

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL  
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC  
ENGENHARIA CIVIL

GILBERTO LUCAS LEANDRO DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DE ESTRATÉGIAS NUMÉRICAS DE PERFURAÇÃO  
NA SIMULAÇÃO DO FECHAMENTO DE POÇOS  
VERTICAIS NO PRÉ-SAL**

MACEIÓ-AL  
2021

GILBERTO LUCAS LEANDRO DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DE ESTRATÉGIAS NUMÉRICAS DE PERFURAÇÃO  
NA SIMULAÇÃO DO FECHAMENTO DE POÇOS  
VERTICAIS NO PRÉ-SAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas - CTEC/UFAL, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. William Wagner Matos Lira

Coorientadora: M.<sup>a</sup> Catarina Nogueira de A. Fernandes

MACEIÓ-AL  
2021

## Folha de Aprovação

AUTOR: GILBERTO LUCAS LEANDRO DOS SANTOS

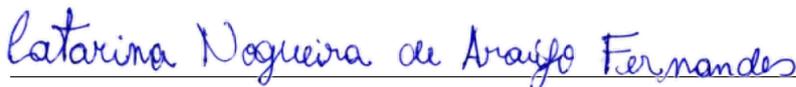
Influência de estratégias numéricas de perfuração na simulação do fechamento de poços verticais no pré-sal. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em 19 de Janeiro de 2021.



---

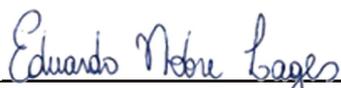
Prof. Dr. William Wagner Matos Lira (Orientador)  
Universidade Federal de Alagoas



---

M.a Catarina Nogueira de Araújo Fernandes (Coorientadora)  
Universidade Federal de Alagoas

### Banca Examinadora:



---

Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Alagoas



---

M.e Eduardo da Silva Paranhos Sobrinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Alagoas

Dedico este trabalho ao professor e engenheiro civil Glauco Araújo do Nascimento, que faleceu em 2020, e foi minha inspiração durante o ensino médio para escolher esta profissão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos em forma de pessoas iluminadas que colocou na minha vida e em forma de situações que me fizeram ser quem sou.

Aos meus pais Gilberto e Luciana pela construção de um lar com amor e carinho e por me apoiar em decisões fundamentais.

À toda minha família por me servir de inspiração e trazer momentos de alegria, em especial aos meus avós José Leandro e Adair Presado. Como também as minhas primas que foram criadas comigo como verdadeiras irmãs: Stenia, Stella, Jessika, Beatriz e Thayná.

Aos meus orientadores William e Catarina por me ajudarem a atingir níveis de aprendizado que eu não imaginaria chegar desenvolvendo este e outros trabalhos, sempre com atenção e paciência.

Aos membros da banca por analisarem o trabalho com atenção e entregar suas devidas contribuições.

Ao apoio financeiro da Petrobras.

À toda equipe do LCCV, pela infraestrutura e suporte técnico oferecidos.

Aos meus companheiros de pesquisa Ricardo, Otávio, Karol, Luiz, Jonathan e Layz por contribuir na elaboração das atividades de iniciação científica, artigos e apresentações.

Aos amigos que fiz durante a graduação no CTEC e no LCCV que me ajudaram e me proporcionaram momentos de distração e felicidade, em especial: Bruno, Luísa, Danilo, Matheus, Ewerton, Jordson e Leonardo.

Aos amigos de longa data que sempre estão presentes na minha vida, em especial: Praxedes, Thiago, Márcio, Sérgio, Miguel, Arthur, André, Wilker, Jacques e Victor. Como também as amigas: Cinthia, Iva, Lilianny, Mayra e Carla.

Às inúmeras equipes que joguei e algumas que ainda jogo por me proporcionarem rotinas que sempre foram minha paixão (futebol), em especial: Atlético Maceió, Corinthians Alagoano, Mixto, Os Chatos, Rotary 09, Lazio, Atlético da Pelota e Bahia Feitosa.

*Filho, se você parar de aprender, logo esquecerá o que sabe. Provérbios 19:27.*

## RESUMO

SANTOS, Gilberto L. L.. **Influência de estratégias numéricas de perfuração na simulação do fechamento de poços verticais no pré-sal**. 2021. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas. Maceió-AL, 2021.

O principal objetivo deste trabalho é comparar duas estratégias de simulação computacional baseadas no método dos elementos finitos (MEF) aplicadas na perfuração de poços verticais, avaliando suas influências no comportamento mecânico de rochas salinas. Uma estratégia simula a perfuração de uma fase sendo realizada de forma instantânea, a outra simula a perfuração de acordo com a taxa de penetração (ROP, do inglês *rate of penetration*), o que implica na modelagem da perfuração por etapas. Embora as rochas salinas apresentem propriedades que favorecem o trapeamento de óleo e gás em camadas subjacentes, as mesmas estão sujeitas ao fenômeno de fluência, que leva ao deslocamento contínuo das paredes do poço na direção de seu fechamento. Nesse cenário, previsões são essenciais para reduzir riscos operacionais relacionados ao aprisionamento da coluna de perfuração e ao colapso do revestimento. As duas estratégias numéricas estudadas são encontradas em diversos trabalhos na literatura, mas uma discussão relacionada ao efeito da utilização de cada uma delas, normalmente, não é o foco desses trabalhos. Nesse contexto, a metodologia adotada para alcançar o objetivo baseia-se em 5 macro etapas: i) modelagem da perfuração de forma instantânea; ii) implementação computacional da perfuração em etapas no SESTSAL (*software* desenvolvido no LCCV em parceria com a Petrobras); iii) modelagem da perfuração em etapas; iv) simulação de exemplos numéricos, para verificação dos resultados com os disponíveis na literatura; v) coleta e organização dos resultados de interesse para realização das análises, comparações e verificações dos resultados fornecidos pelas duas estratégias e simuladores utilizados. Em todas as etapas foram utilizados os simuladores comercial ABAQUS e *in-house* SESTSAL para realização dos estudos. Na segunda etapa, o uso dos dois simuladores serviu, inclusive, para validar os resultados produzidos pelo SESTSAL. De acordo com os resultados das simulações do cenário de referência, nota-se que a perfuração instantânea tende a sobrestimar o fechamento do poço, enquanto a perfuração em etapas tende a gerar resultados de fechamento menores. Além disso, nota-se que a perfuração em etapas é mais dispendiosa computacionalmente que a perfuração instantânea. Com relação aos simuladores utilizados, é verificada a eficiência do SESTSAL em relação ao ABAQUS para obtenção dos resultados do problema em questão. A principal contribuição deste trabalho é avaliar o efeito de duas estratégias clássicas no comportamento mecânico de rochas salinas durante a perfuração de poços verticais. Outra contribuição é incorporar a estratégia da simulação da perfuração em etapas ao simulador SESTSAL.

**Palavras-chave:** Perfuração de Poços. Rochas Salinas. Método dos Elementos Finitos.

## ABSTRACT

SANTOS, Gilberto L. L.. **Influence of numerical drilling strategies in the simulation of the closure of vertical wells in the pre-salt.** 2021. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas. Maceió-AL, 2021.

The main objective of this work is to compare two computer simulation strategies based on the finite element method (FEM) applied to vertical wells drilling, and evaluate their influences on the mechanical behavior of salt rocks. One strategy simulates the drilling of a phase being drilled instantaneously, the other strategy simulates drilling according to the rate of penetration (ROP), which implies in modeling of drilling in steps. Although salt rocks have properties that favor the oil and gas trapping in the underlying layers, they are subjected to the creep effect, which provoke to the continuous displacement of the walls of the hole in the direction of its closure. In this context, predictions are essential to reduce operational risks related to stuck pipe and the casing collapses. The two numerical strategies studied are found in various works in the literature, but a discussion related to the effect of using each of them isn't, usually, the objective of these works. In this regard, the methodology adopted to hit the objective is based on 5 macro steps: i) modelling of instantaneous drilling; ii) computational implementation of drilling in steps in SESTSAL, (software developed at LCCV in partnership with Petrobras); iii) modelling of drilling in steps; iv) simulation of numerical examples, to verify the results with those available in the literature; v) collecting and organizing the results of interest to perform out the analysis, comparisons and verifications of the results obtained by the two strategies and simulators used. In all stages, the simulators ABAQUS (commercial) and SESTSAL (in-house) were used to carry out the studies. In the second stage, the use of the two simulators also served to validate the results provided by SESTSAL. According to the results of the simulations of the reference scenario, it is noted that instant drilling tends to overestimate the well closure, while drilling in stages tends to generate smaller closure results. Furthermore, it is noted that drilling in steps needs more computational time than instantaneous drilling to complete the simulations. Regarding the simulators used, the efficiency of SESTSAL in relation to ABAQUS is verified to obtain the results of the problem in question. The main contribution of this work is to evaluate the effect of two classic strategies on the mechanical behavior of salt rocks during the drilling of the vertical wells. Another contribution is to incorporate the strategy of the simulation of drilling in steps to the SESTSAL simulator.

