

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

JONATHAN FERREIRA FRANCISCO

**CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DO REPASSE EM POÇOS  
VERTICAIS EM ROCHAS SALINAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MACEIÓ  
2020

JONATHAN FERREIRA FRANCISCO

**CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DO REPASSE EM POÇOS  
VERTICAIS EM ROCHAS SALINAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages  
CTEC / UFAL

Coorientador: Me. Ricardo Albuquerque Fernandes  
LCCV / CTEC / UFAL

MACEIÓ  
2020

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

F819c Francisco, Jonathan Ferreira.

Contribuição à modelagem do repasse em poços verticais em rochas salinas / Jonathan Ferreira Francisco. – 2020.  
41 f. : il., figs., grafs e tabs. color.

Orientador: Eduardo Nobre Lages.

Coorientador: Ricardo Albuquerque Fernandes.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 40-41.

1. Poços de petróleo – Perfuração. 2. Rochas salinas. 3. Fluência. 4. Simulação computacional. 5. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDU: 622.276: 004

*"O fracasso é uma possibilidade aqui. Se as coisas não estão falhando, você não está inovando o suficiente."*

*Elon R. Musk*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar coragem, força e por ser o caminho da verdade em todos os dias de minha vida.

Aos meus pais, Sandrilene e Fabio, minhas maiores inspirações, por todo amor, dedicação, carinho, conselhos e lições que me deram ao longo da minha caminhada. E à toda minha família por serem minha base e sempre acreditarem que eu podia sempre mais do que imaginava.

Aos meus amigos de colégio e de infância: Davi, Yeshua, Levi, Maria Helena, Laís, Lucas, Talvanes, Teomar, Marcelo e Bulhões, sou eternamente grato por permanecerem firmes na amizade, apesar da distância.

Àqueles que me acompanharam durante a maior parte da graduação, meus amigos e colegas da Turma de 2015.1 e, principalmente, Felipe, Joyce, Talita e Jennifer. Manifesto minha gratidão por estarem sempre presentes, nos momentos felizes e nos mais difíceis. Vocês eram responsáveis por grande parte da minha alegria na UFAL. Dedico essa conquista a vocês.

Ao professor Eduardo Nobre, pelas brilhantes e desafiadoras aulas de Resistência dos Materiais, pela orientação, pela paciência e toda a atenção sempre prestada.

Ao Ricardo, pela coorientação neste trabalho, pela disponibilidade, prestatividade e auxílio na resolução de problemas.

À Catarina pela atenção, dúvidas esclarecidas e por me acompanhar nas pesquisas desde a iniciação científica.

Ao professor William, pela oportunidade de ingressar no LCCV, pela confiança e todo conhecimento passado.

Ao Laboratório de Computação Científica e Visualização, pela infraestrutura de ponta, essencial para o desenvolvimento de tantos projetos no setor de Óleo e Gás no Brasil.

Aos colegas de Petrosynergy, pelo companheirismo e oportunidade de crescimento profissional.

À Petrobras, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

FRANCISCO, Jonathan. Contribuição à modelagem do repasse em poços verticais em rochas salinas. 2020. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2020.

O constante aumento da demanda energética mundial é motivo da busca por novas fontes de hidrocarbonetos. Especialmente no Brasil, destaca-se a expansão acelerada da exploração de petróleo e gás em águas ultraprofundas nas bacias marginais que compõem a região do Pré-Sal. Esse tipo de exploração apresenta diversos desafios operacionais a serem superados, dentre eles, está a existência de camadas de sal ao longo da trajetória dos poços. A presença de rochas evaporíticas eleva a complexidade das operações de perfuração, uma vez que, ao atravessá-las, o seu mecanismo de fluência (deformação contínua sob um estado de tensão constante) leva a deformações na direção do fechamento do poço. A depender da intensidade da deformação, é possível que haja aprisionamento da coluna de perfuração e problemas na descida do revestimento. Portanto, operações de repasse da broca (*backreaming*) podem ser necessárias para recondicionar o diâmetro do poço ao seu estado original. Assim, torna-se importante a simulação computacional do problema, de forma a auxiliar na tomada de decisão durante a perfuração e na avaliação técnica e econômica de projetos de poços. O presente trabalho aborda a simulação computacional do repasse da broca por meio do Método dos Elementos Finitos, buscando contribuir para uma modelagem efetiva e simplificada do problema ao considerar uma metodologia de remoção de elementos e remalhamento localizado devido à operação de repasse. Para validação da estratégia são apresentados alguns resultados para permitir a comparação com abordagens já verificadas. A metodologia proposta tornou possível eliminar o erro anteriormente causado pela desativação de elementos para representar o repasse, melhorando a precisão e o realismo das simulações.

**Palavras-chave:** Rochas salinas. Perfuração. Simulação computacional. Repasse.

## ABSTRACT

FRANCISCO, Jonathan. Contribution to the modeling of backreaming in vertical wells in salt rocks. 2020. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2020.

The constant increase in world energy demand is the reason for the search for new sources of hydrocarbons. Especially in Brazil, the accelerated expansion of oil and gas exploration in ultra-deep waters in the marginal basins of Pre-Salt region stands out. This type of exploration presents several operational challenges to be overcome, among which is the existence of salt layers along the wells trajectory. The presence of evaporite rocks increases the complexity of drilling operations, as their creep mechanism (continuous deformation under a constant stress state) leads to deformations in the direction of the well closure. Depending on the intensity of the deformation, there may be imprisonment of the drill string and problems while running casing. Therefore, backreaming operations may be required to recondition the diameter of the well to its original state. Thus, the computational simulation of the problem is important to assist in decision making during drilling and in the technical and economic evaluation of well projects. The present work approaches the computational simulation of the backreaming through the Finite Element Method, seeking to contribute to an effective modeling of the problem by considering an element removal methodology and located remeshing due to the backreaming operation. To validate the proposed strategy, results are presented in order to allow the comparison with already verified approaches. The proposed methodology made it possible to eliminate the error previously caused by deactivating elements to represent the backreaming operation, improving the precision and realism of the simulations.

**Keywords:** Salt rocks. Drilling. Computational simulation. Backreaming.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução das Reservas de Petróleo no “pós-sal” e “pré-sal <sup>1</sup> ” . . . . .	10
Figura 2 – Evolução das Reservas de Gás Natural no “pós-sal” e “pré-sal <sup>1</sup> ” . . . . .	11
Figura 3 – Maiores depósitos de sal ao redor do mundo. . . . .	14
Figura 4 – Estágios da fluência. . . . .	16
Figura 5 – Influência da temperatura na fluência. . . . .	17
Figura 6 – Modelos reológicos básicos: a) Hooke; b) Newton; c) Saint-Venant. . . . .	17
Figura 7 – Representação do repasse da broca em poço direcional. . . . .	19
Figura 8 – Elemento isoparamétrico com três nós (L3). . . . .	21
Figura 9 – Funções de forma do elemento L3. . . . .	22
Figura 10 – Camada isolada de rocha com espessura unitária e com poço em evidência. . . . .	23
Figura 11 – <i>Gap</i> entre o raio inicial e o primeiro nó após o repasse. . . . .	24
Figura 12 – Representação da malha composta por elementos uniformes e não-uniformes. . . . .	25
Figura 13 – Estratégia modificada para simulação do repasse. . . . .	26
Figura 14 – Estratégia de mapeamento para os campos de tensão e deformação. . . . .	27
Figura 15 – Modelo axissimétrico do poço após a passagem da broca. . . . .	28
Figura 16 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 1, com elementos uniformes. . . . .	30
Figura 17 – Evidência do <i>gap</i> após os repasses no Cenário 1, com elementos uniformes. . . . .	31
Figura 18 – Evidência do instante em que segundo repasse é necessário no Cenário 1, com elementos uniformes. . . . .	32
Figura 19 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 1, sem elementos uniformes. . . . .	33
Figura 20 – Evidência do <i>gap</i> após os repasses no Cenário 1, sem elementos uniformes. . . . .	33
Figura 21 – Instante em que segundo repasse é necessário no Cenário 1, sem elementos uniformes. . . . .	34
Figura 22 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 2, com elementos uniformes. . . . .	35
Figura 23 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 2, sem elementos uniformes. . . . .	36
Figura 24 – Evidência do <i>gap</i> após o repasses no Cenário 2, com elementos uniformes. . . . .	37
Figura 25 – Evidência do <i>gap</i> após os repasses no Cenário 2, sem elementos uniformes. . . . .	37



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas fixas. . . . .	29
Tabela 2 – Parâmetros dos Cenários 1 e 2. . . . .	29
Tabela 3 – Parâmetros da malha e da simulação. . . . .	29

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gas Natural e Biocombustíveis
MMbbl	Milhões de barris
MMm <sup>3</sup>	Milhões de metros cúbicos

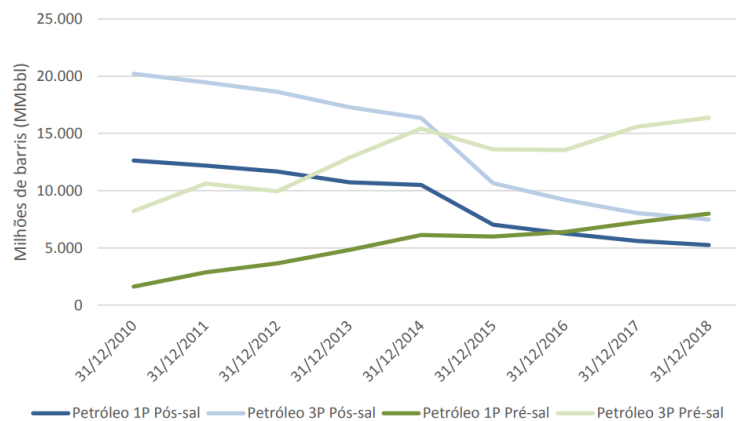
## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>–</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>		<b>Relevância e Motivação do Estudo</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>		<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
<b>1.3</b>		<b>Síntese dos Capítulos</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>–</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>		<b>Rochas Salinas</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1</b>		<b>Relação das Rochas Salinas com o Petróleo</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>		<b>Fluência do Sal</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1</b>		<b>Estágios da Fluência</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2</b>		<b>Modelos Constitutivos de Fluência</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2.1</b>		<b>Modelos Empíricos</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2.2</b>		<b>Modelos Reológicos</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2.3</b>		<b>Mecanismo Duplo de Deformação</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2.4</b>		<b>Mecanismo Duplo Melhorado</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>		<b>Operação de Repasse</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>–</b>	<b>FORMULAÇÃO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>		<b>Método dos Elementos Finitos</b>	<b>21</b>
<b>3.1.1</b>		<b>Formulação Isoparamétrica</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>		<b>Considerações do Modelo</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>		<b>Representação do Repasse</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>		<b>Metodologia Modificada de Repasse</b>	<b>25</b>
<b>3.4.1</b>		<b>Mapeamento dos Campos Nodais</b>	<b>25</b>
<b>3.4.2</b>		<b>Mapeamento dos Campos do Elemento</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>–</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>		<b>Cenário 1</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>		<b>Cenário 2</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>–</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>38</b>
<b>5.1</b>		<b>Continuidade do Trabalho</b>	<b>38</b>
		<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, novos desafios surgiram na indústria do petróleo, especialmente na área da exploração *offshore* de hidrocarbonetos. O aumento da demanda energética mundial, além das grandes descobertas das bacias de Campos e Santos, transformaram o pré-sal<sup>1</sup> brasileiro no foco dos maiores investimentos do setor. Em 2018, as reservas 1P (provadas)<sup>2</sup> eram da ordem de aproximadamente 8.000 MMbbl (milhões de barris) de óleo, conforme Figura 1, e 200.000 MMm<sup>3</sup> (milhões de metros cúbicos) de gás (Figura 2). Além disso, o pré-sal confirma seu grande impacto na produção brasileira a cada ano, sendo responsável por 59,8% do volume total produzido no país, segundo o Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural de Junho de 2019 (ANP, 2019a).

