)$$

em que  $\sigma$  e  $\varepsilon$  representam a tensão e deformação totais, já  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  são as tensões e deformações de cada elemento básico. Ao utilizar as relações de Hooke e de Newton, Equações (3.1) e (3.2), encontra-se a tensão total em função da deformação e da taxa de deformação, na forma

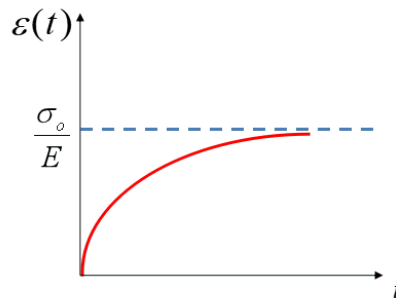
$$\sigma = E\varepsilon + \dot{\varepsilon}\eta \quad (3.11)$$

Observa-se que se o módulo de elasticidade  $E \rightarrow 0$  o comportamento do modelo puramente viscoso, já se o coeficiente de amortecimento  $\eta \rightarrow 0$  o comportamento passa a ser puramente elástico (GONÇALVES, 2011). Ao resolver a Equação (3.11) e considerar que a deformação inicial seja nula, encontra-se

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left( 1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right) \quad (3.12)$$

em que  $\sigma_0$  corresponde a uma tensão inicial constante e  $t$  corresponde ao tempo. Com base na Equação (3.12), nota-se que, com o passar do tempo, a deformação tende a  $\sigma_0/E$ , como é mostrado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Curva de Fluência no Modelo de Kelvin.



Fonte – Autor (2019)

Para o teste de relaxação, a solução da Equação (3.11) após a aplicação da deformação

inicial constante é dada por

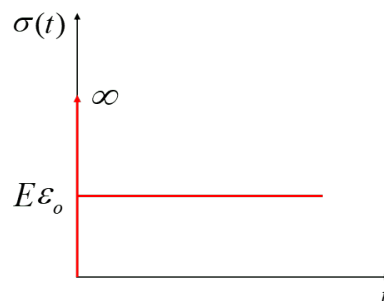
$$\sigma(t) = \varepsilon_0 [\eta\delta(t) + E] \quad (3.13)$$

em que  $\delta(t)$  corresponde à função delta de Dirac definida como

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } t \neq 0, \\ \infty, & \text{para } t = 0. \end{cases} \quad (3.14)$$

de modo que a representação gráfica da curva de relaxação para o modelo de Kelvin é mostrada na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Curva de Relaxação no Modelo de Kelvin.

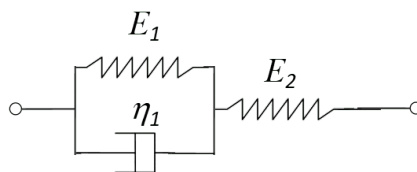


Fonte – Autor (2019)

### 3.1.1.3 Modelo de Sólido Padrão

Um dos modelos viscoelásticos mais conhecidos é o modelo de sólido padrão, no qual estão associados em série o modelo de Hooke e o modelo de Kelvin (mola e amortecedor em paralelo), assim como é exibido na Figura 3.16. Esse modelo viscoelástico é capaz de reproduzir a deformação elástica instantânea e também o primeiro estágio da fluência (GRAVINA, 1997).

Figura 3.16 – Modelo de Sólido Padrão.



Fonte – Autor (2019)

Devido a associação em série, a deformação total do sistema corresponde à deformação do modelo de Kelvin  $\varepsilon_1$  somado a deformação da mola  $\varepsilon_2$ , dessa forma a equação de compatibilidade é dada por

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.15)$$

na qual  $\varepsilon$  corresponde à deformação total. Já a tensão aplicada em cada um dos modelos será a mesma, ou seja,

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (3.16)$$

em que  $\sigma$  corresponde à tensão total,  $\sigma_2$  é a tensão da mola e  $\sigma_1$  é a tensão do modelo de Kelvin, a qual é composta por uma parcela elástica e uma viscosa. Essas parcelas, ao considerar a igualdade das tensões e os modelos de Hooke e Newton, podem ser escritas como

$$\sigma = E_2\varepsilon + \dot{\varepsilon}\eta_2 \quad (3.17)$$

em que  $E_1$  e  $\eta_1$  correspondem, respectivamente, ao módulo de elasticidade e ao coeficiente de amortecimento do modelo de Kelvin.

Ao isolar  $\varepsilon_1$  da Equação (3.15), substituir na Equação (3.17) e fazer algumas manipulações algébricas, chega-se à seguinte relação:

$$(E_1 + E_2)\sigma + \eta_1\dot{\sigma} = \eta_1E_1\dot{\varepsilon} + E_1E_2\varepsilon \quad (3.18)$$

na qual  $E_0$  corresponde ao módulo de elasticidade do modelo de Hooke. Para resolver a Equação (3.18) é considerado que a deformação inicial é dada por

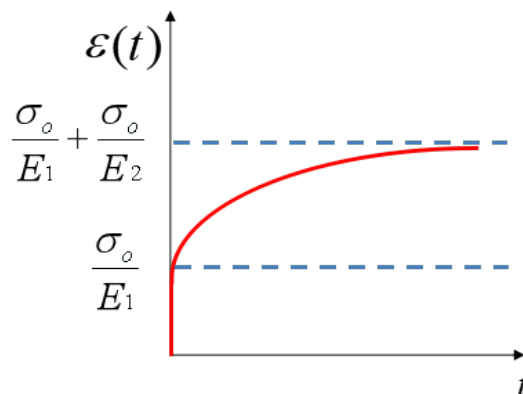
$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (3.19)$$

em que  $\sigma_0$  é a tensão inicial constante aplicada durante o teste. A partir disso, chega-se à deformação em função do tempo  $t$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta}t}\right) \quad (3.20)$$

Na Figura 3.17 é apresentado o comportamento da curva de deformação da fluência no modelo de Sólido Padrão.

Figura 3.17 – Comportamento da Deformação no Modelo de Sólido Padrão.

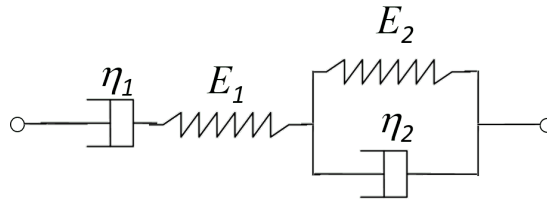


Fonte – Autor (2019)

### 3.1.1.4 Modelo de Burgers

O modelo viscoelástico de Burgers é composto pela associação em série dos modelos de Kelvin e Maxwell (mola e amortecedor em série) como é exibido na Figura 3.18. Esse modelo é capaz de reproduzir as deformações elástica inicial instantânea, da fluência primária e da fluência secundária.

Figura 3.18 – Modelos de Burgers.



Fonte – Autor (2019)

De acordo com Costa (1984), o modelo de Burgers é o mais representativo das curvas experimentais obtidas em ensaios laboratoriais realizados em evaporitos. No entanto, encontram-se dificuldades para ajustar a equação de fluência às curvas experimentais, sendo necessário realizar o descarregamento para que seja feito o ajuste corretamente. Por este motivo, o modelo adotado em seu trabalho foi a lei empírica potencial.

Como esse modelo é composto pelos modelos de Kelvin e Maxwell em série, a deformação total do sistema corresponde à soma das deformações de cada um deles

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.21)$$

em que  $\varepsilon$  corresponde à deformação total,  $\varepsilon_1$  a deformação do modelo de Kelvin e  $\varepsilon_2$  a deformação de Maxwell. Dessa forma, as tensões que atuam em cada um dos modelos são iguais, ou seja,

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (3.22)$$

na qual  $\sigma$  é a tensão atuante total,  $\sigma_1$  a tensão atuante no modelo de Maxwell e  $\sigma_2$  a tensão atuante no modelo de Kelvin. Sabendo que as equações constitutivas de Maxwell e Kelvin são

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\sigma}_1}{E_1} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} \quad (3.23)$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_2 \quad (3.24)$$

em que  $\dot{\varepsilon}$ ,  $E$  e  $\eta$  correspondem às taxas de deformação, módulos de elasticidade e coeficientes de amortecimento, tanto para Maxwell quanto para Kelvin.



Ao manipular as Equações (3.21), (3.22), (3.23) e (3.24) chega-se na equação constitutiva para o modelo de Burgers

$$\eta_2 \ddot{\varepsilon} + E_2 \dot{\varepsilon} = \left( \frac{\eta_2}{E_1} \right) \ddot{\sigma} + \left( 1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} + \left( \frac{E_2}{\eta_1} \right) \sigma \quad (3.25)$$

Ao considerar uma tensão constante  $\sigma_0$  aplicada sobre sistema, a Equação (3.25) pode ser reduzida a

$$\eta_2 \ddot{\varepsilon} + E_2 \dot{\varepsilon} = \left( \frac{E_2}{\eta_1} \right) \sigma_0 \quad (3.26)$$

admitindo que  $t = 0$  para as seguintes condições iniciais:

$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (3.27)$$

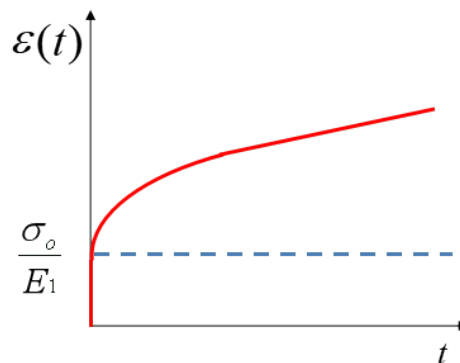
$$\dot{\varepsilon}(0) = \sigma_0 \left( \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} \right) \quad (3.28)$$

a solução da equação diferencial (3.26) é dada por:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t \quad (3.29)$$

de modo que o comportamento do deslocamento é mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Comportamento da Deformação no Modelo de Burgers.



Fonte – Autor (2019)

### 3.1.2 Modelos Empíricos

Os modelos empíricos são equações matemáticas que visam representar o comportamento típico de uma curva de fluência com base em análises experimentais. Segundo Araújo (2012), essas equações são concebidas por meio do ajuste dos resultados experimentais segundo o estado uniaxial de tensões e deformações. De acordo com Gravina (1997), esses modelos, normalmente, representam as fluências primária e secundária. Apesar disso, há o interesse, por

parte da indústria, em estudar a fluência terciária que aborda a fase em que o material entra em processo de ruptura e provoca desmoronamentos na parede do poço.

Gonçalves (2011) destaca que, em relação aos modelos reológicos, as leis empíricas têm como vantagem a dependência explícita da temperatura, a qual é bastante relevante para descrever o comportamento de evaporitos, já que influencia diretamente na taxa de deformação do sal. A seguir são apresentados alguns modelos empíricos que representam a fluência.

### 3.1.2.1 Lei de Potência

A lei empírica potencial é capaz de representar o estágio primário de fluência em metais, mas também pode ser aplicada em rochas salinas. Gravina (1997) adotou o modelo de potência para investigar o fechamento de poços de petróleo em zonas com rochas salinas. Sabendo que ao término da perfuração de uma fase inicia-se a implantação do revestimento e da cimentação, e que o intervalo entre esses processos é de alguns dias e não chega a um mês, é conveniente avaliar apenas a fluência primária.

Esse modelo também foi adotado por Costa (1984) na avaliação do comportamento dos evaporitos da mina de Taquari-Vassouras em Sergipe, que obteve bons resultados de simulação em comparação com as medições feitas. A lei potencial pode ser descrita como

$$\varepsilon(t) = A\sigma^a T^b t^c \quad (3.30)$$

em que  $T$  é a temperatura,  $\sigma$  é a tensão,  $t$  é o tempo e  $A$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes definidas empiricamente. Sendo que, na Equação (3.30) tanto a temperatura  $T$ , quanto a tensão  $\sigma$  devem ser constantes, pode-se agrupá-las em um único parâmetro como

$$P = A\sigma^a T^b \quad (3.31)$$

dessa forma, a lei potencial pode ser reescrita como

$$\varepsilon(t) = Pt^c \quad (3.32)$$

Apesar de ser um dos modelos mais utilizados para representar a fluência primária, a lei potencial apresenta duas condições indesejáveis. A velocidade de deformação  $\dot{\varepsilon}$  tende ao infinito quando o tempo  $t$  tende a ser nulo. Já quando o tempo  $t$  tende ao infinito, a velocidade de deformação  $\dot{\varepsilon}$  tende a ser nula.

De acordo com Gravina (1997), a partir da lei potencial surgiu a Lei de Norton, a qual é capaz de representar o estágio secundário da fluência em metais, mas também vem sendo aplicada em trabalho com rochas salinas. A aplicação dessa lei para representar o estágio secundário de fluência em rochas salinas, torna-se relevante em estudos que visam analisar longos períodos.

A formulação matemática é representada por

$$\varepsilon(\sigma) = \varepsilon_s \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^n \quad (3.33)$$

na qual  $\varepsilon_s$  corresponde à velocidade de deformação no estágio secundário,  $n$  é uma constante empírica e  $\sigma_c$  é uma tensão constante. Pode-se agrupar os termos constantes de forma que

$$A_p = \frac{\varepsilon_s}{\sigma_c^n} \quad (3.34)$$

seja uma expressão semelhante à apresentada na Equação (3.32), porém a deformação passa a ser em função da tensão, já que no estágio estacionário não ocorre variação da velocidade de deformação, dada por

$$\varepsilon(t) = A_p \sigma^n \quad (3.35)$$

### 3.1.2.2 Lei Logarítmica

Assim como o modelo potencial, a lei logarítmica também é fruto de estudos de fluência primária em metais, mas pode ser estendida para avaliação do comportamento de formações salíferas. Sua representação matemática é dada por

$$\varepsilon(t) = A \sigma^b \ln(t) T^a \quad (3.36)$$

na qual  $\sigma$  representa a tensão efetiva,  $T$  é a temperatura,  $t$  é o tempo e  $A$ ,  $a$  e  $b$  são constantes definidas experimentalmente (GONÇALVES, 2011).

Da mesma forma que o modelo empírico anterior, a tensão efetiva e a temperatura devem ser constantes, logo é possível agrupar todas as constantes em um único parâmetro, o que resulta em

$$\varepsilon(t) = L \ln(t) \quad (3.37)$$

sendo  $B$  a Equação (3.31). Essa lei empírica também apresenta o mesmo inconveniente da lei potencial, em que a velocidade de deformação infinita quando o tempo tende a zero, no entanto, segundo Gravina (1997) algumas modificações propostas por Lomnitz (1956 *apud* GRAVINA, 1997) e Jeffreys (1958 *apud* GRAVINA, 1997) visam contornar esse problema como mostram as equações, respectivamente, abaixo

$$\varepsilon(t) = L \ln(1 + \alpha_L t) \quad (3.38)$$

$$\varepsilon(t) = L \ln[(1 + \alpha_L t)^{c_L} - 1] \quad (3.39)$$

em que  $\alpha_L$  e  $c_L$  são constantes definidas empiricamente.

### 3.1.2.3 Lei Exponencial

A fim de encontrar uma função que pudesse representar os dois primeiros estágio da fluência, Yang, Daemen e Yin (1999) propuseram uma formulação baseada em uma função exponencial, na qual, de acordo com a Equação (3.40), a primeira parcela representa o comportamento transiente e a segunda parcela o comportamento estacionário

$$\dot{\epsilon}(t) = A_E e^{\left(\frac{t_0-t}{\beta}\right)} + C_E e^{-n_{EP}} \sigma_d^{m_E} \quad (3.40)$$

em que  $A_E$ ,  $\beta$ ,  $C_E$ ,  $n_E$  e  $m_E$  são constantes empíricas definidas a partir dos dados experimentais de ensaios uni e triaxiais,  $t_0$  é um tempo de referência,  $p$  é a pressão de confinamento e  $\sigma_d$  representa a tensão desviadora.

Yang, Daemen e Yin (1999) apresentaram uma formulação que não contempla a temperatura explicitamente, o que limita seu uso a condições de temperaturas constantes e próximas as que foram adotadas no trabalho deles. No entanto, existem outras formulações para lei empírica exponencial que explicitam a temperatura, como a presente no trabalho de Gravina (1997) dada por

$$\dot{\epsilon}(t) = A \sigma^a t^c e^{\left(\frac{-b}{T}\right)} \quad (3.41)$$

na qual  $A$ ,  $a_E$ ,  $c_E$  e  $b_E$  são constantes empíricas,  $t$  é o tempo,  $\sigma$  é a tensão e  $T$  é a temperatura. Segundo Gravina (1997) essa formulação é capaz de representar a fluência transiente, e é recomendada para modelar o comportamento de fluência das rochas salinas em altas temperaturas, como depósitos de lixo atômico.

### 3.1.3 Leis de Fluência Associadas a Processos Físicos

Embora os modelos viscoelásticos reológicos e empíricos consigam reproduzir o comportamento das rochas salinas, existem aspectos relevantes que não são contemplados nesses modelos, como é o caso da microestrutura dessas rochas. De acordo com Costa e Poiate Júnior (2008), durante o processo de formação dos evaporitos surgem imperfeições no arranjo atômico, os quais são chamados de discordância.

Essas discordâncias controlam o mecanismo de deformação, pois as imperfeições do retículo cristalino geram forças interatômicas que podem se elevar devido as distorções sofridas pelo sal. Uma vez ocorrido o desequilíbrio das forças interatômicas, o mecanismo buscará o rearranjo dos átomos para restaurar o equilíbrio, o que resulta na reorganização na estrutura cristalina e se estende aos agregados granulares das rochas salinas.

Enquanto o sal se deforma, as discordâncias se propagam podendo gerar sobreposições das mesmas. Se ocorrer o fechamento desses espaços devido ao rearranjo da estrutura atômica, o

processo de deformação continua a agir (recuperação), no entanto, se os espaços ainda permanecerem abertos, a fluência passa a desacelerar até a estagnação (endurecimento). Ao longo da fluência primária o processo de recuperação atua de forma dominante, enquanto que o processo de endurecimento evolui até que se atinja um equilíbrio e consolide a fluência secundária, conforme é mencionado por Hunsche e Hampel (1999 *apud* ARAÚJO, 2012).

Com o avanço nos estudos de evaporitos, de acordo com Munson, Fossum e Sensey (1989 *apud* COSTA; POIATE JÚNIOR, 2008) a partir do começo dos anos 90, as leis baseadas em mecanismos de deformação passaram a ser recomendadas pela literatura técnica internacional, visto que consideravam aspectos intrínsecos do material além da condição de pressão e temperatura do meio.

### 3.1.3.1 Modelo de Günther/Salzer

Khadeli, Datcheva e Schanz (2013) utilizaram esse modelo para estudar o comportamento de rochas salinas para armazenamento de ar comprimido, gás natural, gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>). Esse modelo constitutivo leva em consideração aspectos físicos em escala micro e macro, podendo representar os três estágios da fluência. A taxa de deformação total é composta por uma parcela elástica  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$  e outra de fluência  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{flu}$  como mostra a Equação (3.42).

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{total} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{flu} \quad (3.42)$$

As parcelas elástica e de fluência da taxa de deformação são dadas por

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el} = -\frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} \quad (3.43)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{flu} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_{ef}^{flu} s_{ij}}{\sigma_{ef}} \quad (3.44)$$

em que  $\sigma_{kk}$  corresponde à tensão hidrostática,  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\sigma_{ij}$  é o tensor de tensão,  $\dot{\varepsilon}_{ef}^{flu}$  é a taxa de deformação efetiva de fluência,  $\sigma_{ef}$  é a tensão efetiva e  $s_{ij}$  é o tensor de tensão desviadora, sendo estes dados por

$$\dot{\varepsilon}_{ef}^{flu} = A_p \frac{\sigma_{ef}^{n_p}}{\left(\varepsilon_{ef}^{V,0} + \varepsilon_{ef}^V\right)^\mu} \quad (3.45)$$

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} \quad (3.46)$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (3.47)$$

em que  $\varepsilon_{ef}^V$  corresponde ao parâmetro que governa o comportamento de endurecimento, recuperação e dano,  $A_p$ ,  $n_p$  e  $\mu$  são parâmetros do material.

No início, a taxa de deformação de fluência  $\dot{\varepsilon}_{ef}^{flu}$  depende apenas dos defeitos naturais presentes na estrutura do cristalino do evaporito ( $\varepsilon_{ef}^{V,0}$ ), mas a medida que a tensão desviadora passa a atuar e deforma a rocha salina, novas discordâncias surgem, e com isso  $\varepsilon_{ef}^V$  passa a aumentar, o que caracteriza o estágio transiente da fluência.

No entanto, após um tempo, devido a sobreposição das discordâncias, o processo de recuperação passa a atuar até que  $\varepsilon_{ef}^V$  não varie mais, o que caracteriza a etapa estacionária da fluência. Após um longo período, o aumento das tensões locais provoca microfaturas, então  $\varepsilon_{ef}^V$  passa a diminuir e  $\dot{\varepsilon}_{ef}^{flu}$  a aumentar, o que resulta, portanto, no terceiro estágio da fluência (KHADELI; DATCHEVA; SCHANZ, 2013).

### 3.1.3.2 Mecanismo Duplo de Deformação

Poiate Júnior, Costa e Falcão (2006) utilizaram o modelo de mecanismo duplo de deformação para representar o comportamento de rochas no desenvolvimento de projetos de fluidos de perfuração, revestimento e estratégias de perfuração em poços de petróleo do pré-sal, nos quais os evaporitos estão sujeitos a condições de pressão e temperatura severas. Este modelo é uma simplificação de três mecanismos de deformação: *dislocation climb*, *dislocation glide* e mecanismo indefinido, os quais podem contribuir em escalas diferentes, a depender das condições de temperatura e diferencial de tensão atuantes no evaporito.

De acordo com Botelho (2008) o *dislocation climb* é controlado pelo fenômeno de ativação térmica, visto que a temperatura influencia diretamente na agitação dos átomos de um corpo, portanto, o aumento da temperatura implica no aumento da velocidade de fluência. Além da contribuição da temperatura, esse mecanismo também leva em consideração a reorganização da estrutura molecular do material. Esse mecanismo se torna predominante quando o regime de tensão diferencial é baixo e os níveis de temperatura são de moderado a alto.

O mecanismo *dislocation glide* é formado por modelos micromecânicos de deslizamento, sendo responsável pelo controle da fluência estacionária quando o corpo em estudo está sujeito elevados níveis de tensão. Já o mecanismo indefinido recebe este nome por não estar relacionado a nenhum modelo micromecânico, por isso é determinado empiricamente em ensaios de laboratório (BOTELHO, 2008).

A simplificação no modelo do mecanismo duplo de deformação consiste em considerar apenas os mecanismos *dislocation glide* e indefinido. Dessa forma, a equação constitutiva do modelo elasto/viscoelástico é dada por

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left( \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n e^{\left( \frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT} \right)} \quad (3.48)$$

em que  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação na condição de regime permanente,  $\dot{\varepsilon}_0$  é a taxa de deformação na condição de regime permanente de referência,  $\sigma_{ef}$  é a tensão efetiva de fluência,  $\sigma_0$  é a tensão

efetiva de referência,  $n$  é o expoente de tensão das rochas salinas,  $Q$  é a energia de ativação,  $R$  é a constante universal dos gases,  $T$  é a temperatura da rocha e  $T_0$  é a temperatura de referência.

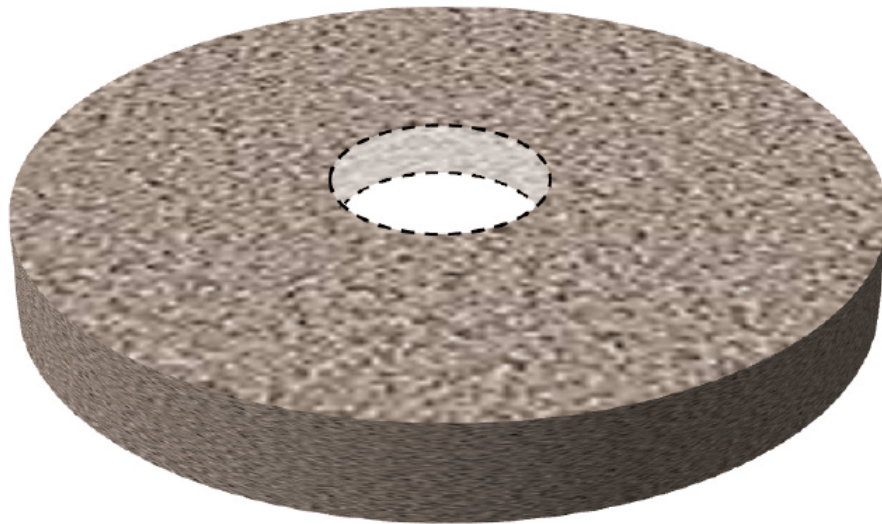
De acordo com Costa *et al.* (2014), a obtenção dos valores de referência é realizada por intermédio da relação entre a taxa de deformação do regime permanente e a tensão desviadora. Para uma dada temperatura, por meio de interpolações são encontrados os valores de  $\dot{\epsilon}_0$ ,  $\sigma_0$  e  $n$ , de modo que o expoente de tensão pode ser determinado de acordo com a Equação (3.49).

$$n = \begin{cases} n_1, & \text{se } \sigma_{ef} \leq \sigma_0, \\ n_2, & \text{se } \sigma_{ef} > \sigma_0. \end{cases} \quad (3.49)$$

#### 4 FORMULAÇÃO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS

Araújo (2009) desenvolveu uma ferramenta com base no Método dos Elementos Finitos que, devido à simetria geométrica, adotou a formulação axissimétrica para representar o fechamento do poço ocasionado pelo fenômeno de fluência em rochas salinas. Além disso, a fim de tornar o programa mais eficiente, em termos de tempo de simulação, foi considerado que as camadas de rocha possuem espessura unitária, conforme é mostrado na Figura 4.1, dessa forma as variáveis de estado variam apenas na direção radial. Outro aspecto sobre a malha é que foi adotado elementos do tipo L3.

Figura 4.1 – Camada de rocha com espessura unitária e com poço em evidência.



Fonte – Araújo *et al.* (2009)

Essas simplificações adotadas por Araújo (2009) permitiram que a discretização da malha seja feita com elementos unidimensionais. Dessa forma, a malha apresenta uma complexidade menor, visto que o número de graus de liberdade corresponde à metade do que seria numa modelagem bidimensional. Com isso, garante-se um tempo de processamento menor.

Devido à aplicabilidade da ferramenta desenvolvida por Araújo (2009), no contexto de perfuração de poços em rochas salinas, e o seu baixo custo computacional, este trabalho incorpora a essa ferramenta a modelagem do repasse de broca. Dessa forma, em alguns pontos de interesse é feito o monitoramento do raio do poço até que alcance o valor limite e acione o repasse.

Além disso, propõe-se um modelo de acoplamento de multicamadas unidimensionais que leva em consideração a interação entre elas. Dessa forma, é possível modelar diversas camadas unidimensionais em determinados pontos de análise com a interação de umas com as outras. Desse modo, tem-se a análise de vários pontos de interesse com um custo de processamento menor, devido ao menor número de graus de liberdade, sem perda de representatividade do problema em estudo.



Os modelos simulados nessa ferramenta têm como características básicas serem poços verticais, localizados em regiões com rochas salinas durante a perfuração, nos quais é considerada a ocorrência do fenômeno de fluência na parede da formação.

Assim como foi adotado por Araújo (2009), o modelo viscoelástico escolhido para esse tipo de rocha é o Mecanismo Duplo de Deformação, visto que o mesmo leva em consideração aspectos da microestrutura do material, os quais não são contemplados nos modelos reológicos e empíricos, além de que já apresentou resultados interessantes em diversos trabalhos relacionados a evaporitos na exploração de petróleo.

Para este modelo, a análise se inicia logo após a passagem da broca no trecho determinado durante a perfuração, assim, enquanto a fluência passa a provocar o fechamento do poço devido à ação das tensões desviadoras, considera-se presente o fluido de perfuração na parede do poço agindo como uma contrapressão ao avanço desse fechamento. Neste modelo, a contribuição do fluido de perfuração depende apenas do seu peso específico e da profundidade na qual é feita a análise, e pode ser descrita como

$$P_f = (H_{airg} + LDA + H_{sot} + H_{sal})\gamma_{fluido} \quad (4.1)$$

em que  $H_{airg}$  corresponde ao *air gap*,  $LDA$  é a lâmina de água,  $H_{sot}$  é a espessura do soterramento,  $H_{sal}$  é a espessura do topo do sal até a profundidade de análise e  $\gamma_{fluido}$  é o peso específico do fluido.

Embora exista uma diferença na pressão exercida por fluidos em movimento e fluidos em repouso, no fundo do poço a pressão dinâmica não atinge o mesmo patamar alcançado pela pressão estática, dessa forma, utiliza-se um peso de fluido equivalente que já incorpora essa diferença. Por esse motivo, a pressão exercida pelo fluido de perfuração na zona de estudo é considerada constante ao longo da simulação.

Outro parâmetro que está ligado diretamente ao deslocamento do sal é a temperatura, a qual é considerada no modelo de mecanismo duplo de deformação. A temperatura é calculada em função das espessuras do sal e do soterramento, além de seus gradientes térmicos, a qual é descrita como

$$T_i = T_{FM} + GT_{sot}H_{sot} + GT_{sal}H_{sal} \quad (4.2)$$

em que  $T_{FM}$  corresponde à temperatura do fundo do mar,  $GT_{sot}$  é o gradiente térmico do soterramento e  $GT_{sal}$  é o gradiente térmico do sal.

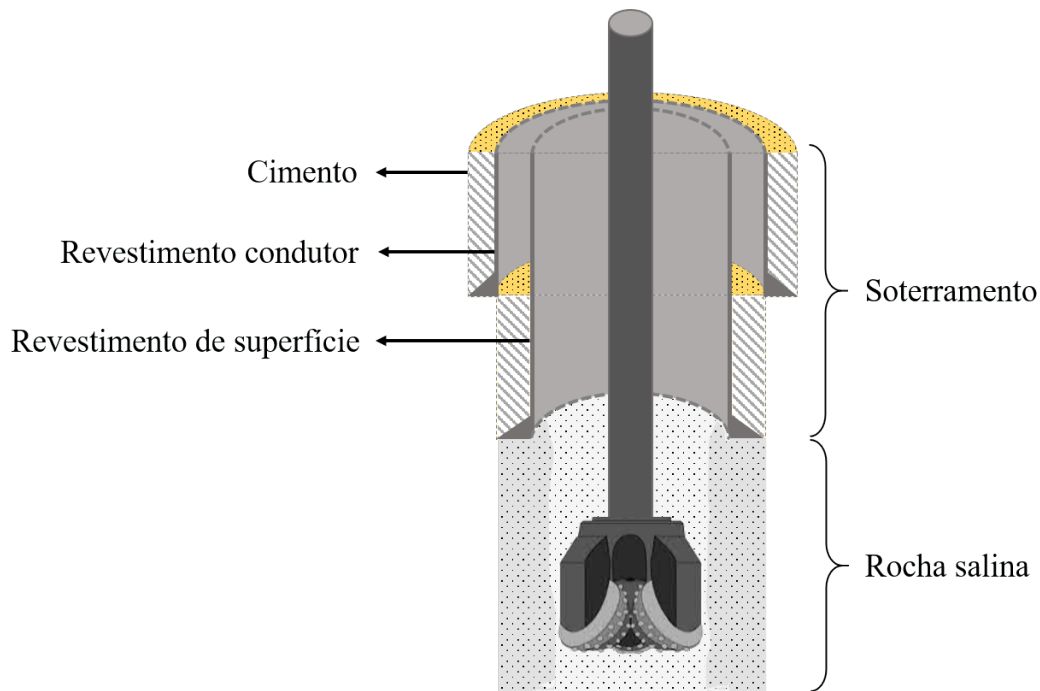
Antes de ocorrer a perfuração do poço, a subsuperfície se encontra em um equilíbrio geostático, que leva em consideração, além da lâmina d'água, a presença do trecho de soterramento e das camadas de rochas salinas presentes na zona de análise, descrito na Figura 4.2. A tensão geostática original está em função das espessuras e pesos específicos das camadas presentes

acima da cota em análise, de modo que pode ser calculado como

$$\sigma_0^v = LDA\gamma_{\acute{a}gua} + H_{sot}\gamma_{sot} + H_{sal}\gamma_{sal} \quad (4.3)$$

na qual  $\sigma_0^v$  corresponde à tensão geostática vertical,  $\gamma_{\acute{a}gua}$  é o peso específico da água,  $\gamma_{sot}$  é o peso específico do soterramento e  $\gamma_{sal}$  é o peso específico do sal.

Figura 4.2 – Esquema simplificado de uma perfuração e das camadas que determinantes para a tensão geostática.



Fonte – Autor (2019)

A partir da tensão geostática vertical  $\sigma_0^v$ , é possível calcular a tensão geostática horizontal  $\sigma_0^h$  por meio de um fator que relaciona as duas tensões, o coeficiente de empuxo horizontal  $k_0$ , como

$$\sigma_0^h = \sigma_0^v k_0 \quad (4.4)$$

para o qual se admite o valor unitário.

Também são adotadas outras estratégias, que serão discutidas nas próximas seções deste capítulo, como a geração da malha que contenha elementos unidimensionais de tamanhos uniformes e não uniformes e a utilização de um incremento de tempo calculado de forma adaptativa conforme o avanço da simulação em termos de deslocamento.