**Keywords:** Well Drilling. Salt Rocks. Finite Element Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Índices relativos a poços no pré-sal . . . . .	14
Figura 1.2 – Etapas de desenvolvimento do trabalho . . . . .	17
Figura 1.3 – Fluxo para a análise dos resultados das simulações . . . . .	18
Figura 2.1 – Estágios do fenômeno de fluência . . . . .	21
Figura 2.2 – Esquema geral da sonda na perfuração . . . . .	23
Figura 2.3 – Operações em uma fase de perfuração . . . . .	24
Figura 2.4 – Tubos de revestimento . . . . .	25
Figura 2.5 – Processo de simulações numéricas por meio do MEF . . . . .	26
Figura 2.6 – Representação do problema axissimétricos . . . . .	26
Figura 2.7 – Elementos quadrilaterais . . . . .	27
Figura 3.1 – Perfuração instantânea . . . . .	28
Figura 3.2 – Partições no modelo geométrico . . . . .	30
Figura 3.3 – Restrições de deslocamento no ABAQUS . . . . .	31
Figura 3.4 – Carregamentos de peso das camadas e pressão da lama de perfuração . . . . .	32
Figura 3.5 – Geração da malha de elementos finitos no ABAQUS . . . . .	32
Figura 3.6 – Visualização dos resultados . . . . .	33
Figura 3.7 – Esquemática da perfuração em etapas . . . . .	35
Figura 3.8 – Malha de elementos finitos para a perfuração em etapas . . . . .	36
Figura 3.9 – Partições para representação das etapas de perfuração . . . . .	37
Figura 3.10 – Desativação dos elementos na etapa de perfuração e aplicação da pressão da lama de perfuração na borda do poço . . . . .	38
Figura 4.1 – Perfil do modelo axissimétrico . . . . .	42
Figura 4.2 – Detalhe da malha de elementos finitos do modelo numérico do poço 6-RJS-457 . . . . .	44
Figura 4.3 – Comparação dos resultados obtidos entre a estratégia de perfuração instantânea e os apresentados por Firme (2013) e Firme et al. (2018) . . . . .	44
Figura 4.4 – Perfil geológico . . . . .	46
Figura 4.5 – Detalhe da malha de elementos finitos do modelo numérico . . . . .	47
Figura 4.6 – Curvas do fechamento do poço no meio da camada de taquidrita . . . . .	48
Figura 4.7 – Comparação entre simuladores utilizando a perfuração instantânea . . . . .	50
Figura 4.8 – Comparação entre simuladores utilizando a perfuração em etapas e ROP constante . . . . .	50
Figura 4.9 – Comparação entre simuladores utilizando a perfuração em etapas e ROP associada à litologia . . . . .	51
Figura 4.10 – Tempo computacional associado às estratégias e simuladores . . . . .	52
Figura 4.11 – Comparação entre os tipos de estratégias de simulação da perfuração . . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Propriedades termomecânicas das rochas (Poço: 6-RJS-457) . . . . .	40
Tabela 4.2 – Propriedades elásticas das rochas (Poço: 6-RJS-457) . . . . .	41
Tabela 4.3 – Propriedades viscosas da halita (Poço: 6-RJS-457) . . . . .	41
Tabela 4.4 – Propriedades plásticas das rochas (Poço: 6-RJS-457) . . . . .	41
Tabela 4.5 – Dados do poço 6-RJS-457 . . . . .	42
Tabela 4.6 – Litologia do modelo . . . . .	43
Tabela 4.7 – Dados do poço simulado . . . . .	46
Tabela 4.8 – Propriedades elásticas das rochas . . . . .	46
Tabela 4.9 – Propriedades viscosas da taquidrita . . . . .	47
Tabela 4.10 – Diferença máxima entre os simuladores . . . . .	51
Tabela 4.11 – Diferença máxima em relação a perfuração instantânea . . . . .	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CAX8	Elemento Quadrilateral de Oito Nós, Axissimétrico, Com Integração Completa (ABAQUS)
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobras
LCCV	Laboratório de Computação Científica e Visualização
MEF	Método dos Elementos Finitos
ROP	<i>Rate Of Penetration</i> (Taxa de Penetração)
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação
$\dot{\epsilon}_0$	Taxa de deformação de referência no regime de permanência
$\sigma_{ef}$	Tensão desviadora efetiva
$\sigma_0$	Tensão efetiva de referência
$Q$	Energia de ativação
$T_0$	Temperatura de referência
$T$	Temperatura a qual a rocha está submetida
$R$	Constante universal dos gases
$n$	Expoente de tensão
$E$	Módulo de elasticidade
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$c$	Coesão do modelo de Mohr-Coulomb
$\phi$	Ângulo de atrito do modelo de Mohr-Coulomb

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	METODOLOGIA	17
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	19
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1	PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DAS ROCHAS SALINAS	20
2.2	PERFURAÇÃO DE POÇOS EM ROCHAS SALINAS	22
2.3	SIMULAÇÕES UTILIZANDO O MEF	25
<b>3</b>	<b>ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO</b>	<b>28</b>
3.1	PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA	28
3.1.1	PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA USANDO O ABAQUS	29
3.1.2	PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA USANDO O SESTASAL	33
3.2	PERFURAÇÃO EM ETAPAS	34
3.2.1	PERFURAÇÃO EM ETAPAS USANDO O ABAQUS	36
3.2.2	PERFURAÇÃO EM ETAPAS USANDO O SESTASAL	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1	EXEMPLO 1: SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA	40
4.2	EXEMPLO 2: SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO EM ETAPAS	45
4.3	ESTUDOS COMPARATIVOS	48
4.3.1	AVALIAÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO	49
4.3.2	AVALIAÇÃO ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO	52
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>55</b>
	Referências	57

## 1 INTRODUÇÃO

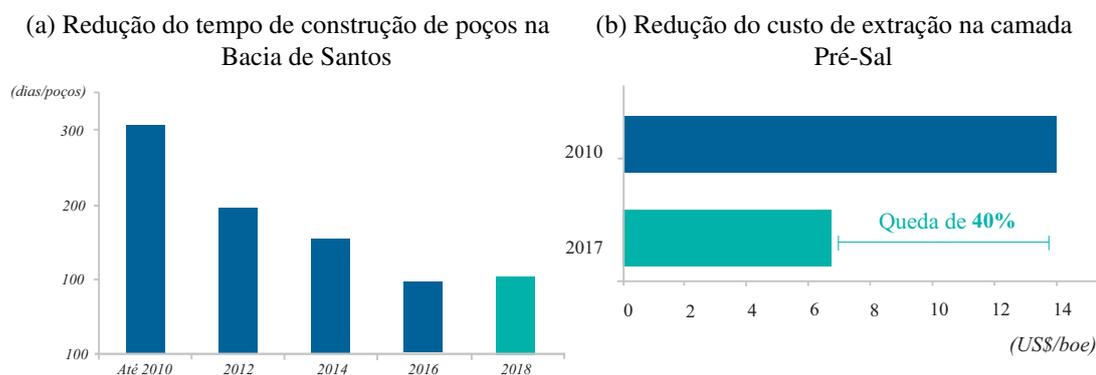
Desde o poço DNPM-163 (primeiro poço de petróleo no Brasil), perfurado em 1939 na Bahia, a exploração do petróleo brasileiro é motivo de discussão. Com a descoberta do pré-sal, as pesquisas intensificaram-se devido ao grande potencial de produção de óleo e gás que a bacia de Campos e de Santos apresentam, no entanto, o Brasil ainda não possuía tecnologia offshore suficiente para produção rentável e segura. Neste cenário, para explorar essas reservas e operar com eficiência em águas ultra profundas, empresas exploradoras de petróleo e gás desenvolveram tecnologia própria, atuando em parceria com fornecedores, universidades e centros de pesquisa (PETROBRAS, 2020).

Segundo Petrobras (2020), um dos desafios era produzir óleo e gás em um local de acesso limitado e sem infraestrutura de produção pré-instalada: 300 km distante da costa, com lâmina d'água atingindo 2.200 m de profundidade e os reservatórios chegando a 5.000 m abaixo do leito marinho, incluindo uma camada de sal de aproximadamente 2.000 m de espessura.

Neste contexto, devido às características das rochas salinas, os padrões de projetos de perfuração de poços precisaram ser repensados. Novos projetos de poços deveriam considerar problemas decorrentes do fechamento do poço citados por Ferreira (2014), tais como o aprisionamento de brocas durante a perfuração, os desmoronamentos e o colapso de revestimentos. Ajustes nos projetos de poços contribuíram para um aumento gradativo na produção ao longo do tempo. Segundo a ANP (2019), em junho de 2017 a produção de petróleo no pré-sal totalizou 1.352.957 barris de petróleo por dia, superando a do pós-sal pela primeira vez, que totalizou 1.321.813 bbl/d.

Recentemente, em novembro de 2020 a produção de petróleo chegou a 2,755 MMbbl/d (milhões de barris por dia), na qual 1,920 MMbbl/d foram produzidos na camada pré-sal, correspondendo a 69,7% do total produzido no Brasil (ANP, 2020). Além disso, o tempo médio de construção de poços marítimos que em 2010 era de 310 dias, em 2018 passou para 127 dias, associado a uma redução de 40% do custo de extração na camada pré-sal, conforme ilustrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Índices relativos a poços no pré-sal



Fonte: Adaptado de Petrobras (2020)

Segundo Cardoso (2005), a perfuração de um poço de petróleo é realizada em diversas fases. As operações realizadas em cada fase são: descida da broca de perfuração, perfuração, cimentação e revestimento. Posteriormente, tem-se a realização de uma nova fase.

De acordo com Baar (2013), a perfuração de aberturas subterrâneas altera o campo de tensão existente pela remoção de rocha que anteriormente previa um campo de tensão equilibrado de tensões principais quase iguais. A alteração dos níveis de tensão provoca deformações por fluência do sal. Conforme Shames (1997), deformações de fluência para rochas e alguns outros materiais geralmente apresentam dependência não linear da tensão.

Durante as décadas de 80 e 90, muitos autores dedicaram-se a desenvolver e aperfeiçoar modelos constitutivos capazes de caracterizar a fluência do sal. No entanto, modelar o fenômeno de fluência e antecipar suas consequências durante a perfuração de um poço não é algo trivial, principalmente devido ao comportamento não linear do sal.

Devido à complexidade do problema, os estudos do comportamento mecânico das camadas salinas são realizados utilizando simulações numéricas. Com o desenvolvimento da tecnologia e capacidade de processamento dos computadores, as simulações numéricas computacionais dão suporte para minimizar os riscos envolvidos. Essas simulações podem ser realizadas por meio do método dos elementos finitos (MEF). Milhões de engenheiros e cientistas em todo o mundo usam o MEF para prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico nas etapas de projeto e análises (FISH; BELYTSCHKO, 2000).

Amaral et al. (1996), citado por Borges (2008), descrevem o sistema SIGMA, que é usado no Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) para simulações numéricas de problemas geotécnicos por meio do MEF. Outros *softwares* que implementam o MEF podem ser utilizados para realizar simulações numéricas. Um deles é o ABAQUS, no qual sua interface gráfica possibilita a construção de modelos através de passos lógicos representativos do comportamento do problema em questão. Outro, é o simulador SESTASAL, desenvolvido no Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) em

parceria com a Petrobras, com o objetivo de prever o comportamento geomecânico de rochas salinas perfuradas por poços verticais.

Simulações da perfuração podem ser reproduzidas utilizando a estratégia da perfuração instantânea, ou seja, desconsiderando a taxa de penetração (ROP) da broca em sua modelagem. Dessa forma, a simulação inicia com a região do poço totalmente perfurada e livre para se deformar. Outra forma de simular a perfuração é considerando a ROP, o que implica na modelagem da perfuração por etapas. Dessa forma, a região do poço é exposta gradativamente de acordo com velocidade de perfuração da broca.

Poiate Jr, Costa e Falcão (2006) apresentam uma estratégia de simulação da perfuração em grandes profundidades através de espessas camadas de sal e previsões numéricas do fechamento do poço. Poiate Jr, Costa e Falcão (2006) utilizam tanto a perfuração instantânea quanto a perfuração em etapas em suas análises.

O trabalho de Poiate Jr (2012) apresenta resultados de ensaios laboratoriais, *in situ*, bem como simulações numéricas para ampliar o conhecimento em mecânica das rochas e aplicar a mecânica computacional na modelagem numérica do comportamento estrutural de poços de petróleo em zonas de sal. Apesar de não ser o foco do trabalho, Poiate Jr (2012) avalia a influência da ROP em termos de comportamento estrutural do poço. Além disso, Poiate Jr (2012) utiliza a simulação da perfuração em etapas para analisar o aumento do peso de fluido na perfuração.