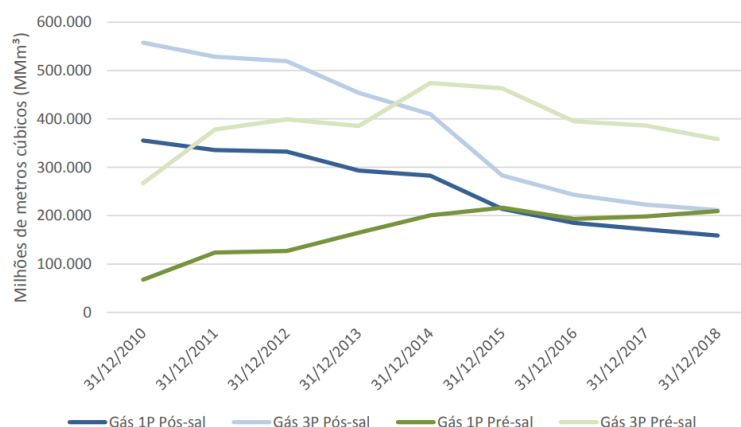
Figura 1 – Evolução das Reservas de Petróleo no “pós-sal” e “pré-sal<sup>1</sup>”.



Fonte: ANP (2019b).

<sup>1</sup> Pré-sal – jazidas no horizonte geológico denominado pré-sal, em campos localizados na área definida no inciso IV do caput do art. 2º da Lei nº 12.351, de 2010.

<sup>2</sup> As reservas podem ser categorizadas como Provadas (1P), Provadas e Prováveis (2P) ou Provadas, Prováveis e Possíveis (3P). Para caracterizar uma reserva com o Provada, Provável ou Possível, a probabilidade de que a quantidade recuperada seja igual ou maior que a estimativa deverá ser de pelo menos 90%, 50% e 10%, respectivamente, quando são utilizados métodos probabilísticos.

Figura 2 – Evolução das Reservas de Gás Natural no “pós-sal” e “pré-sal<sup>1</sup>”.

Fonte: ANP (2019b).

Espessas camadas de rochas salinas podem ser encontradas na trajetória dos poços perfurados para alcançar esses reservatórios nas bacias marginais brasileiras, como Campos e Santos. Apesar de serem estruturas favoráveis ao aprisionamento de hidrocarbonetos, especialmente devido aos baixos valores de porosidade e permeabilidade, as camadas de sal comumente elevam a complexidade das perfurações. Isto ocorre por conta da grande mobilidade característica de rochas com comportamento de fluência, como halita, taquidrita e carnalita. A alteração no estado de tensões durante a perfuração leva a deformações elásticas e viscosas que, a depender de sua intensidade, podem causar o fechamento do poço (OROZCO et al., 2018).

Reduções significativas do diâmetro do poço aberto em relação ao diâmetro original da broca podem ocasionar o aprisionamento da coluna de perfuração, dificuldades na descida do revestimento e até mesmo o seu colapso (FERREIRA, 2014). De acordo com Muqem, Weekse e Al-Hajji (2012), o aprisionamento de coluna é responsável por atrasos na execução do projeto e aumento expressivo nos custos de perfuração no mundo todo.

Para evitar o problema, a manobra de repasse da broca (ou *backreaming*), pode ser executada. Neste tipo de operação, retira-se a coluna de perfuração em rotação, circulando o fluido do poço (YARIM; RITCHIE; MAY, 2008). Dessa forma, o poço pode ser reconicionado ao seu diâmetro de projeto.

### 1.1 Relevância e Motivação do Estudo

O estudo do comportamento mecânico do sal é de grande importância no atual contexto da indústria do petróleo brasileira, uma vez que a maior parte da exploração está direcionada a regiões com a presença de camadas de rochas salinas. Durante a perfuração, torna-se essencial garantir o não aprisionamento de equipamentos devido à fluência do sal induzindo o fechamento do poço. Logo, ferramentas computacionais que simulam o comportamento do sal em operações de perfuração e repasse mostram-se úteis, principalmente na fase de projeto do poço.

Nesse sentido, Gravina (1997) desenvolveu um programa computacional baseado no Método dos Elementos Finitos para estudar o deslocamento das paredes do poço considerando a deformação elástica e a fluência no seu estágio primário. Botelho (2008) realizou análises de deslocamentos, deformações e tensões na parede do poço e na vizinhança por meio de análises planas e axissimétricas com o uso do programa comercial de elementos finitos ABAQUS.

Araújo (2009) propôs um modelo axissimétrico simplificado em elementos finitos para a previsão do fechamento de poços verticais, considerando elementos unidimensionais e uma camada isolada de rochas salinas. A linha de trabalho teve continuidade com a incorporação da transferência de calor pelo acoplamento termomecânico fraco e da expansão da formulação para elementos bidimensionais por Gonçalves (2011).

Araújo (2012) incorporou ao modelo elementos finitos associados a funções interpoladoras não polinomiais capazes de representar o problema com poucos graus de liberdade, fornecendo resultados mais rápidos e precisos. Seguindo a mesma linha de trabalho, Paranhos Sobrinho (2018) incorporou a estratégia do repasse da broca no desenvolvimento do projeto. A metodologia adotada para essa representação do repasse consiste na desativação dos elementos de malha que estejam entre o raio limite mínimo e o raio original do poço. Entretanto, por menores que sejam os elementos, gera-se um *gap* entre o raio inicial e o primeiro nó ativo.

Propõe-se neste trabalho uma implementação que poderá contribuir para o aumento na precisão nas simulações do problema, uma vez que se pretende eliminar o erro associado ao *gap* criado pelo tratamento da malha de elementos finitos na operação do repasse.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho estuda a simulação computacional da operação de repasse de broca em poços verticais que atravessam camadas de sal, buscando contribuir para a modelagem numérica do problema ao considerar uma metodologia de readequação do elemento finito durante o tratamento da malha após o repasse. Como objetivos específicos no desenvolvimento deste trabalho pode-se citar:

- Implementar um algoritmo computacional que considere readequação do elemento na operação de repasse.
- Avaliar a eficiência da modelagem por meio de um estudo comparativo com outras metodologias de tratamento da malha.

## 1.3 Síntese dos Capítulos

Nesta seção são apresentados, de forma sucinta, os principais temas abordados em cada capítulo do presente trabalho. O Capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica acerca da origem das rochas evaporíticas, bem como sua influência na composição de um sistema petrolífero. Também são apresentados os aspectos relativos ao seu comportamento mecânico característico,

assim como seus modelos constitutivos, além de características operacionais da manobra de repasse.

No Capítulo 3, discutem-se o Método dos Elementos Finitos e as estratégias utilizadas no desenvolvimento do modelo proposto.

A apresentação e análise dos resultados são realizadas no Capítulo 4, cujas conclusões são discutidas no Capítulo 5.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca das rochas salinas e sua relação com a indústria do petróleo, além de aspectos operacionais da manobra de repasse.

### 2.1 Rochas Salinas

Os evaporitos ou rochas salinas são rochas de origem sedimentar formadas pela precipitação de minerais a partir de uma solução salina (BRESOLIN, 2010). Em geral, o ambiente sedimentar de sua formação é caracterizado por uma taxa de evaporação maior que o seu influxo de água. Apesar de haver formação de evaporitos em ambientes continentais, como em lagunas e lagos salgados (FERREIRA, 2014), os depósitos de maiores volume e expressão são originários da água do mar (GRAVINA, 1997), como destacado com a cor branca na Figura 3.

Figura 3 – Maiores depósitos de sal ao redor do mundo.



Fonte: Farmer et al. (1996).

Segundo Ferreira (2014), os depósitos evaporíticos apresentam grande variabilidade mineralógica, especialmente devido a diferentes solubilidades dos componentes originais. Logo, costumam precipitar-se em ordem definida com a deposição progressiva de carbonatos e sulfatos, seguidos por halita, silvita carnalita, bischofita e taquidrita (MOHRIAK; SZATMAN; ANJOS, 2008).

#### 2.1.1 Relação das Rochas Salinas com o Petróleo

A ocorrência de petróleo em uma bacia é associada necessariamente a uma série de fatores. Uma acumulação convencional é resultado da existência de uma rocha geradora rica em matéria orgânica de qualidade e uma rocha reservatório com porosidade e permeabilidade adequadas. Além disso, é preciso haver condições favoráveis para migração entre a rocha geradora e a rocha reservatório, bem como uma rocha capeadora que evite a exudação dos



hidrocarbonetos. Para cumprir tal função, a rocha capeadora deve ser impermeável (THOMAS, 2004).

As rochas salinas são praticamente impermeáveis, logo, é natural que acumulações de hidrocarbonetos estejam associadas à presença de estruturas selantes formadas por sal. Segundo Willson e Fredrich (2005), depósitos consideráveis de sal existem em regiões produtoras de hidrocarbonetos, a exemplo do Golfo do México e da margem atlântica de Angola. No Brasil, as bacias marginais da costa leste são a principal zona de ocorrência de rochas salinas, a exemplo das bacias de Campos, Santos, Espírito Santo e Sergipe-Alagoas, onde foram encontrados diversos reservatórios da camada conhecida como pré-sal.

## 2.2 Fluência do Sal

Apesar de possuírem características favoráveis ao trapeamento de hidrocarbonetos, a presença de camadas de rochas salinas, em grandes profundidades e altas temperaturas (características do pré-Sal brasileiro), aumenta o risco e a complexidade das operações de perfuração e cria novas dificuldades na manutenção da integridade de poço (WILLSON; FREDRICH, 2005), especialmente devido ao fenômeno de fluência.

A fluência, ou *creep*, é definida pela deformação constante ao longo do tempo que alguns materiais apresentam mesmo sob um estado constante de tensão. O estado de tensão desviador que ocorre após a passagem da broca e modificação do domínio do maciço gera uma deformação que, de maneira geral, é mais pronunciada no sal em relação a rochas não evaporíticas. Segundo Araújo (2009), tal comportamento ocorre devido ao elevado grau de discordância e pela falta de átomos na estrutura cristalina desse tipo de rocha.

Cada tipo de rocha apresenta composição mineralógica, teor de água e impureza diferentes e, portanto, taxas de deformação por fluência distintas. Segundo Costa et al. (2011), a taquidrita é um dos sais com a maior mobilidade, enquanto a halita, mesmo também sendo um sal de cloreto, apresenta baixa taxa de deformação por fluência. Essa taxa de deformação, também chamada de velocidade de fluência, é comumente representada por

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

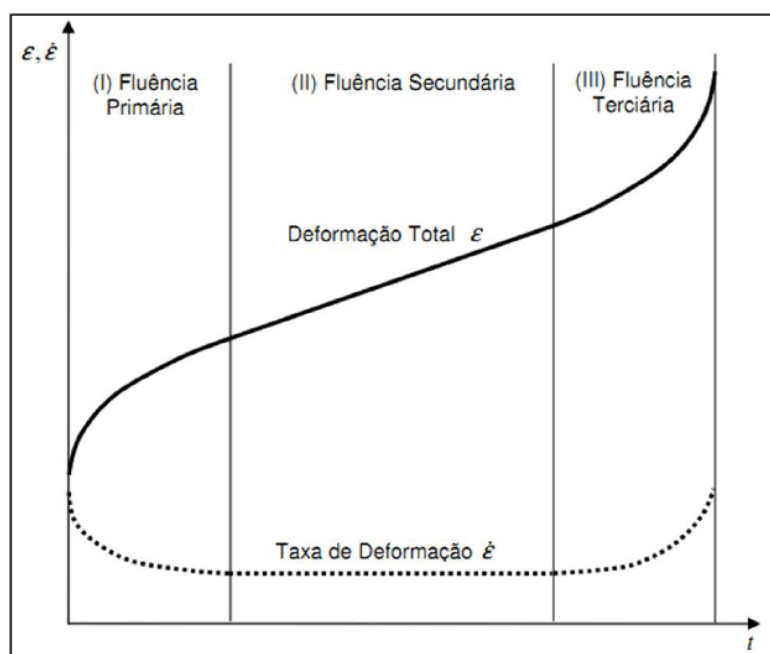
em que  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação ou velocidade de fluência,  $d\varepsilon$  é a variação de deformação e  $dt$  é o intervalo de tempo.

### 2.2.1 Estágios da Fluência

A variação da deformação com o tempo é caracterizada em laboratório com o uso de um corpo sólido submetido a um nível constante de tensão e temperatura. Em geral, a fluência é dividida em três estágios principais de deformação (primário, secundário e terciário), conforme Figura 4.

A deformação elástica inicial  $\varepsilon_0$  ocorre logo após a aplicação da carga constante sobre o material (JEREMIC, 1994). Em seguida, ocorre o estágio primário de fluência (ou estágio

Figura 4 – Estágios da fluência.



Fonte: Costi (2006).