#### 4.1 Modelo Unidimensional Axissimétrico

Logo após a passagem da broca, o estado de tensões geostáticas original é alterado pela retirada de material, assim sendo, as rochas salinas passam a se acomodar em busca do equilíbrio

devido à ação da tensão desviadora. Ao seguir a mesma linha apresentada por Araújo (2009), entende-se que antes da remoção de material as rochas encontravam-se em um equilíbrio de tensões geostáticas, de forma que, baseado na formulação dos deslocamentos de MEF, pode ser descrito como

$$\int_{V'} B'^T \sigma_g dV' = f'_g \quad (4.5)$$

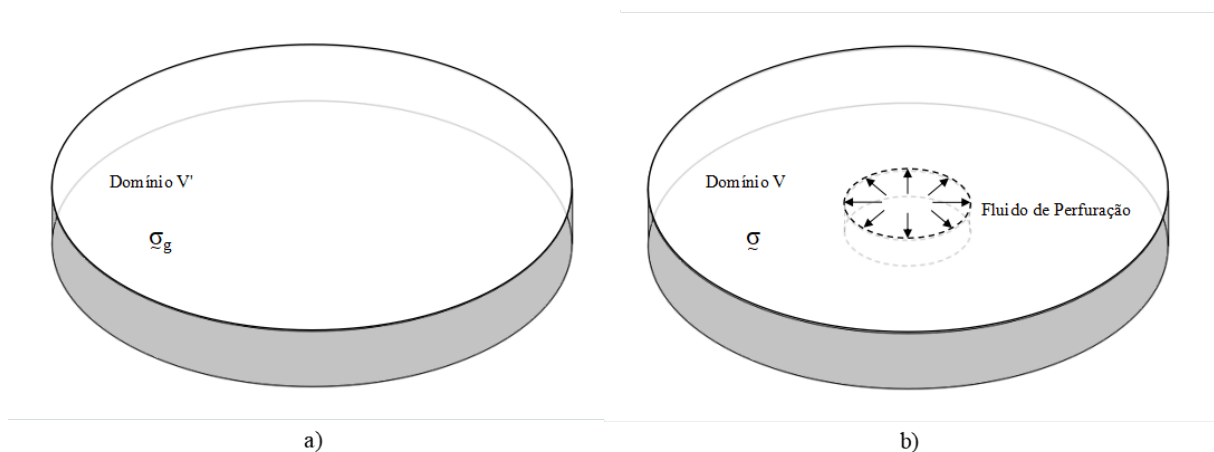
em que  $V'$  corresponde ao domínio antes da perfuração,  $B'$  é a matriz que correlaciona os graus de liberdade dos elementos e suas deformações,  $\sigma_g$  é o tensor de tensões geostáticas e  $f'_g$  é o vetor de forças externas que geram o estado geostático.

Assim que a broca passa por um determinado trecho durante a perfuração, o estado de tensões é alterado tanto pela retirada de material quanto pela presença do fluido de perfuração cuja presença passa a ser considerada imediatamente, conforme é mostrado na Figura 4.3. Dessa forma, o novo estado de tensões passa a ser

$$\int_V B^T \sigma dV = f_g + f_{e0} + f_{ac} \quad (4.6)$$

na qual  $V$  corresponde ao domínio depois da perfuração,  $\sigma$  trata-se do tensor do novo estado de tensões da rocha,  $f_g$  é o vetor de forças geostáticas redimensionado,  $f_{e0}$  é o vetor de forças externas iniciais após a perfuração e  $f_{ac}$  corresponde à força de acoplamento entre as camadas unidimensionais.

Figura 4.3 – Estado de tensão: a) Antes da perfuração; b) Depois da perfuração.



Fonte – Autor (2019)

Devido ao problema de fluência em rochas salinas requerer um modelo constitutivo visco-elástico, esse modelo trata inicialmente a deformação elástica inicial instantânea, a qual não depende do tempo. A partir da solução elástica, inicia-se o cálculo das deformações viscosas em função do tempo para contribuir na determinação dos deslocamentos gerados pela fluência.

Como a parte elástica do problema é abordada antes mesmo do início da contagem do tempo, sabe-se que logo após a passagem da broca as relações constitutiva são puramente elásticas,

que em conjunto com as relações cinemáticas, podem ser descritas como

$$\sigma = D\varepsilon + \sigma_g \quad (4.7)$$

$$\varepsilon = Bd_0 \quad (4.8)$$

na qual  $D$  é a matriz constitutiva,  $\varepsilon$  corresponde à deformação e  $d_0$  é o vetor de deslocamentos elásticos nodais.

Para obter a solução do problema elástico, utilizam-se dessas relações em associação com a Equação (4.6) para chegar na seguinte expressão

$$\int_V B^T (DBd_0 + \sigma_g) dV = f_g + f_{e0} + f_{ac} \quad (4.9)$$

na qual são separados os termos que representam os vetores de força

$$\int_V B^T DBd_0 = f_g + f_{e0} + f_{ac} - \int_V B^T \sigma_g dV \quad (4.10)$$

de modo que o termo que multiplica  $d_0$  resulta na matriz de rigidez elástica  $K$  e a parcela da direita é agrupada em um vetor de forças  $f$ , como mostra a Equação (4.11).

$$Kd_0 = f \quad (4.11)$$

Formulado o problema elástico, a solução da Equação (4.11) definirá as condições iniciais para a parcela viscosa do problema. Essas condições são descritas nas equações

$$d_{t=0} = d_0 \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{t=0} = \varepsilon_0 = Bd_0 \quad (4.13)$$

$$\sigma_{t=0} = \sigma_0 = D\varepsilon_0 + \sigma_g \quad (4.14)$$

$$\varepsilon'_{t=0} = 0 \quad (4.15)$$

Como a parcela viscosa é dependente do tempo, o equacionamento é desenvolvido para determinar as contribuições incrementais das variáveis analisadas a cada passo de tempo. Sabendo disso, a condição de equilíbrio a ser satisfeita é dada por

$$\int_V B^T \sigma_{(t+\Delta t)} dV = f_g + f_{e(t+\Delta t)} + f_{ac(t+\Delta t)} \quad (4.16)$$

de modo que a relação constitutiva apresentada passa a considerar que a deformação total, antes composta apenas pela parcela elástica, agora conta com a contribuição viscosa, dessa forma a Equação (4.7) passa a ser reescrita como sendo

$$\sigma_{(t+\Delta t)} = D(\varepsilon_{(t+\Delta t)} - \varepsilon_{(t+\Delta t)}^{\nu}) + \sigma_g \quad (4.17)$$

em que  $\varepsilon_{(t+\Delta t)}^{\nu}$  corresponde à parcela viscosa da deformação em função do tempo.

Ao relacionar as Equações (4.16) e (4.17) por substituição chega-se em uma expressão a qual é avaliada nos instantes de tempo  $t$  e  $t + \Delta t$  como sendo

$$Kd_{(t+\Delta t)} = f_g + f_{e(t+\Delta t)} + f_{ac(t+\Delta t)} - f_{\sigma_g} + \int_V B^T D \varepsilon_{(t+\Delta t)}^{\nu} dV \quad (4.18)$$

$$Kd_{(t)} = f_g + f_{e(t)} + f_{ac(t)} - f_{\sigma_g} + \int_V B^T D \varepsilon_{(t)}^{\nu} dV \quad (4.19)$$

sendo assim, ao subtrair as Equações (4.18) e (4.19) obtém-se a expressão que contém as variações dos parâmetros dependentes do tempo, como

$$K\Delta d = \int_V B^T D \Delta \varepsilon^{\nu} dV + \Delta f_{ac} \quad (4.20)$$

uma vez que o fluido de perfuração tem atuação imediata, após a abertura do furo, e constante ao longo de toda a análise, não há variação de  $f_e$ .

Para determinar a taxa de deformação viscosa, utiliza-se a função de fluência  $\beta$  da seguinte forma

$$\dot{\varepsilon}^{\nu}(t) = \beta(\sigma(t), \varepsilon(t)) \quad (4.21)$$

$$\Delta \varepsilon_t^{\nu} \cong \Delta t \beta(\sigma_t, \varepsilon_t) \quad (4.22)$$

em que  $\dot{\varepsilon}^{\nu}$  corresponde à taxa de deformação viscosa. Dessa forma, o problema da fluência em função do tempo é totalmente explícito, por isso se deve adotar incrementos de tempo pequenos para garantir a estabilidade do processo de integração das equações. Em termos de integração numérica, foi implementado o método da Quadratura Gaussiana, que utiliza a ordem de integração 2 para o modelo unidimensional com apenas uma camada.

## 4.2 Modelo Multicamadas Unidimensionais Axissimétricas

As camadas de evaporitos podem possuir centenas de metros com diversas intercalações de diferentes tipos de rochas, por isso, a depender do tipo de análise que se deseja, apenas um trecho de espessura unitária pode não representar o comportamento da rocha diante do fenômeno

de fluência da forma mais adequada, como é o caso do problema em questão cujo interesse é o monitoramento da parede do poço para evitar aprisionamento da coluna de perfuração.

A modelagem de multicamadas unidimensionais é capaz de reproduzir resultados mais representativos, se comparado à modelagem de uma única camada unidimensional, pois além de abranger uma faixa maior para observação do problema, consegue garantir uma complexidade menor que um modelo com um maior número de dimensões. Os modelos com multicamadas consistem basicamente no acoplamento de mais de uma camada de espessura unitária com interação entre elas. A adoção desse tipo de estratégia favorece a obtenção de um tempo de processamento menor.

A interação entre as camadas acopladas é definida por uma força gerada a partir do deslocamento relativo entre camadas, a qual deve ser considerada devido às diferentes condições (pressão geostática e temperatura) e características particulares (propriedades mecânicas e viscosas) das camadas presentes no modelo. A contribuição dessa força de interação, para o deslocamento das camadas unidimensionais, é dada pelo seu incremento a cada passo de tempo da simulação, presente na parcela  $\Delta_{fac}$  da Equação 4.20.

A partir do elemento infinitesimal com os componentes do tensor de tensões em coordenadas cilíndricas do diagrama de corpo livre mostrado na Figura 4.4, têm-se as equações diferenciais de equilíbrio estático escritas nas direções radial, circunferencial e vertical (adaptadas de Reddy (2008)) na forma:

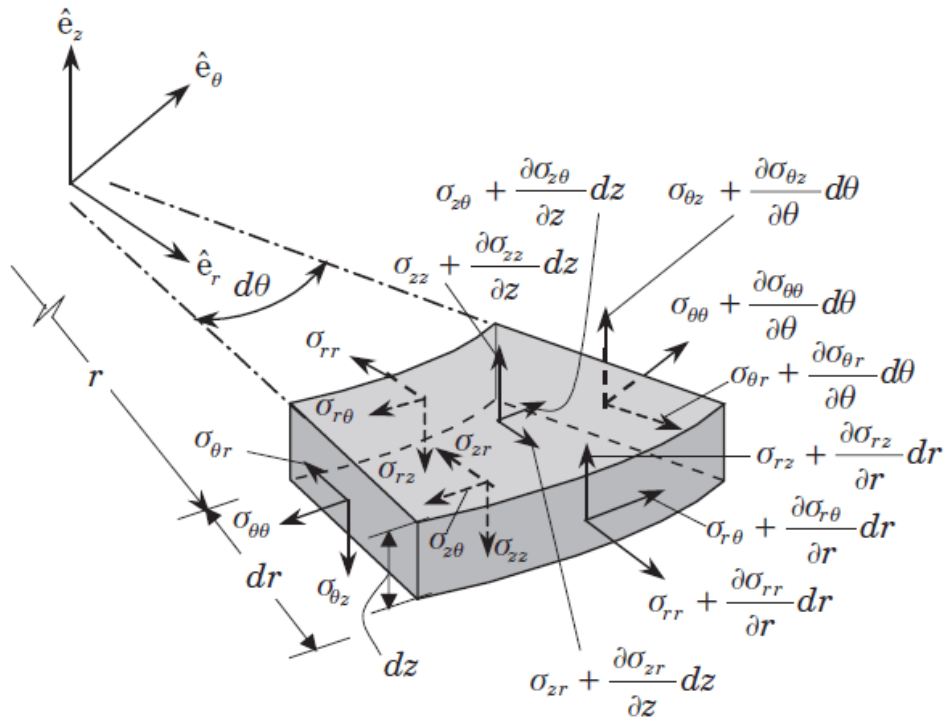
$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + b_r = 0 \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{z\theta}}{\partial z} + \frac{\sigma_{r\theta} - \sigma_{\theta r}}{r} + b_\theta = 0 \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} + b_z = 0 \quad (4.25)$$

nas quais  $b_i$  são os componentes da força de volume, além de que o tensor de tensão é simétrico, ou seja,  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ .

Figura 4.4 – Elemento infinitesimal e componentes do tensor de tensões em coordenadas cilíndricas.



Fonte – Reddy (2008)

Visto que o problema de interesse remete a poços verticais, tem-se a condição de axissimetria na análise, a qual possui apenas a força de volume gravitacional, na direção  $z$ . Dessa forma, todas as variações dos parâmetros referentes à direção circunferencial são nulas, bem como os componentes de cisalhamento que envolvem essa mesma direção. Com a consideração da simetria do tensor de tensão, as equações diferenciais de equilíbrio estático se reduzem a

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0 \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} - \rho g = 0 \quad (4.27)$$

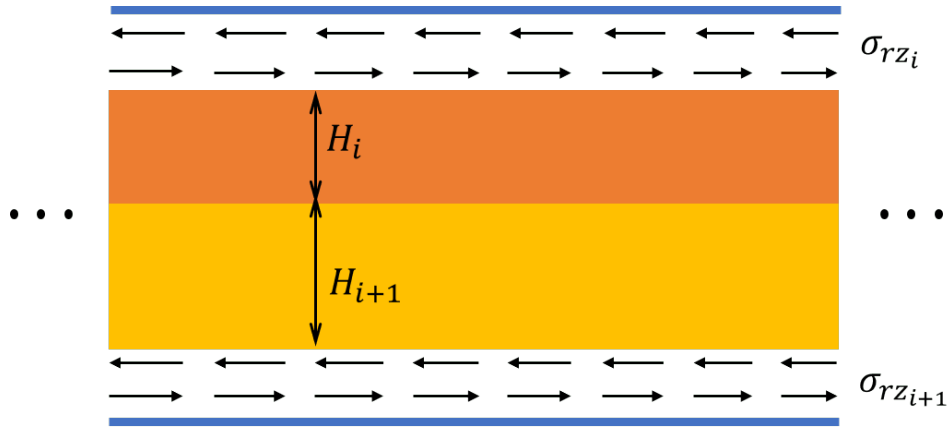
em que  $\rho$  é a densidade da formação salina e  $g$  é a aceleração da gravidade, além disso, os componentes do tensor de tensão ainda presentes nas Equações (4.26) e (4.27) são funções de  $r$  e  $z$ .

Como já foi mencionado anteriormente, a modelagem multicamadas consiste no acoplamento de camadas unidimensionais axissimétricas, as quais fornecem os componentes normais  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$  e  $\sigma_{zz}$ . Além desses componentes normais, considera-se que na região intermediária de influência, com uma determinada espessura  $H$  entre as camadas unidimensionais, existe uma tensão de cisalhamento cuja contribuição ocorre nas direções  $r$  e  $z$ .

Essa região intermediária apresenta o comportamento viscoelástico segundo o mesmo modelo adotado para as camadas unidimensionais, o mecanismo duplo de deformação. Visto que

é bastante comum a ocorrência de intercalações de diferentes tipos de evaporitos cujas propriedades podem variar consideravelmente, essa região intermediária é subdividida em duas, como mostra a Figura 4.5.

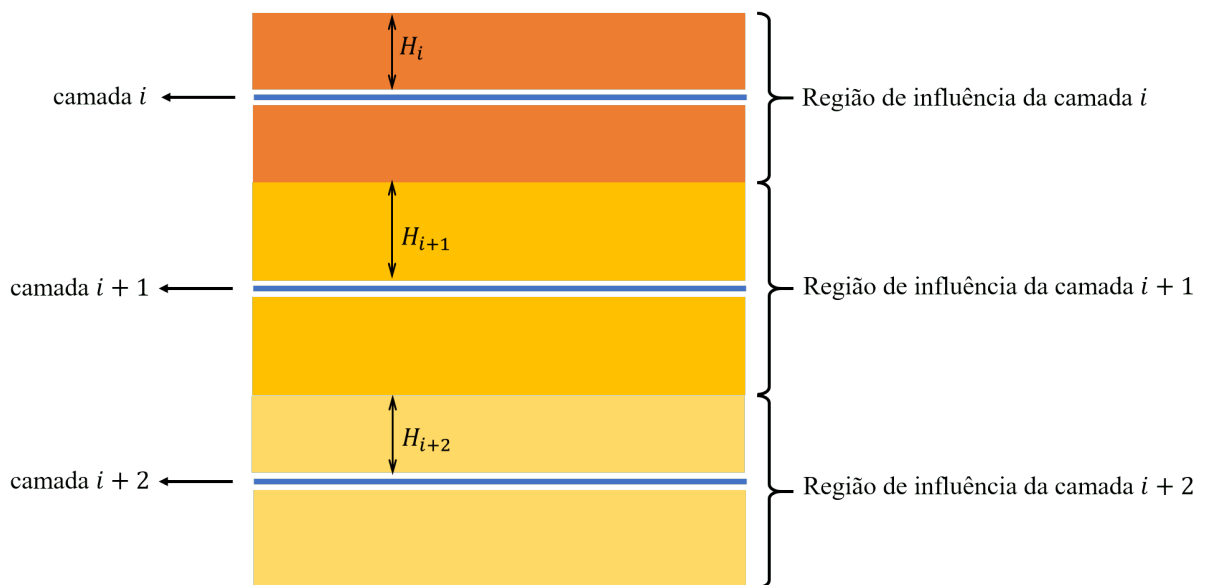
Figura 4.5 – Camadas unidimensionais axissimétricas e região.



Fonte – Autor (2019)

A região intermediária é tratada de forma semelhante à camada unidimensional axissimétrica, pois as propriedades atribuídas a ela podem ser ou por associação direta, como as propriedades elásticas e viscosas do material, ou calculadas por meio de uma interpolação linear, como é o caso das tensões, deformações e temperatura, as quais dependem da cota de análise. As camadas unidimensionais estão localizadas ao centro de sua zona de influência, dessa forma, uma região intermediária entre camadas unidimensionais é composta pela metade de cada uma das zonas de influência dessas camadas, como mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6 – Composição do modelo com camadas unidimensionais axissimétricas e regiões de influência.



Fonte – Autor (2019)



Ao levar em consideração a presença das regiões intermediárias, a estrutura do modelo passa a ser composta por camadas unidimensionais axissimétricas, originadas a partir dos dados de entrada do modelo, e regiões de influência cujas informações são calculadas a partir das camadas unidimensionais axissimétricas via interpolação linear de acordo com

$$V = \left( \frac{V_{(i+1)} - V_{(i)}}{H_{(i)} + H_{(i+1)}} \right) H + V_{(i)} \quad (4.28)$$

em que  $H$  corresponde à altura em um determinado ponto e  $V$  a propriedade a ser interpolada na altura referida. Foi definido que as informações interpoladas são calculadas no ponto central de cada uma das regiões intermediárias, ou seja, consideram-se  $H = H_{(i)}/2$  e  $H = H_{(i)} + H_{(i+1)}/2$  para calcular as informações na primeira e na segunda região intermediária respectivamente.

A inicialização das tensões da região intermediária acontece antes do comportamento viscoso entrar em ação, pois no modelo viscoelástico ocorre uma deformação elástica instantânea antes do processo viscoso, a partir da qual são calculados os estados de tensão nos pontos de integração das camadas unidimensionais. A partir desse estado de tensão, aplica-se a interpolação linear para obter os estados de tensão da região intermediária.

Uma vez que o estado de tensão das camadas unidimensionais é composto apenas pelas tensões normais, a tensão de cisalhamento que compõe o estado de tensão da região intermediária é calculada a partir das deformações angulares obtidas pelo deslocamento relativo entre as camadas unidimensionais. Além disso, considera-se que essa tensão de cisalhamento  $\sigma_{rz}$  é constante ao longo da direção  $z$ , em uma região intermediária, mas pode variar ao longo da direção  $r$ .

Ao considerar as regiões intermediárias entre duas camadas unidimensionais  $i$  e  $i+1$ , tem-se que as tensões de cisalhamento nessas regiões intermediárias são dadas por

$$\sigma_{rz(i)} = G_{(i)} \left( \gamma_{rz(i)} - \gamma_{rz(i)}^v \right) \quad (4.29)$$

$$\sigma_{rz(i+1)} = G_{(i+1)} \left( \gamma_{rz(i+1)} - \gamma_{rz(i+1)}^v \right) \quad (4.30)$$

em que  $G$  corresponde ao módulo de elasticidade transversal,  $\gamma_{rz}$  é a deformação angular total e  $\gamma_{rz}^v$  corresponde à deformação angular viscosa, apesar de que sua contribuição é nula durante o passo elástico. Como a tensão de cisalhamento é considerada constante ao longo da direção  $z$ , as Equações (4.29) e (4.30) se igualam e resultam em

$$G_{(i)} \left( \gamma_{rz(i)} - \gamma_{rz(i)}^v \right) = G_{(i+1)} \left( \gamma_{rz(i+1)} - \gamma_{rz(i+1)}^v \right) \quad (4.31)$$

Além dessa expressão, por meio da compatibilidade cinemática na interface das regiões intermediárias se tem que

$$d_{(i+1)} - d_{(i)} = H_i \gamma_{rz(i)} + H_{(i+1)} \gamma_{rz(i+1)} \quad (4.32)$$

em que  $u$  corresponde aos deslocamentos nos pontos de integração e  $H$  as alturas de cada região intermediária. Dessa forma, por meio de um sistema composto pelas Equações (4.31) e (4.32), encontram-se as expressões

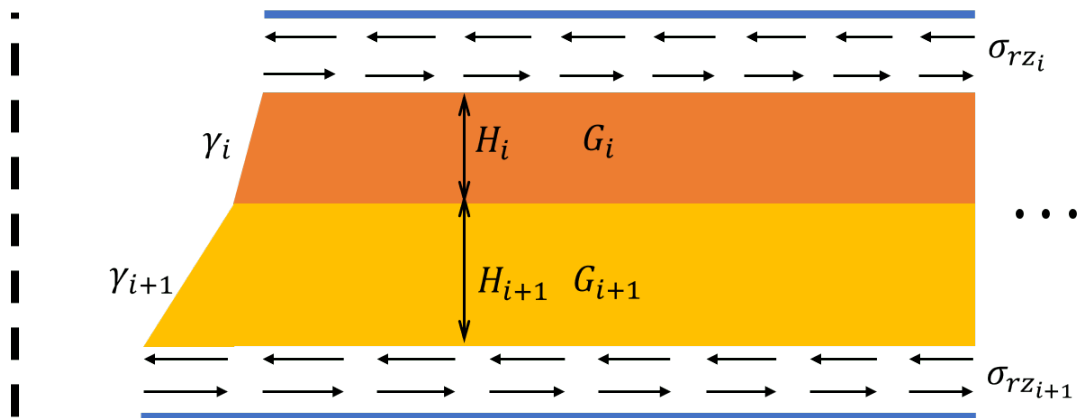
$$\gamma_{rz(i)} = \frac{\left(d_{(i+1)} - d_{(i)} - H_{(i+1)}\gamma_{rz(i+1)}^v\right) G_{(i+1)} + G_{(i)}H_{(i+1)}\gamma_{rz(i)}^v}{G_{(i)}H_{(i+1)} + G_{(i+1)}H_{(i)}} \quad (4.33)$$

$$\gamma_{rz(i+1)} = \frac{\left(d_{(i+1)} - d_{(i)} - H_{(i)}\gamma_{rz(i)}^v\right) G_{(i)} + G_{(i+1)}H_{(i)}\gamma_{rz(i+1)}^v}{G_{(i)}H_{(i+1)} + G_{(i+1)}H_{(i)}} \quad (4.34)$$

as quais definem as deformações angulares das regiões intermediárias associadas as camadas unidimensionais  $i$  e  $i + 1$  cujos valores são diferentes devido as diferentes propriedades que as compõem conforme mostra a Figura 4.7.

Figura 4.7 – Deformações angulares das regiões intermediárias com materiais diferentes.

Centro do poço



Fonte – Autor (2019)

Ao iniciar o processo viscoso, os estados de tensão, de deformação total e de deformação viscosa das regiões intermediárias passam a ser atualizadas a cada passo de tempo. Isso ocorre logo após todas as camadas unidimensionais axissimétricas terem suas propriedades calculadas para o tempo corrente.

Para calcular o novo estado tensão das regiões intermediárias é seguida a mesma linha apresentada nas Equações (4.29) e (4.30), no entanto, estende-se para as tensões normais e as deformações específicas além de levar em consideração a contribuição das tensões geostáticas, o que resulta em

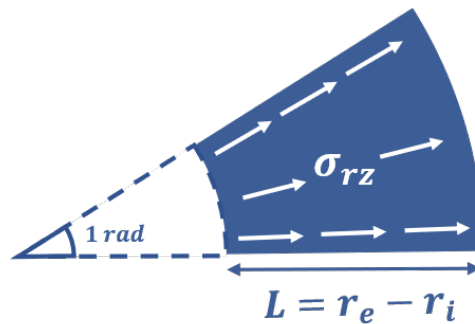
$$\begin{pmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{rz} \end{pmatrix} = \frac{E(1-2\nu)}{1+\nu} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{rr} - \varepsilon_{rr}^v \\ \varepsilon_{zz} - \varepsilon_{zz}^v \\ \varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{\theta\theta}^v \\ \gamma_{rz} - \gamma_{rz}^v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{g_{rr}} \\ \sigma_{g_{zz}} \\ \sigma_{g_{\theta\theta}} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

todavia, antes de contribuir na Equação (4.35), as deformações totais das regiões intermediárias são atualizados, para isto é utilizada a interpolação linear para as deformações específicas, segundo a Equação (4.28) a partir das deformações totais das camadas unidimensionais axisimétricas associadas, e as deformações angulares são calculadas de acordo com as Equações (4.33) e (4.34).

Assim como no caso das deformações totais, os estados de deformação viscosa das regiões intermediárias também são atualizados. Visto que o comportamento dessa região é regido pelo mecanismo duplo de deformação, utiliza-se o estado de tensão da região intermediária para calcular a taxa de deformação viscosa por meio da função  $\beta$ , a qual juntamente com o incremento de tempo define a parcela de deformação viscosa do tempo corrente.

Como já foi mencionado anteriormente, a interação entre as camadas unidimensionais axisimétricas é dada pela aplicação de uma força radial distribuída, a qual é definida a partir das tensões de cisalhamento das regiões intermediárias após serem atualizadas, conforme mostra a Figura 4.8.

Figura 4.8 – Esquema da atuação da força de interação radial distribuída.



Fonte – Autor (2019)

As tensões de cisalhamento das regiões intermediárias são calculadas nos seus pontos de integração, dessa forma, a força de interação radial nodal equivalente, por radiano,  $f_{ac}$  é calculada a partir de uma integração numérica de Gauss ao longo do raio e levada aos nós por meio das funções de forma do elemento, conforme a expressão

$$f_{ac} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} = \int_{-1}^1 \left( N^T(\xi) \sigma_{rz}(\xi) r(\xi) \frac{L}{2} \right) d\xi \quad (4.36)$$

em que  $r$  é o raio no ponto de Gauss,  $L$  é o comprimento do elemento e  $N$  corresponde às funções de interpolação do elemento L3. Calculada a contribuição da força de interação, é feita a atribuição da mesma às camadas unidimensionais  $i$  e  $i + 1$ .

Durante o processo de evolução temporal, o incremento da força de interação passa a compor o conjunto de forças atuantes, dessa forma, as camadas unidimensionais passam a receber influência umas das outras, fato que se reflete em seus deslocamentos, os quais podem ser esti-

mulados ou contidos a depender do material da camada associada. Essa relação entre camadas unidimensionais traz mais fidedignidade ao problema em questão.

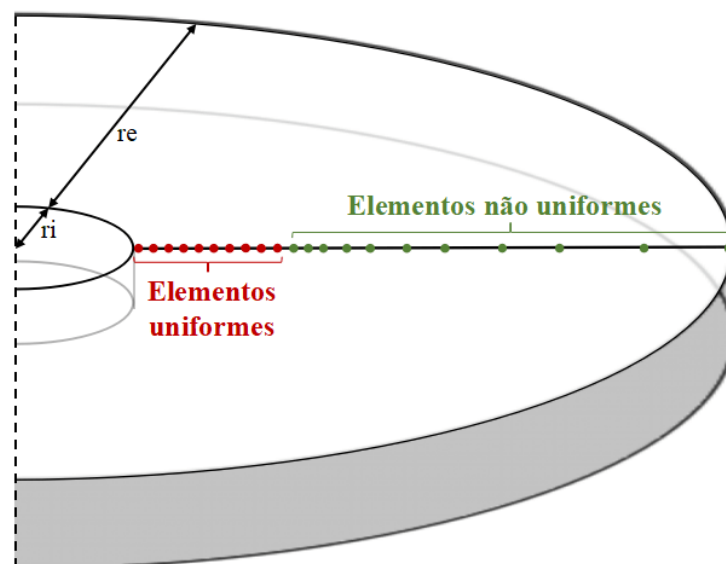
### 4.3 Geração da Malha

Em um programa de elementos finitos a geração da malha é um dos pontos mais importantes, uma vez que toda a simulação irá depender de como a malha representará o fenômeno em estudo. Conhecer bem o problema permite enxergar como a malha pode ser melhor aproveitada na solução de um determinado problema, pois utilizar uma malha que não seja adequada pode gerar resultados incoerentes com a realidade que se deseja representar.

Durante a perfuração de poços em zonas com evaporitos, o monitoramento da fluência da rocha é essencial para garantir a operação seja concluída com segurança. Como a rocha se deforma radialmente em direção ao centro do poço, em um determinado instante o deslocamento da parede atingirá um nível crítico, de modo que o avanço da parede do poço pode ocasionar o aprisionamento da coluna. Embora sejam comuns as operações de repasse para recondicionar o diâmetro do poço, após esse nível crítico de deformação o repasse se torna impossível.

Para esse tipo de problema, entende-se que a malha de elementos finitos necessita de um refinamento maior na zona próxima a parede do poço, já que é a região mais crítica durante a análise. Além do refinamento maior nessa região, a malha conta com um trecho de elementos mais próximos à parede do poço com tamanho uniforme e outro com elementos de tamanhos não uniformes, conforme é mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Esquema da malha composta por elementos uniformes e não uniformes.



Fonte – Autor (2019)

Os elementos de tamanho uniforme são mais eficazes para o tratamento dado a malha quando o repasse é realizado, pois os mesmos geram um *gap* menor entre a malha e o raio inicial, esse aspecto será tratado com mais detalhes em tópicos mais a frente. Os demais ele-

mentos, não uniformes, têm seu comprimento definido por uma progressão geométrica que aumenta da região mais próxima do poço à mais afastada, de modo que os comprimentos desses elementos são dados em função do comprimento uniforme  $lu$ , da razão da progressão geométrica  $q$ , do identificador dos nós  $i$ , que parte do número de elementos uniformes, e do número de elementos uniformes  $neu$ , dada por

$$L = lu q^{(i-neu-1)} \quad (4.37)$$

Com essa consideração de elementos de tamanho não uniforme, ganha-se desempenho no tempo de simulação, pelo fato que a malha trabalha com um menor número de elementos para um determinado comprimento, sem perda de qualidade no resultado, visto que nas regiões mais afastadas do poço os deslocamentos radiais são praticamente inexistentes.

#### 4.4 Incremento de Tempo Adaptativo

Em problemas dependentes do tempo, é preciso aplicar estratégias que garantam bons resultados com o menor tempo possível de simulação. Para atender essa demanda, é adotada uma estratégia que conta com o incremento de tempo, um dos principais termos que define o andamento da simulação e que está diretamente ligado com ambas as necessidades.

Problemas com um incremento de tempo relativamente pequeno geram resultados mais refinados, porém o tempo de processamento pode ser significativamente maior. Já o uso de um incremento de tempo muito maior pode resultar em instabilidades e gerar respostas não representativas, além disso, devido aos saltos do tempo de simulação, algumas características do problema podem não ser bem descritas. Por esses motivos, deve-se buscar o incremento de tempo adequado para o tipo de problema que se deseja resolver.

Nesse sentido, Minkoff e Kridler (2005) estudaram uma maneira de determinar o incremento de tempo de forma adaptativa para modelagem fracamente acoplada de fluxo de fluido e deformação mecânica, a qual consiste em rodar a mesma simulação com dois incrementos diferentes, que gera uma solução mais grosseira ( $d_g$ ) e outra mais refinada ( $d_r$ ). Tendo como referência uma tolerância ( $\delta t$ ), é calculado o erro relativo entre as duas soluções em um passo de tempo, conforme

$$\delta t = \frac{\|d_r - d_g\|}{\|d_r\|} \quad (4.38)$$

A partir daí o algoritmo decide se aceita a solução e se adotará o incremento de tempo grosseiro, seguindo as seguintes possibilidades:

- Se  $\delta < \frac{1}{2}\delta t$ , aceita a solução atual e aumenta o incremento de tempo;
- Se  $\frac{1}{2}\delta t \leq \delta \leq \delta t$ , aceita a solução atual e mantém o incremento de tempo;
- Se  $\delta t \leq \delta \leq 2\delta t$ , aceita a solução atual e diminui o incremento de tempo;

- Se  $\delta > 2\delta t$ , não aceita a solução atual, diminui o incremento de tempo pela metade e repete o passo atual.

Visto que Minkoff e Kridler (2005) alcançaram bons resultados, tornou-se importante a adoção do incremento de tempo adaptativo neste trabalho dada a importância do tempo no cálculo da contribuição da fluência para os deslocamentos. Neste trabalho, adota-se uma abordagem diferente, na qual a estratégia consiste na avaliação do campo de deslocamento da parede do poço, dessa forma, os incrementos de tempo seguem o ritmo do deslocamento e permitem que o incremento de tempo cresça de forma gradativa.