Em seu estudo, Ferreira (2014) realiza uma análise numérica da perfuração e cimentação de poços de petróleo em evaporitos. O trabalho de Ferreira (2014) adota a estratégia da perfuração em etapas para simular o efeito da fluência do sal durante a perfuração e analisar o estado de tensões ao redor do poço. Ferreira (2014) descreve de forma bastante intuitiva a modelagem da perfuração em etapas no ABAQUS, o que auxilia na construção de modelos usando essa estratégia.

Trabalhos nesta linha também são desenvolvidos na UFAL. Araújo (2009) apresenta um modelo para a previsão da taxa de fechamento de poços verticais em rochas salinas. Santos (2011) desenvolve uma ferramenta para analisar riscos associados ao processo de perfuração em rochas salinas, verificando a variabilidade das variáveis de projetos. Gonçalves (2011) apresenta alguns cenários para avaliar o efeito da temperatura no problema de perfuração de poço em camadas salinas, inclusive utilizando a modelagem da perfuração de forma instantânea.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O tempo de escavação do maciço corresponde, em média, 48% do tempo total da perfuração da fase de um poço (PASQUALINO, 2011 apud CANDOL; CORRÊA, 2012). Esse tempo interfere diretamente no valor para construção do poço, visto que há um custo associado no aluguel de sondas e brocas de perfuração. Diante disso, a definição da estratégia de simulação pode reduzir custos na elaboração de projetos de perfuração de poços utilizando uma representação mais fiel do que acontece em campo, levando a previsões mais precisas do comportamento das rochas salinas.

Basicamente, existem dois tipos de estratégias de simulação da perfuração utilizadas na modelagem numérica deste problema: i) perfuração em etapas, considerando a velocidade de perfuração da broca em sua modelagem; e ii) perfuração instantânea, considerando que o poço é totalmente perfurado no instante inicial da simulação. Alguns trabalhos disponíveis na literatura utilizam a perfuração em etapas, por exemplo o trabalho de Ferreira (2014). Outros, utilizam a perfuração instantânea, por exemplo o trabalho de Gonçalves (2011). Determinados trabalhos utilizam ambas as estratégias, conforme apresentados por Poiate Jr, Costa e Falcão (2006) e Poiate Jr (2012).

Apesar de existirem diversos trabalhos avaliando o comportamento mecânico do sal ao ser perfurado e a influência de vários parâmetros nas respostas obtidas, a comparação quantitativa entre as estratégias de simulação da perfuração geralmente não é o foco desses trabalhos.

O simulador SESTSAL, desenvolvido pelo LCCV em parceria com a Petrobras, simula apenas o comportamento de rochas salinas ao serem perfuradas para construção de poços verticais, adotando a estratégia de perfuração instantânea. O uso do SESTSAL é vantajoso devido ele ser especializado e que todas funcionalidades e metodologias incorporadas são pensadas para acelerar ou melhorar a qualidade das respostas desse problema específico.

O ABAQUS é um *software* comercial capaz de simular numericamente uma grande gama de problemas e fenômenos, inclusive o problema de perfuração de poços em rochas salinas. Neste contexto, o ABAQUS é amplamente utilizado e validado em diferentes trabalhos disponíveis na literatura que estudam o fechamento de poços verticais em rochas salinas, por exemplo o trabalho de Ferreira (2014). Adicionalmente, é um software consolidado quanto as suas funcionalidades e formulação, servindo também para confrontar os resultados obtidos por meio das simulações com o SESTSAL e os fornecidos usando o ABAQUS.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é comparar duas estratégias de simulação computacional baseadas no método dos elementos finitos (MEF) aplicadas à perfuração de poços verticais, avaliando suas influências no comportamento mecânico de rochas salinas. Uma estratégia simula a perfuração de uma fase sendo realizada de forma instantânea. O outro procedimento, reproduz a perfuração de acordo com a taxa de penetração (ROP), o que implica na modelagem da perfuração por etapas (essa estratégia é mais realista por reproduzir mais fielmente o que ocorre durante a perfuração). Além disso, a perfuração em etapas deve ser incorporada ao SESTSAL, com o intuito de ter um simulador mais completo e que seja capaz de representar mais fielmente o problema em questão.

Como objetivos específicos deste trabalho, podem ser citados:

- Incorporar os dados de perfuração em etapas na modelagem do problema, como os valores de ROP de cada camada litológica;
- Elaborar um plano de perfuração em etapas, neste plano, os grupos de elementos na região

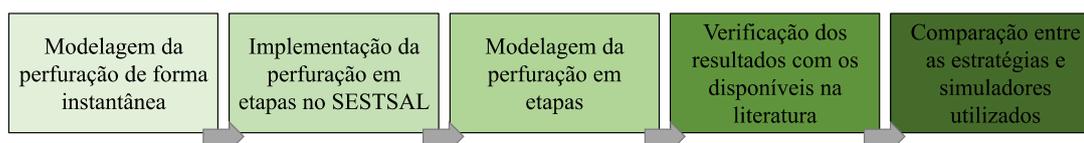
do poço são identificados com os valores de topo e base de perfuração, bem como os valores de ROP associados;

- Implementar uma rotina computacional para que os passos elástico e viscoso possam ser definidos de forma incremental;
- Implementar a remoção de elementos da região do poço, ao longo da simulação, de acordo com o plano de perfuração;
- Recalcular os incrementos de tempo à medida que cada grupo de elementos é removido, com o objetivo de garantir a qualidade dos resultados.
- Comparar o tempo computacional para completar a simulação, avaliando as duas estratégias de simulação da perfuração;
- Comparar o tempo computacional para completar a simulação, avaliando os dois simuladores utilizados neste trabalho.

### 1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia adotada neste trabalho baseia-se em cinco macro etapas, conforme ilustra a Figura 1.2. Cenários de estudo disponíveis na literatura são utilizados para aplicação da metodologia em questão. As simulações executadas neste trabalho são realizadas por meio do *software* comercial ABAQUS (ABAQUS, 2014) e do simulador *in-house* SESTSAL. Ambos são baseados no MEF e possibilitam a construção de modelos representativos do problema e posteriormente a obtenção das respostas.

Figura 1.2 – Etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autor, 2021

A primeira etapa utiliza a estratégia baseada na perfuração instantânea na modelagem de um cenário de referência para reproduzir a perfuração de poços, por meio dos *softwares* ABAQUS e SESTSAL. Nesta etapa, são desenvolvidas rotinas computacionais em Python que automatizam tanto o processo de modelagem da perfuração de poços verticais no ABAQUS, quanto o processo de comunicação com o simulador SESTSAL. Além de acelerar as etapas de modelagem, simulação e coleta dos resultados, as rotinas implementadas tornam esses processos menos suscetíveis a erros. Detalhes sobre a estratégia da perfuração instantânea estão descritas na Seção 3.1.

A segunda etapa da metodologia envolve a definição de uma estratégia de perfuração em etapas e sua implementação no SESTSAL. Nesta etapa, são desenvolvidas rotinas no código do SESTSAL para o acesso dos parâmetros de perfuração, como a ROP de cada camada litológica. A

partir desses dados, outras rotinas são desenvolvidas e utilizadas para a gerar o modelo numérico, conforme a estratégia da perfuração em etapas, e para definição do período de remoção dos elementos de forma que estejam de acordo com a ROP adotada. Detalhes sobre a estratégia da perfuração em etapas estão descritas na Seção 3.2.

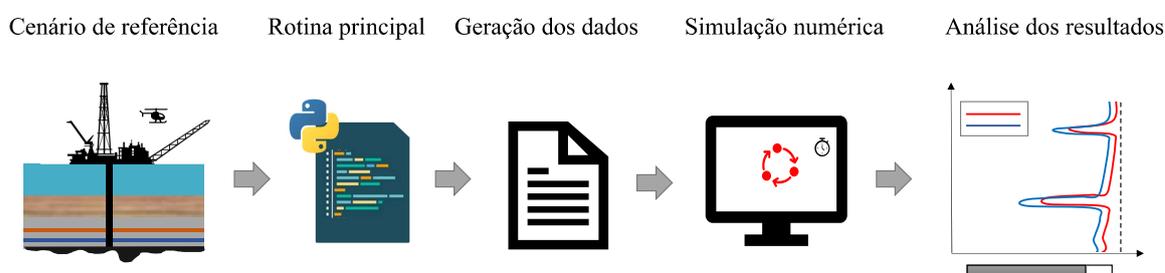
A terceira etapa desta metodologia utiliza a estratégia baseada na perfuração em etapas na modelagem de um cenário de referência para reproduzir a perfuração de poços, usando o ABAQUS o SESTALS. Além disso, também são realizados ajustes nas rotinas computacionais para que seja realizada a automatização na modelagem da perfuração em etapas, simulação e coleta dos resultados, assim como é realizado na reprodução do processo usando a perfuração instantânea.

A quarta etapa executa simulações de exemplos numéricos da perfuração usando ambas as estratégias nos simuladores ABAQUS e SESTALS. As respostas são utilizadas para geração de gráficos comparativos a fim de verificar os resultados entre as simulações dos cenários de referência e os disponíveis na literatura, além de validar as estratégias utilizadas e também as rotinas computacionais desenvolvidas nas etapas anteriores.

A quinta etapa avalia a influência da consideração da ROP nos resultados e também o tempo computacional associado à obtenção das respostas em cada uma das estratégias e simuladores adotados. Para facilitar esse procedimento, a visualização normalmente é realizada utilizando gráficos e/ou tabelas relacionados aos resultados alcançados, podendo ser exibido de forma global ou local em regiões pré-definidas.

Com o desenvolvimento dessas 5 macro etapas, o fluxo para análises dos resultados das simulações é realizado conforme ilustra a Figura 1.3. A partir dos dados do cenário de referência, é possível determinar, na rotina principal, o simulador numérico utilizado. Na rotina principal é definida, também, a estratégia adotada para a simulação da perfuração. Posteriormente, tem-se a geração dos dados necessários para a simulação numérica. Após a simulação, tem-se a identificação dos resultados de interesse para a realização das interpretações e inferências.