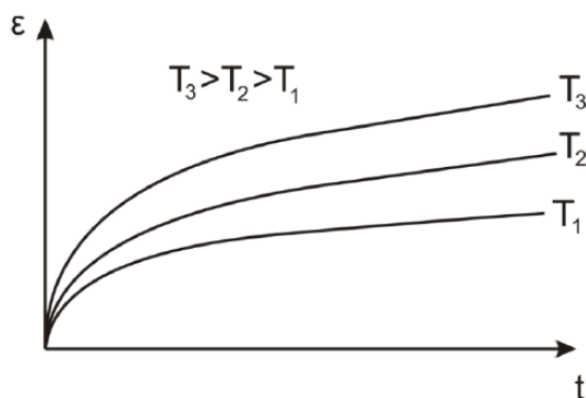
transiente), caracterizado pela diminuição da velocidade de deformação até atingir um valor constante. Segundo Fjær et al. (1992), nessa fase, a deformação se reduz a zero caso a tensão seja reduzida a zero, não restando deformação permanente.

O segundo estágio, também chamado regime permanente ou estacionário, apresenta velocidade de deformação constante com o tempo. Normalmente é a fase dominante do regime de fluência. No caso da remoção repentina da tensão, somente a deformação elástica é recuperada, resultando em uma deformação permanente.

Alguns materiais podem passar rapidamente para o terceiro estágio de fluência sob altas temperaturas e tensões. Nesse estágio, a taxa de deformação passa a aumentar até a ruptura do material sólido (FERREIRA, 2014). Não há a recuperação total das deformações sofridas nesse estágio.

A Figura 5 apresenta três curvas de deformação *versus* tempo para amostras submetidas a temperaturas diferentes, o que evidencia a influência do aumento da temperatura na deformação por fluência. Segundo Paranhos Sobrinho (2018), as altas temperaturas e pressões às quais estão submetidas as rochas do pré-sal justificam a importância dada ao estudo do seu comportamento em poços de petróleo.

Figura 5 – Influência da temperatura na fluência.



Fonte: Gonçalves (2011).

## 2.2.2 Modelos Constitutivos de Fluência

As relações que procuram descrever o comportamento mecânico dos materiais a partir de suas propriedades são chamadas de modelos constitutivos, assim, define-se por equação constitutiva qualquer formulação que relacione o estado de tensões e deformações de um corpo (GRAVINA, 1997). Os modelos em questão são classificados em empíricos, reológicos e físicos (SANTOS, 2019).

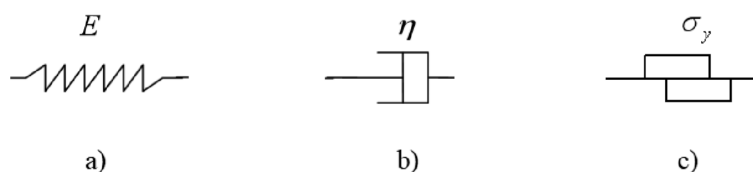
### 2.2.2.1 Modelos Empíricos

A abordagem empírica envolve a observação e ajuste do comportamento de um material a uma curva típica de fluência e seu resultado experimental (ARAÚJO, 2009), para posterior dedução de uma equação matemática representativa. Em geral esses modelos representam somente a fluência primária.

### 2.2.2.2 Modelos Reológicos

Os modelos reológicos, por sua vez, buscam a representação dos materiais submetidos a diferentes carregamentos levando em consideração aspectos macroscópicos, relacionando tensão, deformação e tempo. Alguns modelos clássicos são o de Hooke, Newton e Saint-Venant, apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Modelos reológicos básicos: a) Hooke; b) Newton; c) Saint-Venant.



Fonte: Paranhos Sobrinho (2018).

O modelo de Hooke é idealizado por um elemento de mola para representar o comportamento elástico linear, ou seja, materiais em que a deformação é relacionada direta e linearmente com a tensão aplicada, e, logo após o alívio da tensão, o material recupera a sua condição indeformada.

O modelo de Newton representa o material com comportamento viscoso linear, simplificado pela representação de um amortecedor, em que não há a recuperação da configuração inicial após a retirada da tensão.

O modelo de Saint-Venant é utilizado na representação de um material perfeitamente elástico e idealizado por um elemento de atrito. As deformações são permanentes e só ocorrem após a tensão atingir o valor da tensão de escoamento.

### 2.2.2.3 Mecanismo Duplo de Deformação

De maneira geral, as contribuições brasileiras no campo do estudo da fluência do sal estão relacionadas ao uso de leis físicas constitutivas baseadas do mecanismo duplo de deformação. Paranhos Sobrinho (2018) apresenta esse modelo como uma simplificação do mecanismo baseado em três mecanismos de deformação: *dislocation climb*, *dislocation glide* e mecanismo indefinido.

O mecanismo *dislocation climb* é predominante quando o regime de tensão diferencial é baixo e a temperatura é de moderada a alta (MUNSON; DEVRIES, 1991), uma vez que está relacionado com a agitação dos átomos de um corpo.

O mecanismo *dislocation glide* é predominante sobre a fluência estacionária quando o material está sob altos níveis de tensão. Este mecanismo está relacionado com modelos micromecânicos de deslizamento.

Já o mecanismo indefinido é denominado desta maneira por não estar associado a modelos micromecânicos, sendo determinado empiricamente. Segundo Ferreira (2014), é o mecanismo que controla a fluência em regimes de baixa temperatura e tensão.

A simplificação do modelo consiste na desconsideração do mecanismo de *dislocation climb*, resultando na equação constitutiva

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left( \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n e^{\left( \frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT} \right)}, \quad (2)$$

em que  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação no regime permanente,  $\dot{\varepsilon}_0$  é a taxa de deformação de referência no regime permanente,  $Q$  é a energia de ativação,  $R$  é a constante universal dos gases,  $\sigma_{ef}$  é a tensão efetiva de fluência,  $\sigma_0$  é a tensão efetiva de referência,  $n$  é a o expoente de tensão das rochas salinas e  $T$  e  $T_0$  são as temperaturas corrente e de referência da rocha, respectivamente.

#### 2.2.2.4 Mecanismo Duplo Melhorado

Firme et al. (2018) apresentam uma revisão do modelo de mecanismo duplo. Uma vez que a formulação não considerava os efeitos do estágio transiente de fluência, pois a fase estacionária era acoplada diretamente à deformação elástica inicial.

As leis de mecanismo duplo melhorado (*enhanced double-mechanism creep laws*) apresentadas utilizam o acoplamento entre o mecanismo duplo e funções transientes ou uma função de potência. Desta forma, é mais precisa a previsão dos estágios iniciais da fluência (*early-stage creep*).

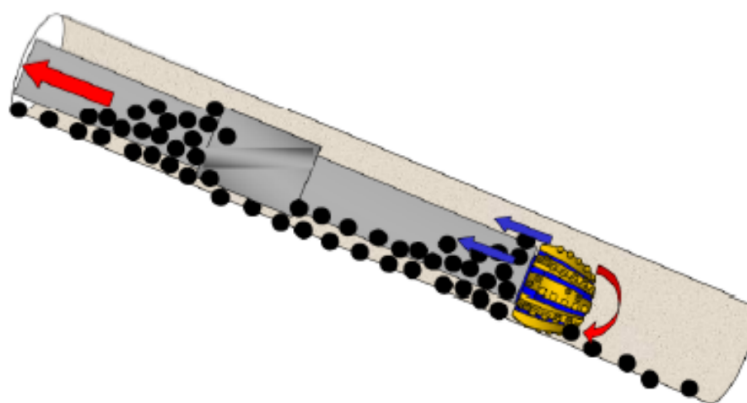
A contribuição do mecanismo duplo melhorado para a previsão dos estágios iniciais da fluência se mostra relevante, especialmente no monitoramento do fechamento de poços em rochas salinas (FIRME et al., 2018).

### 2.3 Operação de Repasse

Nas operações de perfuração convencionais, a coluna de perfuração é retirada após ser atingido o objetivo de cada fase, e logo em seguida, é realizada a limpeza e o condicionamento do poço para a descida do revestimento. Normalmente, a coluna pode ser retirada livremente, entretanto, casos de fechamento excessivo ou desmoronamento das paredes do poço podem dificultar a subida da broca. Diversos fatores podem provocar essa resistência, como o desmoronamento de formações inconsolidadas ou a mobilidade de rochas evaporíticas. Problemas de prisão de coluna são responsáveis por milhões de dólares de custos adicionais anualmente (MUQEEM; WEEKSE; AL-HAJJI, 2012), especialmente devido à perda de equipamentos e ao aumento do tempo da perfuração.

Operações de repasse podem ser realizadas a fim de retirar a coluna de perfuração e dar continuidade à operação ou de prevenir o fechamento excessivo do poço. Yarim, Ritchie e May (2008) definem o repasse como a prática de retirar a coluna em rotação e circulação de fluido. A Figura 7 ilustra o repasse da broca em um poço.

Figura 7 – Representação do repasse da broca em poço direcional.



Este tipo de manobra se tornou mais comum com a popularização de sondas do tipo *top drive*, uma vez que as sondas convencionais, equipadas com mesa rotativa e *kelly*<sup>1</sup> inviabilizavam a retirada da composição de tubos em rotação.

Apesar de contribuir para o condicionamento do diâmetro do poço aos parâmetros de projeto, a realização do repasse não deve ser feita em algumas situações (YARIM; RITCHIE; MAY, 2008). A prática indiscriminada da manobra pode causar justamente o efeito contrário ao desejado, contribuindo para o desmoronamento do poço em regiões pouco consolidadas, como camadas de folhelhos fraturados. Esse tipo de rocha é sensível à agitação mecânica da coluna de perfuração, podendo gerar o acúmulo de cascalhos que dificultam a limpeza efetiva do poço aberto. Além disso, segundo Agostini (2015), a falta de contato da broca com o fundo do poço potencializa a instabilidade mecânica da coluna, que pode colidir contra as formações durante a subida.

---

<sup>1</sup> Elemento tubular de parede externa hexagonal ou quadrada que transmite a rotação originada na mesa rotativa para a coluna de perfuração.

### 3 FORMULAÇÃO E ASPECTOS COMPUTACIONAIS

A abordagem computacional do problema de fechamento do poço foi amplamente estudada pelo método dos elementos finitos nos trabalhos desenvolvidos por Araújo (2009), Gonçalves (2011), Araújo (2012) e Paranhos Sobrinho (2018). Neste capítulo discutem-se a formulação utilizada na análise de elementos finitos, as considerações do modelo proposto e a metodologia de repasse desenvolvida.

#### 3.1 Método dos Elementos Finitos

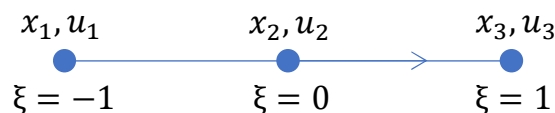
A análise numérica por meio Método dos Elementos Finitos é uma das mais aplicadas em problemas de engenharia. Sua grande utilização, especialmente na área de mecânica estrutural, se deve aos resultados satisfatórios que apresenta na determinação dos estados de tensão e deformação de sólidos sujeitos a carregamentos externos. A abordagem já é utilizada rotineiramente no desenvolvimento de motores, navios e na indústria da construção civil (COOK; MALKUS; PLESHA, 1989).

Segundo Araújo (2009), o método é fundamentado numa subdivisão do meio contínuo em elementos menores, cujo comportamento isolado é conhecido. Assim, é possível modelar e solucionar numericamente problemas cuja resolução por meios analíticos clássicos é complexa ou até mesmo impossível. O comportamento no interior dos subdomínios finitos é aproximado por funções de interpolação (ou de forma), buscando garantir a continuidade do meio discretizado. Tais funções permitem que informações originalmente nodais sejam calculadas no domínio do elemento.

##### 3.1.1 Formulação Isoparamétrica

Neste trabalho, a simulação do fechamento das paredes de um poço em rocha salina é realizada a partir da utilização de elementos isoparamétricos de barra com três nós (L3), conforme Figura 8.

Figura 8 – Elemento isoparamétrico com três nós (L3).



Fonte: Autor (2020).

Na formulação isoparamétrica, a relação entre deslocamentos e coordenadas em qualquer ponto do elemento com os deslocamentos e coordenadas nos pontos nodais é obtida pelas

mesmas funções de forma, logo:

$$x = \mathbf{N}\tilde{\mathbf{x}} \quad (3)$$

$$u = \mathbf{N}\tilde{\mathbf{u}}, \quad (4)$$

em que  $x$  e  $u$  são os valores de coordenada e do deslocamento no domínio físico,  $\mathbf{N}$  o vetor das funções de forma e  $\tilde{\mathbf{x}}$  e  $\tilde{\mathbf{u}}$  os vetores de coordenadas e deslocamentos nos pontos nodais.