Após varrer todas as camadas unidimensionais e atualizar as informações das mesmas, verifica-se qual delas apresenta o maior deslocamento no nó mais próximo a borda do poço, então é calculada a velocidade do avanço para o passo de tempo atual, conforme mostra a equação

$$vel_{(t)} = \frac{d_{(t)} - d_{(t-\Delta t)}}{Dt_{(t)}} \quad (4.39)$$

em que  $vel_{(t)}$  corresponde à velocidade de avanço na borda do poço,  $d_{(t)}$  é o deslocamento do passo de tempo atual,  $d_{(t-\Delta t)}$  é o deslocamento no passo de tempo anterior e  $Dt_{(t)}$  corresponde ao incremento de tempo corrente.

A escolha do maior deslocamento dentre as camadas unidimensionais resulta na maior velocidade de avanço para o tempo corrente, dessa forma, o próximo incremento de tempo será o menor possível, de modo que seja adequado para o cálculo dos deslocamentos de qualquer camada no próximo passo de tempo sem provocar instabilidades. A expressão que calcula o próximo incremento de tempo é dada por

$$Dt_{(t+\Delta t)} = \frac{Fc \cdot L_1}{|vel_{(t)}|} \quad (4.40)$$

em que  $Dt_{(t+\Delta t)}$  corresponde ao próximo incremento de tempo,  $L_1$  é o comprimento do primeiro elemento ativo e  $Fc$  é um fator que multiplica o comprimento do elemento.

A função de  $Fc$  é diminuir o valor do incremento de tempo e o dimensionamento do seu valor depende da mobilidade das rochas em análise, pois quanto maior for a mobilidade, menor deve ser o fator para impedir que o incremento de tempo aumente desproporcionalmente, de modo que provoque deslocamentos exagerados e gere instabilidades na simulação.

Outra medida tomada para garantir que a simulação convirja, é a imposição de limites superior e inferior para o incremento de tempo do próximo passo, de modo que não ocorram mudanças bruscas em seu valor. Esses limitantes são aplicados sobre o incremento de tempo da seguinte forma

$$Dt_{(t+\Delta t)} = \begin{cases} Dt_{in}, & \text{se } Dt_{(t+\Delta t)}^p < Dt_{in}, \\ \frac{3}{2}Dt_{(t)}, & \text{se } Dt_{(t+\Delta t)}^p > \frac{3}{2}Dt_{(t)}. \end{cases} \quad (4.41)$$

em que  $Dt_{(t+\Delta t)}^p$  é o próximo incremento de tempo proposto e  $Dt_{in}$  corresponde ao incremento de tempo inicial.

#### 4.5 Repasse na Malha

Nas operações de repasse ou *backreaming*, garante-se que o calibre do poço retorne ao previsto em projeto para dar prosseguimento às demais operações de condicionamento do poço. Ciente da mobilidade das rochas salinas, essa operação passa a ser mais frequente e estratégica para evitar graves problemas operacionais. Vale salientar que para isso é primordial o monitoramento do diâmetro da parede do poço ao longo da perfuração.

Os problemas operacionais relacionados ao aprisionamento da coluna de perfuração ocorrem devido ao alcance de um raio crítico do poço. Em perfurações de poços com rochas de alta mobilidade, como as rochas salinas, tem-se como objetivo que esse raio crítico não seja alcançado, para isso, considera-se um limite de segurança com o qual o repasse é requisitado quando atingido.

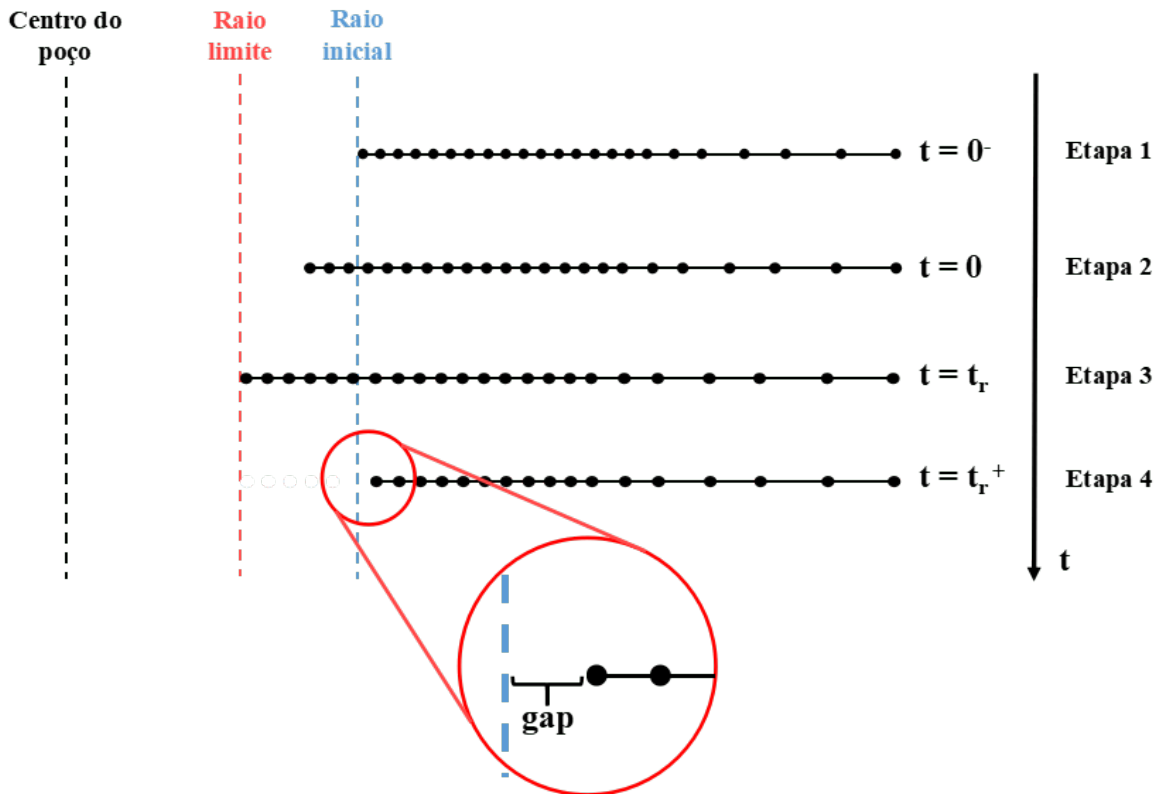
A estratégia adotada para representação do repasse durante a simulação consiste na desativação dos elementos da malha que estejam entre o raio limite e o raio inicial, incluindo os elementos que estejam sobre o raio inicial, assim a malha é reestabelecida ao estado original em termos de raio. Com a malha unidimensional, sabe-se que a coordenada do nó mais próximo ao centro do poço corresponde ao raio do poço, dessa forma, a cada instante de tempo é verificado se o raio do poço alcançou o valor limite que garante a viabilidade do repasse.

É feito um controle dos elementos que estão ativos e os não ativos, visto que à medida que os elementos da borda do poço são desativados pelo repasse, suas contribuições para a malha passam a não ser mais consideradas. Além disso, o nó mais próximo ao centro do poço é alterado a cada repasse, portanto é feito também o controle dos nós ativos para continuar o monitoramento da necessidade de se realizar o repasse novamente.

Após a realização do repasse, a desativação de alguns elementos requer um condicionamento das dimensões das matrizes e vetores envolvidos no cálculo dos deslocamentos. Essa adequação é feita com base nos graus de liberdade do nó ativo mais próximo da borda do poço, dessa forma é garantida a consistência necessária para dar continuidade a solução viscosa da fluência.

Um aspecto importante a ser mencionado quando o repasse é acionado, é a presença de um *gap* entre o raio inicial do poço e o primeiro nó ativo logo após a desativação dos elementos, como é ilustrado na Figura 4.10. A escolha pela malha ser composta por elementos pequenos uniformes no trecho inicial é justificada pela mitigação desse espaço, visto que no pior caso o *gap* terá no máximo o tamanho de um elemento uniforme.

Figura 4.10 – *Gap* entre o raio inicial do poço e o primeiro nó da malha após o repasse.



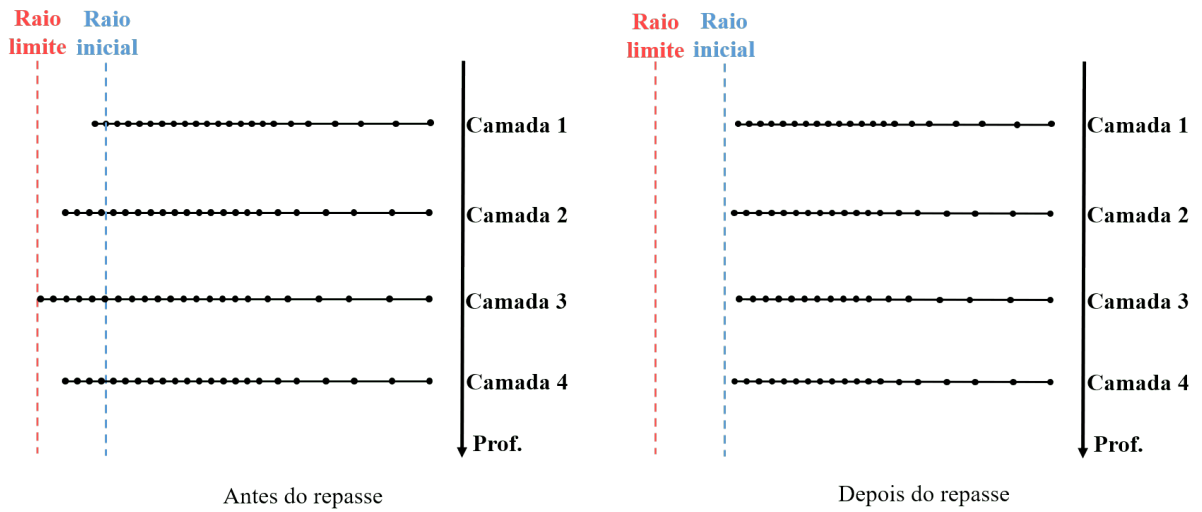
Fonte – Autor (2019)

Antes da passagem da broca, na etapa 1, não se tem deformação alguma na malha, já na etapa 2, imediatamente após a passagem da broca, tem-se o avanço dos elementos em direção ao raio inicial, que indica o deslocamento elástico instantâneo. Na etapa 3, as parcelas de deslocamento viscoso e elástico fazem o raio do poço alcançar o valor limite para evitar o aprisionamento da coluna, então é feito o repasse e, com a retirada dos elementos, surge o *gap* entre o primeiro nó ativo e o raio inicial.

No caso de uma modelagem multicamadas, quando o repasse é acionado para recondicionar uma determinada camada unidimensional, as demais presentes nas proximidades também serão repassadas. A passagem da broca atinge não apenas a camada cujo raio atingiu o valor limite, mas também as regiões que estão ao redor da mesma, normalmente uma seção (cerca de 30 m) acima e abaixo, como mostra a Figura 4.11. As camadas próximas têm maiores chances de alcançarem o valor limite devido a interação entre elas.



Figura 4.11 – Repasse na modelagem de multicamadas.



Fonte – Autor (2019)

O repasse de todas as camadas ao redor da camada que alcançou o raio limite tem como objetivo atrasar a necessidade de outro repasse naquele mesmo trecho. Dessa forma, será realizado um menor número de repasses ao longo da perfuração, de modo que se evita o NPT e diminui o risco de problemas operacionais relacionados a esse tipo de manobra.

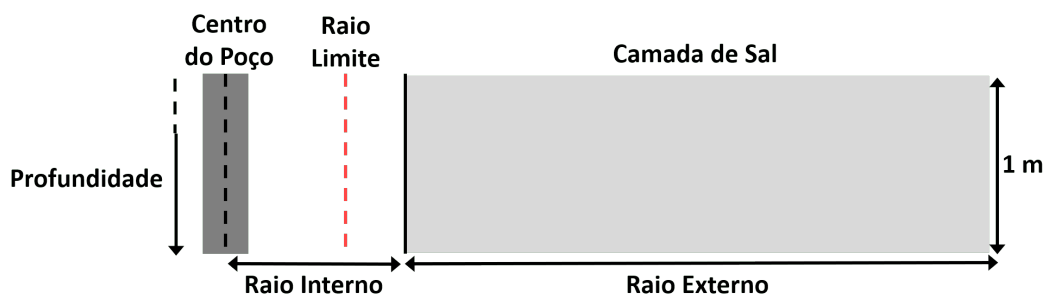
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Estudo Paramétrico do Repasse em Camadas Unidimensionais

Definidas as estratégias e formulações para tratar o problema do repasse de broca em zonas de rochas salíferas, são criados alguns cenários fictícios para simular e verificar o desempenho do programa desenvolvido, os quais são baseados em modelos apresentados por Gonçalves (2011). É importante lembrar que tanto a qualidade do resultado quanto o tempo de simulação são relevantes, pois o problema requer uma tomada de decisão rápida.

A Figura 5.1 apresenta um esquema geométrico do poço logo após a passagem da broca. Nesse instante as deformações elástica e viscosa passam a atuar para o fechamento do poço. Esse esquema será a base de cenários fictícios, a partir dos quais serão avaliados alguns aspectos do programa desenvolvido. Com um modelo base garante-se uma isonomia no comparativo de alguns dos parâmetros que regem o problema do repasse.

Figura 5.1 – Esquema geométrico do poço logo após a passagem da broca.



Fonte – Autor (2019)

Gravina (1997) realizou um comparativo, por meio de solução analítica, entre os deslocamentos de uma placa infinita e uma placa finita, ambas com um furo no centro, submetidas a pressões interna e externa e um estado plano de deformação. Nesse comparativo, foi constatado que ao considerar um diâmetro externo 50 vezes o diâmetro interno o erro era inferior a 0,5%. Nesse sentido, os cenários fictícios gerados nessa seção adotam um raio externo correspondente a 50 vezes o raio interno.

Ainda sobre o raio externo, a condição de contorno aplicada ao mesmo é que o nó associado tem o seu deslocamento radial impedido, logo, é nulo. Outra característica, relacionado as condições de contorno, é que a deformação vertical também é impedida para todos os nós da malha.

O comprimento do elemento uniforme está relacionado com a distância entre o raio inicial e o raio limite, de modo que, nessa seção, essa distância seja de 25 vezes o comprimento do elemento uniforme. Assim, o número de elementos uniformes corresponde ao dobro do mínimo necessário para que o acionamento do repasse não desative elementos não uniformes em cada cenário, pois a presença dos elementos uniformes tem como objetivo a minimização do "gap".

Naturalmente, sabe-se que quanto mais elementos na malha, maior o tempo de simulação, nesse sentido, o fato dos elementos uniformes serem pequenos pode levar a inserção de uma grande quantidade dos mesmos. Devido ao volume de informação associada a malha, o tempo computacional é prejudicado. Por isso, só é interessante adotar os elementos uniformes se for simular o repasse.

Nessa mesma linha, o número de camadas simuladas também influencia diretamente o tempo computacional, visto que a quantidade de informação é multiplicada pelo número de camadas presentes no modelo. Portanto, quanto mais camadas unidimensionais axissimétricas no modelo simulado, maior será o tempo computacional.

Pelo fato dos elementos de comprimento uniforme serem posicionados no início da malha, na região de maior deslocamento, faz com que alguns desses elementos estejam na posição de primeiro elemento ativo, o que os leva a participar do cálculo do incremento de tempo adaptativo, segundo a Equação (4.40), e contribuem para que o incremento de tempo seja menor.

Outra propriedade relevante para o desempenho é o fator que multiplica o incremento de tempo, visto que o seu papel é impedir que o incremento de tempo seja muito grande e provoque instabilidades na simulação. A escolha desse fator está intimamente ligada ao conteúdo litológico do modelo, pois as rochas que se deslocam mais geram incrementos de tempo menores, segundo a estratégia implementada.

De uma forma geral, as propriedades físicas do modelo interferem nos desempenho da estratégia de incremento de tempo adaptativa via deslocamento radial. Se o conjunto de propriedades favorecer ao deslocamento radial, os incrementos de tempo serão menores para garantir a estabilidade. Da mesma forma, se o conjunto de propriedades desfavorecer ao deslocamento radial, os incrementos de tempo gerados serão maiores.

Para cada cenários dessa primeira seção é considerado apenas uma camada unidimensional, cuja rocha salina escolhida é a halita. Devido a essas escolhas, é adotado um valor de 0,35 para o fator do incremento de tempo adaptativo, pois a halita corresponde a um evaporito que apresenta baixa mobilidade.

Na primeira parte da análise paramétrica são avaliados os parâmetros físicos que afetam diretamente o comportamento viscoelástico da rocha salina halita (como temperatura, profundidade, peso do fluido de perfuração e tensão geostática original), de modo que seja possível verificar as influências de determinados parâmetros quanto ao acionamento do repasse. Em seguida, é feita uma avaliação do tamanho do "gap" de acordo com o comprimento dos elementos uniformes.

Os resultados gerados consistem basicamente na avaliação do histórico do raio do poço ao longo do tempo, em que os repasses são representados pelas descontinuidades das curvas ao atingir o raio limite. Esses cenários possuem parâmetros fixos e são descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades comuns a todos os cenários com uma camada unidimensional.

Parâmetros	
Peso específico da água (kN/m <sup>3</sup> )	10
Peso específico do soterramento (kN/m <sup>3</sup> )	22,56
Peso específico do sal (kN/m <sup>3</sup> )	21,7
Gradiente térmico de soterramento (K/m)	0,03
Gradiente térmico do sal (K/m)	0,01
Módulo de elasticidade (GPa)	20,4
Coefficiente de Poisson	0,36
Taxa de deformação viscosa de referência ( $h^{-1}$ )	$1,808 \cdot 10^{-6}$
Temperatura de referência (K)	359,15
Tensão efetiva de referência (kPa)	9910
Razão entre energia de ativação e constante universal dos gases (K)	6042,9
Expoente das tensões	3,23 e 7,55
Raio externo (m)	9,366
Raio interno (m)	0,187
Raio limite (m)	0,184
Número de elementos não uniformes	50
Ordem de integração	2
Razão da PG	1,22
Fator do incremento de tempo adaptativo	0,35
Tempo da simulação (h)	480

### 5.1.1 Influência das Propriedades Físicas

Diversos parâmetros influenciam de forma significativa no fenômeno de fluência, portanto a análise dessas propriedades se torna necessária para avaliar como elas influenciam na demanda da execução do repasse. Como as análises são das propriedades físicas, as propriedades da malha, mostradas na Tabela 5.2, são mantidas constantes para que não distorçam os resultados de cenários diferentes.

Tabela 5.2 – Parâmetros fixos da malha para avaliação das propriedades físicas.

Parâmetros	
Comprimento uniforme (mm)	0,127
Número de elementos uniformes	150

Em relação ao número de elementos uniformes, adota-se a proporção de 50 elementos uniformes para cada repasse, conforme já foi mencionado anteriormente, portanto, nos cenários que avaliam as propriedades físicas foram adotados 150 elementos de comprimento uniforme pois esses cenários apresentam no máximo 3 repasses.

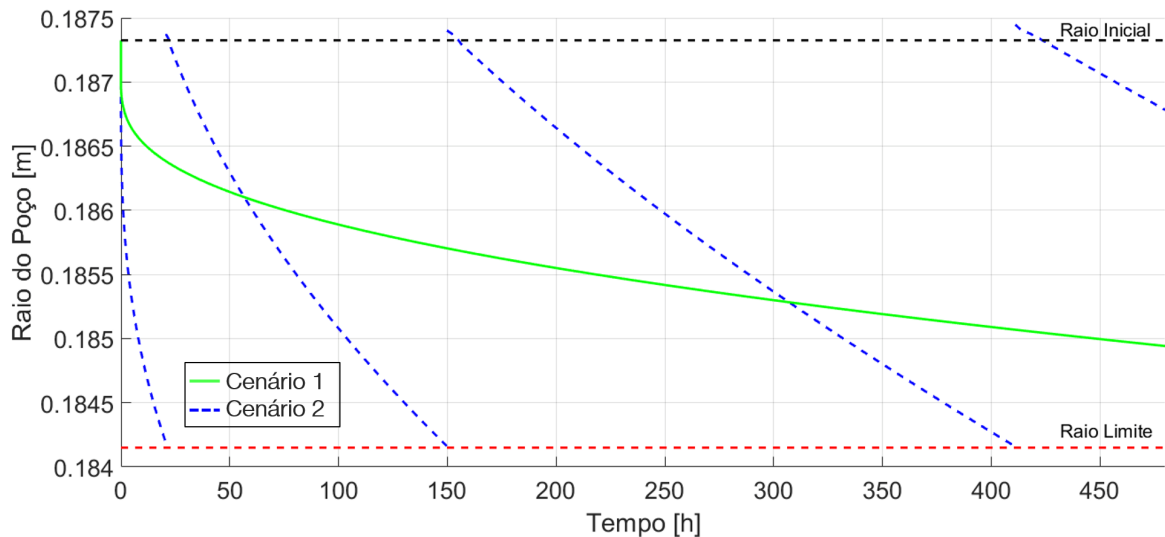
Como já mostrado anteriormente na Equação (4.3), a tensão geostática original também é dependente das espessuras do soterramento, do sal e da lâmina de água. Dada a importância desses parâmetros para o comportamento viscoelástico do sal, os mesmos serão explorados nos

dois primeiros cenários, os quais apresentam os dados mostrados na Tabela 5.3. O comparativo entre os dois cenários é exibido na Figura 5.2.

Tabela 5.3 – Parâmetros dos cenários fictícios 1 e 2.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2
Lâmina de água (m)	2032	1852
Espessura do soterramento (m)	1863	2183
Espessura do sal (m)	471	2202
Temperatura inicial (K)	337,75	353,65
Tensão geostática original (kPa)	72570	91660
Peso específico do fluido (kN/m <sup>3</sup> )	10,23	

Figura 5.2 – Histórico do raio do poço com repasse para os cenários 1 e 2.



Fonte – Autor (2019)

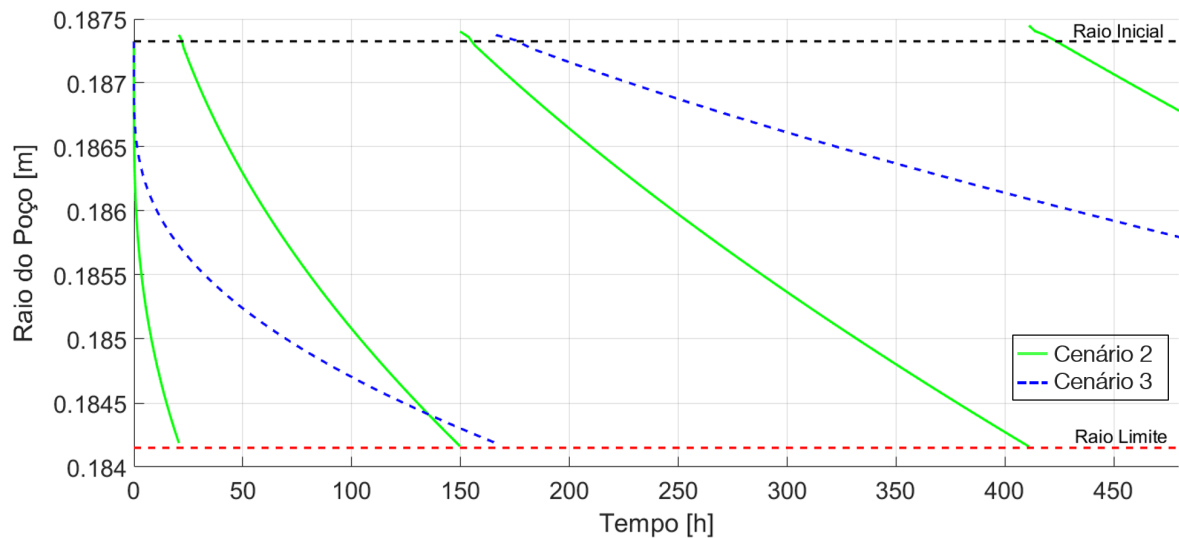
Nota-se que no primeiro cenário não há necessidade do repasse, já no segundo são necessários três repasses para acondicionamento do poço, visto que neste cenário a espessura do soterramento e do sal são maiores e, conseqüentemente, a temperatura e a tensão geostática original também são maiores. Um aspecto que vale a pena destacar é o fato de que o acionamento do repasse é feito com um tempo cada vez maior, isso por que com o passar do tempo o sal se acomoda devido ao alívio do estado de tensões ao longo da simulação, ou seja, existe uma relaxação das tensões desviadoras na camada salina.

Para conter o avanço da formação salina, o fluido de perfuração atua como uma contrapressão, portanto, é um parâmetro importante para determinar a necessidade ou não do repasse. Como já mencionado anteriormente, no programa desenvolvido a pressão exercida pelo fluido depende apenas do seu peso específico e da profundidade onde é realizada a análise, como mostra a Equação (4.1). Dessa forma, a Tabela 5.4 exibe os dados utilizados nos cenários 2 e 3, e a Figura 5.3 a influência do fluido de perfuração sobre a demanda de repasses.

Tabela 5.4 – Parâmetros dos cenários fictícios 2 e 3.

Parâmetro	Cenário 2	Cenário 3
Lâmina de água (m)	1852	
Espessura do soterramento (m)	2183	
Espessura do sal (m)	2202	
Temperatura inicial (K)	353,65	
Tensão geostática original (kPa)	91660	
Peso específico do fluido (kN/m <sup>3</sup> )	10,23	11,75

Figura 5.3 – Histórico do raio do poço com repasse para os cenários 2 e 3.



Fonte – Autor (2019)

Como esperado, quanto maior for o peso do fluido de perfuração, maior será a contrapressão exercida sobre a parede da formação salina e, conseqüentemente, o deslocamento do sal será menor. Na Figura 5.3 fica evidenciado que é necessário um menor número de repasses para o cenário com um peso específico do fluido de perfuração maior, visto que a profundidade de análise foi a mesma para ambos os cenários.

### 5.1.2 Influência do comprimento do elemento uniforme sobre o gap

Observada a influência de alguns dos parâmetros físicos sobre o comportamento do evaporito, nesta seção avaliam-se os efeitos do comprimento dos elementos uniformes sobre o surgimento do *gap*. Para fazer esta avaliação, os parâmetros físicos são fixados com base nas propriedades físicas do cenário 3, conforme é mostrado na Tabela 5.5.

Assim como já mencionado quando foi tratada a geração da malha, a estratégia de adotar elementos de tamanho uniforme, na região próxima a borda do poço, tem como objetivo diminuir o *gap* entre o primeiro nó ativo e o raio inicial. O tamanho dos elementos uniformes e a sua quantidade estão diretamente ligados ao tamanho do *gap* logo após o repasse.

O maior *gap* possível ocorre quando um dos elementos desativados tem o raio inicial ultrapassado pelo seu primeiro nó em uma escala infinitesimal, assim, praticamente todo o compri-

Tabela 5.5 – Parâmetros físicos fixos.

Parâmetro	
Lâmina de água (m)	1852
Espessura do soterramento (m)	2183
Espessura do sal (m)	2202
Temperatura inicial (K)	353,65
Tensão geostática original (kPa)	91660
Peso específico do fluido (kN/m <sup>3</sup> )	11,75

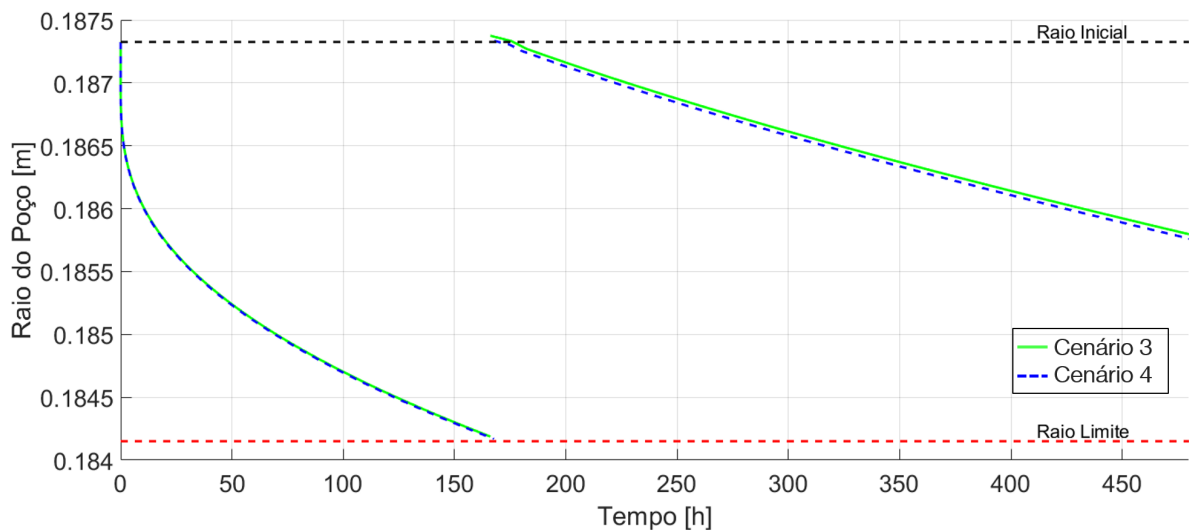
mento do elemento será removido do local após o raio inicial. Como o posicionamento dos nós depende exclusivamente do deslocamento do sal calculado, não há como controlar o valor *gap*.

Não menos importante, a quantidade de elementos uniformes é relevante por conta da quantidade de elementos que serão desativados nas operações de repasse, visto que se fossem removidos elementos do trecho não uniforme, aumentaria a chance de *gaps* maiores, no entanto, como já mencionado anteriormente, o número de elementos uniformes é o suficiente para garantir que os elementos não uniformes não sejam desativados pelo acionamento do repasse. O comparativo entre os cenários 3 e 4, com dados exibidos na Tabela 5.6, é mostrado na Figura 5.4.

Tabela 5.6 – Parâmetros dos cenários 3 e 4.

Parâmetros	Cenário 3	Cenário 4
Comprimento uniforme (mm)	0,127	0,095
Número de elementos uniformes	50	

Figura 5.4 – Histórico do raio do poço com repasse para os cenários 3 e 4.

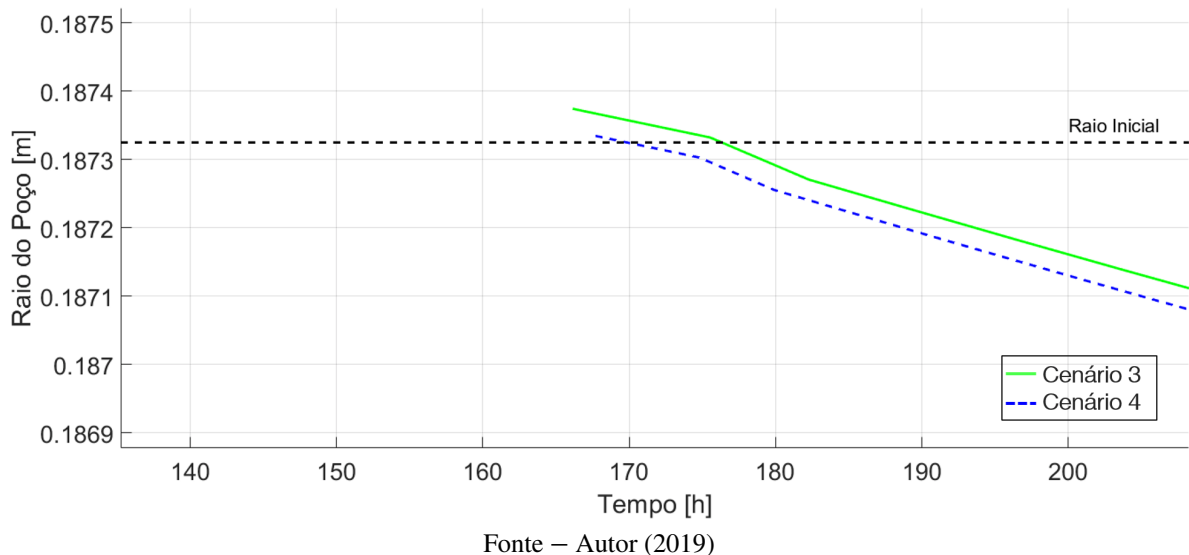


Fonte – Autor (2019)

Nesse comparativo o tamanho do elemento uniforme no cenário 6 é diminuído em 25% em relação ao cenário 5, o que reduz o risco de surgir um *gap* grande. Ao aproximar da região

em que o raio do poço é recondicionado ao tamanho inicial, como mostra a Figura 5.5, nota-se que a curva do cenário 6 está mais próxima, em relação à linha do raio inicial, que a do cenário 5. Em números, o *gap* produzido pelo cenário 3 é de 1,54% do tamanho do raio limite, já no cenário 4 o *gap* é de 0,29%.

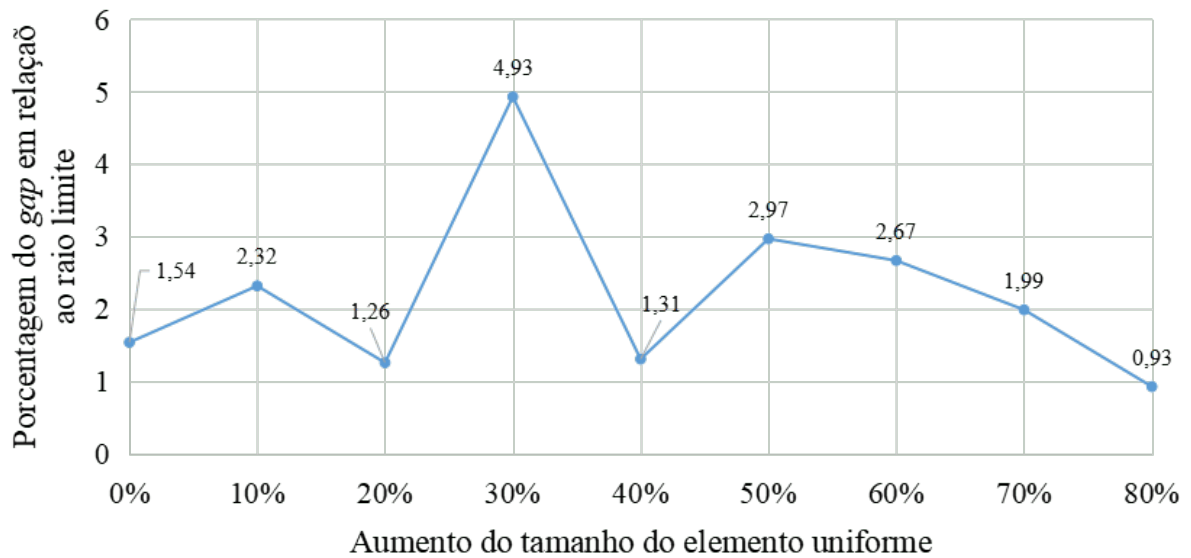
Figura 5.5 – Evidência do *gap* no comparativo entre os cenários 3 e 4.