Figura 1.3 – Fluxo para a análise dos resultados das simulações



Fonte: Autor, 2021

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho utiliza uma modelagem bidimensional axissimétrica do problema, portanto, apenas poços verticais são considerados, uma vez que poços direcionais exigem uma modelagem tridimensional. É simulada a fase de perfuração do poço e o tempo de rocha exposta antes da descida do revestimento e sua cimentação, de forma que esses últimos dois processos não são reproduzidos. A interação da broca com a rocha também não é considerada. A simulação da perfuração reproduz apenas a retirada dos elementos na região por onde a broca passa. Além disso, a simulação da retirada da broca, descida do revestimento e cimentação da rocha se resumem na consideração de um tempo necessário para a estabilização do poço (momento em que o cimento está suficientemente endurecido).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o embasamento teórico necessário para o conhecimento do problema, elaboração de metodologias e identificação dos principais fatores envolvidos no processo de perfuração de poços em rochas salinas. Além disso, esse embasamento é importante na etapa de modelagem para que a reprodução do problema seja realizada de forma correta. Na etapa de interpretação dos resultados, o embasamento teórico se faz necessário para a realização de inferências sobre as respostas obtidas. Nesse contexto, as subseções a seguir detalham os estudos realizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

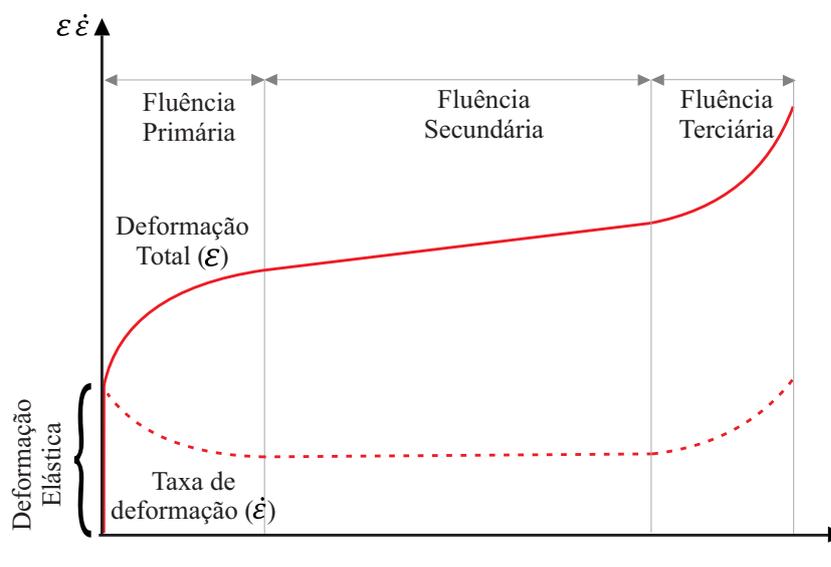
### 2.1 PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO DAS ROCHAS SALINAS

Segundo Baar (2013), rochas salinas são altamente dúcteis e exibem comportamento viscoso. Apresentam resistência relativamente baixa, e exibem alta mobilidade devido ao comportamento viscoso associado aos regimes elástico e plástico. Esse comportamento sofre influência da espessura da camada analisada, temperatura de formação, tensões desviadoras, dentre outros condicionantes.

Com relação à escavabilidade, rochas salinas apresentam dureza baixa (cerca de 2,5 na escala de Mohs – Mohriak, Szatmari e Anjos (2009)), sendo facilmente perfuradas e apresentando boa conformidade com a geometria de projeto. Outra propriedade das rochas salinas é a capacidade de autocura, ou seja, descontinuidades, trincas e fraturas podem ser fechadas naturalmente, retornando à condição íntegra (COSTA; PEREIRA; EBECKEN, 1985).

Por outro lado, a perfuração de poços, através da remoção do sal, altera o estado de tensões do maciço, acarretando em problemas adicionais devido ao fenômeno de fluência (*creep*). A fluência é a evolução da deformação mesmo sob uma tensão constante. A fluência é dividida em 3 estágios, conforme ilustrado na Figura 2.1. No primeiro estágio (fluência primária), a deformação viscosa evolui com uma taxa muito alta. Essa taxa sofre uma desaceleração até se estabilizar, dando início ao segundo estágio (fluência secundária), na qual a taxa de deformação é constante. No último estágio (fluência terciária), a taxa de deformação é acelerada, levando à ruptura do material (SHAMES, 1997).

Figura 2.1 – Estágios do fenômeno de fluência



Fonte: Adaptado de Paranhos Sobrinho (2019)

O comportamento da rocha salina pode ser simulado numericamente por meio de modelos constitutivos e podem ser classificados como modelos reológicos e físicos (empíricos). Os modelos reológicos são, geralmente, utilizados na mecânica das rochas, sendo os mais conhecidos o Modelo de Maxwell, Modelo de Kelvin/Voight, Modelo de Maxwell Generalizado, Modelo de Kelvin Generalizado e Modelo de Burgers (ARAÚJO, 2012).

Por outro lado, a partir de aperfeiçoamentos de uma relação potencial entre a deformação e a tensão aplicada, foram desenvolvidos os modelos físicos (empíricos). Segundo Firme (2013), a forma original dessa relação é conhecida como Lei de Potência. Conforme Firme (2013), alguns exemplos de modelos físicos são a Lei Visco-plástica de Múltiplos Mecanismos e o Modelo de Multi Mecanismo.

Munson e Devries (1991) recomenda leis baseadas em mecanismos de deformação, por considerarem aspectos intrínsecos do material além da condição de pressão e temperatura ambientais. Costa et al. (2005) utilizaram o modelo de mecanismo duplo de deformação para estudar o comportamento da rocha na mina de potássio Taquari-Vassouras (Sergipe/Brasil), onde validaram este modelo constitutivo por meio de testes experimentais (Paranhos Sobrinho et al., 2020).

Este modelo é uma superposição de três mecanismos de deformação: escalonamento de discordâncias (*Dislocation Climb*), deslizamento de discordâncias (*Dislocation Glide*) e mecanismo indefinido (*Undefined Mechanism*) desenvolvido por Munson e Devries (1991).

Segundo Paranhos Sobrinho et al. (2020), o escalonamento de discordâncias é controlado pelo fenômeno de ativação térmica, pois a temperatura influencia diretamente na agitação dos átomos de um corpo; portanto, o aumento da temperatura implica no aumento da velocidade da fluência. Além disso, esse mecanismo se torna predominante quando o regime de tensões

efetivas é baixo e os níveis de temperatura são moderados a altos (Paranhos Sobrinho et al., 2020). O mecanismo de deslizamento de discordâncias é responsável por controlar a fluência estacionária quando o corpo em estudo está sujeito a altos níveis de tensões. O mecanismo indefinido é assim denominado por não estar associado a nenhum modelo micromecânico, mas pode ser empiricamente definido baseado em ensaios de laboratório (BOTELHO, 2008).

A simplificação do mecanismo duplo de deformação considera apenas o deslizamento de discordâncias e mecanismos indefinidos (Paranhos Sobrinho et al., 2020). Assim, a equação constitutiva do modelo é dada por:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \left( \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0} \right)^n e^{\left( \frac{Q}{RT_0} - \frac{Q}{RT} \right)} \quad (1)$$

nesta equação,  $\dot{\varepsilon}$  é a taxa de deformação,  $\dot{\varepsilon}_0$  é a taxa de deformação de referência no regime de permanência,  $\sigma_{ef}$  é a tensão desviadora efetiva,  $\sigma_0$  é a tensão efetiva de referência,  $Q$  é a energia de ativação,  $T_0$  é a temperatura de referência,  $T$  é a temperatura a qual a rocha está submetida e  $R$  é a constante universal dos gases.  $n$  é o expoente de tensão e é definido de acordo com relação abaixo:

$$n = \begin{cases} n_1; & \text{se } \sigma_{ef} \leq \sigma_0 \\ n_2; & \text{se } \sigma_{ef} > \sigma_0 \end{cases} \quad (2)$$

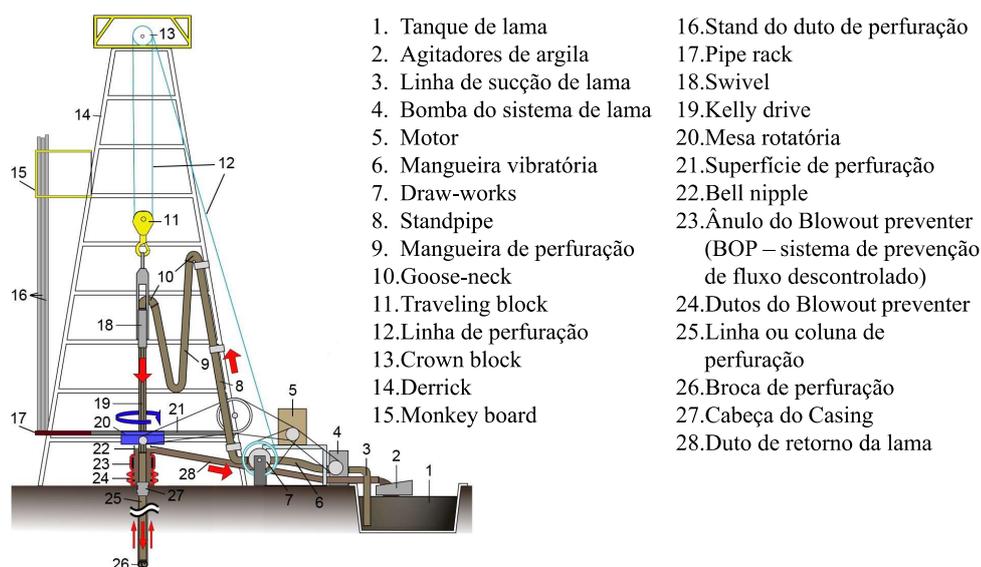
## 2.2 PERFURAÇÃO DE POÇOS EM ROCHAS SALINAS

Na indústria do petróleo, camadas salinas sugerem a presença de hidrocarbonetos aprisionados abaixo delas, o que pode ser um grande indício de sucesso na produção (COSTA et al., 2005). No entanto, os depósitos salinos desafiam a engenharia quanto a técnicas de previsão de comportamento geomecânico, bem como estratégias construtivas que sejam simultaneamente seguras e economicamente viáveis (FIRME, 2013). Nesse cenário, para definir os dados relevantes ao estudo de perfuração de poços em rochas salinas, é preciso compreender o contexto físico correspondente e os fenômenos envolvidos nesse processo. Dentre outras informações, é importante considerar os dados representativos do maciço salino e o procedimento de perfuração adotado.

Com relação à região de perfuração, segundo Fredrich et al. (2007), citado por Borges (2008), a perfuração de poços altera o estado de tensões do maciço, gerando uma tensão desviadora. Além disso, geralmente, cenários em que a perfuração em evaporitos contam com lâminas d'água e soterramentos na ordem de quilômetros as tensões geostáticas são muito elevadas. Esses fatores tornam o comportamento viscoso não linear das rochas salinas ainda mais acentuado.

Com relação ao procedimento de perfuração adotado, em poços de petróleo utilizam-se sondas de perfuração, que consistem em um conjunto de equipamentos, com grande variedades de tipos (CARDOSO, 2005). A Figura 2.2 ilustra um esquema geral da sonda na perfuração de poços.