As Equações (3) e (4) podem ser expandidas para as formas:

$$x = \tilde{x}_1 N_1(\xi) + \tilde{x}_2 N_2(\xi) + \tilde{x}_3 N_3(\xi) \quad (5)$$

e

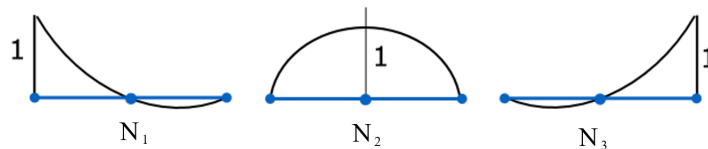
$$u = \tilde{u}_1 N_1(\xi) + \tilde{u}_2 N_2(\xi) + \tilde{u}_3 N_3(\xi) \quad (6)$$

em que  $\xi$  é a coordenada paramétrica no domínio genérico  $[-1, 1]$  e  $N_1$ ,  $N_2$  e  $N_3$  as funções de forma nos pontos nodais

$$N_1 = \xi \frac{(\xi - 1)}{2}; N_2 = (1 + \xi^2); N_3 = \xi \frac{(1 + \xi)}{2}. \quad (7)$$

Observa-se que as funções de interpolação são definidas de tal forma que o valor de  $N_i$  é unitário no nó  $i$  e nulo nos demais pontos nodais, conforme Figura 9.

Figura 9 – Funções de forma do elemento L3.



Fonte: Autor (2020).

### 3.2 Considerações do Modelo

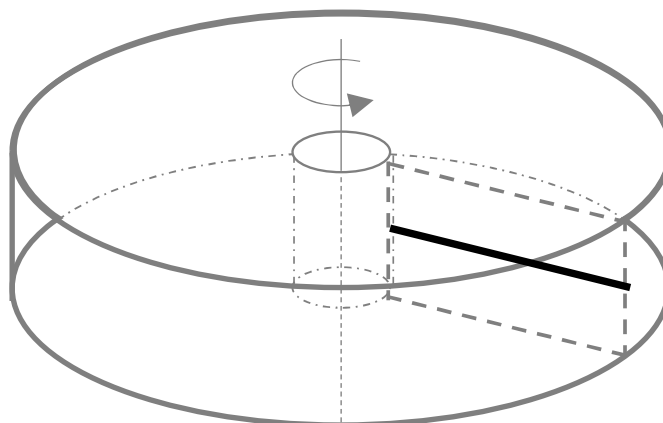
Os desenvolvimentos apresentados neste trabalho têm como objetivo contribuir para uma melhor representação da operação de repasse de broca em poços verticais que atravessam rochas salinas. Para tanto, foram realizadas modificações na estratégia de recondicionamento do poço ao diâmetro original utilizada por Paranhos Sobrinho (2018). A ferramenta é baseada no Método dos Elementos Finitos associado a uma representação axissimétrica do poço.

Considera-se uma camada isolada de rocha com espessura unitária (ver Figura 10), logo, as variáveis de estado só apresentam variações na direção radial. Assim, é possível discretizar a malha em elementos unidimensionais a fim de garantir menor custo computacional (ARAÚJO, 2009). O modelo constitutivo utilizado para o sal é o Mecanismo Duplo de Deformação e os



efeitos associados ao peso do fluido de perfuração e à tensão geostática atuantes na camada são considerados, assim como a temperatura.

Figura 10 – Camada isolada de rocha com espessura unitária e com poço em evidência.



Fonte: Autor (2020).

A análise é iniciada após a execução do furo (passagem da broca). A presença do fluido de perfuração impõe uma pressão nas paredes do poço, que, neste modelo, é função apenas do peso específico do fluido e da profundidade da camada. A não consideração das diferenças existentes entre a pressão exercida por fluidos em movimento e fluidos em repouso se deve à grande distância entre as zonas de sal e a superfície. Desta forma, a diferença se torna desprezível se comparada à grandeza da pressão hidrostática do fluido na camada em análise.

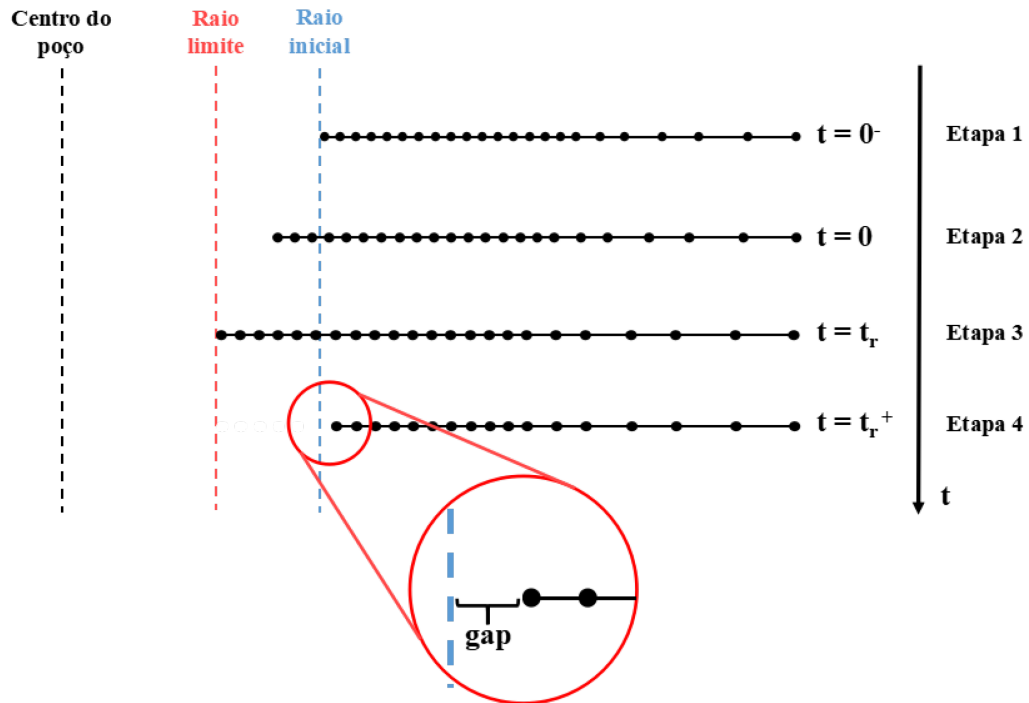
A passagem da broca e a presença do fluido de perfuração provocam uma alteração no estado de tensão do maciço salino. Assim, é analisada inicialmente a deformação elástica instantânea, que não depende do tempo. Como no instante inicial a deformação viscosa é nula, os deslocamentos elásticos podem ser calculados a partir da solução de um sistema linear (SANTOS, 2019). Em seguida é iniciado um processo iterativo de integração temporal para o cálculo das deformações viscosas devido à fluência, que são dependentes do tempo. O detalhamento da formulação utilizada pode ser encontrado em Paranhos Sobrinho (2018) e Araújo (2009).

### 3.3 Representação do Repasse

A estratégia de repasse proposta por Paranhos Sobrinho (2018) consiste na desativação dos elementos da malha que estejam entre um raio crítico definido e o raio inicial, restabelecendo o raio do poço simulado ao raio de projeto. A cada instante de tempo é verificado se o nó mais próximo ao centro do poço ultrapassou o limite de segurança, para assim ser realizado um novo repasse. A consistência da solução é garantida pelo acondicionamento das matrizes e dos vetores envolvidos no cálculo dos deslocamentos, uma vez que os nós desativados deixam de contribuir para a malha.

Por outro lado, a desativação dos nós gera um espaço vazio (ou *gap*) entre o primeiro nó ativo após a operação do repasse e o raio inicial do poço, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – *Gap* entre o raio inicial e o primeiro nó após o repasse.



Fonte: Paranhos Sobrinho (2018).

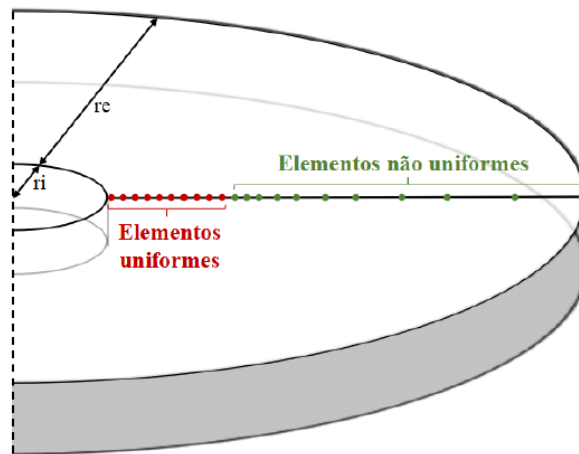
A implementação desenvolvida por Paranhos Sobrinho (2018) utiliza-se de elementos de tamanho uniforme para a discretização inicial da malha na região próxima à borda do poço para reduzir o erro associado a esse espaço (Figura 12). Tendo em vista o objetivo de indicar a necessidade do repasse, o *gap* pode levar a resultados subestimados de deslocamento na direção radial após o primeiro repasse, uma vez que o raio do poço após o tratamento da malha supera o raio de projeto.

Os demais elementos, não uniformes, têm comprimento definido por uma progressão geométrica que aumenta da região mais próxima do poço à mais afastada, conforme

$$Lu = lu \cdot q^{(i - neu - 1)} \quad (8)$$

em que  $lu$  é o comprimento uniforme,  $q$  é a razão da progressão geométrica,  $i$  o identificador dos nós e  $neu$  o número de elementos uniformes.

Figura 12 – Representação da malha composta por elementos uniformes e não-uniformes.



Fonte: Paranhos Sobrinho (2018).

### 3.4 Metodologia Modificada de Repasse

Neste trabalho, a nova estratégia de repasse consiste na readequação (ou ajuste) do tamanho do primeiro elemento ativo após a desativação daqueles que se encontram entre o raio inicial e o raio limite. Dessa forma, a malha é redefinida para que o nó mais próximo do centro do poço (primeiro nó ativo) esteja no raio inicial de projeto, eliminando o *gap* anteriormente existente. A implementação do algoritmo computacional foi realizada em MATLAB (HANSELMAN; LITTLEFIELD, 2002), de forma a continuar os trabalhos já desenvolvidos no Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) da Universidade Federal de Alagoas. Além disso, a escolha do software também se dá por sua aptidão para realizar operações com as matrizes e vetores de deslocamento, tensões e deformações a cada operação de repasse.

#### 3.4.1 Mapeamento dos Campos Nodais

No problema em questão,  $\lambda$  representa um campo nodal (deslocamento, posição ou força) avaliado no domínio do elemento. Como foi mostrado anteriormente, os campos nodais podem ser calculados pelo uso das funções de interpolação para cada nó, conforme a equação generalizada

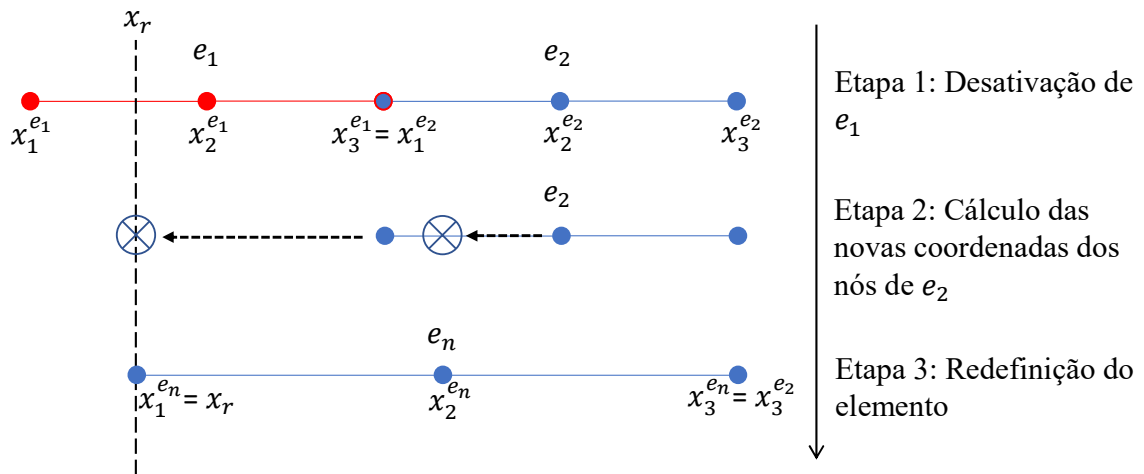
$$\lambda(\xi) = \sum_i N_i(\xi) \lambda_i, \quad (9)$$

em que  $\lambda_i$  é o valor do campo avaliado no nó  $i$ .