Embora o risco de se obter um *gap* grande seja maior quando se tem elementos maiores, essa ocorrência não é garantida, pois não depende apenas do tamanho, mas também do posicionamento dos nós do elemento quando o repasse é feito. Para ilustrar esse fato, na Figura 5.6 são mostrados valores de *gaps* em porcentagem para o primeiro repasse, os quais são definidos a partir do tamanho do raio limite, para o qual considera o aumento percentual do tamanho dos elementos uniformes em relação ao comprimento utilizado no cenário 3 de 0,127 mm, os quais não apresentam, necessariamente, um crescimento à medida que o tamanho do elemento uniforme aumenta.



Figura 5.6 – Gaps em função do tamanho do elemento uniforme.



Fonte – Autor (2019)

## 5.2 Comportamento Viscoelástico com uso da Estratégia de Multicamadas

As zonas com a presença de rochas salinas podem apresentar uma grande diversificação de materiais, visto que a presença de intercalações de diferentes tipos de evaporitos dentro de outro predominante é bastante comum. As propriedades distintas entre esses evaporitos são determinantes no problema de fechamento de poços, pois cada material reage de forma diferente diante das condições em que são expostos. Dessa forma, levar em consideração as interações entre esses materiais promove uma análise mais autêntica do problema em questão.

A metodologia aplicada para representar as interações entre materiais diferentes consiste no acoplamento de camadas unidimensionais axissimétricas, que, além de considerar a interação, permite uma maior abrangência na análise e promove resultados mais representativos. Adicionalmente, o uso de malhas unidimensionais permite se trabalhar com um grau de complexidade menor.

Assim como na seção anterior, são gerados cenários fictícios, baseados nos modelos apresentados por Gonçalves (2011), para verificar o comportamento das camadas unidimensionais acopladas. É válido destacar que durante a criação dos cenários, foi constatado que a formulação proposta possui algumas particularidades quanto ao dimensionamento da malha.

Tanto o raio como o comprimento do elemento fazem parte do cálculo da força de interação e do cálculo do incremento de tempo adaptativo. Dessa forma, é preciso ter um cuidado quanto ao dimensionamento da malha, pois elementos pequenos distribuídos num raio externo grande são fatores que contribuem para o aumento da força de interação e, conseqüentemente, impulsiona os deslocamentos e favorece ainda mais o aumento da força de interação.

Nesses cenários são exploradas zonas que apresentam homogeneidade e heterogeneidade em termos de materiais. Além dos tipos de rochas salinas descritos na Tabela 5.7 obtidos

a partir de Borges (2008) e Costa e Poiate Júnior (2008), é abordado o número de camadas unidimensionais acopladas na análise.

Tabela 5.7 – Propriedades elásticas e viscosas dos evaporitos.

Propriedade	Halita	Carnalita	Taquidrita
Módulo de elasticidade (N/m <sup>2</sup> )	20,4.10 <sup>9</sup>	4,02.10 <sup>9</sup>	4,92.10 <sup>9</sup>
Coefficiente de Poisson	0,36	0,36	0,33
Tensão de referência (N/m <sup>2</sup> )	9,76.10 <sup>6</sup>	5,74.10 <sup>6</sup>	7,86.10 <sup>6</sup>
Taxa de deformação de referência (1/h)	1,67.10 <sup>-6</sup>	1,58.10 <sup>-4</sup>	1,84.10 <sup>-4</sup>
Temperatura de referência (K)	359,15	403,15	359,15
Expoente $n_1$	3,22	2,87	2,61
Expoente $n_2$	7,56	7,09	7,79

Para verificar o desempenho da implementação proposta, faz-se o comparativo da modelagem do problema de fechamento de poços em termos de deslocamento radial entre a estratégia multicamadas, com e sem a consideração da interação viscoelástica, e uma modelagem desenvolvida no *software* comercial Abaqus. Além disso, são exibidos gráficos com os erros relativos dos casos com e sem interação da ferramenta proposta e a modelagem feita no Abaqus no instante final da simulação.

A modelagem elaborada no Abaqus é feita com uma malha bidimensional que possui características equivalentes ao que foi implementado na ferramenta proposta, como dimensões e refino da malha. Dessa forma, a interação entre regiões de cotas diferentes ocorre via malha de elementos finitos. Para que seja feito o comparativo, coletam-se os dados de histórico de deslocamento radial da mesma cota em que as camadas unidimensionais foram simuladas.

Para realizar o comparativo são adotadas as mesmas condições e propriedades para ambas as ferramentas, além disso, a Tabela 5.8 exibe algumas propriedades fixadas para que o comparativo seja focado na relação entre os materiais e o número de camadas unidimensionais presentes no modelo.

Vale ressaltar que nesse comparativo não são utilizados elementos de tamanhos uniforme, pois nessa seção não será avaliada a operação de repasse. O uso de elementos uniformes apenas aumentaria desnecessariamente o número de elementos da malha, além disso, poderia trazer mais dificuldades no dimensionamento adequado da malha. Portanto, somente os elementos de tamanho não uniforme são empregados.

### 5.2.1 Camadas Homogêneas

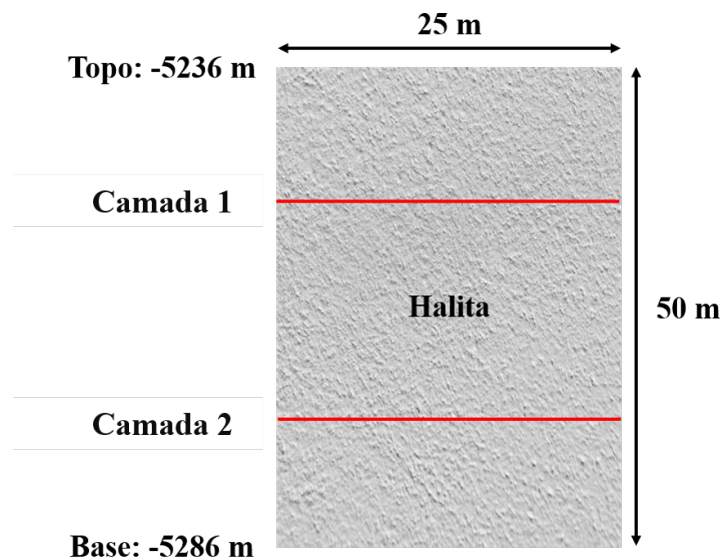
Apesar da ocorrência de intercalações em meio a espessas zonas de evaporitos, é possível encontrar maciços com apenas um tipo de material. Embora essas regiões homogêneas possuam propriedades mecânicas semelhantes, as condições em que se encontram provocam reações diferentes devido a propriedades como temperatura e tensão geostática, as quais estão relacionadas à cota da camada em análise.

Tabela 5.8 – Propriedades comuns a todos os cenários.

Propriedade	
Topo do evaporito (m)	-5236
Temperatura no topo do evaporito (K)	359,15
Tensão geostática no topo do evaporito (N/m <sup>2</sup> )	88,106.10 <sup>6</sup>
Peso do fluido de perfuração (kN/m <sup>2</sup> )	11,75
Raio interno (m)	0,187
Comprimento do primeiro elemento (m)	2,16.10 <sup>-2</sup>
Número de elementos por camada	80
Fator de incremento de tempo adaptativo	0,01
Tempo de simulação (h)	24

O primeiro cenário fictício apresenta em sua litologia apenas halita, além disso, são consideradas duas camadas unidimensionais axissimétricas para uma espessura de 50 m. Dessa forma, cada camada possui uma região de influência de 25 m e estão posicionadas ao centro dessa região, no entanto, as regiões das extremidades superior e inferior não sofrem influência por não apresentarem deslocamentos relativos com o material que está acima ou abaixo, pois os mesmos não são calculados. A Figura 5.7 apresenta um esquema ilustrativo do primeiro cenário com o posicionamento de cada camada.

Figura 5.7 – Esquema geométrico e litológico do cenário 1.



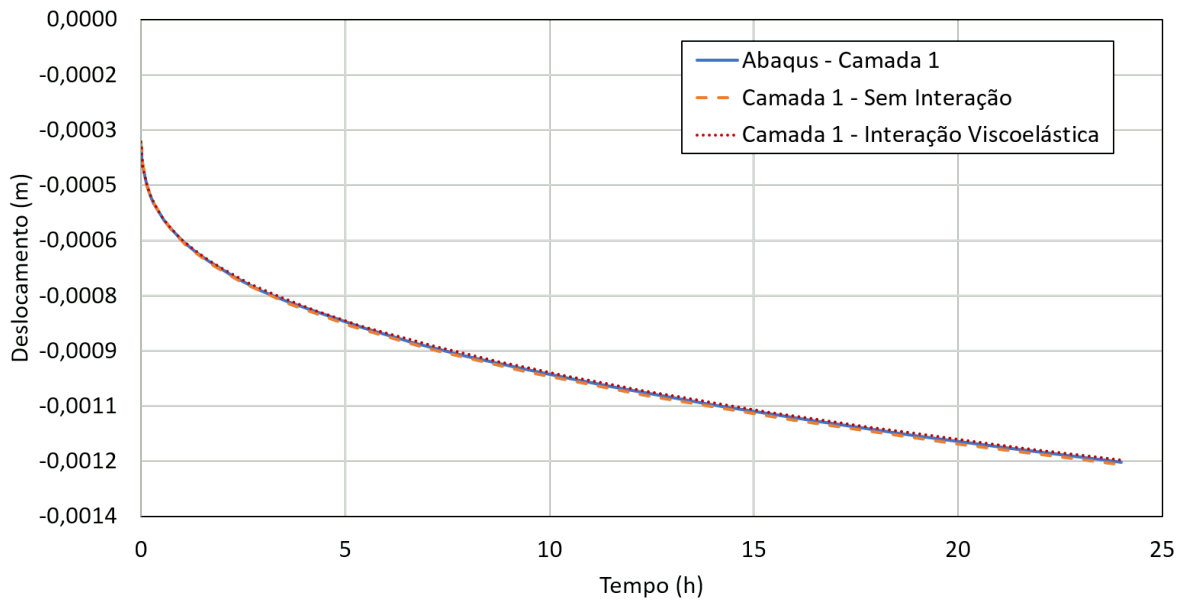
Fonte – Autor (2019)

A Tabela 5.9 exibe os valores de temperatura e tensão geostática para cada camada., já nas Figuras 5.8 e 5.9 são exibidos os históricos de deslocamento radial sofrido por cada camada em cada um dos meios calculados. Esse histórico de deslocamento radial é referente ao nó mais próximo da borda do poço.

Tabela 5.9 – Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 1.

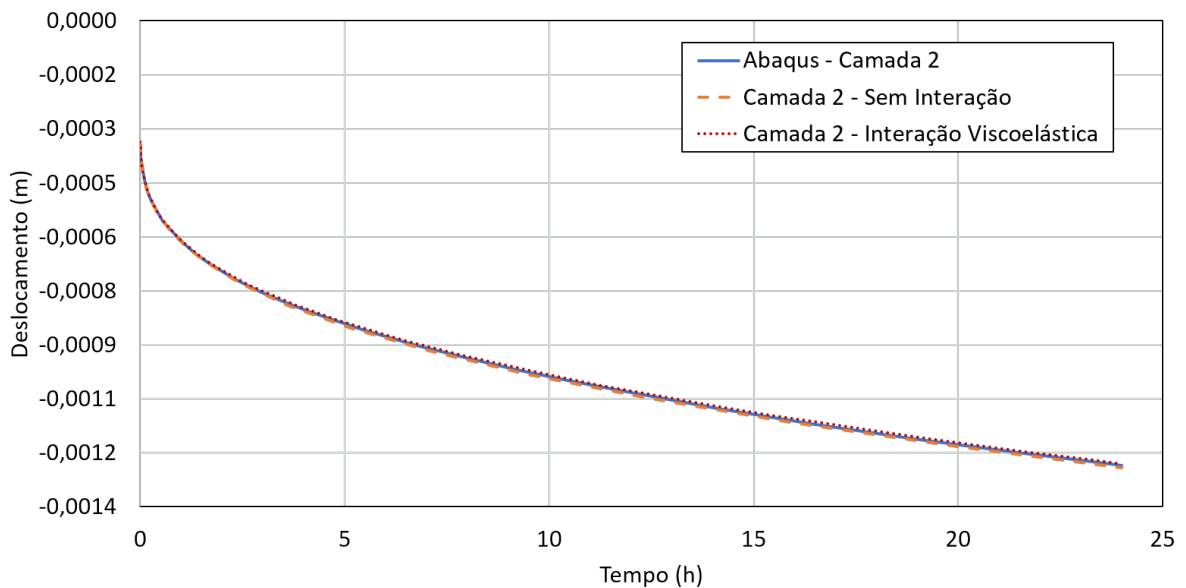
Camada	Cota (m)	Temperatura (K)	Tensão Geostática (N/m <sup>2</sup> )
1 - Halita	-5248,5	359,3	$8,84 \cdot 10^7$
2 - Halita	-5273,5	359,6	$8,89 \cdot 10^7$

Figura 5.8 – 1ª camada do cenário 1 composta por halita a -5248,5 m.



Fonte – Autor (2019)

Figura 5.9 – 2ª camada do cenário 1 composta por halita a -5273,5 m.

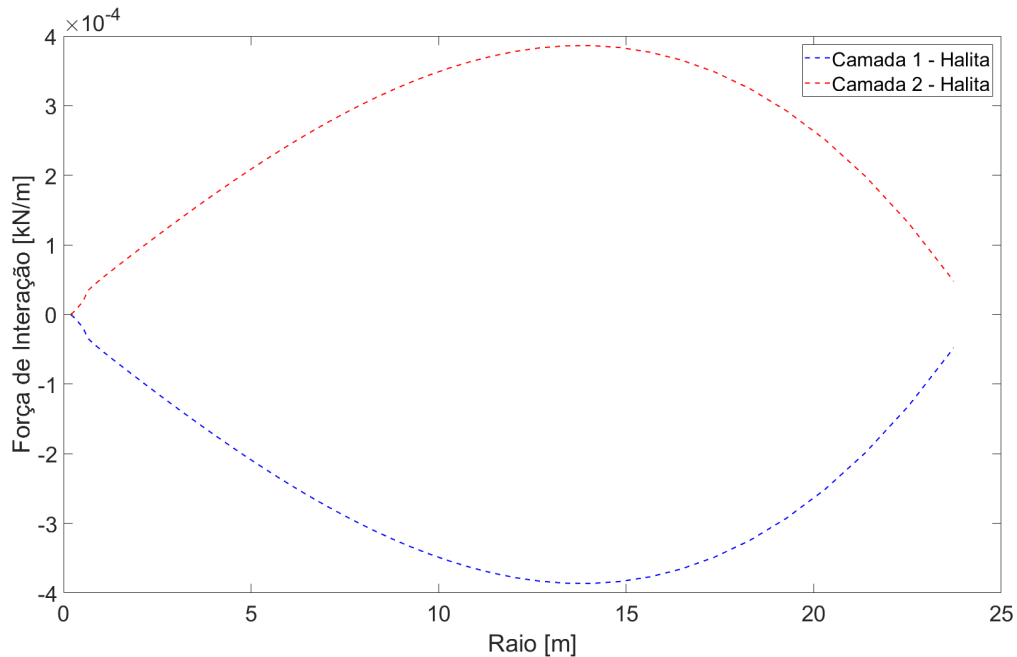


Fonte – Autor (2019)

Em ambas as camadas o histórico do deslocamento radial se comporta de forma semelhante tanto no Abaqus quanto na ferramenta proposta com ou sem interação viscoelástica. O fato de

se ter apenas um material ao longo da espessura do evaporito promove deslocamentos relativos menores, visto que os deslocamentos nodais de cada camada apresentam valores muito próximos, porém com um leve aumento a medida que se eleva a profundidade. A Figura 5.10 exibe as curvas da força de interação em cada camada.

Figura 5.10 – Força de interação das camadas do cenário 1.

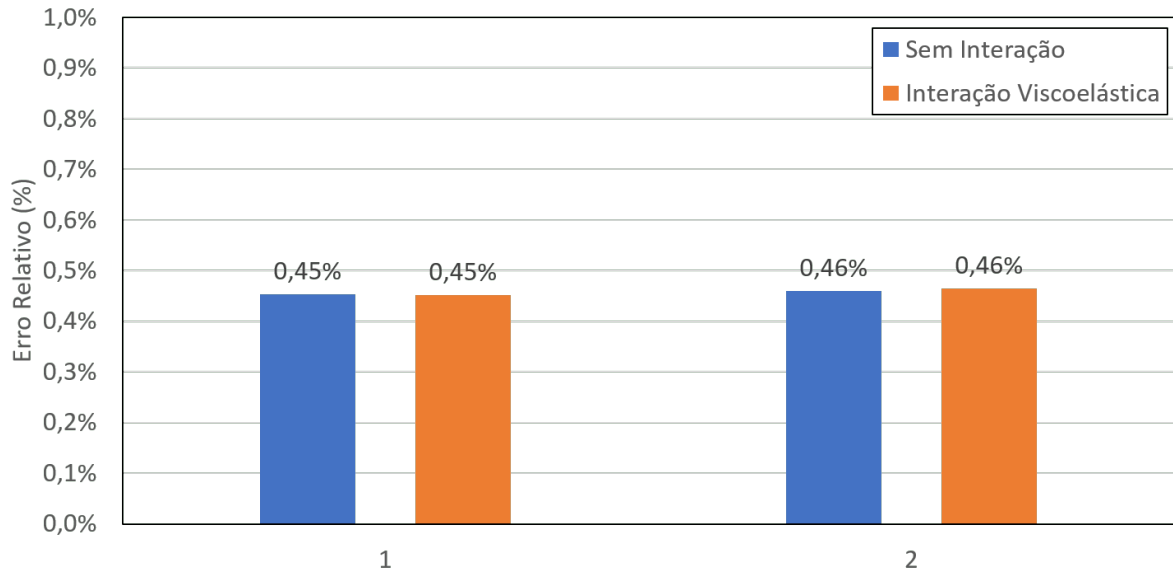


Fonte – Autor (2019)

As curvas mostram que a força de interação age em sentidos opostos em cada camada. Foi adotado que o sentido de fechamento do poço é negativo, dessa forma, na primeira camada a força de interação estimula o deslocamento radial, já na segunda a força de interação amortece o deslocamento radial.

A Figura 5.11 exibe o erro percentual das curvas com e sem interação em relação à curva do Abaqus no final da simulação de cada camada unidimensional, a fim de evidenciar, em termos de valor percentual, o comportamento semelhante das curvas observado nas Figuras 5.8 e 5.9.

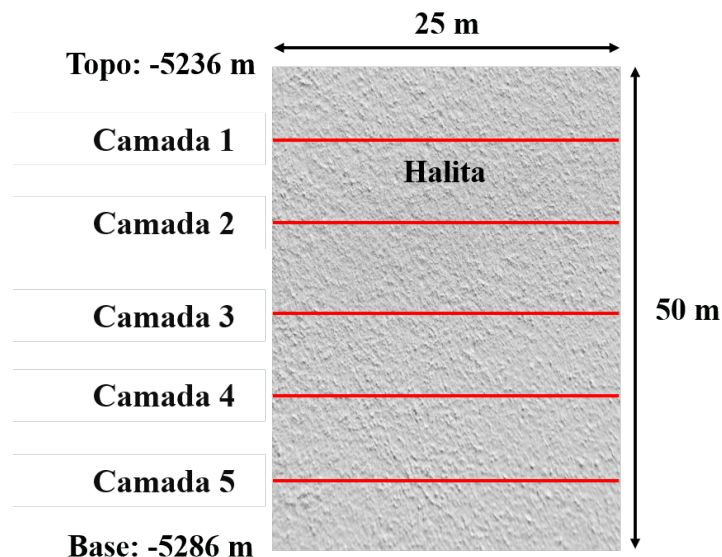
Figura 5.11 – Erro relativo das camadas do cenário 1.



Fonte – Autor (2019)

O próximo cenário também tem a halita como único material presente, no entanto, para esse caso, são atribuídas 5 camadas unidimensionais axissimétricas, assim, as camadas unidimensionais passam a ter uma região de influência de 10 m. A Figura 5.12 mostra o esquema ilustrativo geométrico da litologia e o posicionamento das camadas unidimensionais.

Figura 5.12 – Esquema geométrico e litológico do cenário 2.



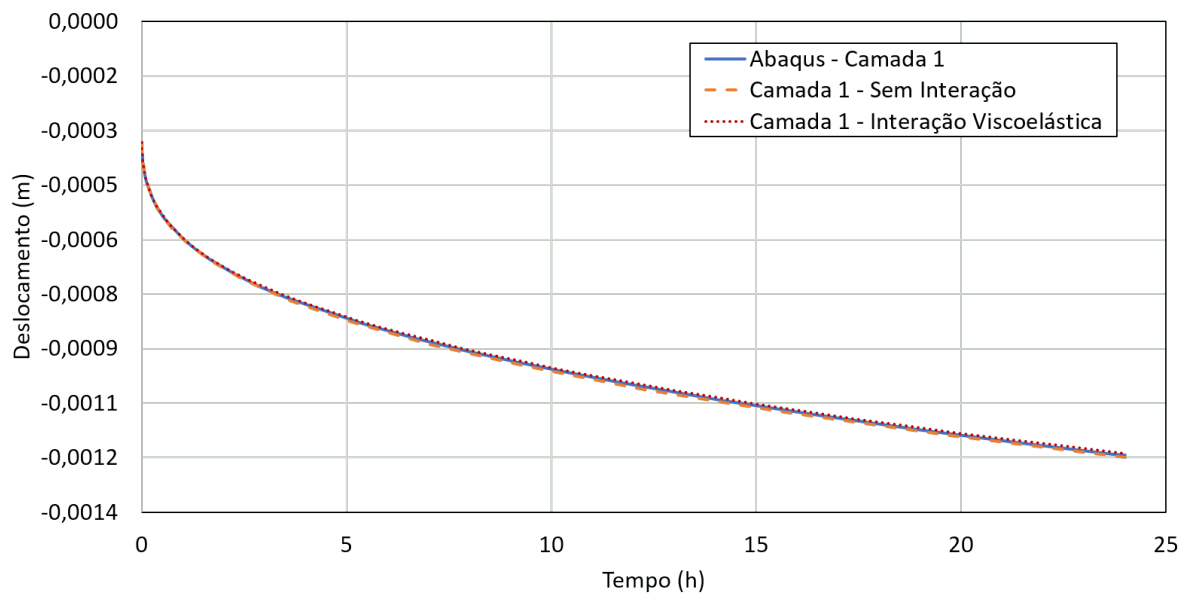
Fonte – Autor (2019)

A Tabela 5.10 informa as temperaturas e as tensões geostáticas de cada camada. As Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 exibem os deslocamentos radial de cada uma das 5 camadas analisadas.

Tabela 5.10 – Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 2.

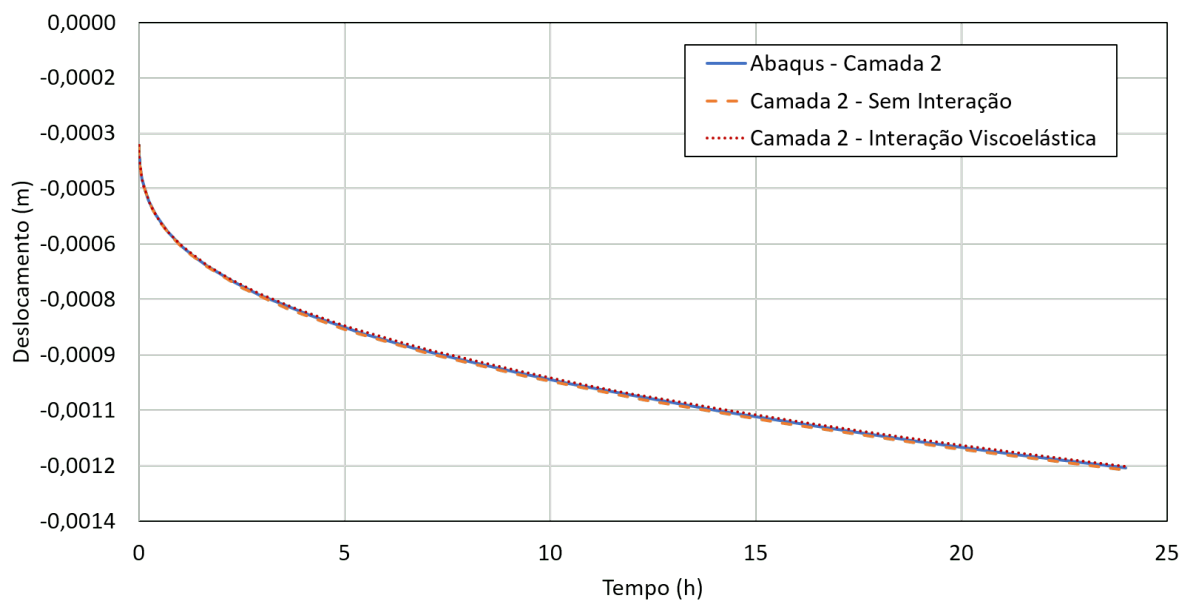
Camada	Cota (m)	Temperatura (K)	Tensão Geostática (N/m <sup>2</sup> )
1 - Halita	-5241	359,21	$8,82 \cdot 10^7$
2 - Halita	-5251	359,33	$8,84 \cdot 10^7$
3 - Halita	-5261	359,45	$8,86 \cdot 10^7$
4 - Halita	-5271	359,57	$8,88 \cdot 10^7$
5 - Halita	-5281	359,69	$8,90 \cdot 10^7$

Figura 5.13 – 1ª camada do cenário 2 composta por halita a -5241 m.



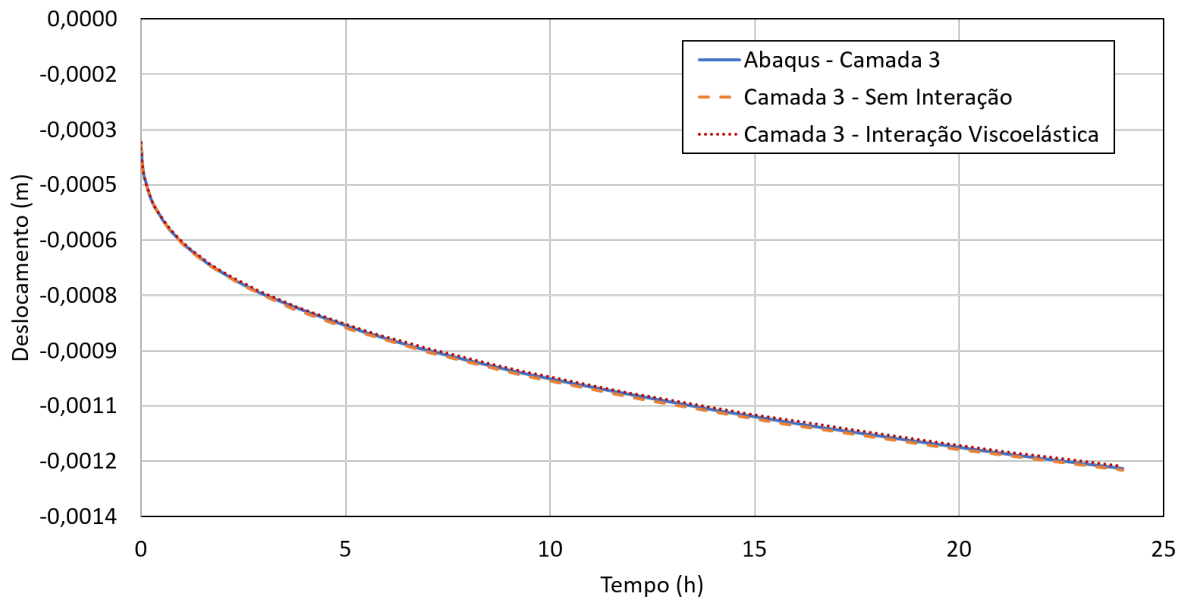
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.14 – 2ª camada do cenário 2 composta por halita a -5251 m.



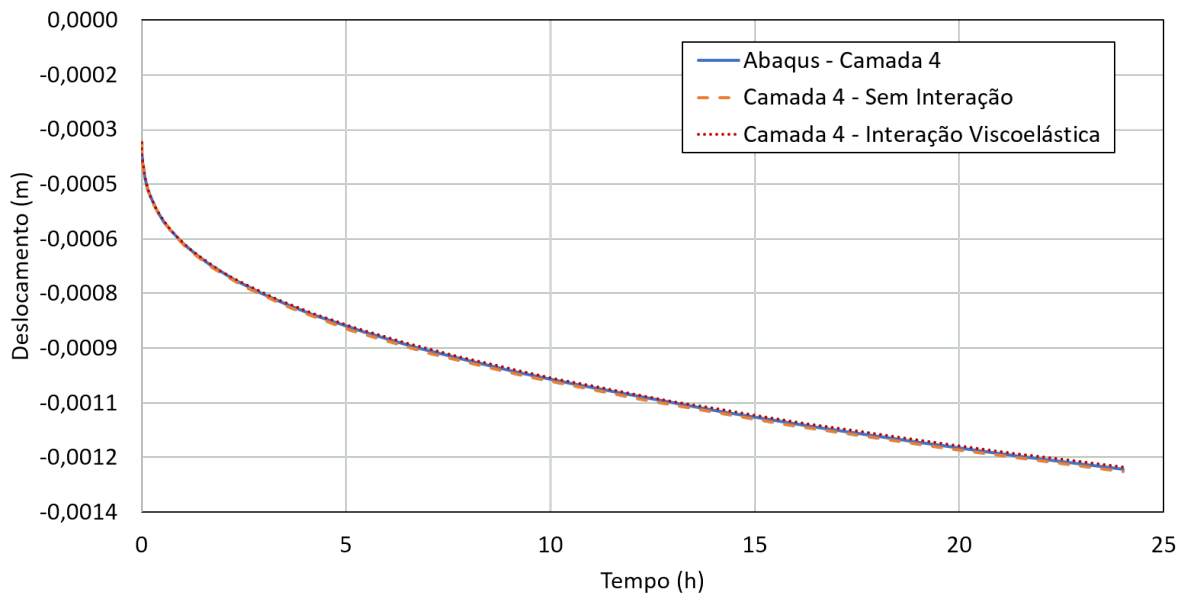
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.15 – 3ª camada do cenário 2 composta por halita a -5261 m.



Fonte – Autor (2019)

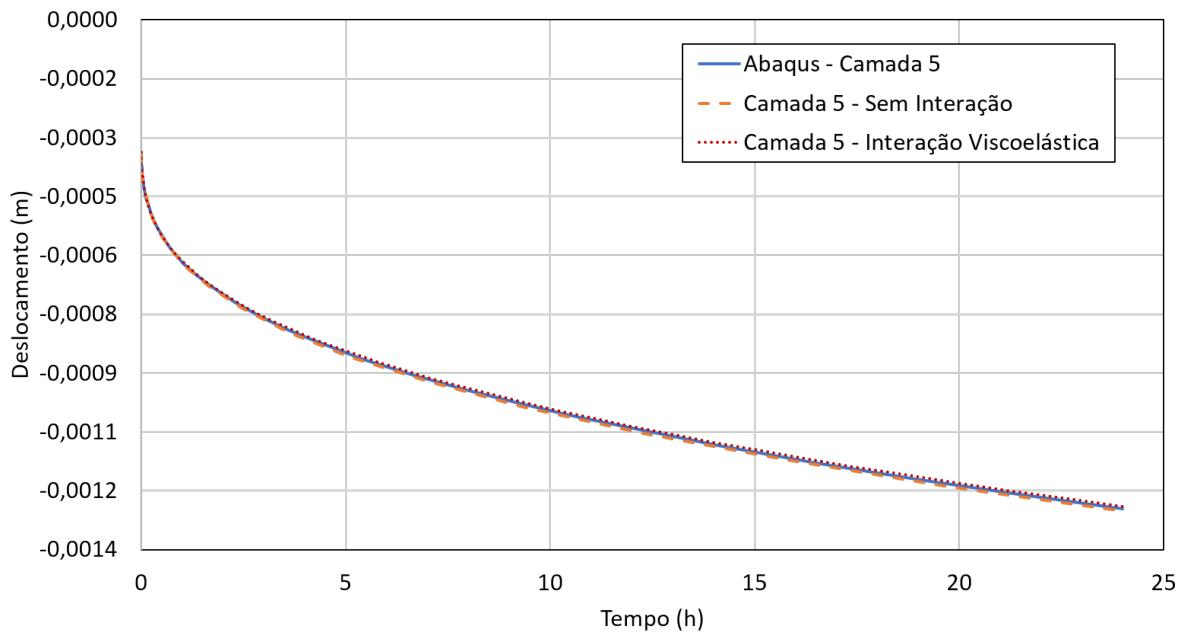
Figura 5.16 – 4ª camada do cenário 2 composta por halita a -5271 m.