Figura 2.2 – Esquema geral da sonda na perfuração



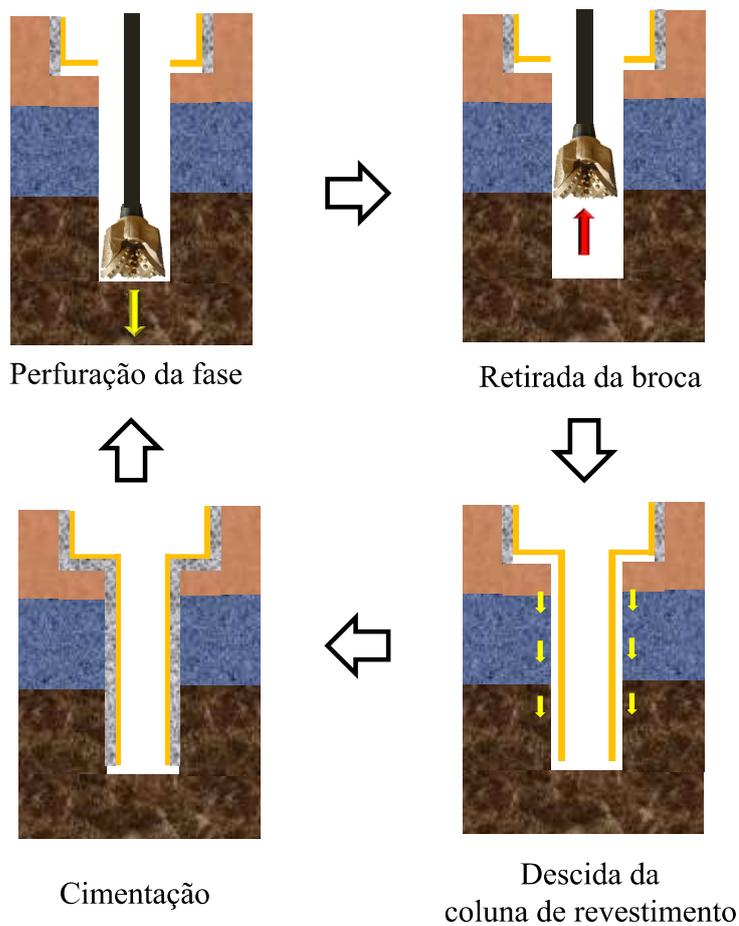
Fonte: Wikimedia Commons (2020)

Segundo Mello (2014), a perfuração de um poço é dividida em fases, sendo cada fase determinada pelo diâmetro da broca que está sendo utilizada na perfuração. Machado et al. (2018) apresentam um projeto de perfuração de um poço de petróleo, no qual é possível identificar as operações realizadas em cada fase. A Figura 2.3 ilustra de forma simplificada as operações em cada fase, iniciando com a sua perfuração, seguida da retirada da broca, descida da coluna de revestimento e cimentação.

Para realizar a perfuração da fase, é necessário um conjunto de ferramentas que constitui a coluna de perfuração, tais como os tubos de perfuração e as brocas, além disso, utiliza-se o fluido de perfuração, também chamado de lama de perfuração. Estabilizar a parede da formação rochosa e carrear os cascalhos cortados pela broca são alguns dos objetivos do fluido de perfuração (Paranhos Sobrinho, 2019).

Segundo Santos (2007), citado por Mello (2014), após a perfuração da fase ser finalizada, é descida uma coluna de revestimento, sendo o espaço entre o revestimento e o maciço cimentado (preenchido com uma mistura cimento/água). Após a cimentação entende-se que a formação foi estabilizada pelo cimento endurecido. As etapas repetem-se com a perfuração de uma nova fase, com exceção da última fase, na qual existe a completação do poço.

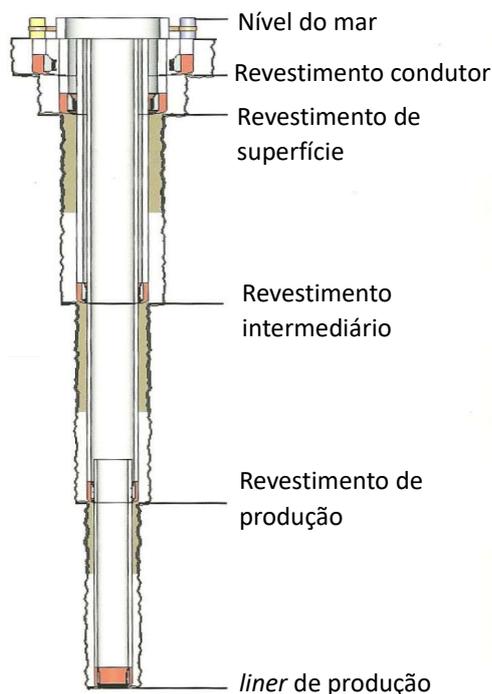
Figura 2.3 – Operações em uma fase de perfuração



Fonte: Autor, 2021

O poço é perfurado em várias fases, que são revestidas e formam as colunas de revestimento, iniciando com um tubo de pequena extensão e diâmetro maior que os posteriores, conforme ilustrado na Figura 2.4 (CARDOSO, 2005). O peso aplicado sobre a broca e a dureza da formação influenciam na velocidade de perfuração (taxa de penetração) na camada (MELLO, 2014).

Figura 2.4 – Tubos de revestimento



Fonte: Adaptado de Cardoso (2005)

Alguns simuladores computacionais consideram que a remoção do material na região do poço ocorre de forma instantânea. Segundo Baar (2013), o estado de tensões inicial é alterado pela retirada de material e, posteriormente, a rocha começa a se deslocar devido a ação da tensão desviadora. Deste modo, desconsiderando a velocidade de perfuração, a deformação por fluência inicia em toda região do poço, conseqüentemente, as camadas mais profundas começam a deslocar desde o início da simulação. Outra opção é considerar a velocidade de perfuração na simulação numérica do problema de perfuração de poços em rochas salinas. Desse modo, camadas mais profundas só irão se deslocar a partir do momento em que a broca atinja sua profundidade, de forma semelhante ao que acontece durante a construção de poços em campo.

### 2.3 SIMULAÇÕES UTILIZANDO O MEF

Milhões de engenheiros e cientistas em todo o mundo usam o MEF para prever o comportamento estrutural, mecânico, térmico, elétrico e químico nas etapas de projeto e análises (FISH; BELYTSCHKO, 2000). De uma maneira geral, o MEF é baseado em um modelo numérico obtido a partir da subdivisão ou “discretização” do domínio de um problema, juntamente com informações adicionais associadas a essa discretização, necessárias para a completa definição do problema físico (LIRA, 2002). Neste contexto, simulações numéricas por meio do MEF podem ser utilizadas para reproduzir a geomecânica do sal ao ser perfurado por poços. Além disso, existem diversos *softwares* que implementam o MEF e são capazes de simular o problema em questão.

As simulações computacionais utilizando o método dos elementos finitos podem ser divididas em três etapas, conforme ilustra a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Processo de simulações numéricas por meio do MEF

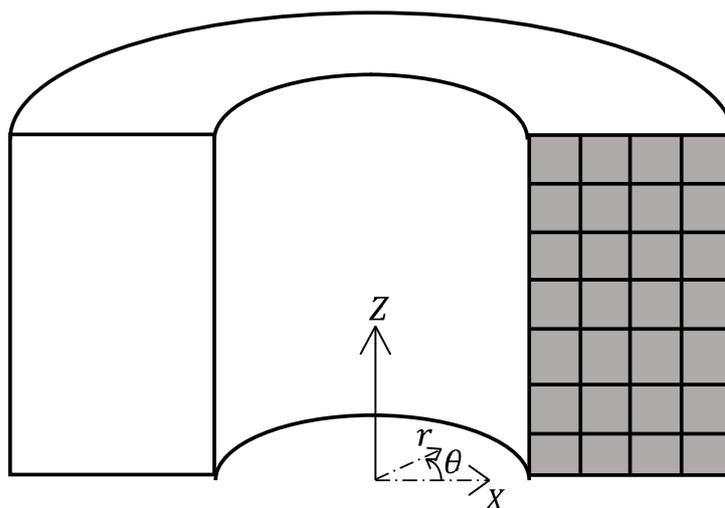


Fonte: Santos et al. (2018)

A modelagem consiste em construir a configuração do problema proposto, através da definição do domínio do problema, geração da malha de elementos finitos, definição das propriedades dos materiais, definição das condições de contorno e iniciais do problema (SANTOS et al., 2018).

Na definição do domínio do problema de perfuração de poços, tem-se a construção da geometria do maciço salino de acordo com o perfil geológico a ser considerado. Como as tensões horizontais são consideradas iguais e neste trabalho são analisados poços verticais, o problema apresenta simetria geométrica e de tensão em relação ao eixo do poço, caracterizando um problema axissimétrico, de forma que pode ser representado por uma seção transversal que, ao ser rotacionada em torno do eixo do poço, gera um sólido de revolução cilíndrico (ARAÚJO, 2012). A Figura 2.6 ilustra uma representação do problema.

Figura 2.6 – Representação do problema axissimétricos

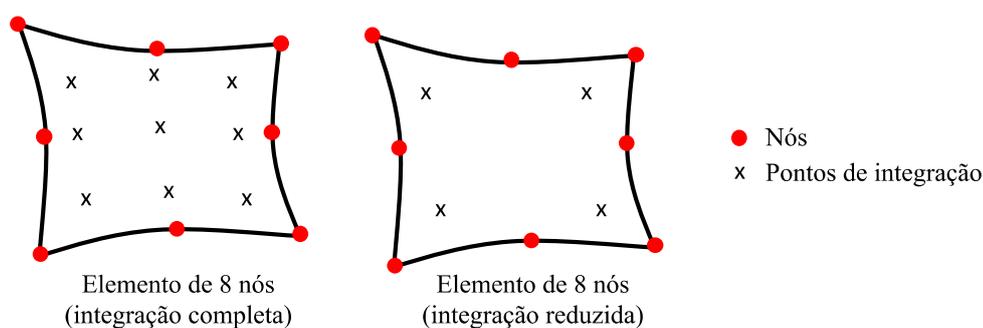


Fonte: Araújo (2012)

A malha de elementos finitos, consiste em um conjunto de nós ou vértices (pontos com coordenadas) e um conjunto de células, denominadas elementos finitos, com uma topologia pré-definida (triângulos, quadriláteros, ou tetraedros, por exemplo) (LIRA, 2002). Dessa forma,

é gerada a malha para representar o domínio do problema. Para a realização deste trabalho são utilizados elementos quadriláteros, seguindo o exemplo de outros trabalhos desenvolvidos nesta linha de estudo, como Poiate Jr, Costa e Falcão (2006) e Firme (2013). A Figura 2.7 ilustra dois exemplos de elementos quadriláteros.