A Figura 14 ilustra a estratégia proposta para a readequação dos nós do elemento. De maneira análoga são calculados os deslocamentos ( $u_i$ ). As posições deformadas ( $x_i$ ) e indeformadas ( $X_i$ ) são então relacionadas na forma:

$$x_i = X_i + u_i. \quad (10)$$

Figura 13 – Estratégia modificada para simulação do repasse.



Fonte: Autor (2020).

O primeiro passo para o mapeamento nodal é o cálculo da coordenada paramétrica da linha de corte ( $\xi_r$ ), referente ao elemento a ser desativado ( $e_1$ ). Utilizando a Equação (9), tem-se:

$$x_r = \sum_i N_i(\xi_r)x_i. \quad (11)$$

O deslocamento de  $e_1$  no ponto de coordenada paramétrica  $\xi_r$  é calculado por meio das funções de forma, o que permite a definição da posição indeformada desse ponto ( $X_r$ ) pela Equação (10). O terceiro nó de  $e_2$  não sofre alteração, e define-se que o segundo nó é central na configuração indeformada, ou seja:

$$X_2^{e_2} = \frac{X_r + X_3^{e_2}}{2}. \quad (12)$$

Dessa forma, é finalizada a caracterização nodal do primeiro elemento ativo, denominado  $e_n$ , após o corte.

Observa-se que a metodologia resulta na criação de um elemento maior que  $e_2$ . A opção de não utilizar um elemento menor, reduzindo o tamanho de  $e_1$ , e sim desativá-lo, se dá pela existência, nessa simulação, do incremento de tempo adaptativo.

Segundo Paranhos Sobrinho (2018), 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, A existência de elementos de tamanho pequeno reduz os limites para o incremento de tempo e, por consequência, aumenta o tempo de processamento.

### 3.4.2 Mapeamento dos Campos do Elemento

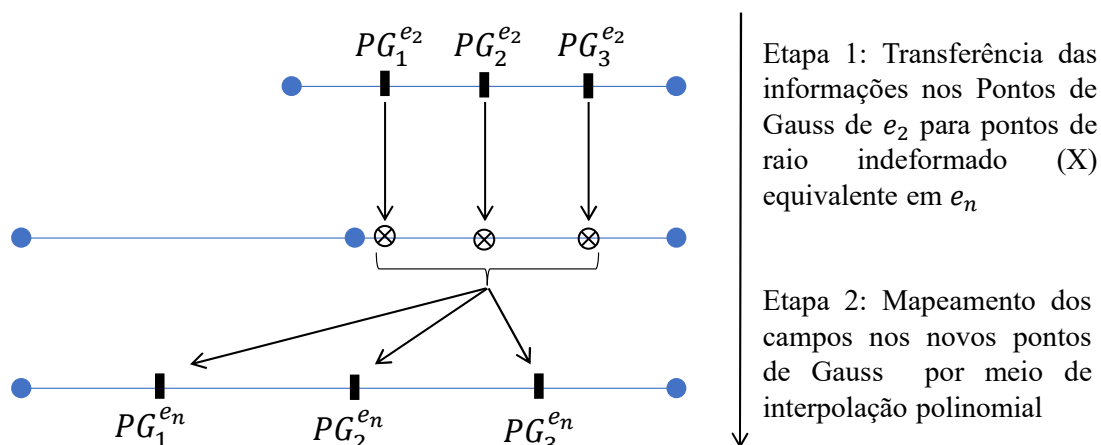
Muitas das integrais utilizadas na aplicação do Método dos Elementos Finitos não são triviais, sendo necessário recorrer a técnicas de integração numérica, como a quadratura de

Gauss, que é uma das mais eficientes técnicas de integração para funções aproximadamente polinomiais (ARAÚJO, 2009).

Definem-se por pontos de Gauss os pontos de ponderação da integração Gaussiana que levam a resultado exato ao se integrar funções polinomiais de grau específico. Para o caso de elementos isoparamétricos de três nós, esses pontos têm as coordenadas paramétricas  $-\sqrt{0,6}$ ,  $0$  e  $\sqrt{0,6}$ , e são onde estão contidas as informações de tensão e deformação dos elementos.

O mapeamento e a transferência dessas informações para a nova configuração do elemento ( $e_n$ ) é realizada utilizando interpolações polinomiais de segundo grau, uma vez que são conhecidos três pontos de Gauss para cada elemento. O primeiro passo para o mapeamento é o cálculo das coordenadas indeformadas  $X_{PG_i}$  dos pontos de Gauss de  $e_2$  (antes da readequação do tamanho). Em seguida, calculam-se as coordenadas paramétricas ( $\xi$ ) equivalentes em  $e_n$ , sendo assim transferidos os valores dos campos de interesse para o elemento modificado. Entretanto, as informações precisam ser passadas para os novos pontos de Gauss do elemento, logo, faz-se uso da interpolação mencionada anteriormente.

Figura 14 – Estratégia de mapeamento para os campos de tensão e deformação.



Fonte: Autor (2020).

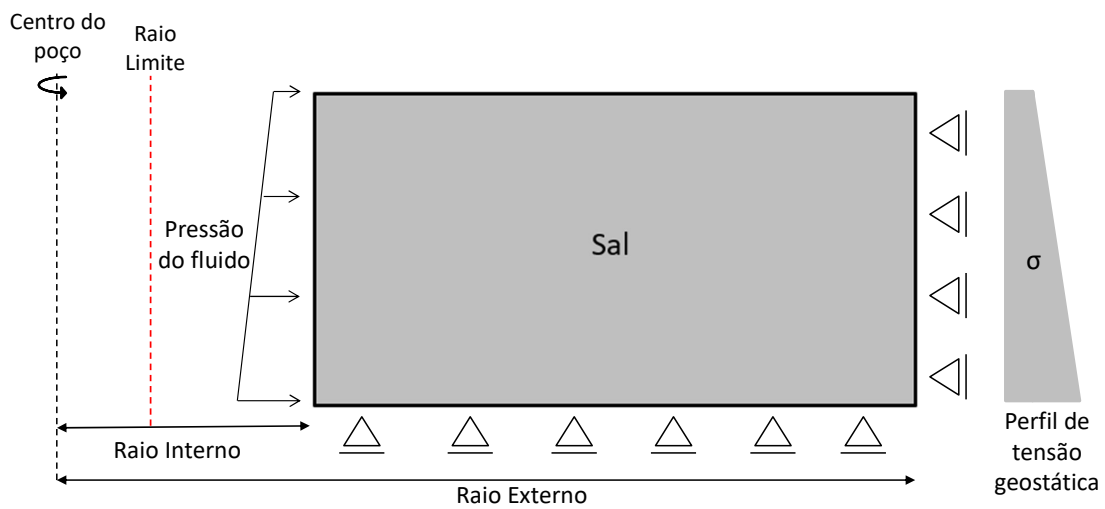
A integração da metodologia apresentada neste trabalho no código MATLAB, já desenvolvido no Laboratório de Computação Científica e Visualização da Universidade Federal de Alagoas, é realizada por meio de uma função que consulta, realiza os mapeamentos e modifica a estrutura de dados dos nós e elementos sempre que o repasse é necessário. Ou seja, a função é chamada apenas caso o critério para a ativação do repasse seja atendido, e em seguida é dada continuidade ao processo iterativo de integração temporal do código original.

#### 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a definição da estratégia para representar o problema de repasse da broca durante a perfuração de zonas de rochas salinas, são definidos os cenários para a verificação das alterações propostas. Os modelos fictícios aqui utilizados são apresentados por Gonçalves (2011).

A Figura 15 apresenta o modelo axissimétrico do poço após a passagem da broca. Conforme mencionado em capítulos anteriores, nesse momento a mudança no estado de tensões provoca deformações elásticas e o início das deformações viscosas, que passam a atuar a favor do fechamento do poço.

Figura 15 – Modelo axissimétrico do poço após a passagem da broca.



Fonte: Autor (2020).

A simulação do fechamento de poços é afetada diretamente por propriedades físicas que alteram as deformações no sal, como temperatura, tensão geostática e peso do fluido de perfuração, além de parâmetros definidos para a geração da malha de elementos finitos (como número e tamanho dos elementos). As propriedades físicas são fixas e estão evidenciadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas fixas.

Parâmetros	
Peso Específico da Água	10 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico do Soterramento	22,56 kN/m <sup>3</sup>
Peso Específico do Sal	21,7 kN/m <sup>3</sup>
Gradiente Térmico do Soterramento	0,03 K/m
Gradiente Térmico do Sal	0,01 K/m
Módulo de Elasticidade do Sal	20,3·10 <sup>7</sup> kN/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson do Sal	0,36
Taxa de deformação viscosa de Referência ( $\dot{\epsilon}_0$ )	1,808·10 <sup>-6</sup> 1/h
Temperatura de referência ( $T_0$ )	359,15 K
Tensão Efetiva de Referência ( $\sigma_0$ )	9910 kN/m <sup>2</sup>
Razão entre Energia de Ativação e Constante Universal dos Gases ( $Q/R$ )	6042,9 K
Expoente das Tensões ( $n_1$ e $n_2$ )	3,23 e 7,55

O modelo de estudo corresponde a um poço vertical com 14,75 polegadas de diâmetro que atravessa uma seção de rocha salina a uma profundidade de 5136 metros. Os parâmetros de dois cenários na camada de estudo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos Cenários 1 e 2.

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2
Lâmina de Água	1852 m	
Espessura de Soterramento	2183 m	
Espessura do Sal	1101 m	
Temperatura Inicial	353,65 K	
Tensão Geostática Original	91660 kN/m <sup>2</sup>	
Peso Específico do Fluido	10,23 kN/m <sup>3</sup>	11,75 kN/m <sup>3</sup>

Na Tabela 3 são apresentados parâmetros da simulação e da malha. Os resultados gerados nesse trabalho consistem nos valores do raio do poço em função do tempo. Assim, é visualizada a realização do repasse e suas consequências para ambas as estratégias de representação dessa operação.

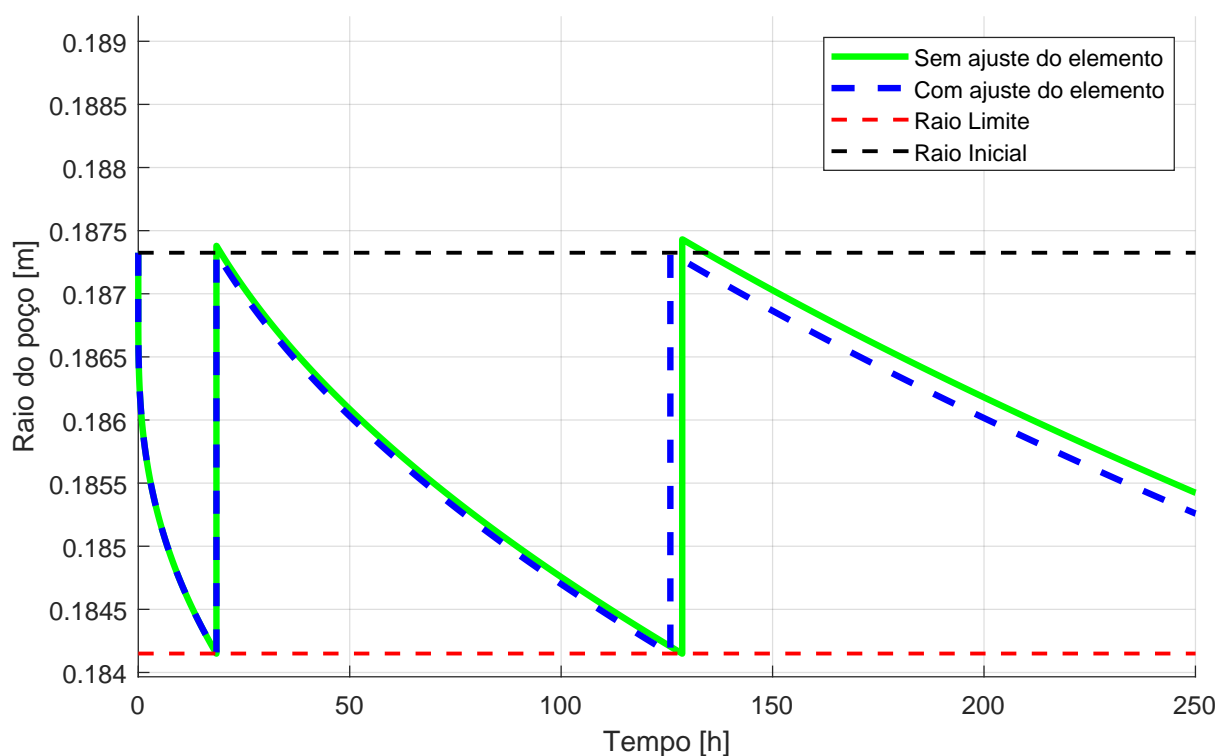
Tabela 3 – Parâmetros da malha e da simulação.