Fonte – Autor (2019)



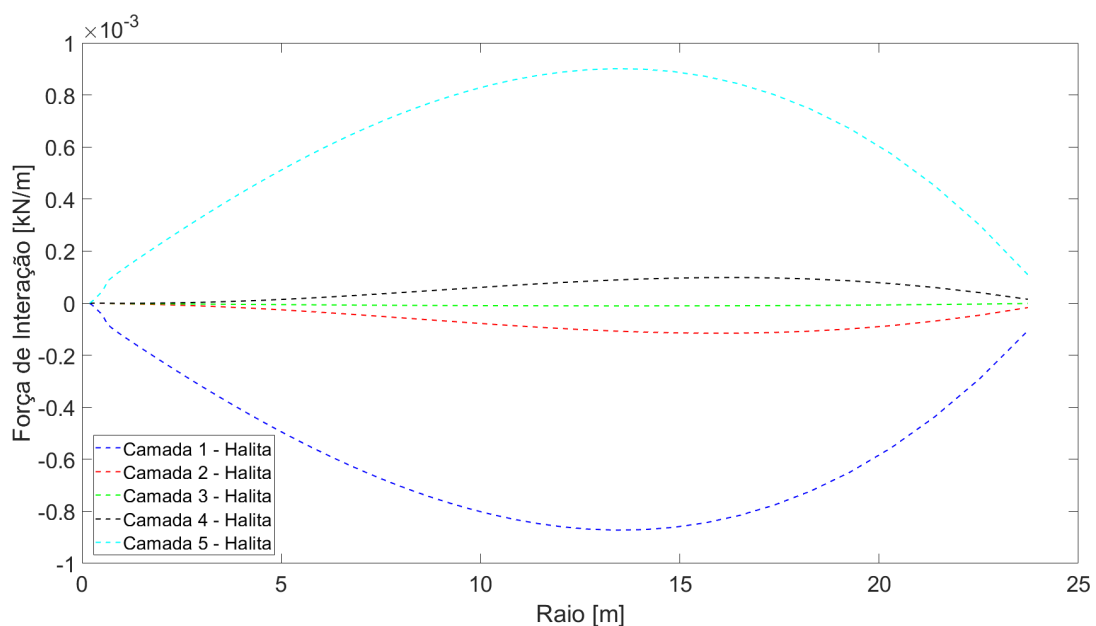
Figura 5.17 – 5ª camada do cenário 2 composta por halita a -5281 m.



Fonte – Autor (2019)

Assim como foi observado no cenário anterior, as curvas de deslocamento radial da ferramenta proposta apresentam um comportamento semelhante ao que é encontrado no Abaqus. A maior proximidade das camadas unidimensionais em relação ao caso anterior contribuiria para que a força de interação das camadas acopladas fosse maior em algumas camadas. No entanto, pelo fato de se ter apenas um material, os deslocamentos relativos continuam pequenos, assim a tensão de cisalhamento que dá origem a força de interação também é pequena. A Figura 5.18 exibe as curvas da força de interação das camadas.

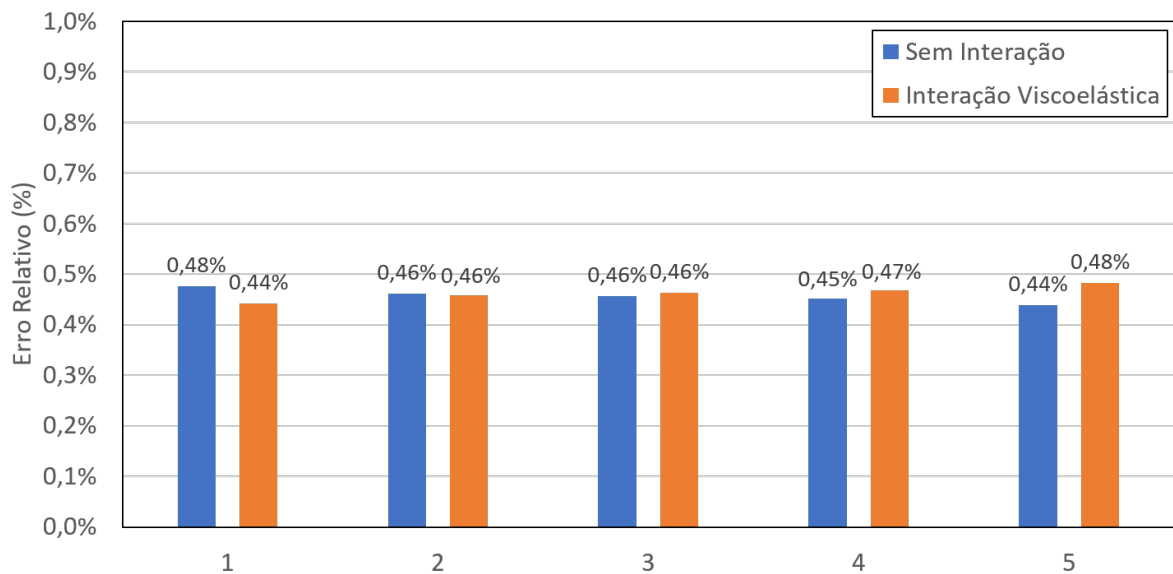
Figura 5.18 – Força de interação das camadas do cenário 2.



Fonte – Autor (2019)

As curvas mostram que as camadas mais centrais sofrem ações da força de interação nos dois sentidos, visto que a última camada se desloca mais e estimula o deslocamento radial das demais, enquanto que a primeira se desloca menos e amortece o deslocamento radial das demais. Esse fato fica mais evidente na camada 3, em que a força de interação é bem menos intensa que as demais. A Figura 5.19 mostra que o erro relativo é pequeno para todas as camadas desse cenário devido a interação fraca entre elas.

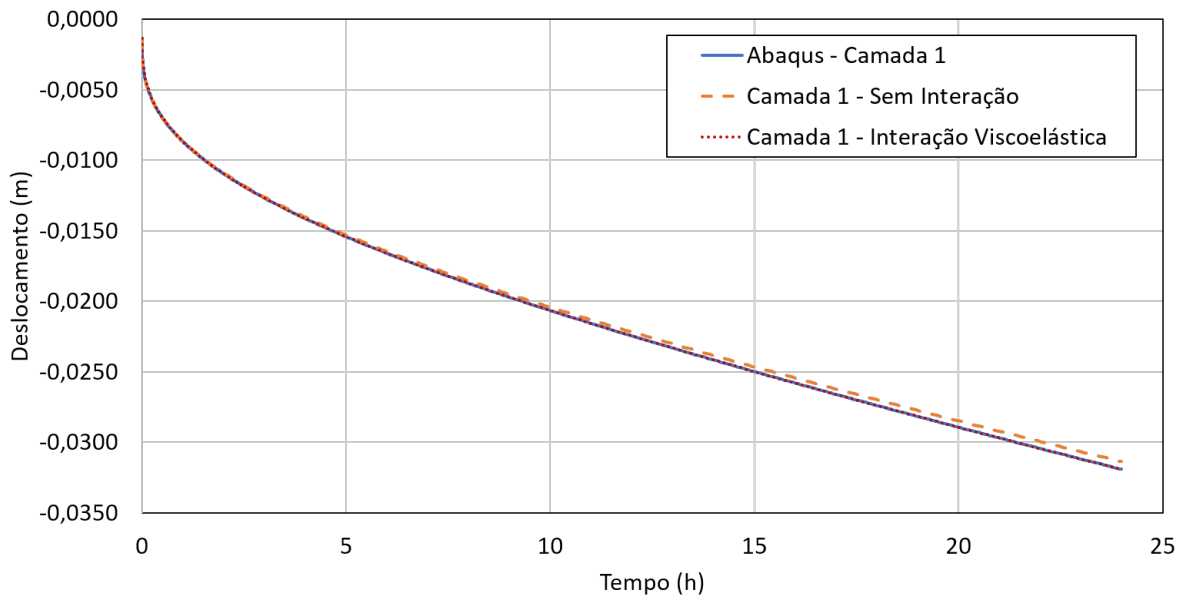
Figura 5.19 – Erro relativo das camadas do cenário 2.



Fonte – Autor (2019)

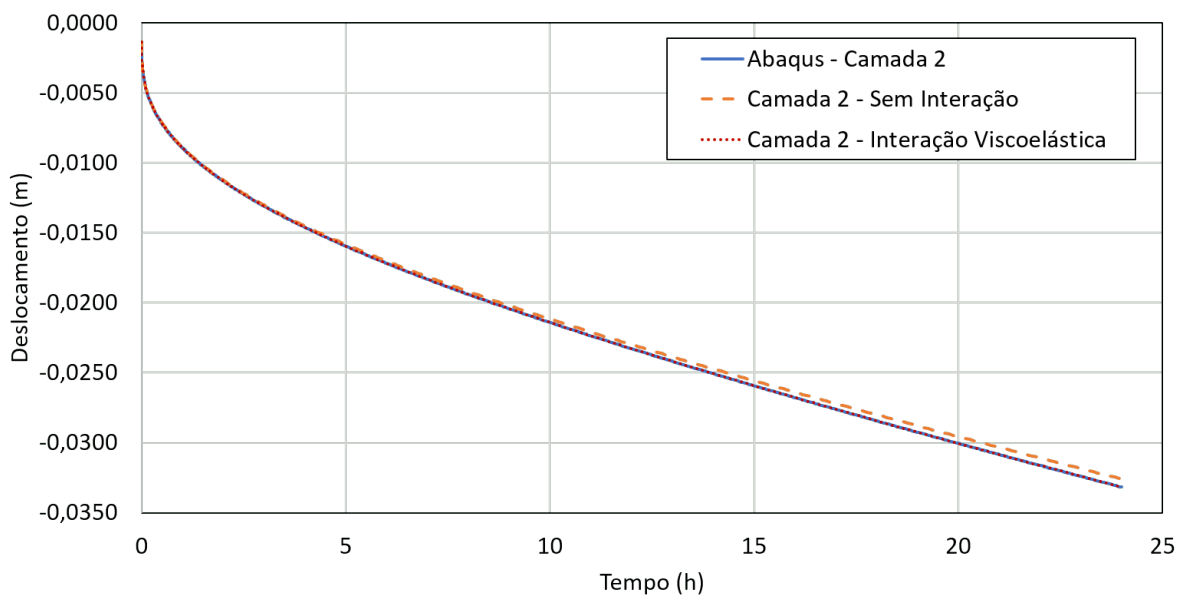
No terceiro cenário se faz a mudança de halita para taquidrita. Sabe-se que esse tipo de rocha salina apresenta uma mobilidade maior em relação a halita, dessa forma, são esperados deslocamentos maiores. Esse cenário apresenta a mesma configuração geométrica ilustrada na Figura 5.7 com 2 camadas e uma região de influência de 25 m cada uma, por isso, os dados de temperatura e tensão geostática são os mesmos da Tabela 5.9, apenas com a troca de material. Nas Figuras 5.20 e 5.21 são exibidos os resultados do deslocamento radial em cada uma das camadas unidimensionais.

Figura 5.20 – 1ª camada do cenário 3 composta por taquidrita a -5248,5 m.



Fonte – Autor (2019)

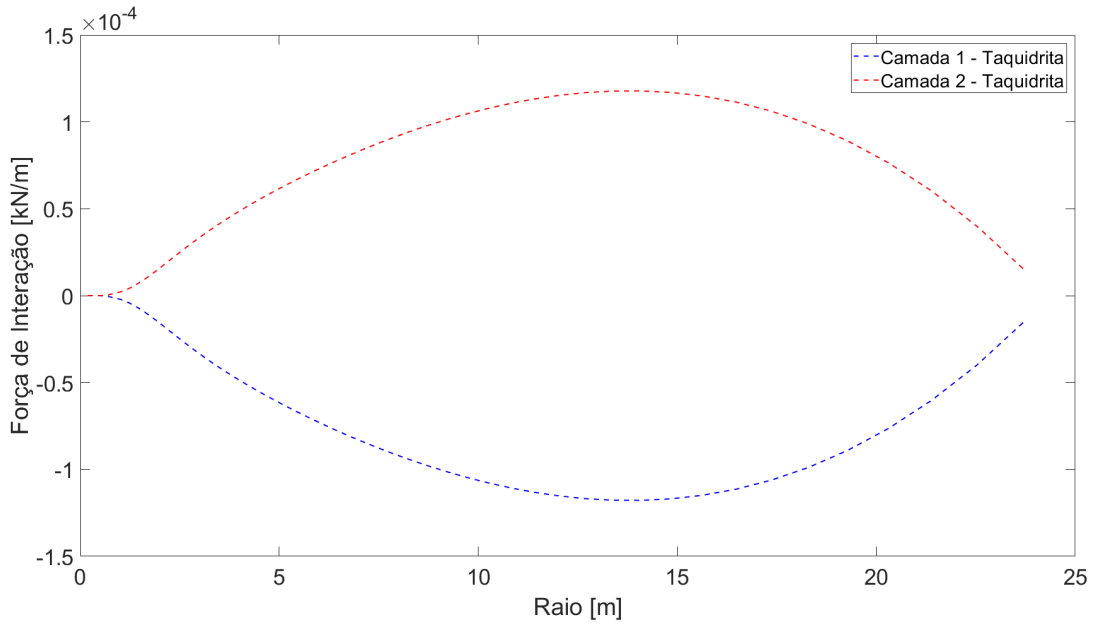
Figura 5.21 – 2ª camada do cenário 3 composta por taquidrita a -5273,5 m.



Fonte – Autor (2019)

Nesses casos percebe-se que, diferentemente do que ocorreu nos cenários com halita, a curva da ferramenta proposta sem interação já apresenta um leve afastamento nos instantes finais da simulação, isso ocorre pelo fato da taquidrita apresentar uma mobilidade maior que a halita. Pois, mesmo com a intensidade da força de interação menor que apresentada pela halita, conforme mostra a Figura 5.22, a curva que considera interação se afasta um pouco da curva que não tem interação.

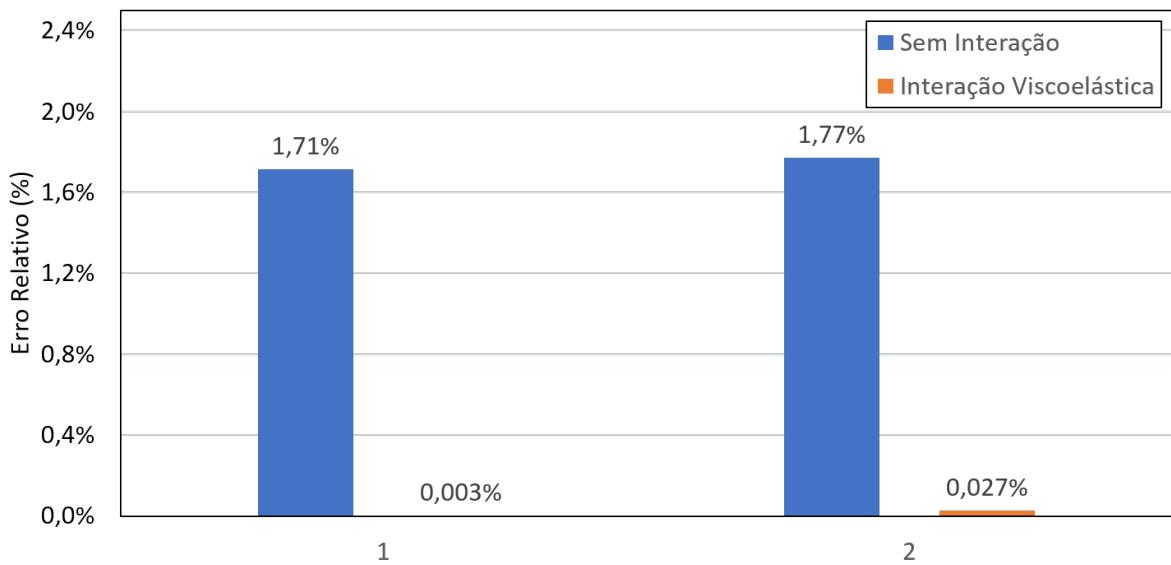
Figura 5.22 – Força de interação das camadas do cenário 3.



Fonte – Autor (2019)

A Figura 5.23 mostra o erro percentual das camadas do cenário 3 em relação ao resultado apresentado pela modelagem feita no Abaqus. O afastamento observado nas curvas de deslocamento radial se configura em um erro relativo maior para a curva que não considera interação, se comparado ao erro relativo da curva que considera a interação.

Figura 5.23 – Erro relativo das camadas do cenário 3.

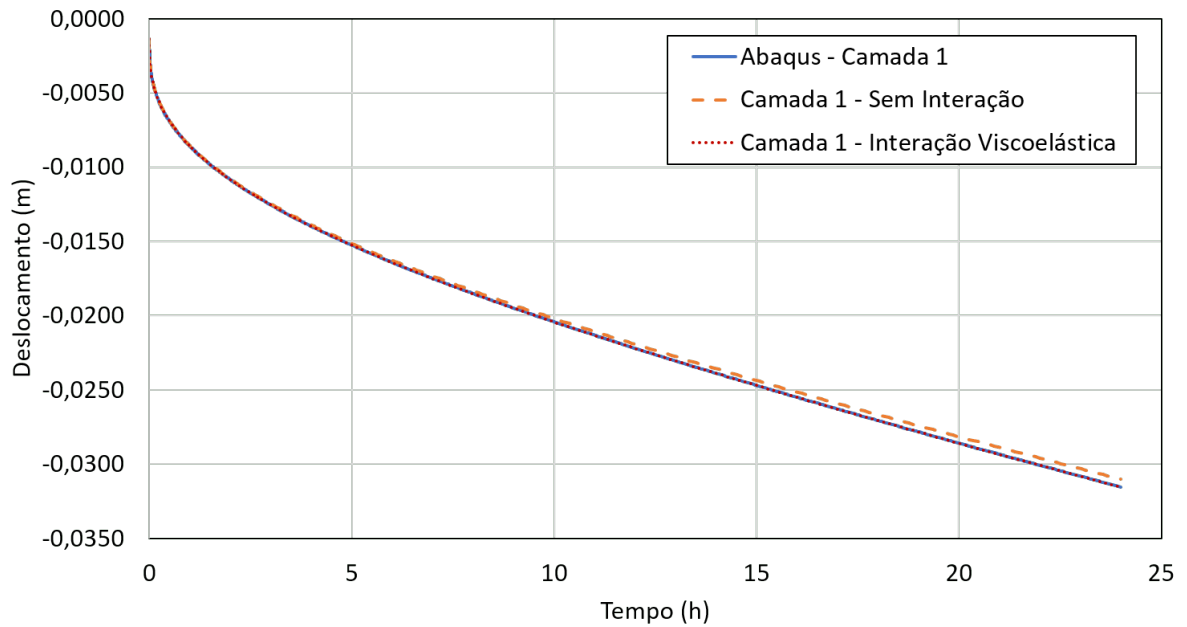


Fonte – Autor (2019)

No caso do cenário 4 o material também é a taquidrita e segue a mesma configuração geométrica apresentada na Figura 5.12, a qual conta com 5 camadas e uma região de influência de 10 m cada uma, dessa forma, os dados de temperatura e tensão geostática são os mesmos

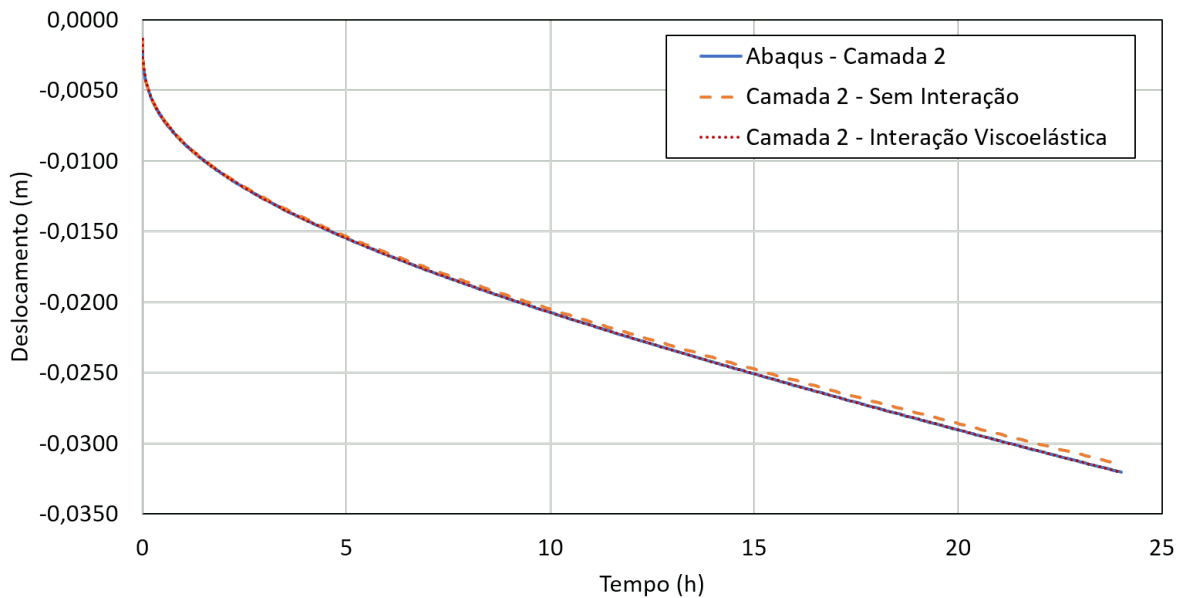
da Tabela 5.10. A seguir, nas Figuras 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28 são mostradas as curvas do histórico de deslocamento radial nas camadas do cenário 4.

Figura 5.24 – 1ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5241 m.



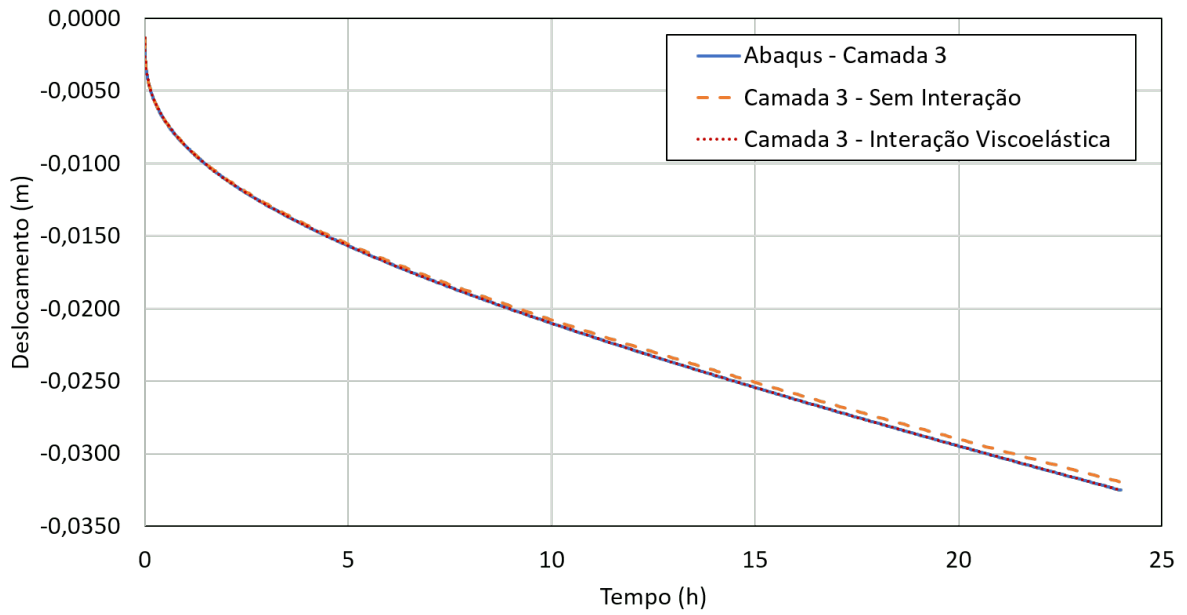
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.25 – 2ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5251 m.



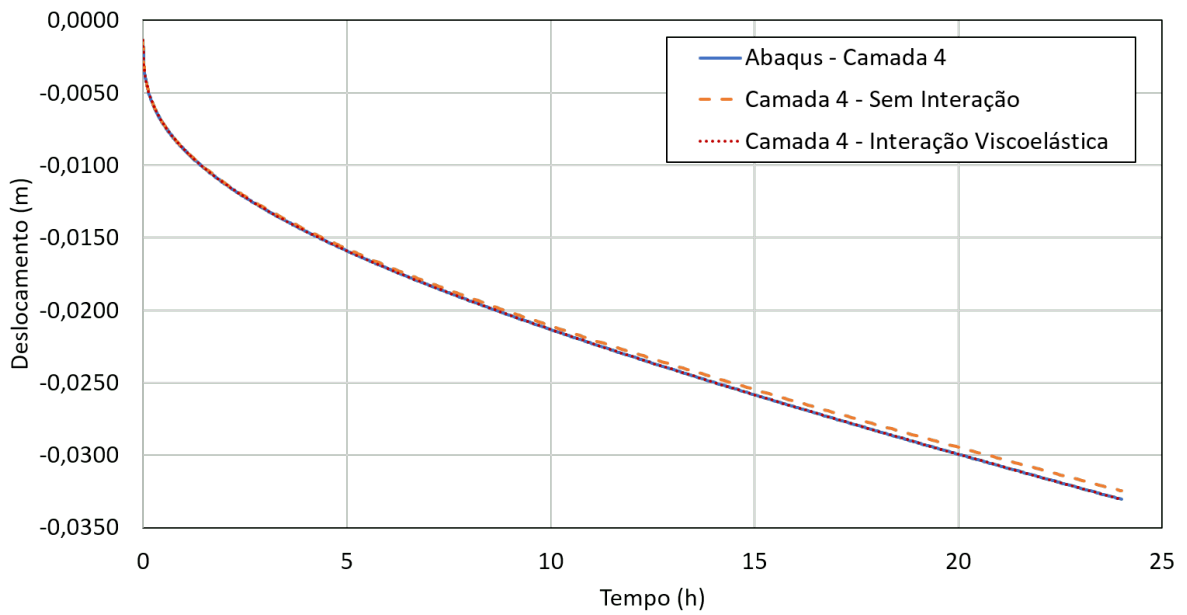
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.26 – 3ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5261 m.



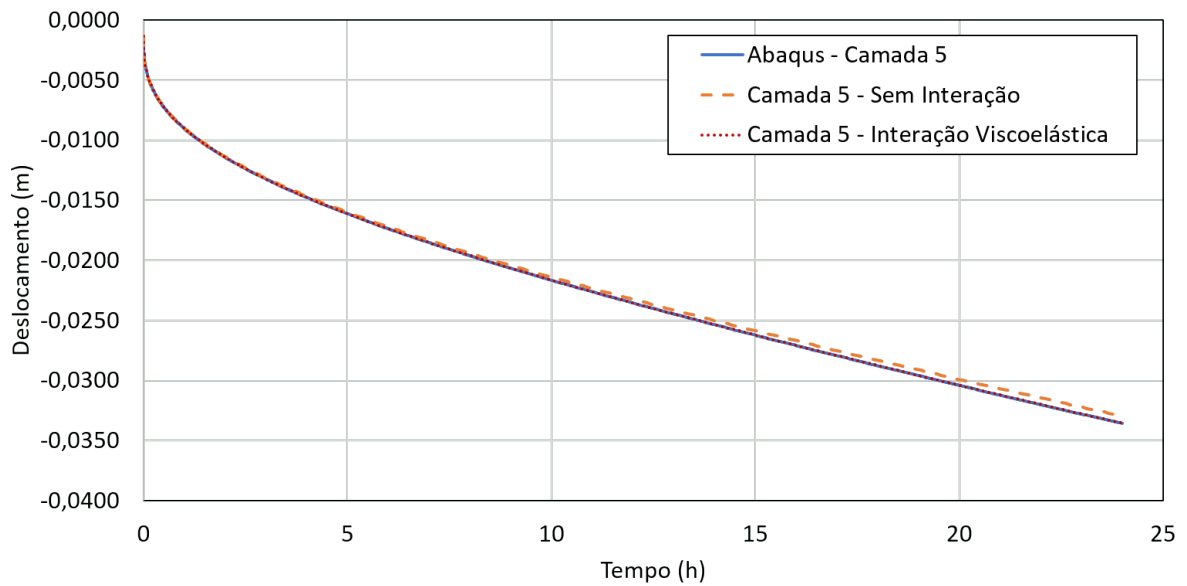
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.27 – 4ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5271 m.



Fonte – Autor (2019)

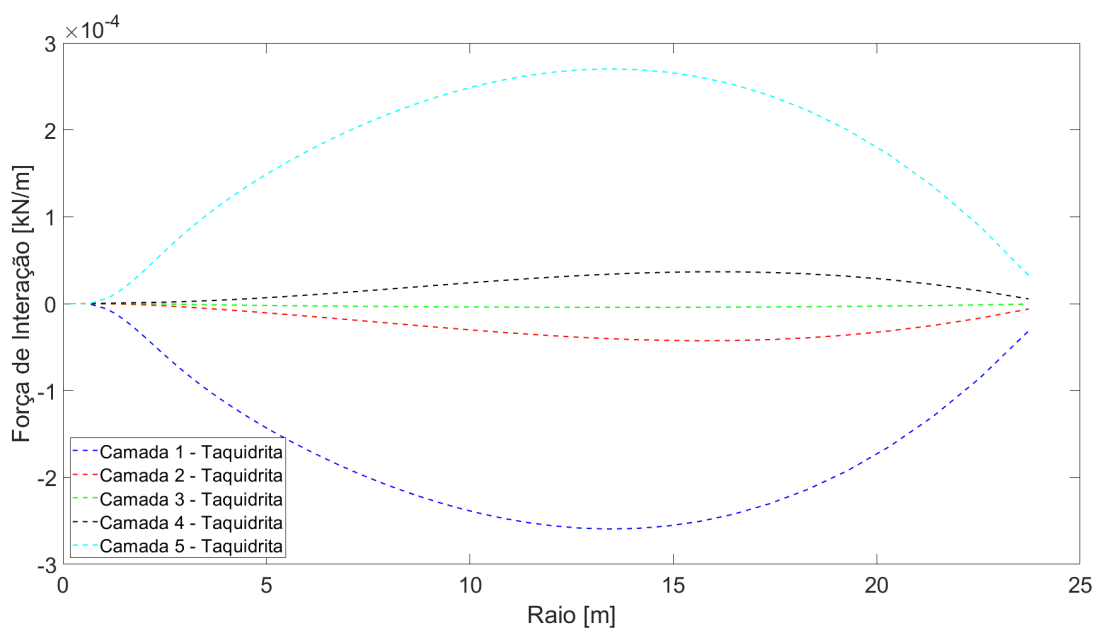
Figura 5.28 – 5ª camada do cenário 4 composta por taquidrita a -5281 m.



Fonte – Autor (2019)

Da mesma forma que ocorreu no caso anterior, as curvas de histórico de deslocamento radial apresentam um comportamento semelhante, exceto pelos instantes finais com o leve afastamento das curvas do método que não considera a interação. O motivo é o mesmo do caso anterior, a sensibilidade do material quanto a mobilidade, em que mesmo com a intensidade da força de interação menor, de acordo com a Figura 5.29, a influência no deslocamento radial impactado por essa força é mais significativa que no caso da halita.

Figura 5.29 – Força de interação das camadas do cenário 4.

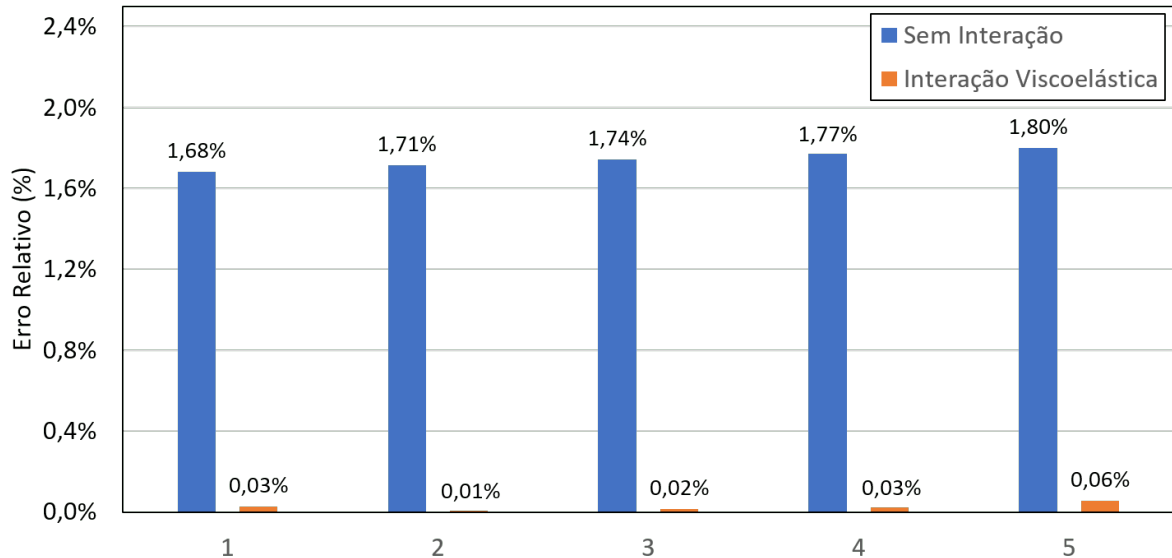


Fonte – Autor (2019)

Assim como observado no cenário anterior, o erro relativo do deslocamento radial no ins-

tante final da simulação é maior para o caso que não considera a interação, conforme é mostrado na Figura 5.30.

Figura 5.30 – Erro relativo das camadas do cenário 4.



Fonte – Autor (2019)

Após observar todos os resultados dos cenários anteriores, percebe-se que a consideração de apenas um tipo de material na modelagem gera deslocamentos relativos pequenos e, consequentemente, a força de interação é baixa. Esse fato permitiu adotar nesses cenários um valor de raio externo cerca 133 vezes maior que o raio interno e é muito maior do que a razão proposta na seção anterior. Os cenários homogêneos mostram que o deslocamento relativo pequeno associado a elementos não tão pequenos favorecem a estabilidade numérica da simulação.