Figura 2.7 – Elementos quadriláteros



Fonte: Adaptado de Abaqus (2014)

Com relação à definição das propriedades dos materiais, o comportamento elástico das rochas salinas é representado por valores correspondentes ao módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. O comportamento viscoso das rochas salinas é definido por meio do modelo constitutivo (mecanismo duplo de deformação), descrito na Seção 2.1.

As definições das condições de contorno e iniciais associadas ao problema incluem a descrição dos gradientes de tensão geostática e temperatura. Definem-se também as condições de carregamento e restrições de deslocamento (SANTOS et al., 2018).

Na etapa de análise numérica, o modelo numérico criado na fase anterior é simulado segundo a formulação matemática do MEF. Apesar de utilizar a formulação do MEF, não é o foco deste trabalho detalhar as etapas da formulação. Entretanto ela é apresentada de forma geral em Fish e Belytschko (2000) e de forma aplicada ao problema de perfuração de poços verticais em Araújo (2012).

Após a análise numérica, é realizada a coleta e interpretação dos resultados de interesse, onde, em geral, são elaborados gráficos e tabelas para um melhor entendimento do problema. Isso pode ser realizado de forma global, observando os resultados em todo o domínio do problema, bem como de forma local, analisando regiões específicas de interesse.

### 3 ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO

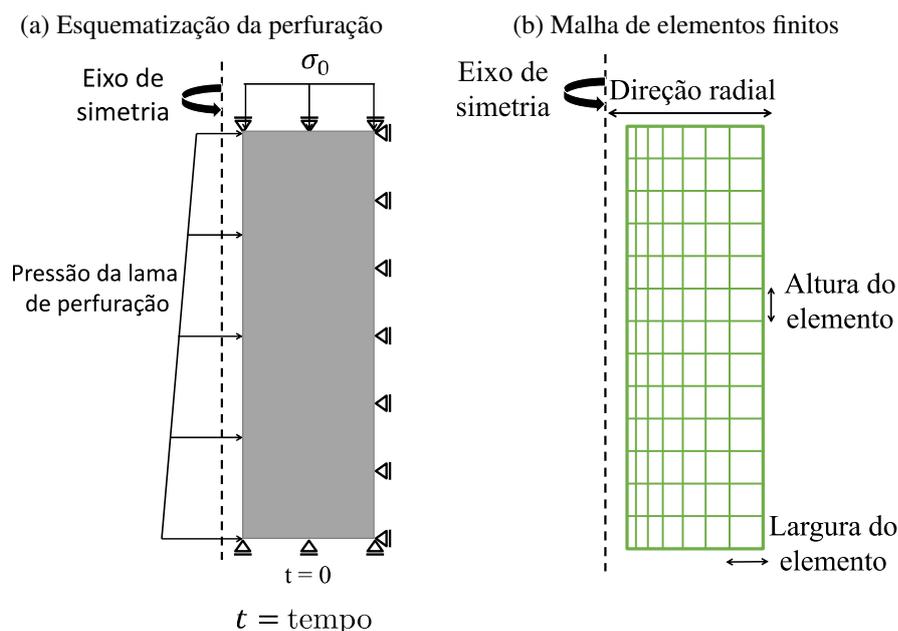
Este capítulo apresenta as duas estratégias de simulação de perfuração de poços utilizadas neste trabalho, para cada tipo de estratégia é apresentada a modelagem do problema nos simuladores ABAQUS e SESTASAL. Como dito anteriormente, é realizada apenas a simulação da perfuração de poços verticais, dessa forma, modelos numéricos bidimensionais axissimétricos são utilizados em ambas estratégias, aproveitando a simetria do problema em relação ao seu eixo central.

#### 3.1 PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA

A estratégia de perfuração instantânea não considera a velocidade de perfuração da broca em sua modelagem. Conforme apresentado na Seção 2.3, a modelagem do problema consiste na definição do domínio do problema, geração da malha de elementos finitos, definição das propriedades dos materiais (rochas salinas) e definição das condições de contorno. A Figura 3.1a) mostra uma esquematização da perfuração instantânea.

Com a utilização dessa estratégia, a região do poço não é incluída no domínio do problema, assim, o domínio é discretizado por meio da quantidade de elementos na direção radial e da altura do elemento, conforme ilustrado na Figura 3.1b). A altura do elemento é definida em cada camada litológica. A largura do elemento varia na direção radial de acordo com o valor razão de aspecto, com o objetivo de ter elementos mais estreitos na borda do poço e conseqüentemente uma melhor qualidade dos resultados nessa região.

Figura 3.1 – Perfuração instantânea



O trecho modelado faz parte de um maciço maior, para compatibilizar seu contexto real, são definidas restrições de deslocamento nas arestas externas do modelo, conforme ilustrado na Figura 3.1a). Essas restrições atuam durante toda a simulação, dessa forma, restringe-se o deslocamento horizontal na aresta vertical mais afastada do poço, assumindo que nessa região já não há mais deslocamentos. Restringe-se também o deslocamento vertical na região do topo e da base, uma vez que o trecho simulado é parte integrante de um maciço maior, havendo rochas acima e abaixo dele.

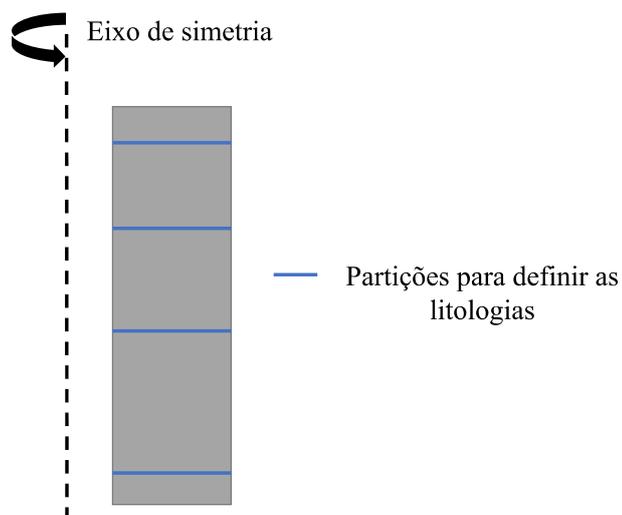
É definido o gradiente de tensão geostática, assumindo que no topo do maciço há uma tensão devido ao peso das camadas superiores e de acordo com o peso das litologias inseridas no trecho modelado. É definido também o gradiente térmico a partir dos valores da temperatura no topo e na base do trecho modelado. Além disso, é inserida a pressão devido a lama de perfuração em toda parede do poço, ou seja, do topo à base do maciço salino. Dessa forma, durante a reprodução do modelo, todo o maciço está livre pra se deslocar no sentido do fechamento do poço desde o instante inicial da simulação.

### 3.1.1 PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA USANDO O ABAQUS

Muitos trabalhos encontrados na literatura discutem análises realizadas por meio de *softwares* que utilizam o MEF, os quais possibilitam a obtenção de respostas para inúmeros problemas de engenharia. Um desses *softwares* é o ABAQUS cuja interface gráfica possibilita a construção de modelos através de passos lógicos representativos do comportamento do problema em questão por meio do módulo ABAQUS/CAE. Para a simulação do modelo, segundo Martinez (2012), o ABAQUS oferece a possibilidade de usar o método de integração numérica implícita no domínio do tempo usando o módulo ABAQUS/Standard. Nesse contexto, o objetivo desta Seção é detalhar a modelagem da perfuração instantânea usando o ABAQUS.

O ABAQUS dispõe de diversas funções necessárias para a modelagem do problema. Inicialmente, tem-se o esboço da geometria do problema, no qual é definido um modelo axissimétrico e a geometria do problema é construída em uma tela de desenho. São realizadas partições na geometria de acordo com o topo e base de cada camada litológica, conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Partições no modelo geométrico



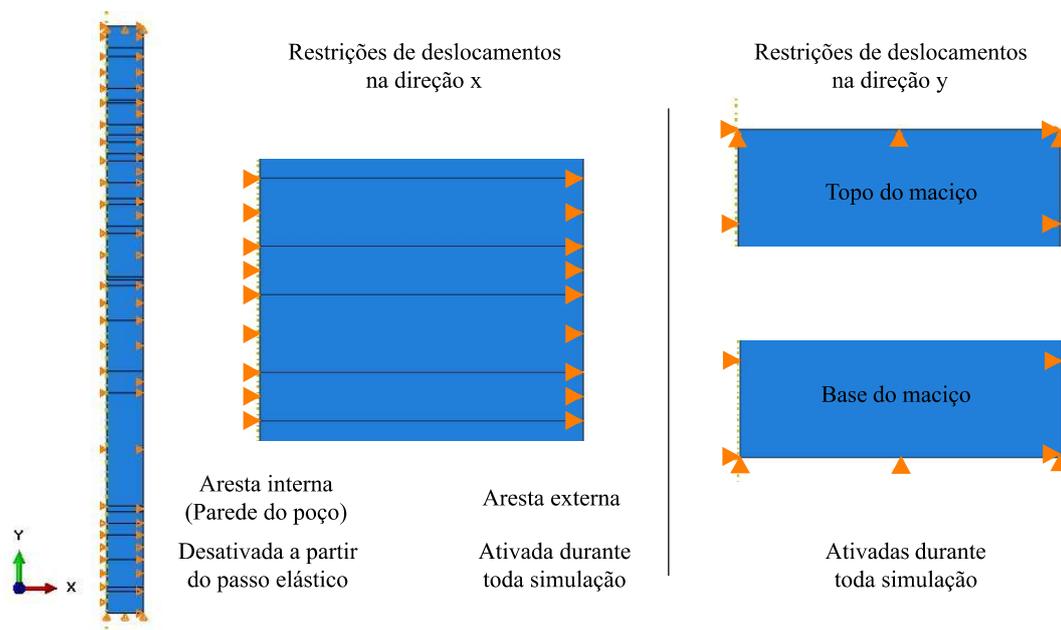
Fonte: Autor, 2021

É possível adicionar materiais no ABAQUS com seus diversos tipos de comportamento. Para este trabalho, são definidas as propriedades físicas e mecânicas de cada rocha por meio dos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. O ABAQUS não tem, em suas funcionalidades, o mecanismo duplo de deformação como lei do comportamento viscoso, entretanto, ele permite incorporar essa lei através da implementação de sub-rotinas. Após a criação dos materiais, é necessário atribuir suas propriedades a geometria do problema. Dessa forma, é criada uma seção para cada tipo de rocha e elas são atribuídas a cada uma das partições geradas anteriormente, de acordo com o perfil geológico a ser analisado.