Parâmetros	
Comprimento Uniforme / Comprimento do Primeiro Elemento	0,127 mm
Número de Elementos	200
Razão da Progressão Geométrica (Com Elementos Uniformes)	1,1043
Razão da Progressão Geométrica (Sem Elementos Uniformes)	1,0466
Ordem de Integração da Quadratura Gaussiana	3
Tempo Total de Simulação	250 h

#### 4.1 Cenário 1

A Figura 16 apresenta o comparativo entre a estratégia original, na qual há somente o desligamento dos elementos que passaram do raio inicial (sem adequação ou ajuste do primeiro elemento ativo após o repasse), em relação à estratégia modificada, proposta no presente trabalho, na qual há a readequação do elemento. Para essa análise inicial, utilizam-se 50% dos elementos com tamanho uniforme.

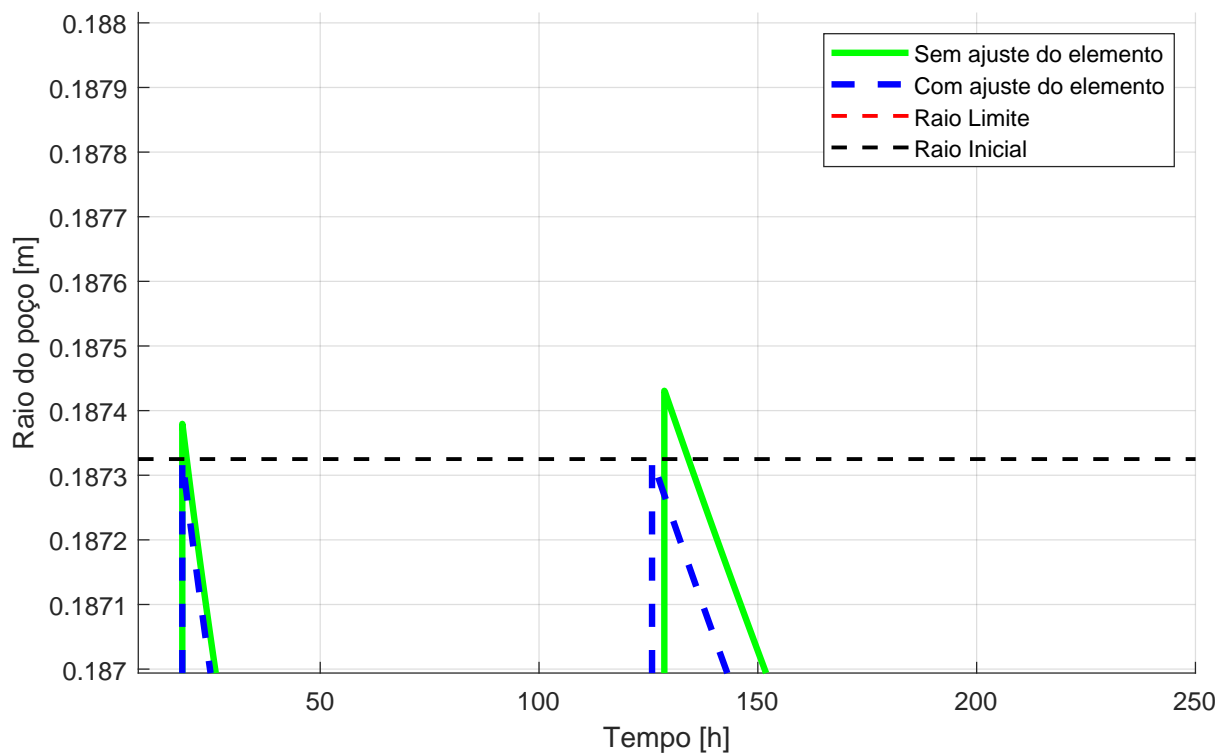
Figura 16 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 1, com elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

Observa-se que, para ambas as metodologias, foram necessários dois repasses para manter o raio do poço dentro do limite aceitável. Entretanto, é notável que, mesmo com os elementos de tamanho uniforme, há a presença do *gap* (evidenciado na Figura 17) após os repasses, o que gera um retardamento do fechamento do poço.

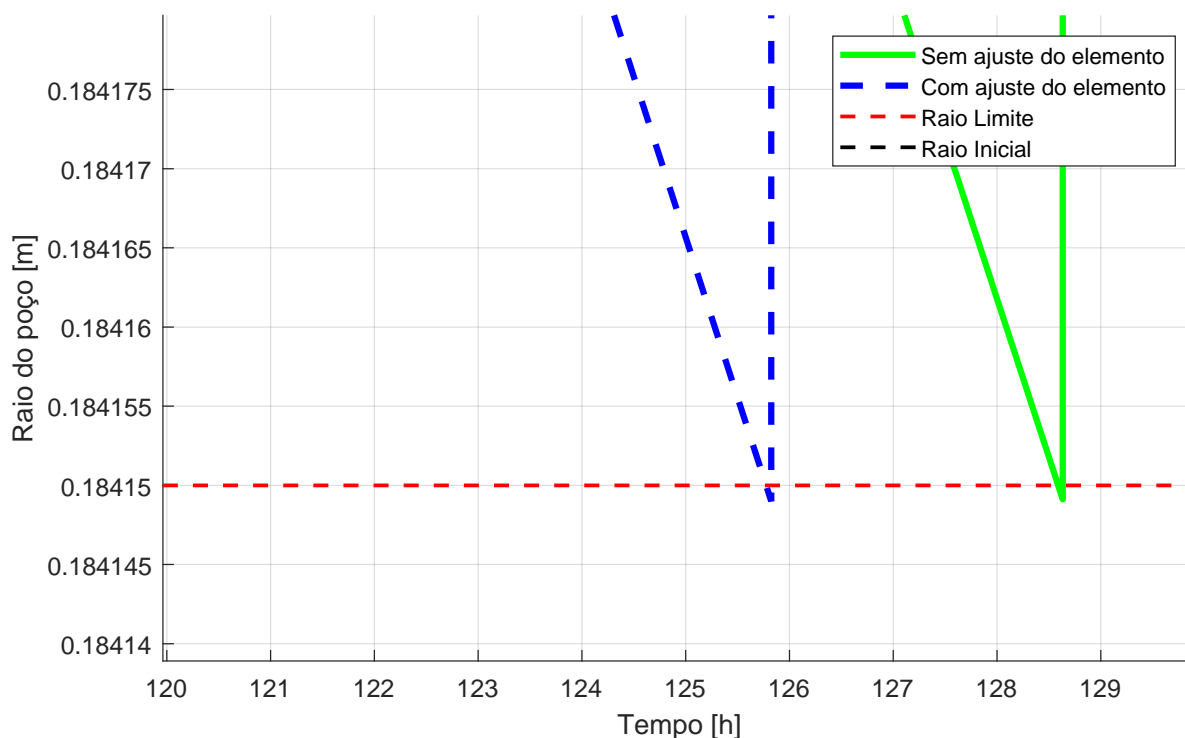


Figura 17 – Evidência do *gap* após os repasses no Cenário 1, com elementos uniformes.

Fonte: Autor (2020).

Com o ajuste do primeiro elemento ativo, o segundo repasse foi necessário 125,82 horas após a primeira passagem da broca (perfuração da camada), enquanto na estratégia original, a necessidade só seria identificada após 128,63 horas, o que equivale a um aumento de 2,2% no tempo de ativação do segundo repasse, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Evidência do instante em que segundo repasse é necessário no Cenário 1, com elementos uniformes.

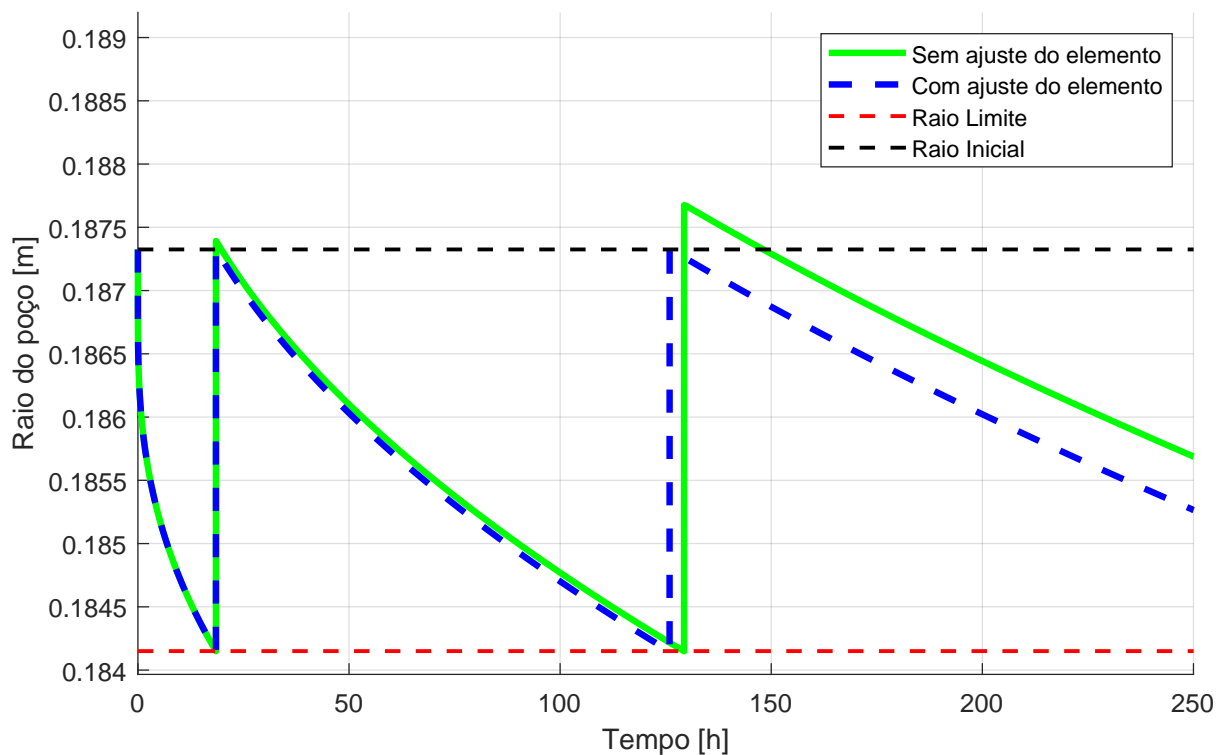


Fonte: Autor (2020).

Outrossim, ao final da simulação, avaliou-se o fechamento radial em relação ao fechamento máximo admitido de 0,125 pol (0,3175 cm). Utilizando o ajuste do primeiro elemento ativo, o fechamento após 250 h correspondeu a 65% do fechamento máximo admitido, enquanto a estratégia original apresentou fechamento de 60%, que equivalem a valores de 0,2067 cm e 0,1902 cm, respectivamente. Ou seja, como esperado, a presença do *gap* promove resultados subestimados de fechamento radial após o primeiro repasse. Os tempos de processamento foram de 253 segundos e 212 segundos, sem e com o ajuste, respectivamente.