Dessa forma, o número de camadas unidimensionais adotadas não é determinante para alcançar resultados semelhantes a modelagem bidimensional feita no Abaqus e, portanto, poucas camadas unidimensionais conseguem representar o comportamento das rochas salinas, seja com a consideração ou não da interação entre tais camadas, conforme foi constatado nos gráficos que apresentam os erros relativos do deslocamento radial.

### 5.2.2 Camadas Heterogêneas

Explorado o desempenho da ferramenta proposta em casos que consideram apenas um tipo de material, neste momento são abordados casos que possuem mais de um tipo de rocha salina, tendo em vista que é bastante comum a ocorrência de intercalações nos maciços salinos. As análises seguem a mesma linha da seção anterior, por meio do comparativo do histórico de deslocamento radial das camadas avaliadas nos 3 métodos: ferramenta proposta com interação, sem interação e a modelagem bidimensional feita no Abaqus.

Visto que nos cenários dessa seção a interação entre as camadas é maior por apresentarem materiais diferentes no mesmo modelo, o raio externo foi reduzido para 15 m. Dessa forma,

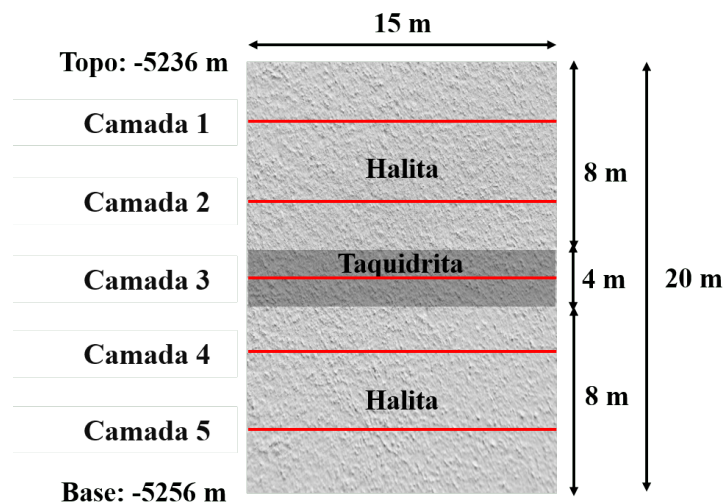


os valores de raio nos pontos de integração serão menores, o que contribui para que as forças de interação não aumente descontroladamente e comprometa a simulação. Embora o valor do raio externo seja menor, o mesmo corresponde a cerca de 80 vezes o tamanho do raio interno e ainda é maior que a razão apresentada na seção anterior.

O quinto cenário desta seção traz uma intercalação de taquidrita em meio a um maciço de halita, nesse caso, a litologia segue a sequência de halita, taquidrita e halita. A espessura total é de 20 m, os quais são distribuídos em 8 m de halita, 4 m de taquidrita e mais 8 m de halita, além de contar com um raio externo de 15 m. Neste cenário, a região de influência é de 4 m para todas as camadas exceto as da extremidade.

Em termos de número de camadas unidimensionais, são atribuídas 2 camadas na primeira seção de halita, 1 camada na seção de taquidrita e mais 2 camadas na outra seção de halita. A Figura 5.31 mostra o esquema geométrico e litológico desse cenário e o posicionamento das camadas.

Figura 5.31 – Esquema geométrico e litológico do cenário 5.



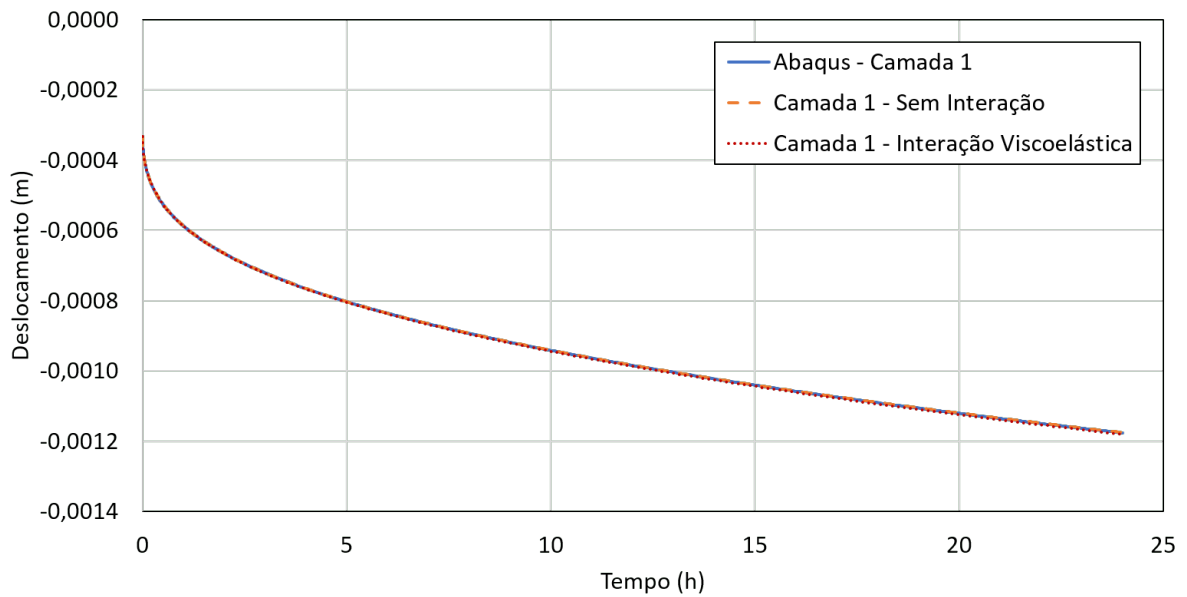
Fonte – Autor (2019)

A seguir são mostradas as propriedades dependentes da cota da profundidade na Tabela 5.11 e os resultados dos históricos de deslocamento radial das camadas unidimensionais em análise nas Figuras 5.32, 5.33 e 5.34, 5.35 e 5.36

Tabela 5.11 – Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 5.

Camada	Cota (m)	Temperatura (K)	Tensão Geostática (N/m <sup>2</sup> )
1 - Halita	-5238	359,17	$8,81 \cdot 10^7$
2 - Halita	-5242	359,22	$8,82 \cdot 10^7$
3 - Taquidrita	-5246	359,27	$8,83 \cdot 10^7$
4 - Halita	-5250	359,32	$8,84 \cdot 10^7$
5 - Halita	-5254	359,37	$8,85 \cdot 10^7$

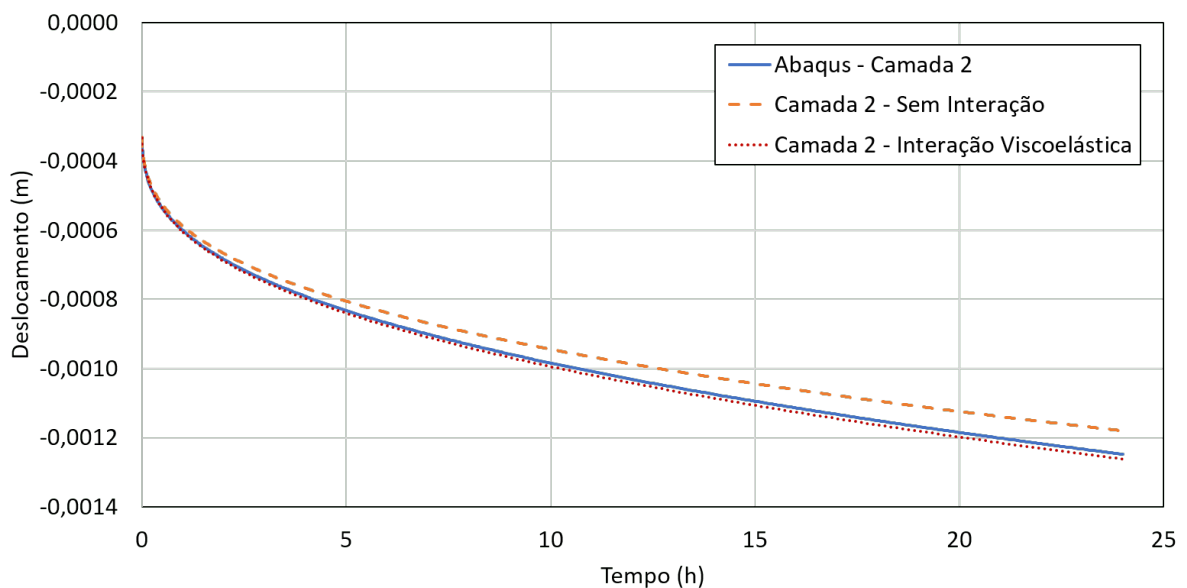
Figura 5.32 – 1ª camada do cenário 5 composta por halita a -5238 m.



Fonte – Autor (2019)

Na primeira camada do cenário 5 se observa um comportamento parecido com o que foi visto nos cenários anteriores, isso devido ao fato da primeira camada, que é de halita, receber influência direta de outra camada do mesmo material. Como as três curvas estão praticamente sobrepostas, constata-se que a força de interação é muito baixa, resultado de deslocamentos relativos pequenos em relação a segunda camada na ferramenta proposta com interação.

Figura 5.33 – 2ª camada do cenário 5 composta por halita a -5242 m.



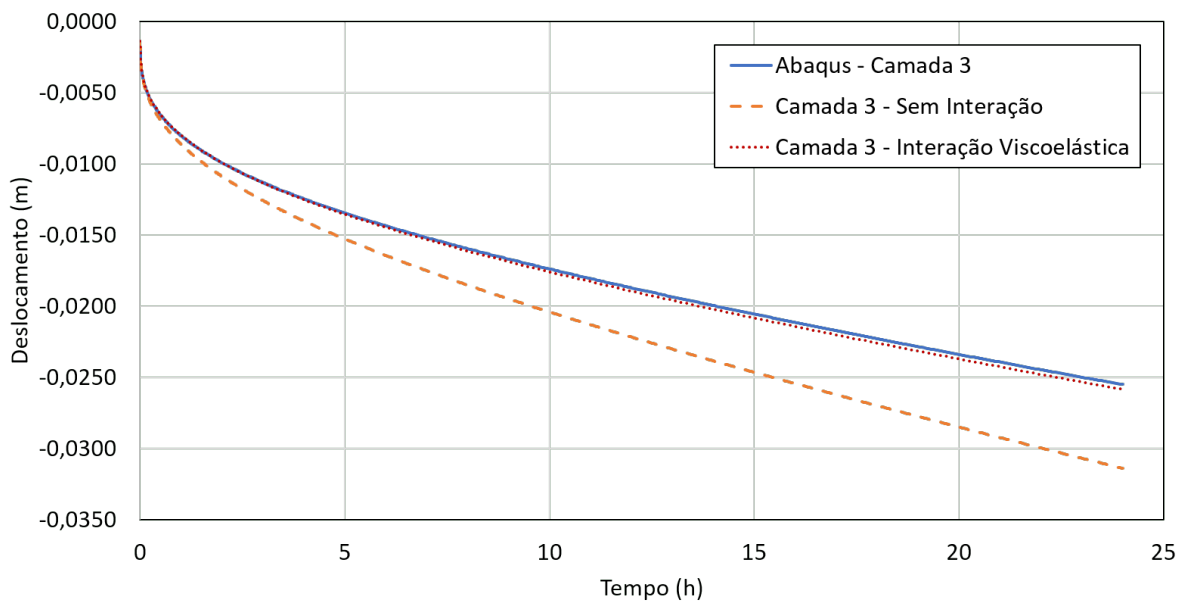
Fonte – Autor (2019)

Nas curvas do histórico de deslocamento radial da segunda camada começam a ficar mais evidente os efeitos da força de interação, pois a curva simulada sem interação apresenta um afas-

tamento observado desde os instantes iniciais da simulação, pois representa o comportamento de uma camada unidimensional de halita sem ser estimulada ao deslocamento pela camada seguinte cujo material é a taquidrita.

Como é mostrado na Figura 5.33, a presença da taquidrita logo abaixo da halita induz a mesma ao deslocamento radial em direção ao fechamento do poço tanto na modelagem do Abaqus quanto na ferramenta proposta com interação, porém, com um pouco mais de intensidade na ferramenta proposta, visto que a curva da mesma se desloca um pouco mais.

Figura 5.34 – 3ª camada do cenário 5 composta por taquidrita a -5246 m.

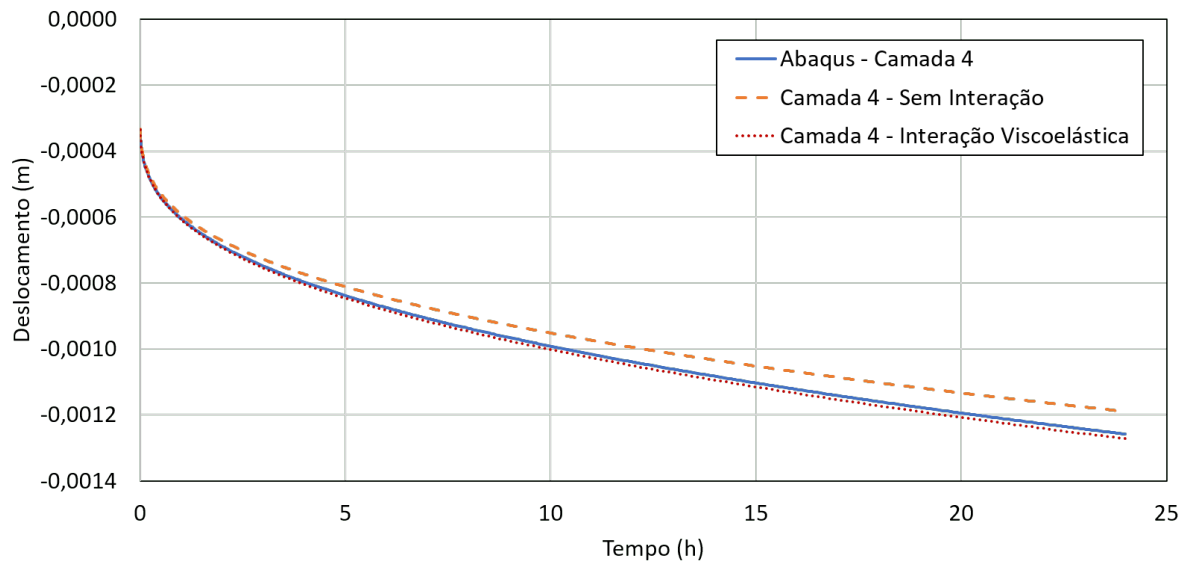


Fonte – Autor (2019)

A terceira camada unidimensional tem como material a taquidrita e, mais uma vez, fica evidenciado o efeito do acoplamento entre as camadas, pois as curvas que consideram a interação indicam um deslocamento radial menor que a curva que não considera a interação, isso devido a influência das camadas unidimensionais ao redor compostas por halita, as quais tendem a amortecer o deslocamento radial da taquidrita.

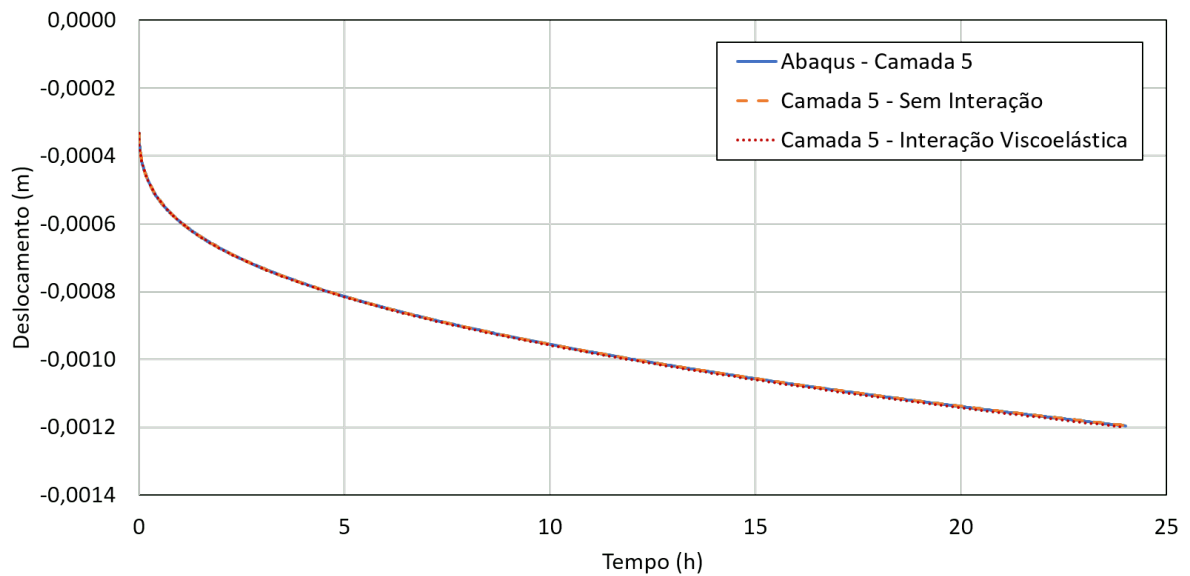
A curva sem interação mostra o histórico de deslocamento radial da taquidrita sem influência das demais e, com isso, traz um ponto importante para o problema da necessidade do repasse, visto que ao desconsiderar a interação entre as camadas se promove um deslocamento radial maior e, conseqüentemente, o repasse poderia ser acionado de forma precipitada e para o andamento das operações.

Figura 5.35 – 4ª camada do cenário 5 composta por halita a -5250 m.



Fonte – Autor (2019)

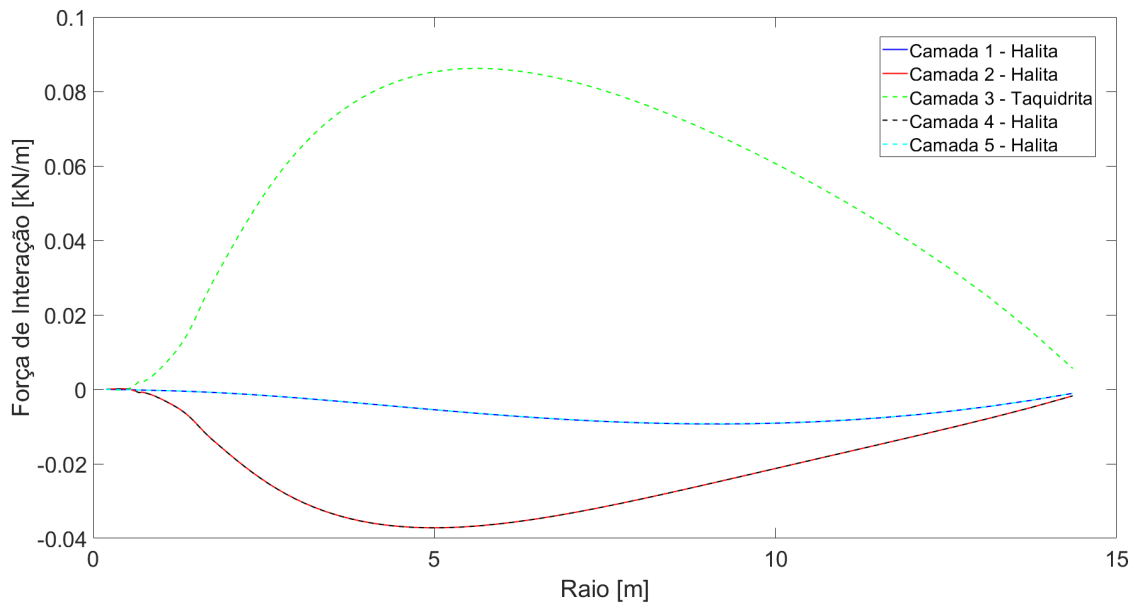
Figura 5.36 – 5ª camada do cenário 5 composta por halita a -5254 m.



Fonte – Autor (2019)

A quarta e quinta camadas exibem um comportamento semelhante o que foi mostrado na primeira e segunda camadas respectivamente, pois os seus posicionamentos são simétricos, no entanto, ressalta-se que as duas últimas camadas unidimensionais apresentam um deslocamento radial maior devido as suas cotas mais profundas. A Figura 5.37 exhibe os valores da força de interação para cada camada.

Figura 5.37 – Força de interação das camadas do cenário 5.

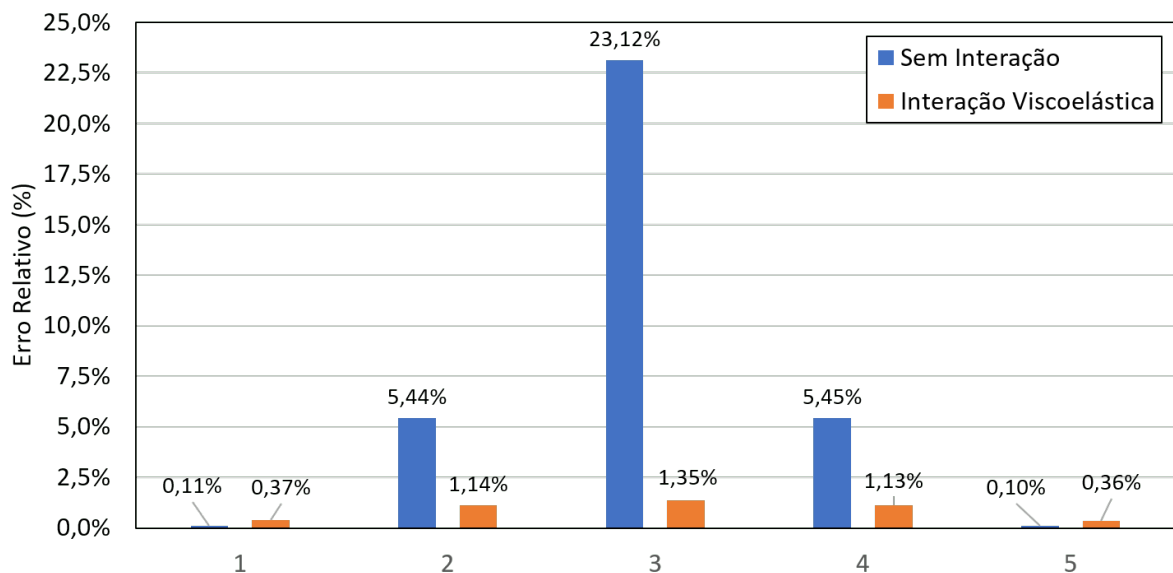


Fonte – Autor (2019)

Observa-se que as camadas de halita são estimuladas ao deslocamento radial, enquanto que a camada de taquidrita tem seu deslocamento radial amortecido. Outra ponto a ser mencionado é que nas camadas de halita que estão mais próximas da camada de taquidrita a força de interação é mais intensa, isso devido aos deslocamentos relativos serem maiores pela influência direta. A força de interação que age sobre as camadas 1 e 5 é calculada com base nos deslocamentos relativos as camadas 2 e 4 respectivamente, por isso são menores.

A Figura 5.38 exibe os erros relativos do deslocamento radial da ferramenta proposta com e sem a consideração da interação.

Figura 5.38 – Erro relativo das camadas do cenário 5.

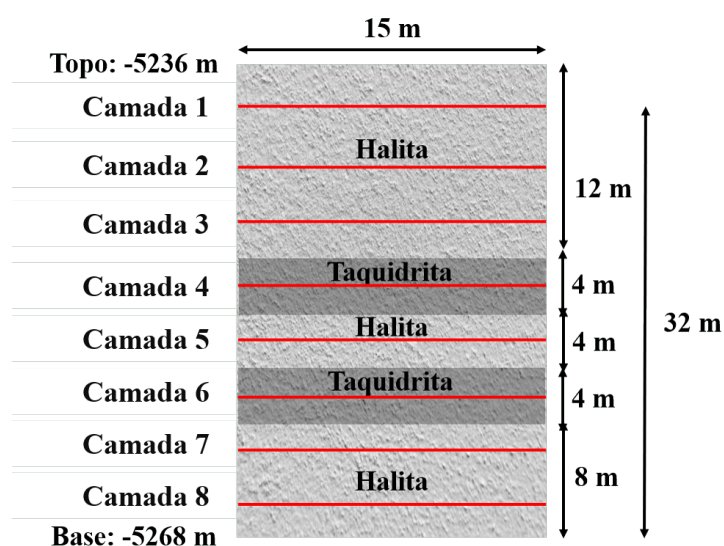


Fonte – Autor (2019)

O erro relativo percentual do deslocamento radial no fim da simulação das camadas 2, 3 e 4 evidencia o fato de que em zonas que possuem mais de um tipo de material a interação é relevante, principalmente pelo erro apresentado pela camada de taquidrita de 23,12%. Em contrapartida, a curva da ferramenta proposta que considera interação apresentou erro relativo no deslocamento radial máximo de 1,35%.

O próximo cenário apresenta uma configuração litológica de um maciço de halita com duas intercalações de taquidrita ao longo de 32 m de espessura. Para este cenário são consideradas 8 camadas unidimensionais dispostas, em 3 de halita, 1 de taquidrita, 1 de halita, 1 de taquidrita e 2 de halita, dessa forma a região de influência de cada camada é de 4 m. A Figura 5.39 exibe o esquema geométrico do cenário 6.

Figura 5.39 – Esquema geométrico e litológico do cenário 6.



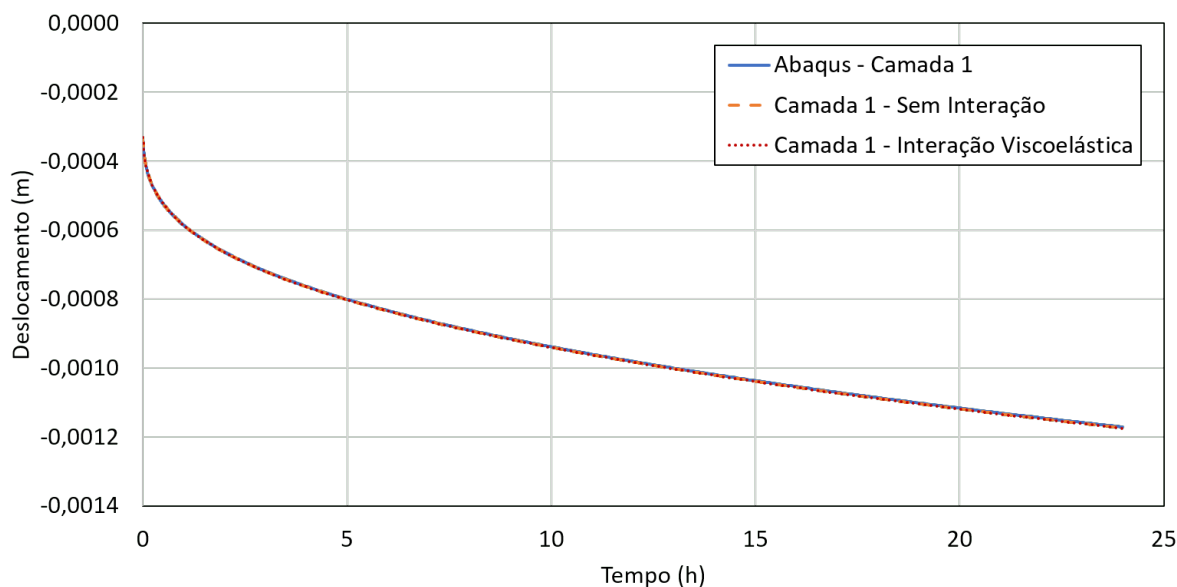
Fonte – Autor (2019)

A Tabela 5.12 mostra os dados de temperatura e tensão geostática das camadas, além disso, as curvas das Figuras 5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 exibem os resultados dos históricos de deslocamento radial das camadas unidimensionais axissimétricas do cenário 6.

Tabela 5.12 – Cota, temperatura e tensão geostática do cenário 6.

Camada	Cota (m)	Temperatura (K)	Tensão Geostática (N/m <sup>2</sup> )
1 - Halita	-5238	359,17	$8,81 \cdot 10^7$
2 - Halita	-5242	359,22	$8,82 \cdot 10^7$
3 - Halita	-5246	359,27	$8,83 \cdot 10^7$
4 - Taquidrita	-5250	359,32	$8,84 \cdot 10^7$
5 - Halita	-5254	359,37	$8,85 \cdot 10^7$
6 - Taquidrita	-5258	359,41	$8,86 \cdot 10^7$
7 - Halita	-5262	359,46	$8,86 \cdot 10^7$
8 - Halita	-5266	359,51	$8,87 \cdot 10^7$

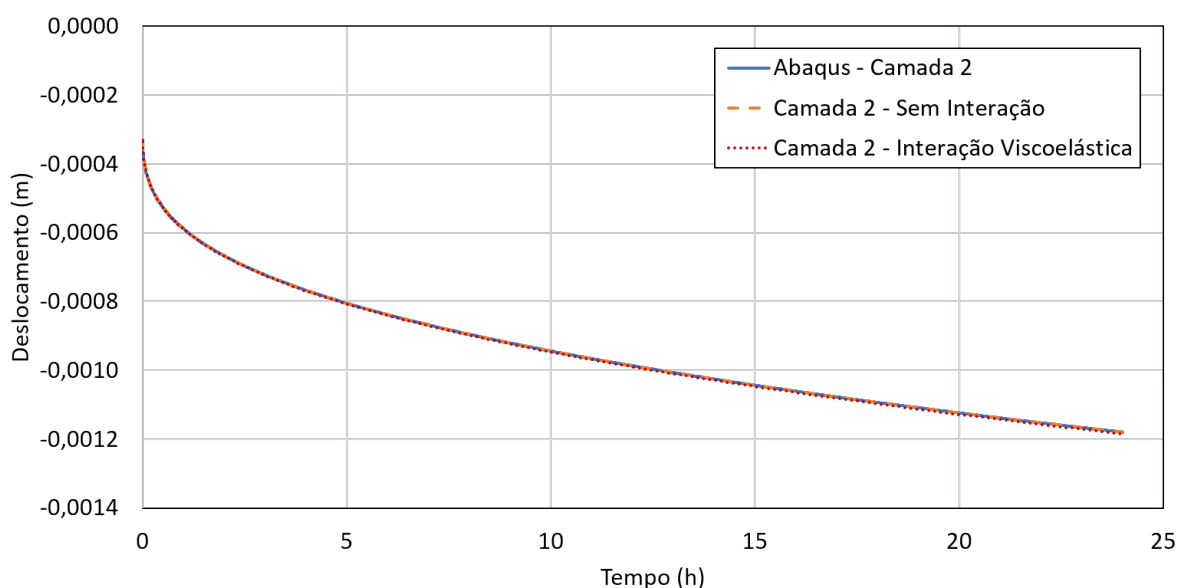
Figura 5.40 – 1ª camada do cenário 6 composta por halita a -5238 m.



Fonte – Autor (2019)

Devido ao posicionamento da primeira camada unidimensional de halita ser mais afastado da região que contém a taquidrita, a mesma não chega a estimular a camada de halita ao deslocamento radial, além disso, a camada mais próxima é composta do mesmo material, por isso a força de interação na primeira camada é quase inexistente.

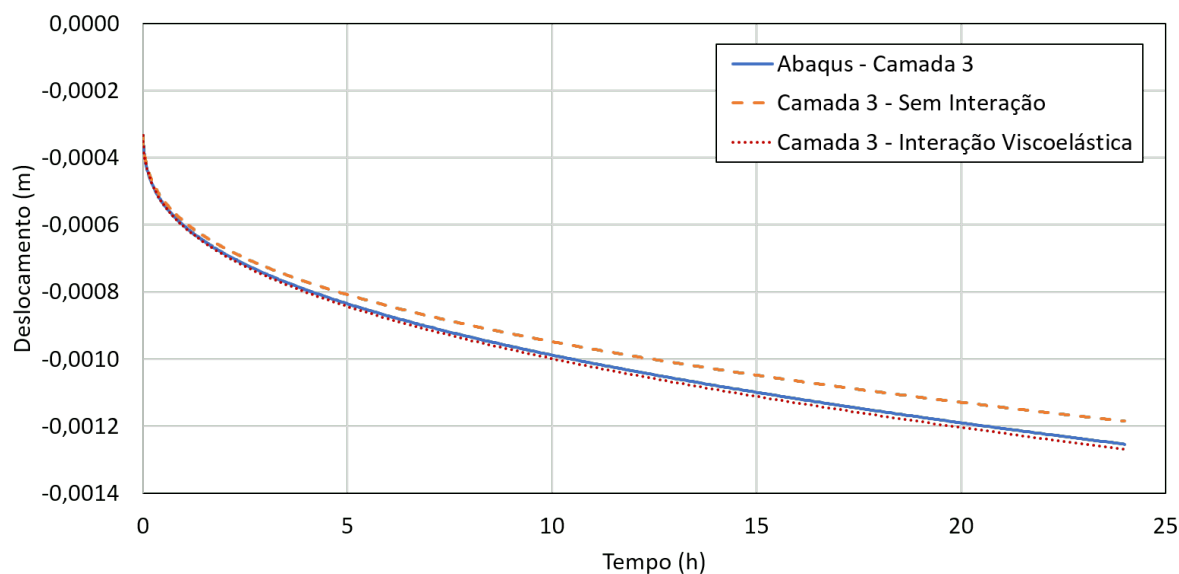
Figura 5.41 – 2ª camada do cenário 6 composta por halita a -5242 m.



Fonte – Autor (2019)

Na segunda camada, o histórico de deslocamento radial mostra que influência da taquidrita ainda não está tão presente, uma vez que a próxima camada unidimensional é composta pelo mesmo material, de modo que não recebe influência direta da taquidrita.