Toda modelagem no ABAQUS é baseada no conceito de um pacote com exemplos de objetos, para esse problema é criado um pacote contendo apenas um exemplo sobre o objeto criado anteriormente. Para simular a perfuração instantânea, são utilizados quatro passos: i) inicial (gerado automaticamente pelo ABAQUS); ii) geostático; iii) elástico; e iv) viscoso.

No passo inicial, são impostas as restrições de deslocamento, conforme a Figura 3.3. É preciso ressaltar que, a partir do passo elástico, a restrição de deslocamento na parede do poço é desativada, permitindo que os elementos dessa região se deformem durante o restante da simulação. No passo inicial, também são aplicados os campos pré-definidos de tensão geostática e gradiente térmico.

Figura 3.3 – Restrições de deslocamento no ABAQUS

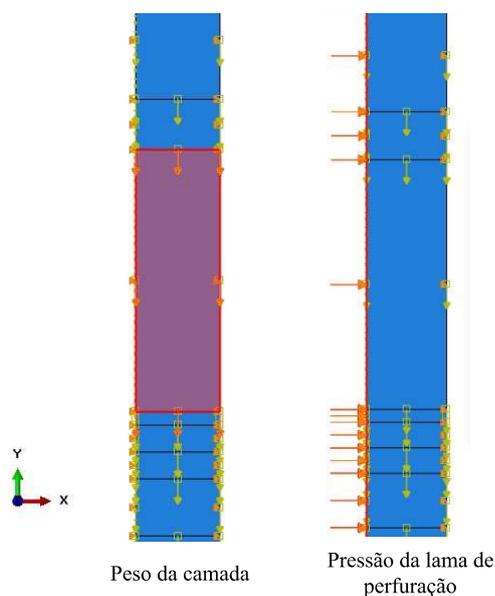


Fonte: Autor, 2021

O ABAQUS dispõe de um campo específico para definição da tensão geostática, no qual são apontados dois valores de tensão e suas respectivas cotas, então o campo é gerado e considera que a tensão geostática varia linearmente com a profundidade. O gradiente térmico é definido de forma análoga, por meio dos valores de temperatura no topo e na base do maciço.

Após o passo inicial, tem-se o passo geostático, no qual são impostas as forças de corpo, para simular o peso que uma camada faz sobre a camada que está imediatamente abaixo dela (ver Figura 3.4). No passo elástico, é aplicado um carregamento para simular a pressão que a lama de perfuração faz na parede do poço (ver Figura 3.4). Como o valor da pressão varia com a profundidade, é criada uma expressão para o cálculo do valor do peso da lama de acordo com a cota. O último passo é o viscoso, nele são informados o período de análise e valores para incrementos máximo e mínimo de tempo.

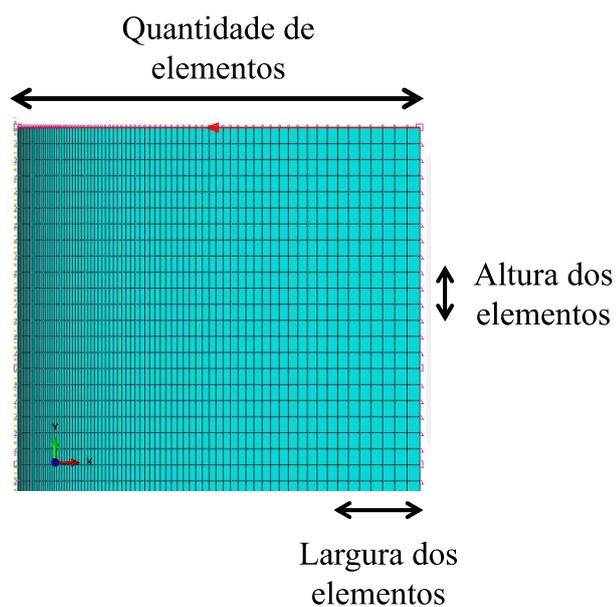
Figura 3.4 – Carregamentos de peso das camadas e pressão da lama de perfuração



Fonte: Autor, 2021

Para a geração da malha de elementos finitos, é definido o tipo de elemento utilizado e a discretização é realizada, conforme descrito na Seção 3.1. A discretização é realizada por meio da quantidade de elementos na direção radial e da definição da altura do elemento. Para isso, selecionam-se as arestas verticais e define-se a opção de discretização pela quantidade ou tamanho do elemento.

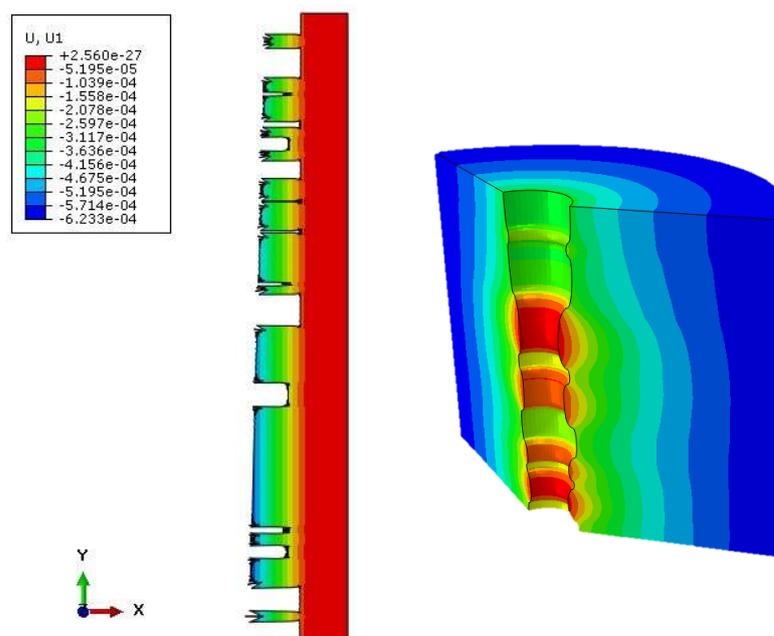
Figura 3.5 – Geração da malha de elementos finitos no ABAQUS



Fonte: Autor, 2021

O modelo criado nas etapas anteriores é submetido a análise numérica, em seguida, é gerado o arquivo de resultados. Dentro da própria interface do ABAQUS/CAE, é possível visualizar os resultados por meio do perfil de deformação ou campos de deslocamento e tensão (ver Figura 3.6). Adicionalmente, podem ser escolhidas regiões específicas para elaborar gráficos de tensão, deformação e deslocamento entre outras variáveis.

Figura 3.6 – Visualização dos resultados



Fonte: Autor, 2021

Todas as etapas detalhadas nesta Seção podem ser automatizadas. O ABAQUS dispõe de uma ferramenta, denominada de *Macro Manager*, na qual é possível gravar um algoritmo, em Python, todas as etapas de modelagem, simulação e coleta dos resultados. Esse código pode ser parametrizado para a modelagem de diversos cenários de forma mais ágil e menos suscetível a erros.

### 3.1.2 PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA USANDO O SESTALS

O SESTALS é um *software* desenvolvido pelo LCCV em parceria com a Petrobras com o objetivo de modelar o problema geomecânico de perfuração de poços verticais em rochas salinas, adotando a estratégia de perfuração instantânea. No SESTALS, podem ser realizadas modelagens numéricas unidimensionais ou bidimensionais axissimétricas. Além disso, o SESTALS simula operações de repasse, caso exista a necessidade. O repasse é uma operação que tem como objetivo recondicionar o diâmetro do poço a um estado adequado (Paranhos Sobrinho, 2019). Condicionar o poço para a descida do revestimento e eliminar trechos com diâmetros apertados são algumas das situações mencionadas por Yarim et al. (2008) que se justifica a aplicação do repasse.

Assim como o ABAQUS, o SESTSAL é um *software* baseado no método dos elementos finitos. O SESTSAL realiza integração numérica explícita no domínio do tempo, considerando incremento de tempo adaptativo. A tensão geostática também é considerada em sua formulação, diante disso, a modelagem é bastante simplificada, resumindo-se à definição de um conjunto de parâmetros, o que reduz os riscos de erros de modelagem.

Na etapa de modelagem, os dados de entrada são definidos textualmente e a geração do modelo é automática, uma vez que sempre o mesmo problema é estudado. A geração da malha de elementos finitos é realizada de forma automática com base na geometria do problema.

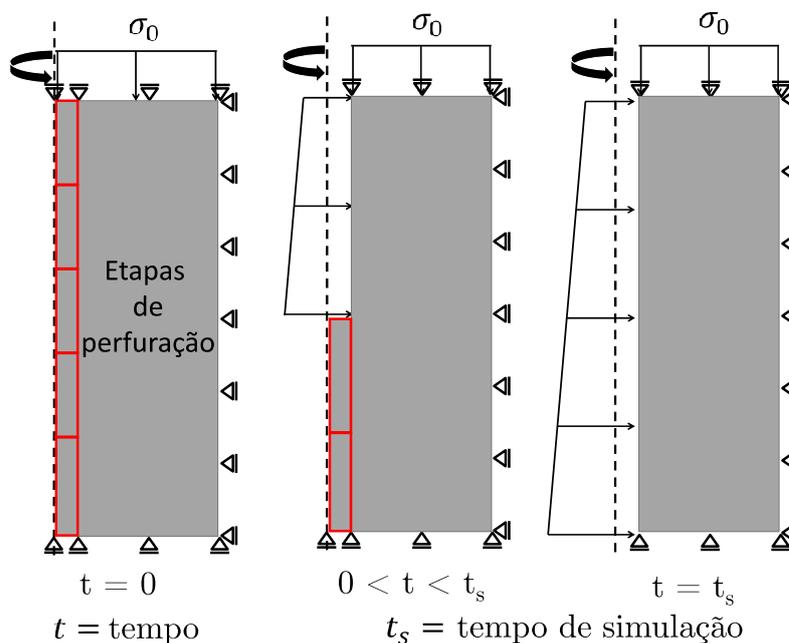
Com relação à etapa de análise numérica, diferente do ABAQUS que é um *software* comercial capaz de simular numericamente uma grande gama de problemas e fenômenos, o simulador SESTSAL é focado em simular apenas o comportamento de rochas salinas ao serem perfuradas em poços verticais. Adicionalmente, por ser especializado em solucionar problemas de poços, em geral deve ser mais eficiente computacionalmente. Avaliar essa eficiência é um dos objetivos deste trabalho.

Com relação à etapa de coleta e interpretação dos resultados, apenas o que é de interesse é armazenado para a elaboração de gráficos e tabelas, o que oferece total controle sobre o formato de saída. A vantagem no uso de ferramentas especializadas é que todas funcionalidades e metodologias incorporadas são pensadas para acelerar ou melhorar a qualidade das respostas desse problema específico. Dessa forma, a elaboração de rotinas para automatização da geração de modelos e coleta de resultados são simplificadas.