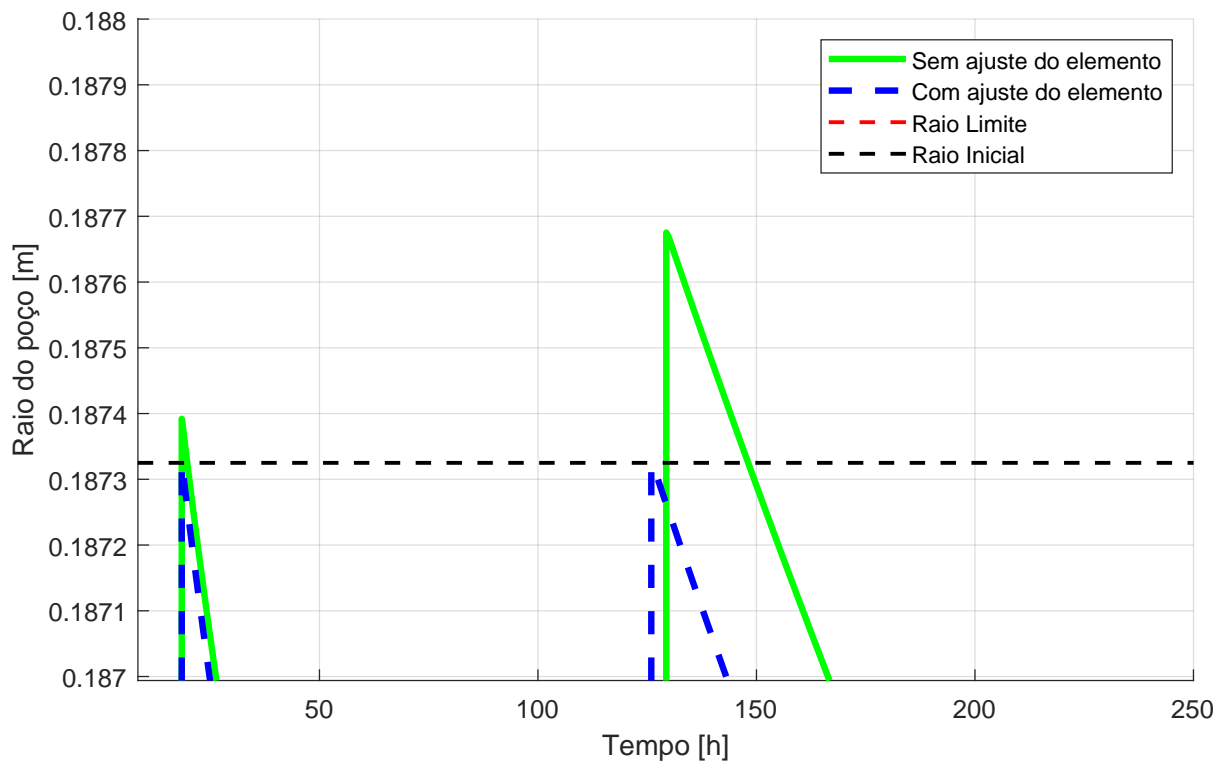
Ao eliminar o uso de elementos de tamanho uniforme, procura-se avaliar se, com um mesmo número de elementos, é possível alcançar resultados consistentes de fechamento. A comparação das duas estratégias de repasse para este caso é apresentada na Figura 19. Nota-se que o não uso de elementos uniformes aumenta o risco de surgirem *gaps* maiores, que diminuem a exatidão das soluções, como mostra a Figura 20.

Figura 19 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 1, sem elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

Figura 20 – Evidência do *gap* após os repasses no Cenário 1, sem elementos uniformes.

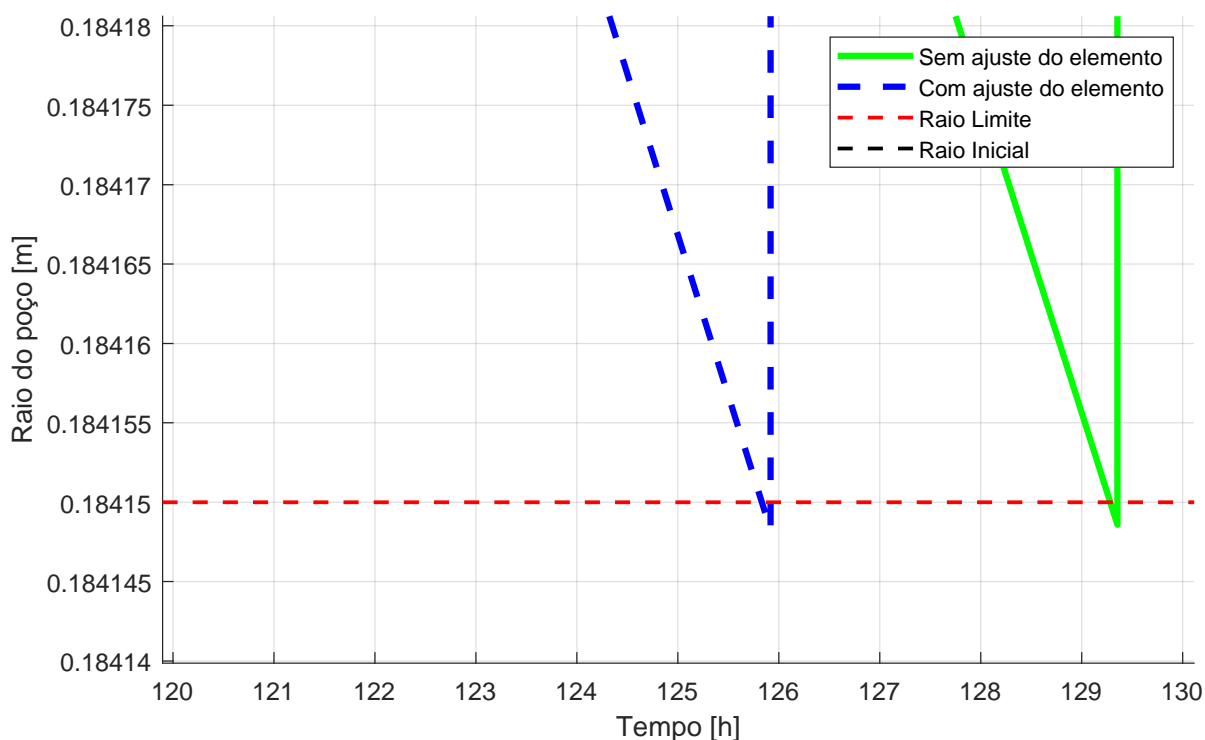


Fonte: Autor (2020).

Na Figura 21, observa-se que, com a metodologia proposta, o segundo repasse foi necessário após 125,91 h após a primeira passagem da broca, enquanto na estratégia original, a necessidade é identificada após 129,35 horas. Além disso, ao final das 250 horas, o fechamento radial foi de 0,2061 cm e 0,1639 cm, com e sem ajuste, respectivamente. Que equivalem a deslocamentos de 65% e 52% em relação ao máximo admitido. Os tempos de processamento foram de 164 segundos e 145 segundos, sem e com o ajuste, respectivamente.

Portanto, pode-se dizer que, se for utilizada estratégia proposta de readequação (ajuste) do primeiro elemento ativo após a desativação dos elementos anteriores, não há a necessidade de fazer uso de elementos de tamanho uniforme, visto que os resultados de fechamento e do tempo em que o repasse é necessário apresentam erros de apenas 0,29% e 0,07%, respectivamente (em relação à simulação do mesmo cenário com o uso de elementos de tamanho uniforme).

Figura 21 – Instante em que segundo repasse é necessário no Cenário 1, sem elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

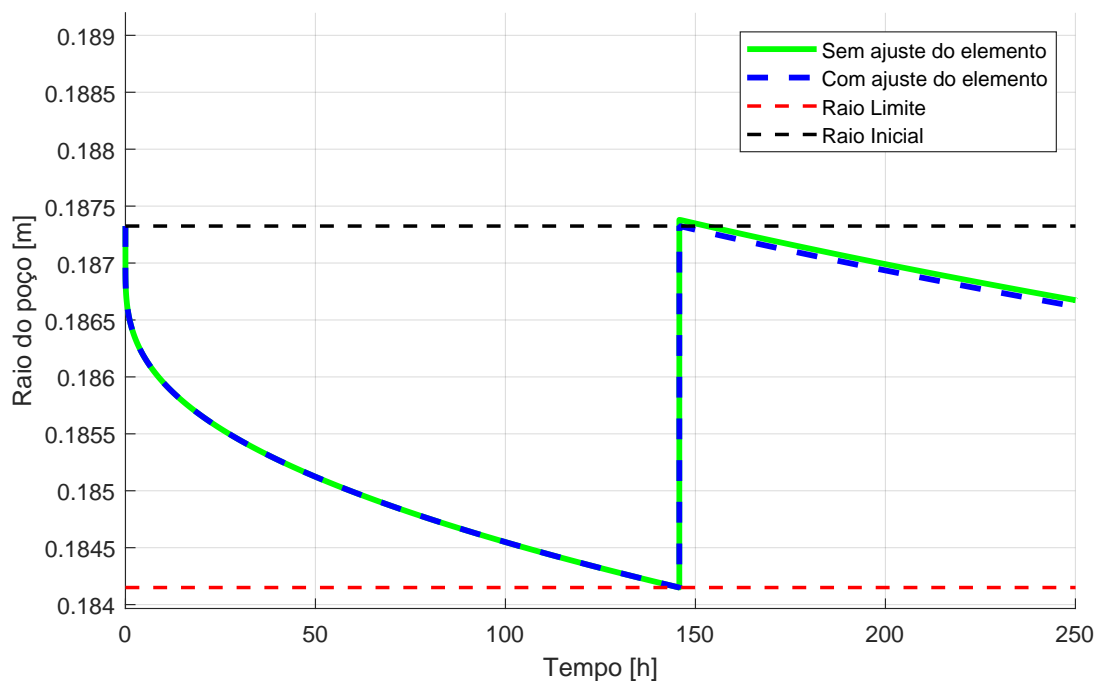
Já utilizando a estratégia original, o *gap* gerado pelo segundo repasse foi 5 vezes maior, o que causou diferenças significativas no fechamento ao final da simulação (de 60% para 52% do fechamento máximo).

## 4.2 Cenário 2

A Figura 22 mostra a comparação das duas estratégias para um poço com as mesmas características, mas com fluido de maior peso específico. Como esperado, a lama de maior

peso exerce uma contrapressão maior sobre a parede da formação salina, conseqüentemente, o deslocamento do sal é menor. No Cenário 2, portanto, apenas um repasse foi necessário.

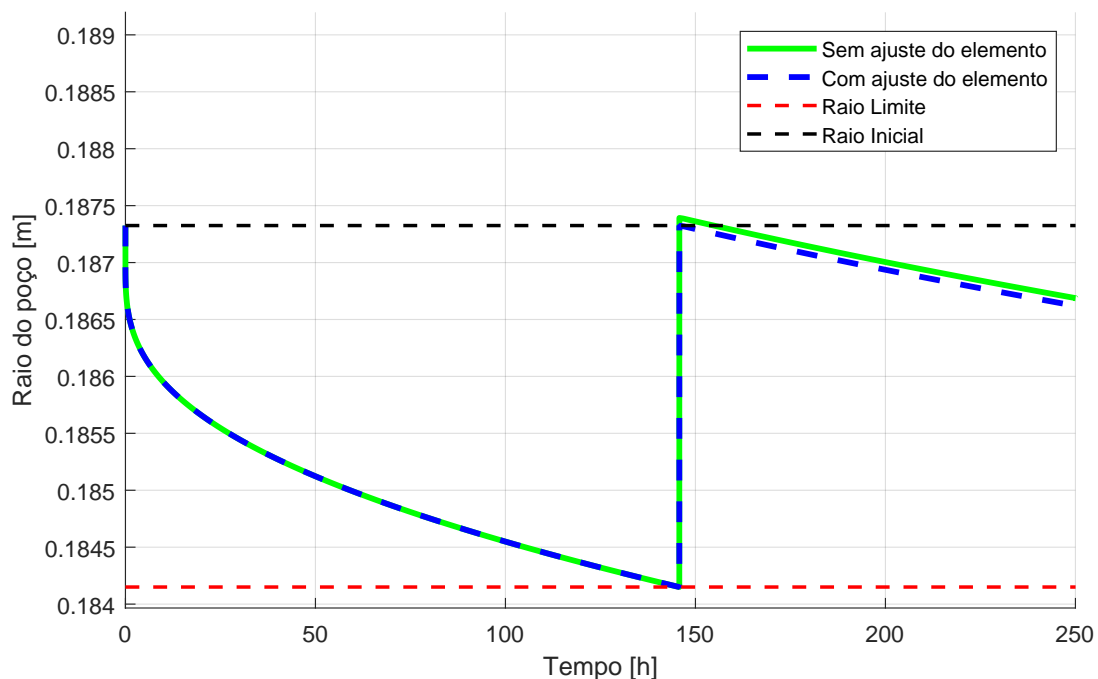
Figura 22 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 2, com elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

Ao final das 250 h, utilizando o ajuste do primeiro elemento ativo, o fechamento correspondeu a 22,5% do fechamento máximo admitido, enquanto a estratégia original apresentou fechamento de 20%, que equivalem a valores de 0,0705 cm e 0,065 cm, respectivamente.