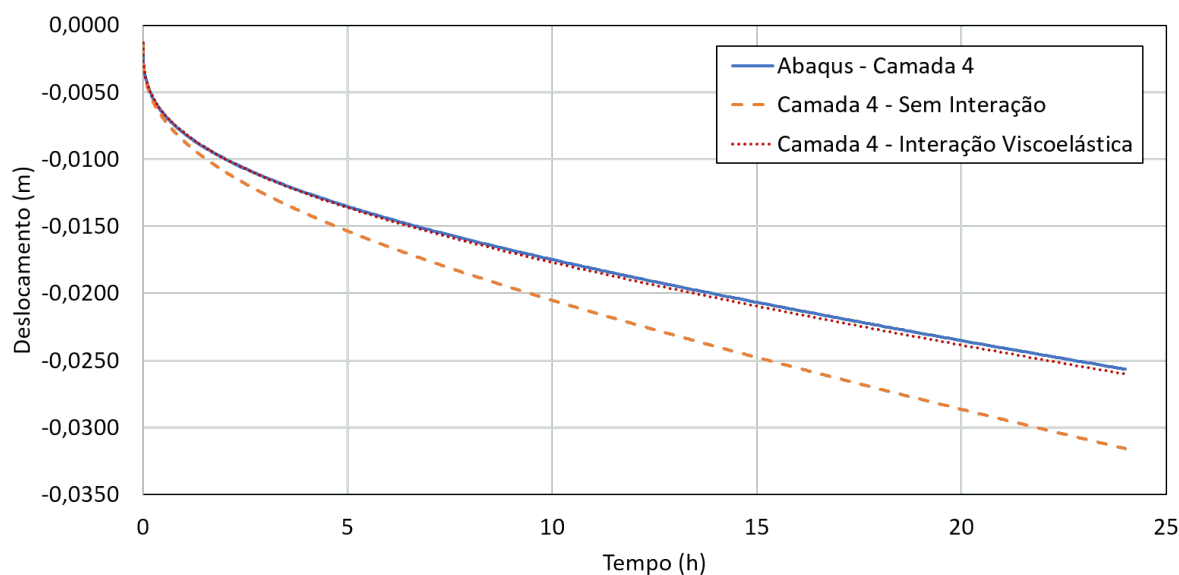
Figura 5.42 – 3ª camada do cenário 6 composta por halita a -5246 m.



Fonte – Autor (2019)

Nas curvas da terceira camada já se observa o estímulo ao deslocamento radial por parte da taquidrita sobre a halita e, conseqüentemente, o afastamento da curva que não considera a interação. No caso da curva com interação viscoelástica, a força de interação se apresenta um pouco mais intensa e provoca um deslocamento radial um pouco maior que a curva da modelagem no Abaqus.

Figura 5.43 – 4ª camada do cenário 6 composta por taquidrita a -5250 m.



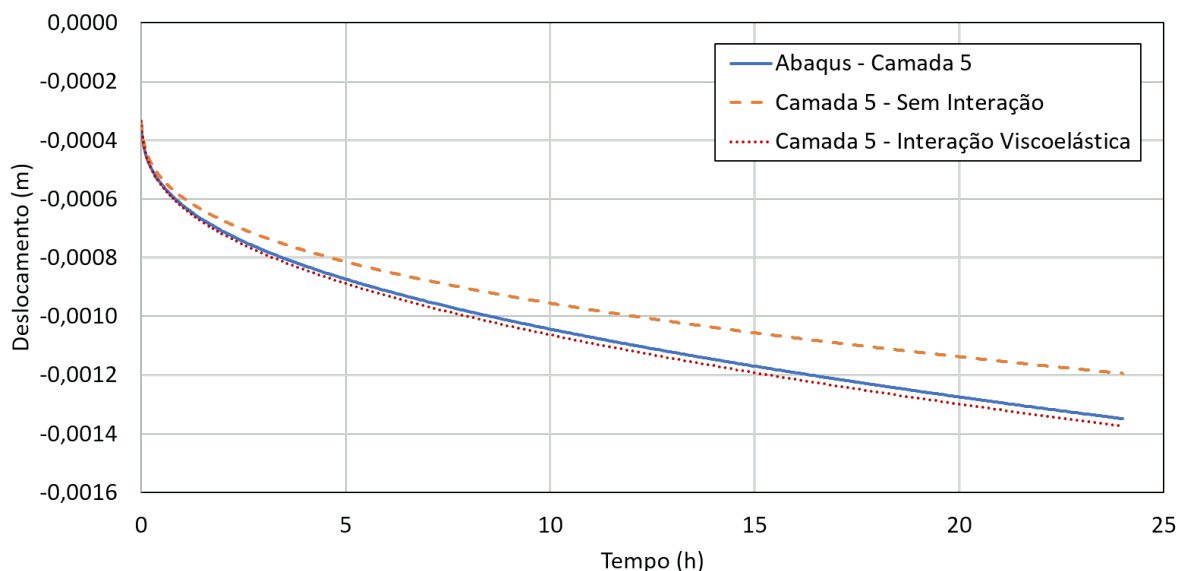
Fonte – Autor (2019)

A quarta camada é composta por taquidrita e possui ao seu redor camadas de halita, portanto, a força de interação amortece o seu avanço radial. Mais uma vez, observa-se que a curva sem



interação não consegue resultados semelhantes à modelagem bidimensional do Abaqus, a qual, pelo nível de complexidade, aproxima-se mais do que acontece na realidade.

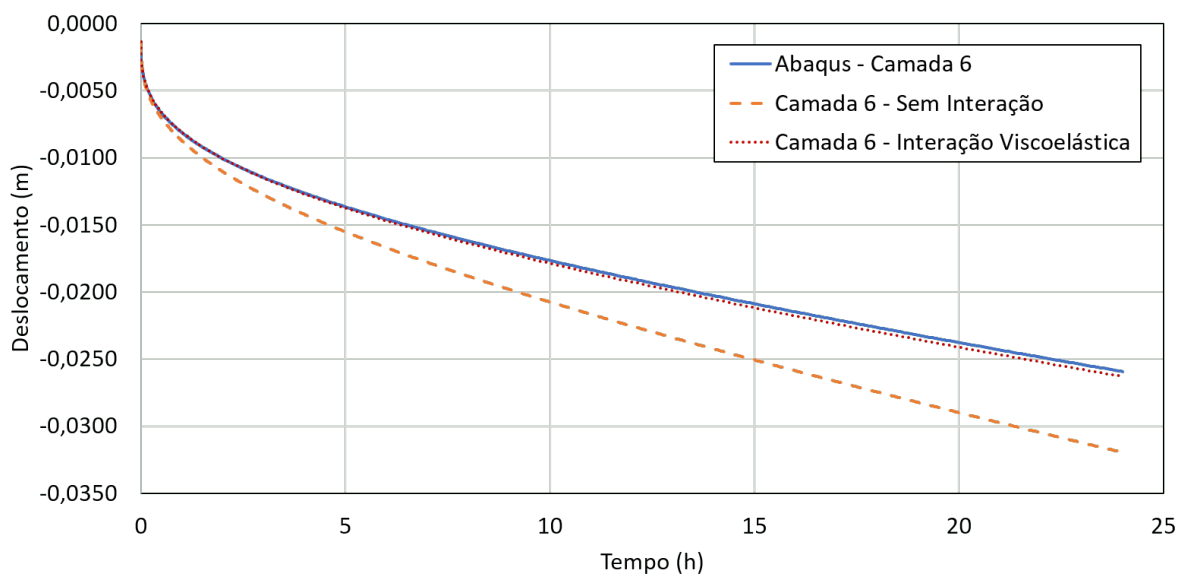
Figura 5.44 – 5ª camada do cenário 6 composta por halita a -5254 m.



Fonte – Autor (2019)

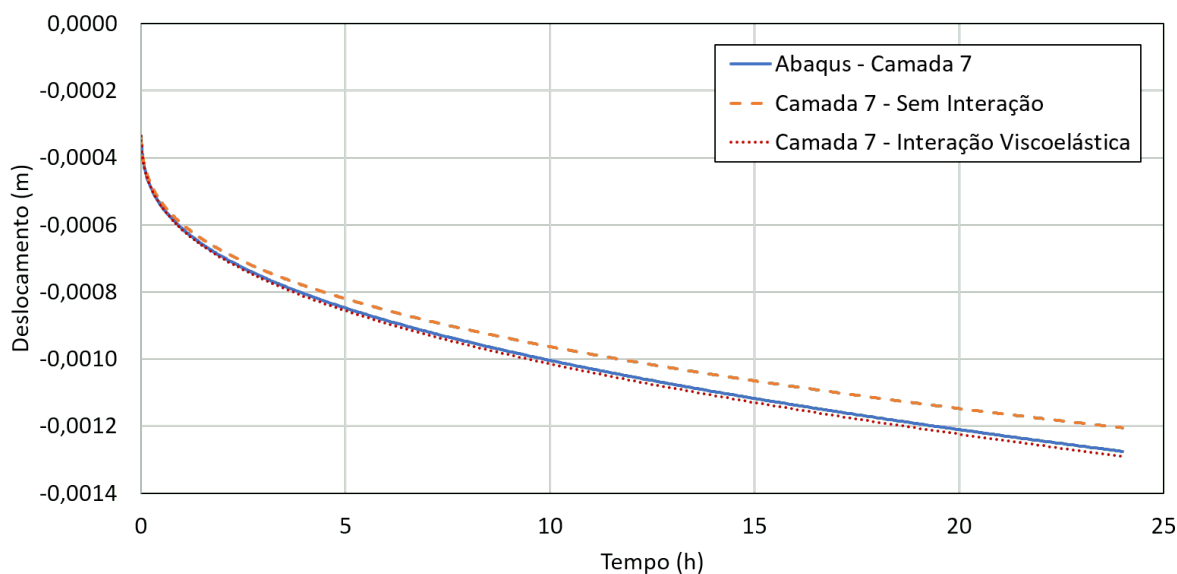
Ao contrário do que aconteceu na camada anterior, a quinta camada se encontra entre duas camadas de taquidrita, dessa forma, a força de interação também atua de forma significativa sobre a camada de halita. Nota-se que, além do deslocamento radial maior, a curva que considera a interação viscoelástica também apresenta um afastamento timidamente maior em relação à curva da terceira camada mostrada na Figura 5.42 cujo estímulo partiu de apenas uma camada de taquidrita.

Figura 5.45 – 6ª camada do cenário 6 composta por taquidrita a -5258 m.



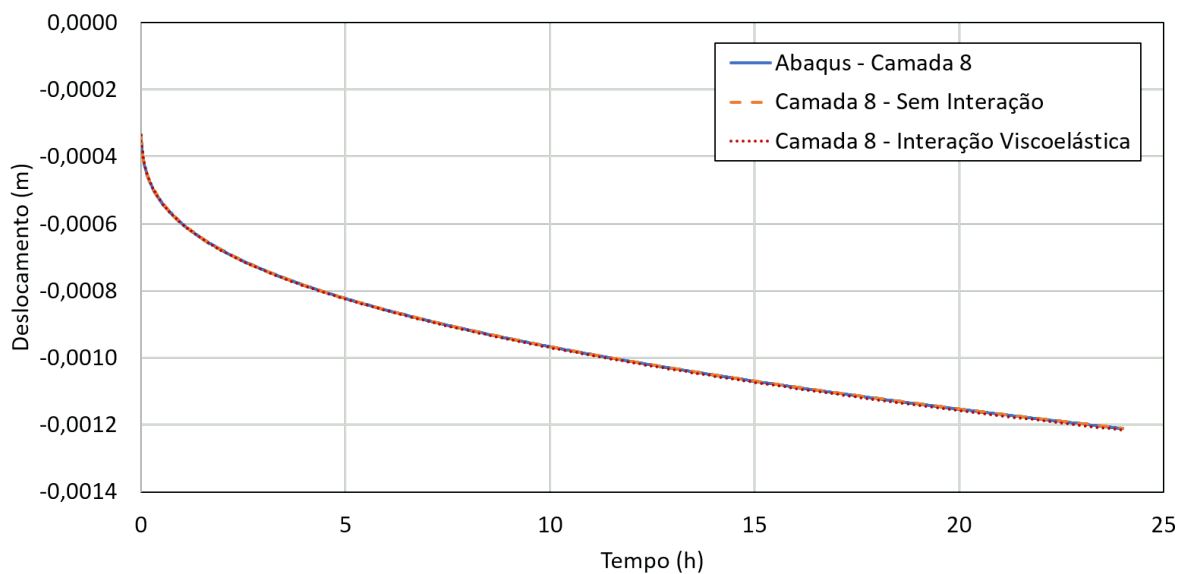
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.46 – 7ª camada do cenário 6 composta por halita a -5262 m.



Fonte – Autor (2019)

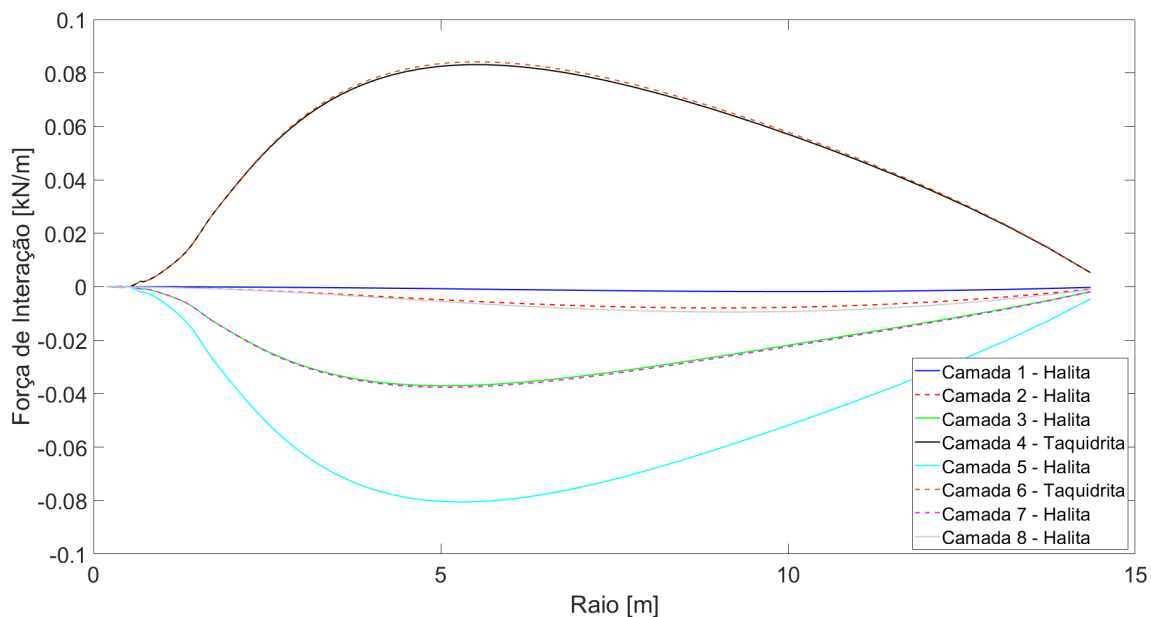
Figura 5.47 – 8ª camada do cenário 6 composta por halita a -5266 m.



Fonte – Autor (2019)

As camadas 6, 7 e 8 apresentam um comportamento semelhante ao que foi encontrado nas camadas 4, 3 e 2, pois as distâncias entre as camadas e os materiais das camadas vizinhas são equivalentes. No entanto, ressalva-se o fato de se deslocarem radialmente um pouco mais pelo fato de estarem em uma profundidade maior. A Figura 5.48 exibe as curvas da força de interação para cada uma das camadas do cenário.

Figura 5.48 – Força de interação das camadas do cenário 6.

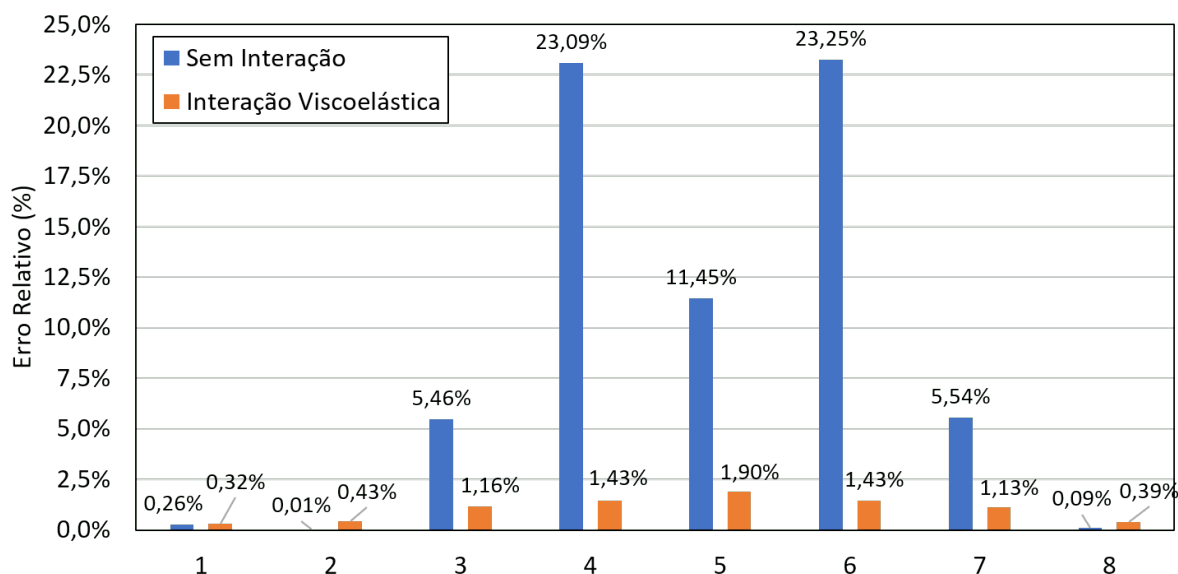


Fonte – Autor (2019)

Mais uma vez se observa as camadas de halita com o estímulo ao deslocamento radial, enquanto as camadas com material de maior mobilidade tem seu deslocamento radial amortecido. Destaca-se o fato de que as quanto mais próximas as camadas de halita estiverem das camadas de taquidrita, maior a força de interação atuante.

Ao verificar o erro relativo do deslocamento radial, observa-se o mesmo ocorrido no cenário anterior, em que as camadas que interagem com materiais diferentes apresentam um valor maior, conforme mostra a Figura 5.49.

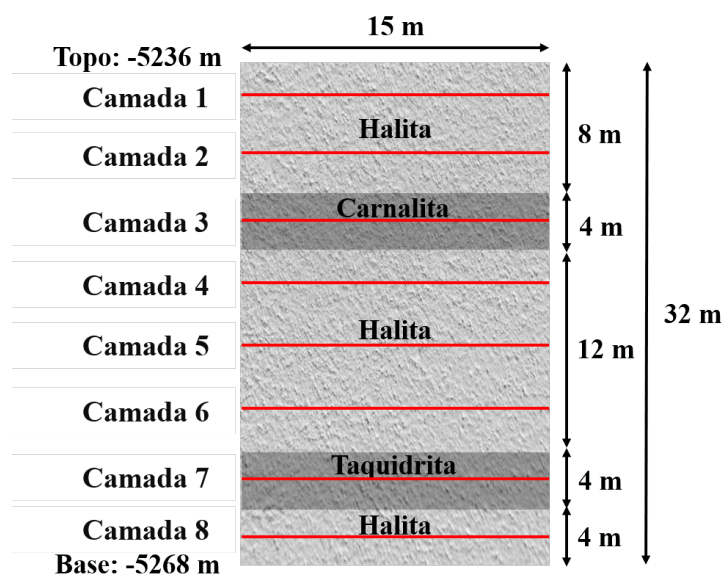
Figura 5.49 – Erro relativo das camadas do cenário 6.



Fonte – Autor (2019)

O próximo cenário conta com a presença de mais um tipo de material, a carnalita cuja mobilidade também é maior que a da halita e tende a estimulá-la ao deslocamento radial. O modelo conta com uma intercalação de carnalita e outra de taquidrita ao longo dos 32 m de espessura avaliada. São consideradas 8 camadas distribuídas conforme é mostrado na Figura 5.50, sendo assim, a região de influência é de 4 m.

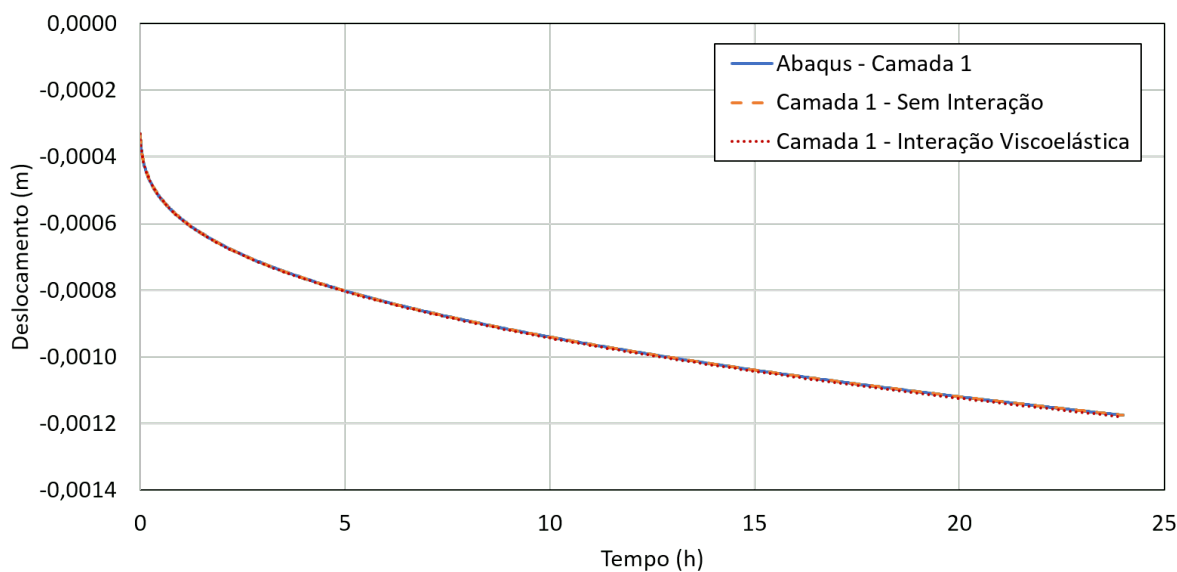
Figura 5.50 – Esquema geométrico e litológico do cenário 7.



Fonte – Autor (2019)

Como esse modelo possui 8 camadas distribuídas em 32 m de espessura, o posicionamento das camadas unidimensionais são equivalente ao modelo anterior, dessa forma, os dados de temperatura e tensão geostática presentes na Tabela 5.12 podem ser aplicados a esse cenário. Além disso, as Figuras 5.51, 5.52, 5.53, 5.54, 5.55, 5.56, 5.57 e 5.58 exibem os históricos de deslocamento radial de cada camada.

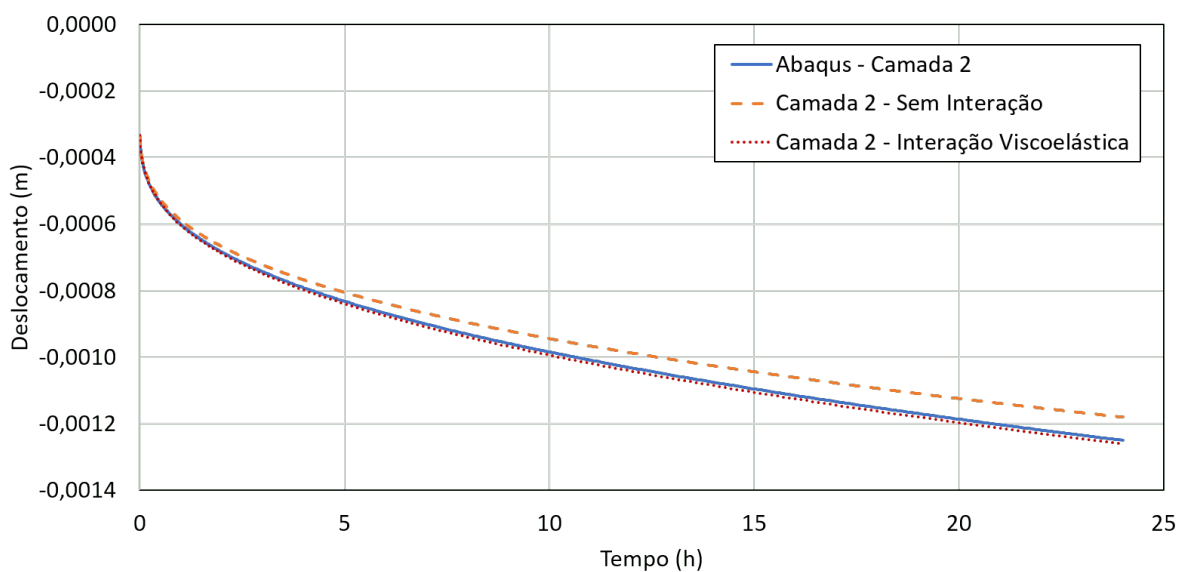
Figura 5.51 – 1ª camada do cenário 7 composta por halita a -5238 m.



Fonte – Autor (2019)

Na primeira camada a força de interação é quase inexistente, visto que a curva sem interação está sobreposta com as demais. Como já foi dito anteriormente, deslocamentos radiais relativos pequenos geram uma tensão de cisalhamento pequena e, conseqüentemente, a força de interação será fraca. Isso tudo é motivado pelo fato de se ter o mesmo material presente na camada com a qual interage diretamente.

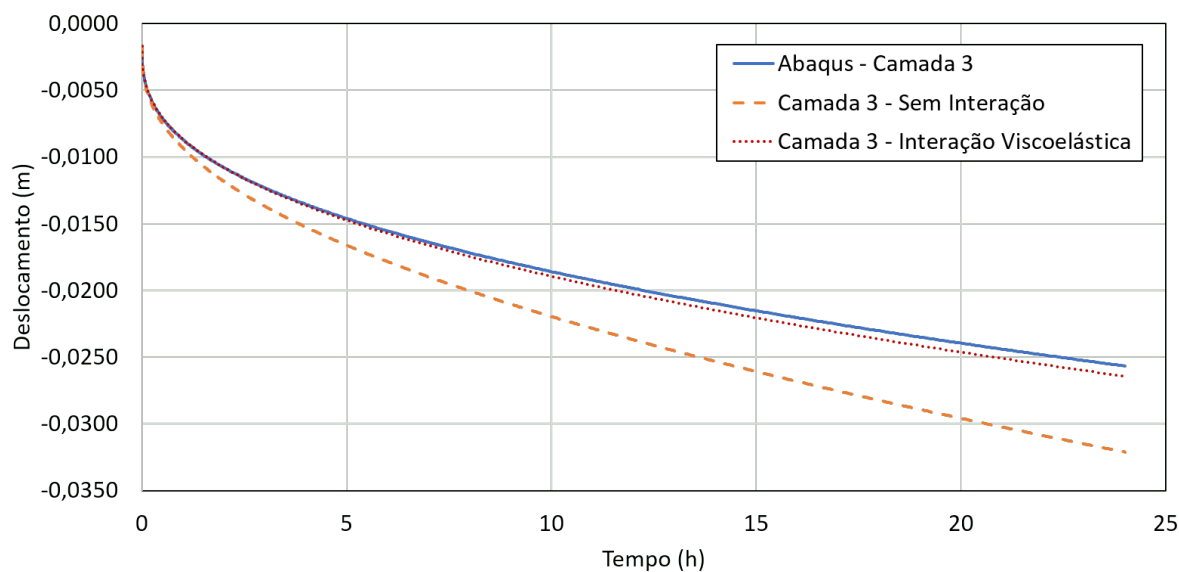
Figura 5.52 – 2ª camada do cenário 7 composta por halita a -5242 m.



Fonte – Autor (2019)

A proximidade dessa camada de halita com a camada de carnalita induz o seu estímulo ao deslocamento radial, assim como já foi observado em outros cenários quando a taquidrita influenciou diretamente uma camada de halita.

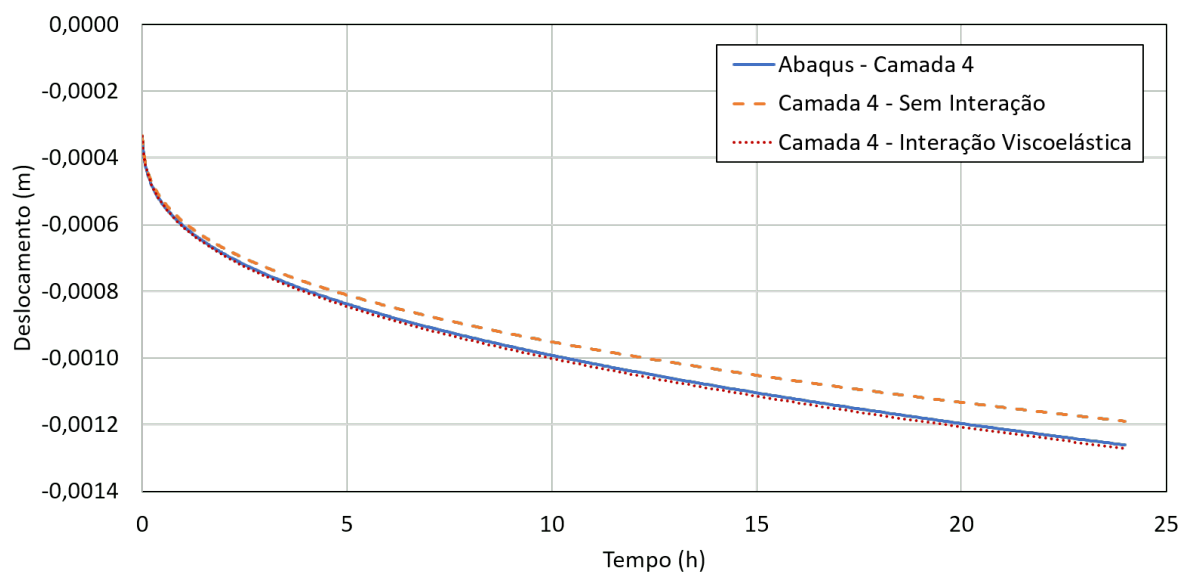
Figura 5.53 – 3ª camada do cenário 7 composta por carnalita a -5246 m.



Fonte – Autor (2019)

Como a camada de carnalita tem o seu deslocamento radial amortecido por duas camadas de halita, devido à alta mobilidade da carnalita, o afastamento entre as curvas com interação e sem interação é maior que o afastamento observado nas curvas de deslocamento radial da camada de halita, visto que ao desconsiderar a interação a camada se desloca livremente, ao contrário do que ocorre com a halita que, naturalmente, apresenta um deslocamento radial menor.

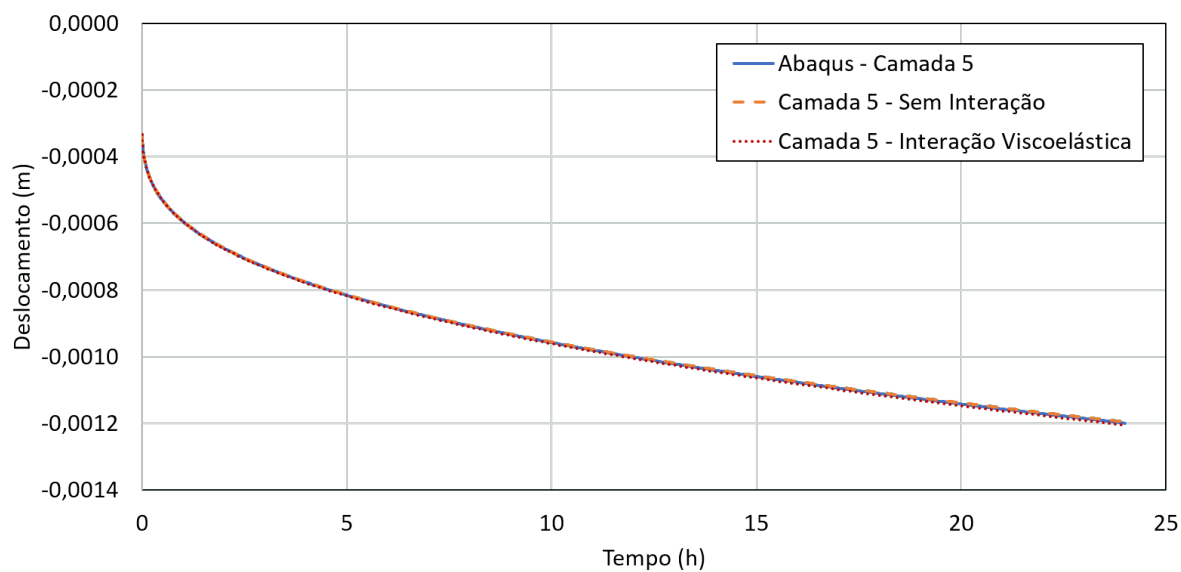
Figura 5.54 – 4ª camada do cenário 7 composta por halita a -5250 m.



Fonte – Autor (2019)

A camada 4 se encontra entre uma camada de carnalita e outra de taquidrita, ambos os evaporitos possuem alta mobilidade, por isso, as curvas com interação apresentam um deslocamento radial maior que a curva sem interação.

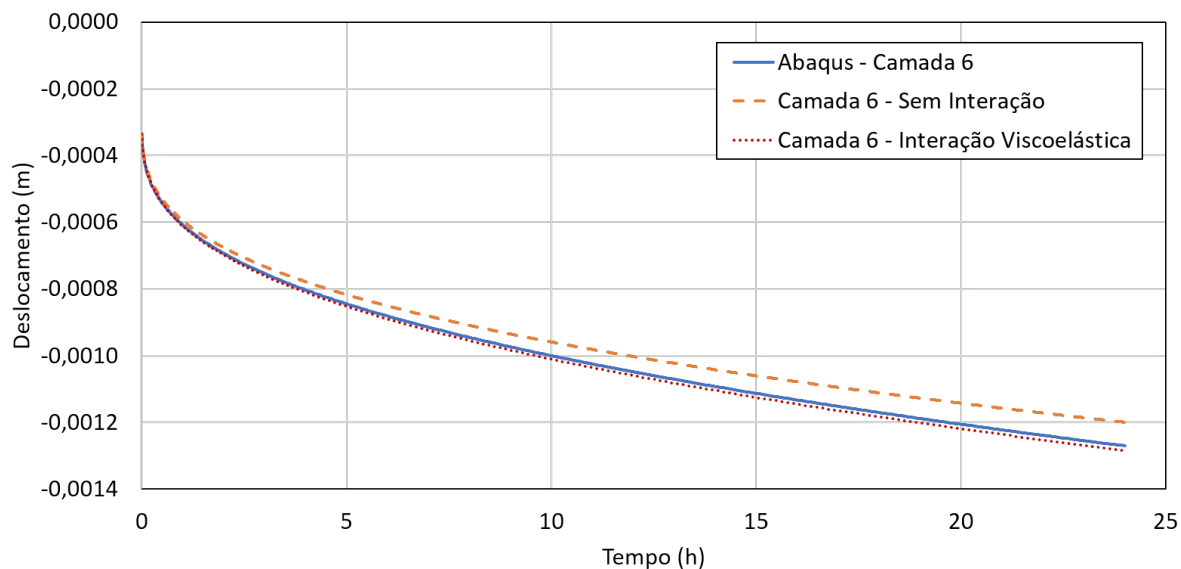
Figura 5.55 – 5ª camada do cenário 7 composta por halita a -5254 m.



Fonte – Autor (2019)

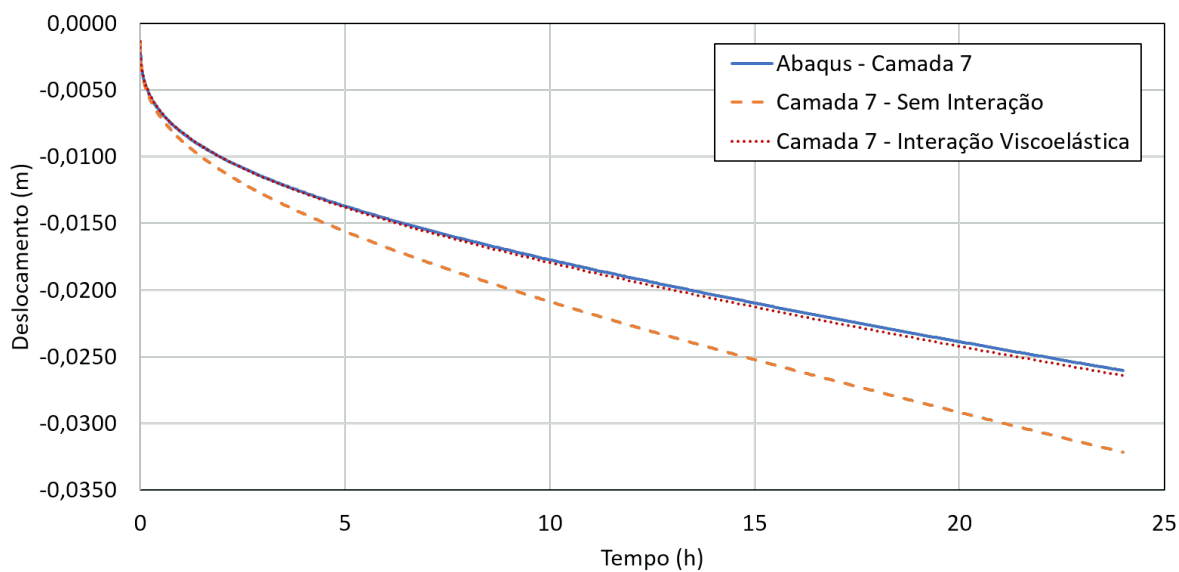
A camada 5 que é composta por halita é cercada por camadas do mesmo material, por isso a força de interação atuante na camada é fraca.

Figura 5.56 – 6ª camada do cenário 7 composta por halita a -5258 m.



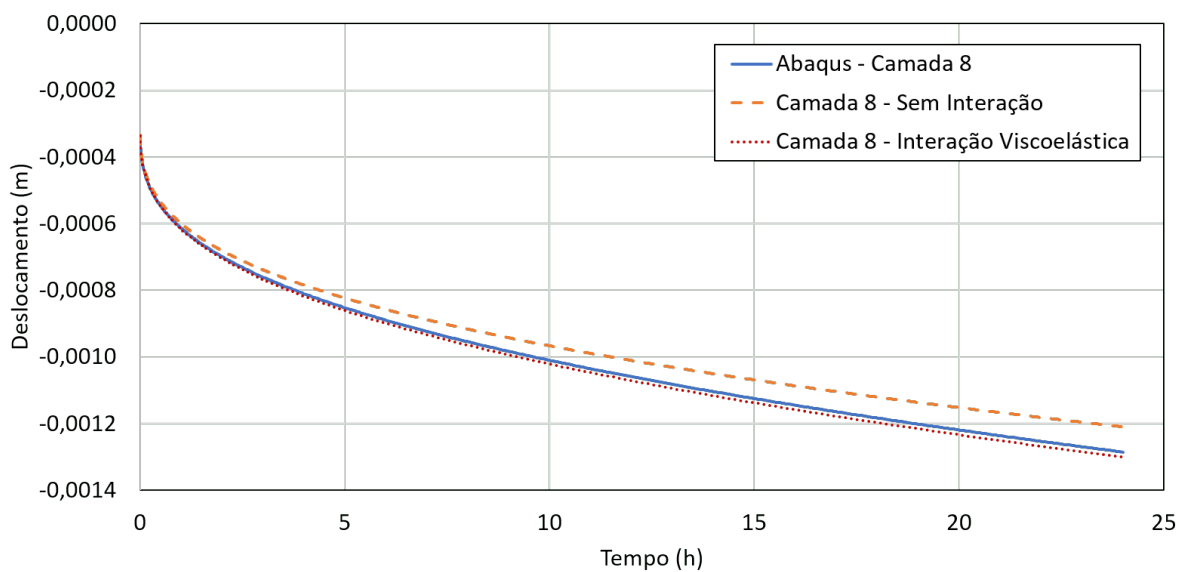
Fonte – Autor (2019)

Figura 5.57 – 7ª camada do cenário 7 composta por taquidrita a -5262 m.



Fonte – Autor (2019)

Figura 5.58 – 8ª camada do cenário 7 composta por halita a -5266 m.

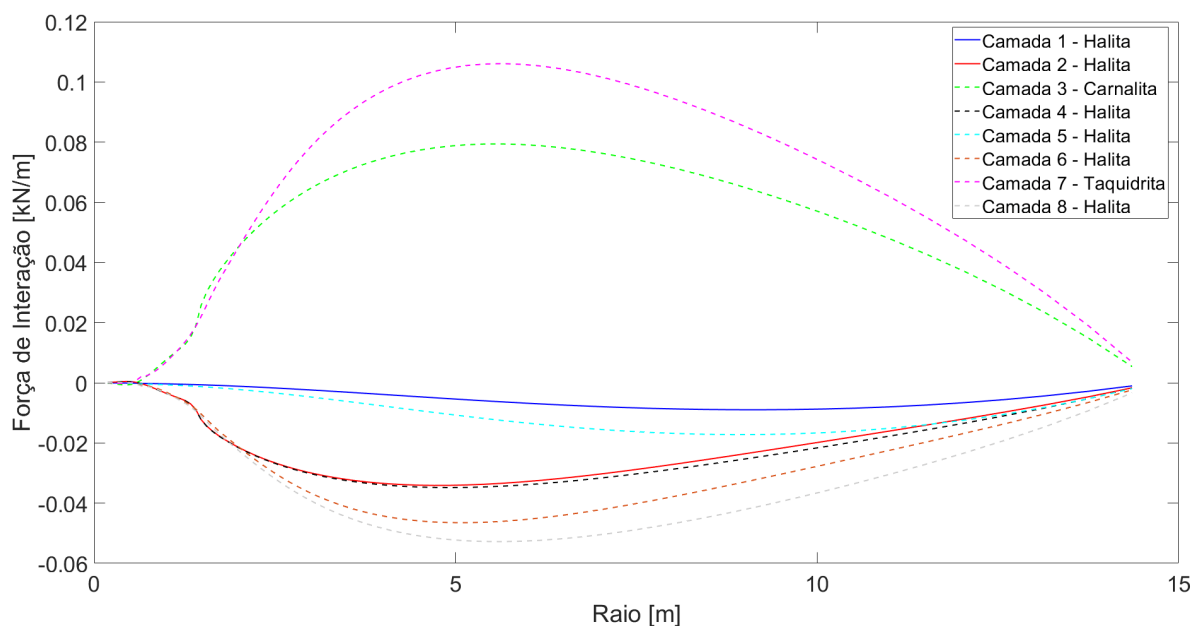


Fonte – Autor (2019)

As camadas 6, 7 e 8 apresentam um comportamento semelhante ao que foi analisado nas camadas 4, 3 e 2, com a ressalva de que pela profundidade maior, as curvas indicam um deslocamento radial um pouco mais acentuado. A Figura 5.59 apresenta as curvas da força de interação que age sobre as camadas.



Figura 5.59 – Força de interação das camadas do cenário 7.

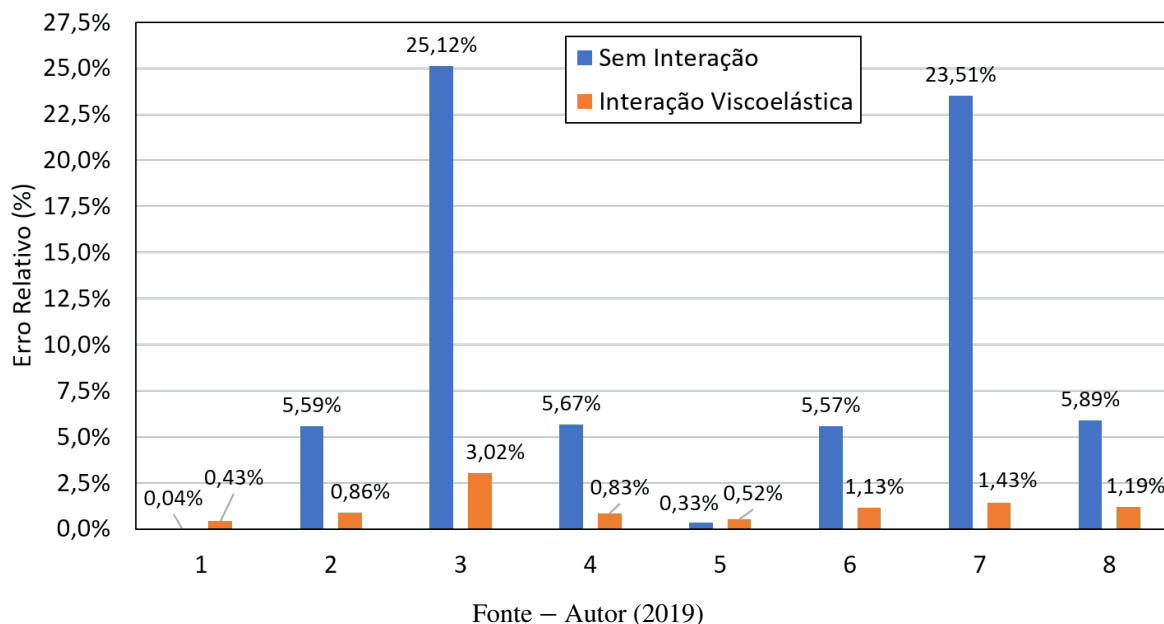


Fonte – Autor (2019)

Assim como já foi observado em outros cenários, a força de interação estimula as camadas de halita e amortece as camadas de carnalita e taquidrita, em termos de deslocamento radial. Um fato a ser destacado é que a intensidade da força de interação sobre a taquidrita foi maior que a atuante na carnalita na maior parte da malha. Esse fato indica que a taquidrita apresenta uma mobilidade maior que a carnalita.

A Figura 5.60 apresenta o erro relativo do deslocamento radial no instante final, na qual fica evidente que a curva que não considera a interação apresenta uma diferença considerável no valor final do deslocamento radial, isso para as camadas que interagem diretamente com materiais diferentes.

Figura 5.60 – Erro relativo das camadas do cenário 7.



Por meio dos resultados apresentados nos históricos de deslocamento radial para os cenários que consideram materiais distintos na composição litológica, observa-se que a presença de diferentes materiais gera forças de interação maiores que as observadas nos cenários homogêneos.

Além disso, o posicionamento das camadas também influencia diretamente no estímulo ou amortecimento do deslocamento radial das camadas, isso devido ao fato que as camadas de menor mobilidade que estavam mais afastadas não sofreram influência das camadas de maior mobilidade, visto que foi observado que a influência é marcante quando as camadas interagem diretamente.

Outro ponto a ser mencionado é sobre o dimensionamento da malha, visto que foi observado que quanto maior a interação entre as camadas, menor o raio externo aplicado. Apesar disso, os valores de raio externo adotados atenderam a proporção estabelecida na seção anterior.

O comprimento do elemento também entra no cálculo do incremento de tempo adaptativo juntamente com o deslocamento, por isso, se a força de interação estimular demasiadamente alguma camada unidimensional, pode provocar deslocamentos excessivos e afetar o cálculo do incremento de tempo adaptativo, de modo que provoque instabilidade a simulação devido ao emprego do método de Euler no cálculo das deformações viscosas.

### 5.3 Operação de Repasse com a Estratégia de Multicamadas

Diante do que foi apresentado na subseção anterior em termos de deslocamento radial, a estratégia do acoplamento de multicamadas unidimensionais axissimétricas apresentou respostas similares as que foram obtidas da modelagem bidimensional feita no Abaqus, dessa forma, a ferramenta desenvolvida com a consideração de interação é capaz de representar com mais consistência o que ocorre na realidade, se comparada ao caso da não consideração da interação.

Como foi observado, a interação entre as camadas interfere diretamente no deslocamento radial das mesmas, por isso, para avaliar a modelagem do problema da operação de repasse é preciso ter precisão quanto ao raio do poço, uma vez que rochas de alta mobilidade tendem a se deslocar menos na presença de rochas de baixa mobilidade.

A fim de explorar o efeito do acoplamento de multicamadas sobre a operação de repasse, é feita uma análise de mais um cenário fictício, conforme mostra a Figura 5.61, em termos de temperatura e tensão geostática os valores são os mesmos apresentados na Tabela 5.11 devido às camadas apresentarem as mesmas cotas.

Neste cenário, a malha é construída tanto com elementos de tamanho uniforme quanto elementos de tamanho não uniforme. A quantidade de elementos uniformes segue a proporção de 50 elementos por repasse, assim como foi adotado na seção 5.1. A Tabela 5.13 apresenta mais dados físicos e da malha para esse comparativo.

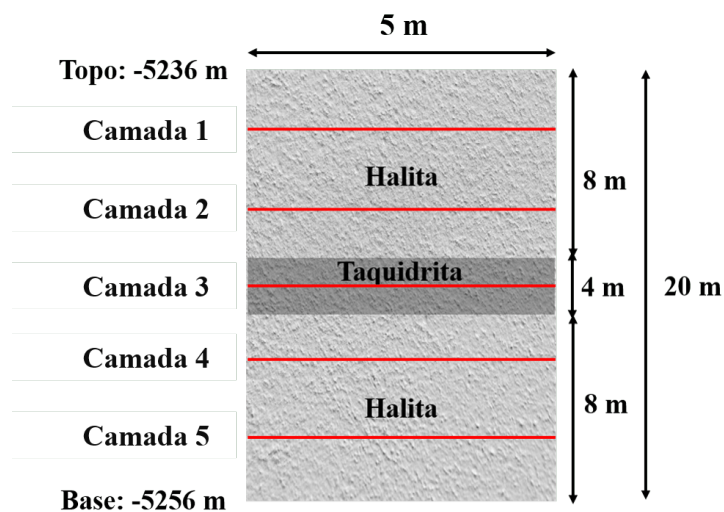
Tabela 5.13 – Propriedades do cenário com repasse em multicamadas.

Propriedade	
Topo do evaporito (m)	-5236
Temperatura no topo do evaporito (K)	359,15
Tensão geostática no topo do evaporito (N/m <sup>2</sup> )	88,106 · 10 <sup>6</sup>
Peso do fluido de perfuração (kN/m <sup>3</sup> )	13,5
Raio interno (m)	0,187
Raio externo (m)	9,366
Razão da PG	1,124
Comprimento dos elementos uniformes (mm)	0,127
Número de elementos uniformes	100
Número de elementos não uniformes	80
Fator de incremento de tempo adaptativo	0,01
Tempo de simulação (h)	24

Como o cenário tem a presença da taquidrita, rocha de alta mobilidade, em sua litologia e avalia a operação de repasse, adota-se o comprimento do elemento uniforme menor que nas outras seções, a fim de diminuir o "gap". Além disso, considera-se um peso de fluido de perfuração maior para conter o avanço da taquidrita.

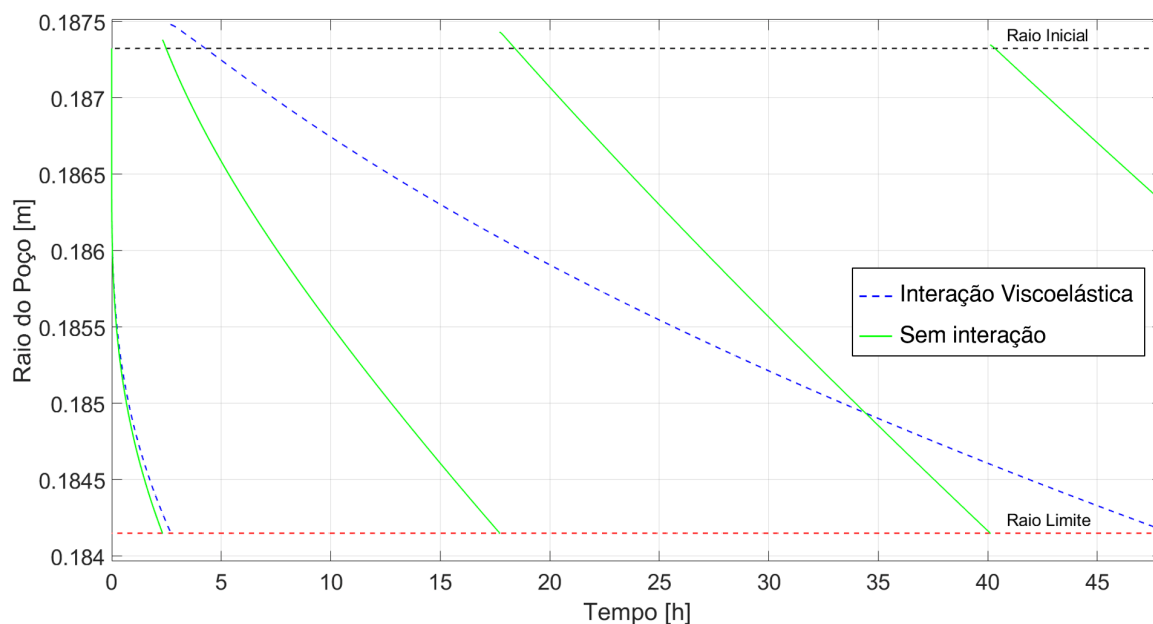
Para este caso, é avaliado o histórico do raio do poço da camada unidimensional da taquidrita cuja mobilidade é maior que a halita, assim, será possível observar a frequência e o tempo de ocorrência do repasse de broca diante da interação entre evaporitos de alta e baixa mobilidade. Neste caso, é feito um comparativo entre a estratégia multicamadas com e sem a consideração de interação das camadas acopladas, conforme mostra a Figura 5.62.

Figura 5.61 – Esquema geométrico e litológico do cenário.



Fonte – Autor (2019)

Figura 5.62 – Comparativo entre a consideração e não consideração da interação na operação de repasse com acoplamento multicamadas.



Fonte – Autor (2019)

Observa-se que a curva que representa o caso com a interação apresenta uma quantidade menor de repasses, em um total de apenas 1 operação, já no caso que não considera a interação foram observadas 3 operações de repasse. Em decorrência da interação, os intervalos de tempo em que ocorrem os repasses de broca no caso que considera a interação são maiores que o caso que não considera a interação entre as camadas.

Assim como foi observado na seção anterior, o deslocamento radial da taquidrita com interação viscoelástica é amortecido pela influência das camadas de halita na vizinhança. Com um

deslocamento radial mais contido, o repasse é acionado com uma frequência menor e em instantes de tempo maiores. Por meio desse fato, constata-se que a curva do raio do poço na região da taquidrita sem considerar a interação induz o acionamento do repasse precipitadamente e, além disso, erroneamente nos repasses adicionais.

Embora a halita também sofra a influência da interação, o fato de ser naturalmente um evaporito que tem baixa mobilidade faz com que o raio do poço em sua cota não atinja o raio limite antes que a camada composta por taquidrita o faça primeiro, pois quando o repasse é acionado, as cotas ao redor daquele trecho também são repassadas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabida a recorrência da operação de repasse em poços com a presença de rochas salinas, investigar uma forma de identificar a sua necessidade e representar o efeito da manobra sobre a formação é algo que motivou o desenvolvimento do trabalho. Para tal, os estudos realizados sobre a operação permitiram o entendimento de como a mesma é realizada, bem como as situações em que a operação de repasse é indicada e contraindicada.

Uma vez que as rochas salinas podem ser representadas por modelos constitutivos visco-elásticos, a investigação dos modelos reológicos, empíricos e associados a processos físicos levou à compreensão do comportamento desse tipo de rocha. Adicionalmente, o estudo sobre o fenômeno da fluência em rochas salinas garantiu a percepção de quais estágios ocorrem durante a perfuração de um poço vertical.

Além do conhecimento adquirido nas formulações de modelos viscoelásticos, as suas aplicações descritas por diversos autores direcionaram qual modelo seria o mais adequado para representar um evaporito durante uma perfuração. Devido à consideração de aspectos relacionados à microestrutura do material e a sua aplicação prévia em trabalhos relacionados com a perfuração de poços com resultados satisfatórios, o Mecanismo Duplo de Deformação foi escolhido para representar as rochas salíferas.

Em termos computacionais, foi desenvolvido um programa capaz de simular o deslocamento da parede da formação salina, o qual é baseado no Método dos Elementos Finitos, que adota uma formulação unidimensional que toma partido da axissimetria do problema de poços. A adoção de uma camada isolada de espessura unitária permite o uso de elementos unidimensionais, dessa forma, garante-se um tempo menor de simulação.

Outras estratégias adotadas como a geração de malha com elementos de tamanho uniforme e não uniforme e o cálculo do incremento de tempo de forma adaptativa, contribuem para obtenção de *gaps* menores, para que o raio do poço seja o mais próximo possível do raio inicial, e para simulações mais eficientes.

Além da possibilidade da simulação de uma única camada, o programa desenvolvido conta com uma estratégia para acoplar múltiplas camadas unidimensionais axissimétricas, a fim de levar em consideração a interação entre elas. A consideração dessa interação torna o programa mais robusto, visto que, na prática, o maciço rochoso consiste em um objeto único e coeso.

Além de considerar a interação entre camadas e proporcionar um resultado mais próximo da realidade, a estratégia de multicamadas tem o intuito de fornecer uma ferramenta robusta e eficiente. A proposta busca um resultado semelhante ao que seria encontrado em modelagens mais complexas, mas com um custo computacional menor, visto que a estratégia implementada contém a metade do número de graus de liberdade que uma malha bidimensional, por exemplo.

A fim de avaliar a eficiência da ferramenta desenvolvida, foram criados cenários fictícios com apenas uma camada unidimensional para analisar parametricamente o efeito de algumas propriedades sobre a demanda do repasse. Essa análise foi dividida em uma parte que investiga as propriedades físicas relacionadas as rochas salinas, e outra que identifica os efeitos do

comprimento dos elementos uniformes sobre o "gap".

A partir dessa análise, constatou-se que as propriedades dependentes da profundidade como a temperatura e a tensão geostática são determinantes no comportamento da camada em termos de deslocamento radial. Já o comprimento uniforme influencia no tamanho do *gap*, mas não de forma proporcional, visto que o posicionamento dos nós não é controlado. O aumento do tamanho do elemento uniforme implica no aumento do risco de ocorrer um *gap* maior.

Outra avaliação feita foi quanto à representatividade da estratégia de acoplamento multicamadas em termos de deslocamento radial. Para esta análise foram gerados mais alguns cenários fictícios para simulação na ferramenta desenvolvida com a consideração de interação entre as camadas unidimensionais, na mesma ferramenta sem a consideração de interação e no *software* comercial Abaqus com uma modelagem bidimensional.

No comparativo feito com a modelagem bidimensional do Abaqus, as curvas de histórico de deslocamento radial da ferramenta com a consideração do acoplamento entre camadas tiveram um comportamento semelhante ao que foi obtido no Abaqus. Dessa forma, a estratégia de múltiplas camadas associadas foi capaz de gerar, nos cenários fictícios criados, resultados mais condizentes com o que acontece na realidade.

Ficou evidente a necessidade de considerar a interação entre camadas devido ao afastamento das curvas que não levam em consideração a associação das mesmas. A ausência da interação ocasionou na falta de estímulo ou amortecimento ao deslocamento radial nos evaporitos com baixa e alta mobilidade respectivamente.

Uma vez que o fechamento de poço foi considerado no sentido negativo, por meio dos gráficos da força de interação, foi observado que as rochas de baixa mobilidade foram estimuladas pelas rochas de alta mobilidade, com a força de interação no sentido negativo, assim como as rochas de alta mobilidade foram amortecidas devido as rochas de baixa mobilidade, com a força de interação no sentido positivo.

Outro aspecto relevante da análise foi a observação de que, tanto pelas curvas de deslocamento radial como pelas curvas de força de interação, as camadas que interagem diretamente com outra de material diferente apresentam força de interação maior. Por isso, as zonas de interface entre materiais são as mais críticas quanto a interação entre camadas.

A consideração do acoplamento entre as camadas unidimensionais é algo relevante para a modelagem correta do problema de repasse de broca, visto que rochas salinas com maior mobilidade passam a se deslocar menos, assim como evaporitos de baixa mobilidade passam a se deslocar mais. Dessa forma, sem a consideração da interação o raio limite de segurança da operação pode ser violado antes do tempo real, o que não é interessante para o andamento da operação.

A fim de dar continuidade a esse trabalho são sugeridas algumas propostas relacionadas ao tema de modelagem da operação de repasse e à estratégia de multicamadas para representação do comportamento de rochas salinas:

- Aplicação do método de redefinição de domínio para a malha no momento em que o

repasse é feito a fim de eliminar o surgimento do *gap*;

- Implementação de algum método incondicionalmente estável para eliminar as instabilidades provocadas pelo dimensionamento da malha juntamente com a estratégia de incremento de tempo adaptativo;
- Incorporação de parâmetros relacionados à operação de repasse, a fim de que a mesma não seja representada de forma instantânea e desconsidere a deformação do sal durante a operação de repasse;
- Modelar em algum software de elementos finitos a operação de repasse de broca por meio da desativação de elementos e comparar com o repasse de broca realizado pela estratégia proposta de multicamadas unidimensionais.



## REFERÊNCIAS

- AGOSTINI, C. E. *Modelagem da Dinâmica e Análise de Vibrações de Colunas de Perfuração de Poços de Petróleo em Operações de Backreaming*. Dissertação (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- ANP. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural - Maio 2018*. [S.l.], 2018. Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim\\_Mensal-Producao\\_Petroleo\\_Gas\\_Natural/Boletim-Producao\\_maio-2018.pdf](http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/boletins-anp/Boletim_Mensal-Producao_Petroleo_Gas_Natural/Boletim-Producao_maio-2018.pdf)>.
- \_\_\_\_\_. *Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural*. [S.l.], 2019. Acessado: 03-04-2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>>.
- ARAÚJO, C. N. *Um Modelo Simplificado para a Simulação do Comportamento Viscoso de Rochas Salinas para a Previsão do Fechamento de Poços*. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal de Alagoas, 2009.
- ARAÚJO, C. N. *Desenvolvimento de um Elemento Finito para Modelagem do Comportamento de Poços Verticais em Rochas Salinas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, 2012.
- ARAÚJO, C. N. *et al.* Um modelo simplificado para a previsão da taxa de fechamento de poços em rochas salinas. In: *30th Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*. Búzios: [s.n.], 2009.
- BAAR, C. A. *Applied Salt-Rock Mechanics*. Amsterdam: Elsevier, 1977.
- BELTRÃO, R. L. C. *et al.* Challenges and new technologies for the development of the pre-salt cluster, Santos basin, Brazil. In: *OTC 19880*. Houston: [s.n.], 2009.
- BORGES, R. G. *Avaliação Numérica de Perturbações de Tensões Associadas a Estruturas Salíferas e suas Influências na Estabilidade de Poços*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- BOTELHO, F. V. C. *Análise Numérica do Comportamento Mecânico do Sal em Poços de Petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.
- BRESOLIN, G. *Simulação do Comportamento Dúctil de Rochas Salinas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- COSTA, A. M. *Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de Escavações Destinadas à Mineração Subterrânea*. Dissertação (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984.
- COSTA, A. M.; POIATE JÚNIOR, E. Rochas salinas na indústria do petróleo: Aspectos relacionados à reologia e à perfuração de rochas salinas. In: *Sal: Geologia e Tectônica*. São Paulo: Editora Beca, 2008. cap. 17.
- COSTA, P. V. M. *et al.* Underground salt caverns opened by solution mining for brine production and storage of natural gas. In: *SBMR*. Goiânia: [s.n.], 2014.

- DAHMANI, L.; HYNES, L. Enhancing well construction for more efficient well abandonment. In: *SPE-186392-MS SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Jakarta: [s.n.], 2017.
- FALCÃO, J. L. Perfuração de formações salíferas. In: *Sal: Geologia e Tectônica: Exemplos nas Bacias Brasileiras*. 1ª. ed. [S.l.]: Editora Beca, 2008. cap. 18.
- FIRME, P. A. L. P. *Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.
- FIRME, P. A. L. P. *et al.* Creep constitutive modeling applied to the stability of pre-salt wellbores through salt layers. In: *ARMA 14-7459*. Minneapolis: [s.n.], 2014.
- FRAGA, C. T. C. *et al.* Challenges and solutions to develop brazilian pre-salt deepwater fields. In: *WORLD PETROLEUM CONCIL. 21st World Petroleum Congress*. Moscou, 2014.
- GONÇALVES, G. G. *Estudo Paramétrico da Influência da Temperatura na Análise Termomecânica Durante a Escavação em Rochas Salinas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, 2011.
- GRAVINA, C. C. *Simulação numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- HUNSCHE, U.; HAMPEL, A. Rock salt - the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. v. 52, p. 271–291, 04 1999.
- JEFFREYS, H. Rock creep and thermal instability. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, v. 1, n. 2, p. 162–163, 1958.
- KEMPKEY, N. *Production from offshore pre-salt oil deposits has increased Brazil's oil production*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34132>>.
- KHADELI, K.; DATCHEVA, M.; SCHANZ, T. Geomechanical behaviour of rocks salt: Assessment of existing models. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- LOMNITZ, C. Creep measurements in igneous rocks. *The Journal of Geology*, v. 64, n. 5, p. 473–479, 1956. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086/626379>>.
- MINKLEY, W.; LÜDELING, C. Deep borehole disposal in salt rocks. In: *ARMA 16-410*. Houston: [s.n.], 2015.
- MINKOFF, S. E.; KRIDLER, N. M. A comparison of adaptive time stepping methods for coupled flow and deformation modeling. In: *Applied Mathematical Modelling*. [S.l.: s.n.], 2005.
- MOHRIAK, W.; SZATMARI, P. Introdução às propriedades químicas e físicas dos evaporitos. In: *Sal: Geologia e Tectônica*. São Paulo: Editora Beca, 2009.
- MUNSON, D. E.; FOSSUM, A. F.; SENSEY, P. E. Approach to first principles model prediction of measured wipp in situ room closure in salt. In: *ARMA 80-0673*. Morgantown: [s.n.], 1989.
- OSTADHASSAN, M.; TAMINI, N. Mechanical behaviour of salt rock at elevated temperature. In: *ARMA 14-7122*. Minneapolis: [s.n.], 2014.

PETROBRAS. *Completamos dez anos de produção no pré-sal*. [S.l.], 2018. Acessado: 25-03-2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/completamos-dez-anos-de-producao-no-pre-sal.htm>>.

\_\_\_\_\_. *Pré-Sal*. [S.l.], 2019. Acessado: 25-03-2019. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>.

POIATE JÚNIOR, E.; COSTA, A. M.; FALCÃO, J. L. Well design for drilling through thick evaporite layers in Santos-Brazil. In: *IADC/SPE 99161*. Miami: [s.n.], 2006.

REDDY, J. N. *An Introduction to Continuum Mechanics - with Applications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008.

SAMUEL, R.; MIRANI, A. Vibration modeling and analysis under backreaming condition. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston: [s.n.], 2015.

SCHLUMBERGER. *Oilfield Glossary*. [S.l.], 2019. Acessado: 10-03-2019. Disponível em: <<https://www.glossary.oilfield.slb.com/>>.

SHAMES, I. H.; COZZARELLI, F. A. *Elastic and Inelastic Stress Analysis*. New York: Prentice-Hall International, 1997.

SOUZA, L. Z. *Estudo do Estado da Arte da Perfuração Direcional de Poços de Petróleo*. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

TAVARES, R. M. *Interpretação e Análise de Dados de Perfuração em Poços de Petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2006.

TERRA, A. O.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. Os desafios do pré-sal brasileiro: um estudo da logística do campo de Tupi. In: *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. Resende: [s.n.], 2014.

VRÅLSTAD, T. *et al.* Plug & abandonment of offshore wells: Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, 2019.

YANG, C.; DAEMEN, J. J. K.; YIN, J. H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999.

YARIM, G.; RITCHIE, G. M.; MAY, R. B. A guide to successful backreaming: Real-time case histories. In: *SPE Annual Conference and Exhibition*. Denver: [s.n.], 2008.

YARIM, G. *et al.* Stuck pipe prevention - a proactive solution to an old problem. In: *SPE Annual Conference and Exhibition*. Anaheim: [s.n.], 2007.