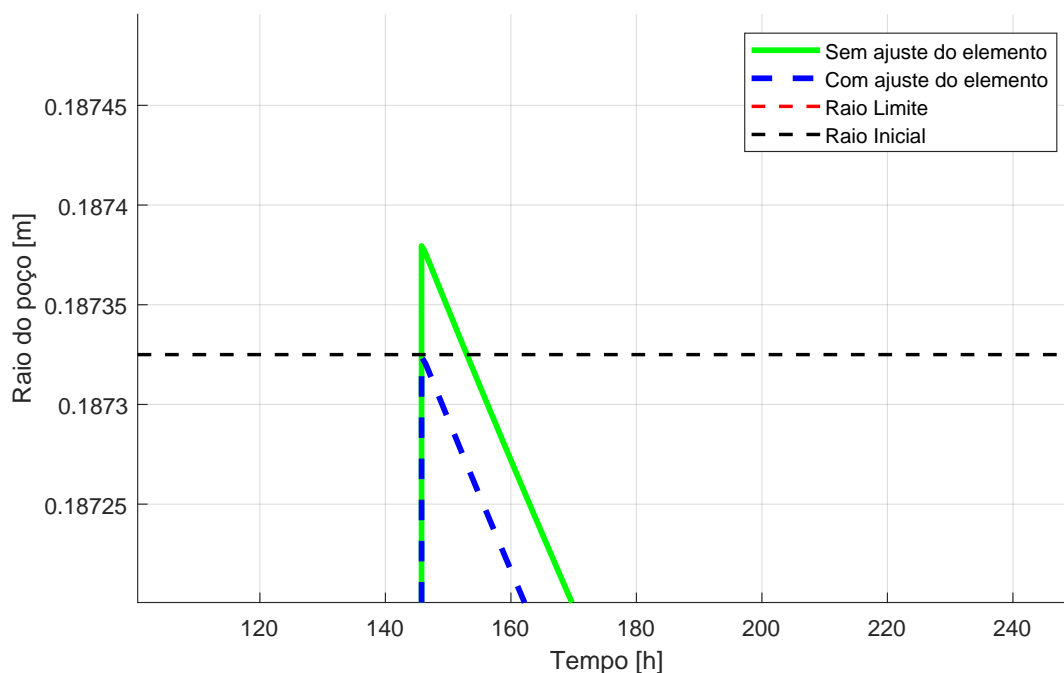
Figura 23 – Gráfico comparativo das duas metodologias de repasse para o Cenário 2, sem elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

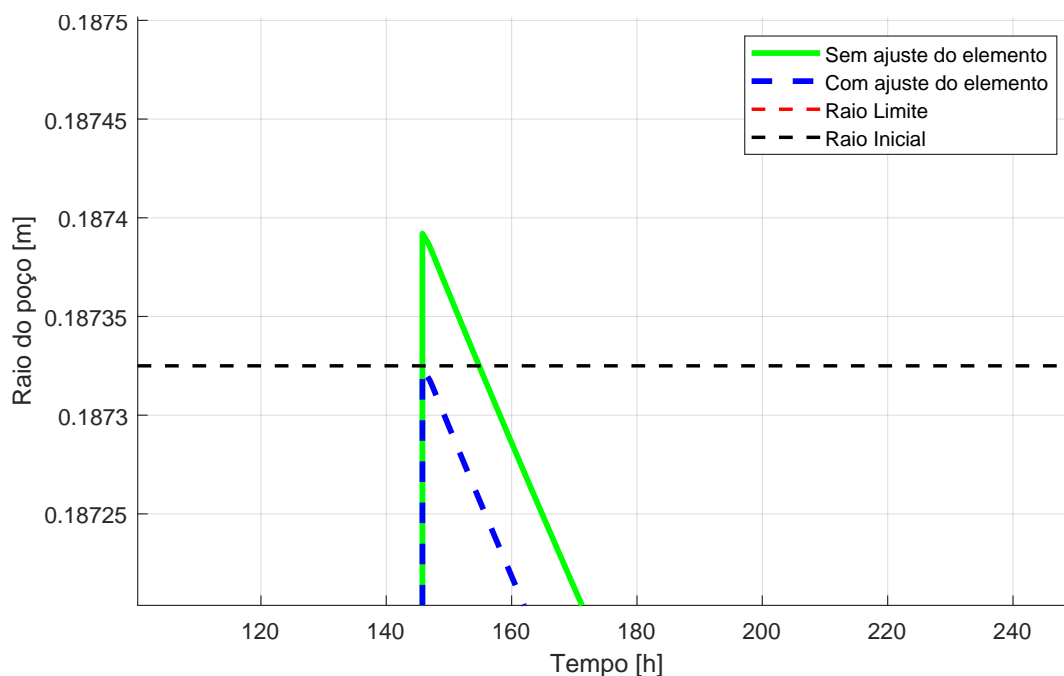
As Figuras 24 e 25 apresentam as dimensões do *gap* nas simulações com e sem elementos uniformes. Nota-se que não houve diferenças significativas no *gap* ao não utilizar elementos uniformes. Os tempos médios de processamento foram de 115 segundos e 105 segundos, respectivamente.

Figura 24 – Evidência do *gap* após o repasses no Cenário 2, com elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

Figura 25 – Evidência do *gap* após os repasses no Cenário 2, sem elementos uniformes.



Fonte: Autor (2020).

Segundo Paranhos Sobrinho (2018), embora o risco de se obter um *gap* grande aumente com o tamanho dos elementos, essa ocorrência não é garantida, pois depende também do posicionamento dos seus nós quando o repasse é feito.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma estratégia para a representação em simulação computacional do repasse da broca em operações de perfuração de poços verticais que atravessam rochas salinas. Devido aos elevados custos computacionais envolvidos na simulação do comportamento de materiais que apresentam comportamentos dependentes do tempo, como o sal, é de suma importância o desenvolvimento de modelos que representem suficientemente bem os fenômenos físicos sem penalizar o tempo total das simulações.

Como discutido nos capítulos anteriores, a metodologia utilizada atualmente, que foi desenvolvida por Paranhos Sobrinho (2018), apesar de eficiente, apresenta limitações relacionadas à readequação da malha de elementos finitos. Tais limitações tornam necessário o uso de elementos pequenos e de tamanho uniforme para evitar erros associados a vazios deixados entre a malha e o raio de projeto do poço após o repasse. Os desenvolvimentos aqui apresentados tornaram possível melhorar a precisão das simulações sem a necessidade de usar esse tipo de elemento.

A metodologia envolveu a readequação do primeiro elemento após a desativação daqueles que estavam entre o raio limite de fechamento e o raio de projeto. Para isso, é realizado um mapeamento dos campos nodais (posição e deslocamento) por meio das funções de forma para um elemento isoparamétrico L3, enquanto os campos do elemento (tensão e deformação) são interpolados para novas posições de interesse a partir das informações contidas nos pontos que levam a integração pela quadratura Gaussiana exata ("Pontos de Gauss").

Definiram-se dois cenários de estudo, mantendo o mesmo modelo físico, mas alterando a composição da malha de elementos finitos e o peso do fluido de perfuração. Uma camada de rocha salina de espessura unitária atravessada por um poço vertical foi representada por um modelo axissimétrico de elementos isoparamétricos unidimensionais de barra (L3) submetidos à tensão geostática e ao peso do fluido de perfuração.

Compararam-se os resultados dos dois cenários utilizando ambas as metodologias e observou-se que o erro associado aos *gaps* causados pela representação do repasse com estratégia original ocasionava resultados subestimados de fechamento radial com o tempo, o que causava um atraso de aproximadamente três horas para que fosse detectada a sua necessidade. Tal fato confirma a importância da modificação proposta no presente trabalho, tendo em vista o uso de programas do tipo para prever a necessidade de repasse, o que pode evitar problemas de segurança devido ao aprisionamento da coluna de perfuração e dificuldades na descida do revestimento.

### 5.1 Continuidade do Trabalho

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a consideração de novos cenários com a aplicação da metodologia alternativa em modelos com múltiplas camadas de rochas salinas



submetidas à interação mútua, e o mapeamento mais completo dos campos associados aos pontos de Gauss, incluindo o uso dos pontos do elemento desativado.

Além disso, recomenda-se a aplicação das recentes pesquisas relacionadas à representação matemática da fluência por meio do mecanismo duplo melhorado, que pode aumentar a precisão das simulações, especialmente durante as fases iniciais da deformação viscosa do sal (*early-stage creep*).

## Referências

- AGOSTINI, C. **Modelagem da Dinâmica e Análise de Vibrações de Colunas de Perfuração de Poços de Petróleo em Operações de Backreaming**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2015. Citado na página 20.
- ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Rio de Janeiro: Superintendência de Desenvolvimento e Produção, 2019. Citado na página 10.
- ANP. **Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural 2018**. Rio de Janeiro: Superintendência de Desenvolvimento e Produção, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- ARAÚJO, C. N. **Um Modelo Simplificado para a Simulação do Comportamento Viscoso de Rochas Salinas para a Previsão do Fechamento de Poços**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 12, 15, 17, 21, 22, 23 e 27.
- ARAÚJO, C. N. **Desenvolvimento de um Elemento Finito para Modelagem do Comportamento de Poços Verticais em Rochas Salinas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 21.
- BOTELHO, F. V. C. **Análise Numérica do Comportamento Mecânico do Sal em Poços de Petróleo**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008. Citado na página 12.
- BRESOLIN, G. **Simulação do comportamento dúctil de rochas salinas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 2010. Citado na página 14.
- COOK, R.; MALKUS, D.; PLESHA, M. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989. Citado na página 21.
- COSTA, A. M. et al. Geomechanics applied to the well design through salt layers in Brazil: A history of success. In: BORJA, R. I. (Ed.). **Multiscale and Multiphysics Processes in Geomechanics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 165–168. ISBN 978-3-642-19630-0. Citado na página 15.
- COSTI, F. **Metodologia numérica aplicada a viscoelasticidade em polímeros**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, 2006. Citado na página 16.
- FARMER, P. et al. Exploring the subsalt. **Oilfield Review**, Netherlands, v. 8, 10 1996. Citado na página 14.
- FERREIRA, Y. **Análise numérica da perfuração de poços de petróleo em evaporitos**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 11, 14, 16 e 18.
- FIRME, P. A. L. P. et al. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. **Acta Geotechnica**, v. 13, p. 1329–1340, 2018. Citado na página 19.

- FJÆR, E. et al. **Petroleum Related Rock Mechanics**. [S.l.]: Elsevier Science, 1992. (Developments in Petroleum Science). ISBN 9780080868912. Citado na página 16.
- GONÇALVES, G. G. **Estudo Paramétrico da Influência da Temperatura na Análise Termomecânica Durante a Escavação em Rochas Salinas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 12, 17, 21 e 28.
- GRAVINA, C. **Simulação numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 12, 14 e 17.
- HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 6 - Curso Completo**. [S.l.]: Clarendon Press, 2002. Citado na página 25.
- JEREMIC, M. **Rock Mechanics in Salt Mining**. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema, 1994. Citado na página 15.
- MOHRIAK, W.; SZATMAN, P.; ANJOS, S. M. C. **Sal: Geologia e tectônica. exemplos de bacias brasileiras**. São Paulo, SP: Beca, 2008. Citado na página 14.
- MUNSON, D.; DEVRIES, K. Development and validation of a predictive technology for creep closure of underground rooms in salt. In: **7th International Congress on Rock Mechanics**. Aachen, Germany: [s.n.], 1991. p. 127–134. Citado na página 18.
- MUQUEEM, M. A.; WEEKSE, A. E.; AL-HAJJI, A. Stuck pipe best practices - a challenging approach to reducing stuck pipe costs. 01 2012. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 19.
- OROZCO, S. O. et al. Managing creep closure in salt uncertainty while drilling. **52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.**, 08 2018. Citado na página 11.
- PARANHOS SOBRINHO, E. S. **Consideração do repasse à modelagem do fechamento de poços verticais em rochas salinas**. Qualificação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL: [s.n.], 2018. Citado 12 vezes nas páginas 12, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 37 e 38.
- SANTOS, B. **Modelos equivalentes do fechamento de poços verticais em rochas salinas**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos da engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência; Petrobras, 2004. Citado na página 15.
- WILLSON, S. M.; FREDRICH, J. T. Geomechanics considerations for through- and near-salt well design. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Dallas, Texas, 8 2005. Citado na página 15.
- YARIM, G.; RITCHIE, G. M.; MAY, R. B. A guide to successful backreaming real-time case histories. In: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. Denver: [s.n.], 2008. Citado 3 vezes nas páginas 11, 19 e 20.