## 3.2 PERFURAÇÃO EM ETAPAS

A perfuração em etapas adotada neste trabalho é semelhante a apresentada por Ferreira (2014). Com a utilização dessa estratégia, a região do poço é incluída no domínio do problema, a qual é subdividida em etapas de perfuração (ou estágios de escavação) de acordo com a ROP, que é um parâmetro na modelagem, conforme ilustra a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Esquemática da perfuração em etapas



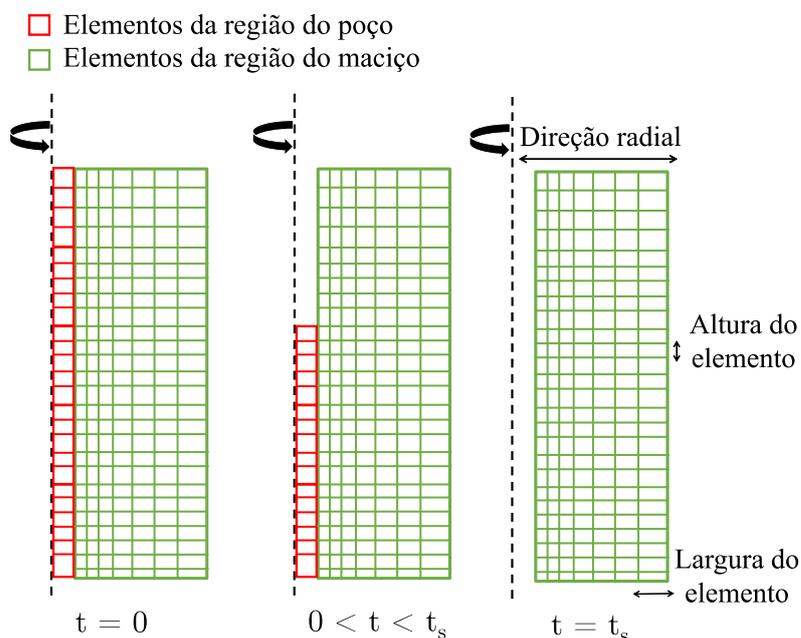
Fonte: Autor, 2021

As definições das restrições de deslocamento, de gradiente térmico e geostático são estabelecidas da mesma forma que é realizada na perfuração instantânea, entretanto, essas definições também são estabelecidas na região do poço. Dessa forma, a simulação inicia com os deslocamentos restringidos em todo o maciço e definição das tensões geostáticas atuantes no maciço salino antes da escavação ( $t = 0$ ). Posteriormente, para cada etapa de perfuração, tem-se a remoção dos elementos da região do poço de forma gradativa de acordo com a ROP e introdução da pressão do fluido de perfuração na parede do poço ( $0 < t < t_s$ ). Assim, apenas a borda do poço, onde foram removidos os elementos, está livre para se deformar.

Nesta etapa, o tempo de simulação depende da espessura da camada e da velocidade de perfuração, por exemplo, uma camada com 25 m de espessura perfurada a uma taxa de perfuração de 10 m/h teria 3 estágios de escavação com tempos de simulação de 1 h, 1 h e 0,5 h, onde seriam removidos 10 m, 10 m, e 5 m, respectivamente. Após a remoção de todos os elementos da região do poço, pode haver uma última etapa, em que todas as camadas de rocha já foram expostas e estão livres para se deformar. Geralmente, o período considerado nessa última etapa é o tempo que leva para remoção da coluna de perfuração, descida do revestimento e cimentação ( $t = t_s$ ).

Com relação à malha de elementos finitos, inicialmente a região do poço é subdividida em etapas de perfuração que, posteriormente, é discretizada com elementos de largura igual ao raio do poço. A Figura 3.8 exemplifica a remoção dos elementos na região do poço de acordo com a evolução da simulação. Como o objetivo deste trabalho é comparar as duas estratégias de simulação da perfuração, a altura adotada para os elementos em cada litologia é a mesma utilizada na perfuração instantânea, garantindo assim que após a remoção de todos os elementos na região do poço a malha seja a mesma em ambas as estratégias.

Figura 3.8 – Malha de elementos finitos para a perfuração em etapas



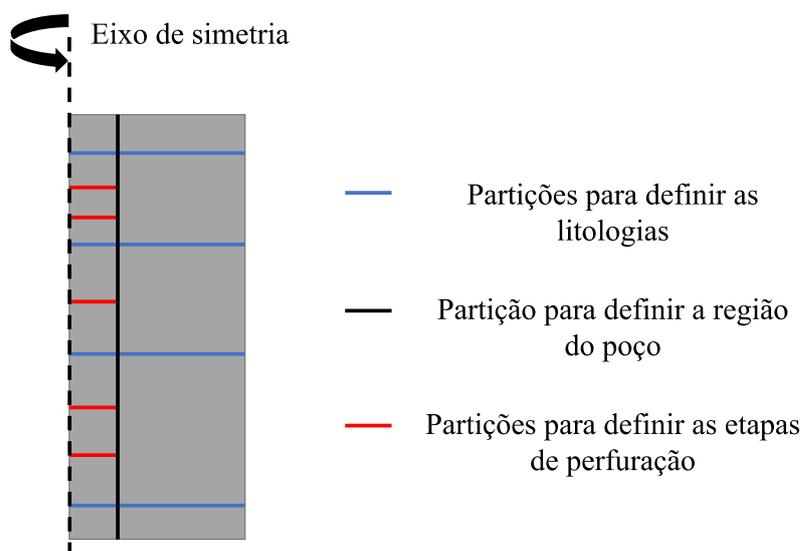
Fonte: Autor, 2021

### 3.2.1 PERFURAÇÃO EM ETAPAS USANDO O ABAQUS

A partir da modelagem da perfuração instantânea no ABAQUS, detalhada na Seção 3.1.1, são realizadas algumas alterações para simular a perfuração em etapas usando o ABAQUS.

Para essa estratégia, o desenho da geometria do problema deve considerar a região do poço em seu domínio. Partições na geometria são feitas para separar a região do poço do restante do maciço, bem como os diferentes tipos de litologia. A partir da ROP, as cotas de topo e base de cada etapa de perfuração são definidas e utilizadas para realizar partições referentes a cada região que é removida. A Figura 3.9 ilustra como as partições são realizadas.

Figura 3.9 – Partições para representação das etapas de perfuração

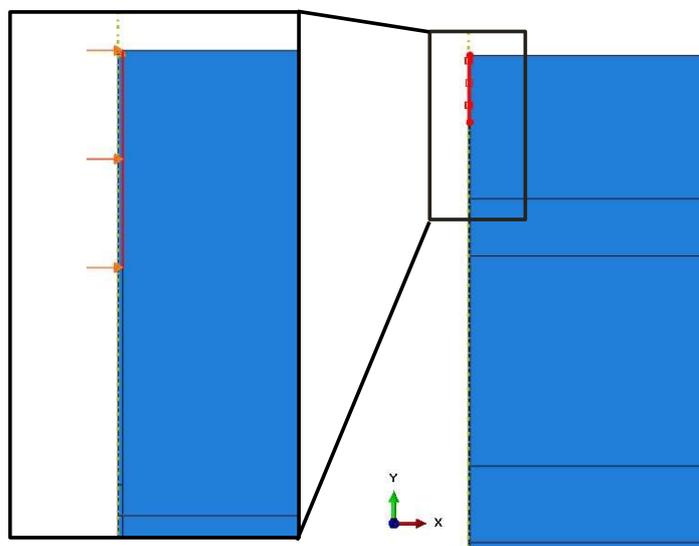


Fonte: Autor, 2021

Algumas etapas para a modelagem da perfuração em etapas são idênticas ao que é realizado na modelagem da perfuração instantânea, tais como a atribuição das propriedades dos materiais à geometria do problema, definição dos campos pré-definidos de tensão e temperatura, definição do peso de cada camada e restrições de deslocamento, que são atribuídas inclusive na região do poço.

Com relação aos passos para a simulação, os passos inicial e geostático são construídos da mesma forma que é realizado na modelagem da perfuração instantânea. Na sequência, tem-se um passo elástico e um passo viscoso para cada etapa de perfuração. Para cada passo elástico uma região de perfuração é removida. Adicionalmente, é aplicada a pressão da lama de perfuração na parede do poço. A Figura 3.10 ilustra como é realizada a remoção da região e a aplicação da pressão na borda do poço no ABAQUS. Após cada passo elástico, tem-se um passo viscoso, com um tempo de simulação calculado a partir da espessura da região de perfuração e ROP da camada, conforme exemplificado na Seção 3.2.

Figura 3.10 – Desativação dos elementos na etapa de perfuração e aplicação da pressão da lama de perfuração na borda do poço



Fonte: Autor, 2021

A malha de elementos finitos é gerada para a região do maciço conforme descrito na Seção 3.1.1, já a região do poço é discretizada com a largura do elemento igual ao raio do poço. Como dito anteriormente, o objetivo deste trabalho é comparar as duas estratégias de simulação da perfuração, a altura adotada para os elementos em cada litologia é a mesma utilizada na perfuração instantânea, garantindo que, após a remoção de todos os elementos na região do poço a malha seja a mesma em ambas as estratégias. A Figura 3.8 exemplifica a discretização adotada.

As etapas de análise numérica e coleta dos resultados são realizadas de forma idêntica a Seção 3.1.1.

### 3.2.2 PERFURAÇÃO EM ETAPAS USANDO O SESTALS

A estratégia da perfuração em etapas é implementada computacionalmente (em linguagem C++) no simulador SESTALS, pois, até o desenvolvimento deste trabalho, o simulador utilizava apenas a perfuração instantânea.

O SESTALS permite eliminar elementos, funcionalidade implementada para trabalhar o repasse e é utilizada para reproduzir a perfuração do poço em etapas. Paranhos Sobrinho (2019) aborda a incorporação da simulação do repasse no SESTALS, removendo elementos inteiros nas regiões com diâmetros apertados, conforme dito na Seção 3.1.2. Nessa linha, Francisco (2020) apresenta uma estratégia para melhorar a precisão da simulação do repasse no simulador, por meio de cortes nos elementos e remalhamento na região onde é simulada a operação de repasse.

Dessa forma, é criada uma rotina para a captura do valor da ROP associada a cada camada litológica. Na sequência, são desenvolvidas rotinas para adicionar nós e elementos finitos na região do poço. De forma semelhante ao que é realizado na perfuração em etapas usando o

ABAQUS, grupos de elementos a serem removidos são definidos em cada etapa de perfuração de acordo com ROP. É implementada uma rotina para a deleção dos grupos elementos de acordo com o instante no qual a simulação se encontra.

Com relação à simulação, as etapas elástica e viscosa são definidas de forma iterativa. Na etapa elástica tem-se a remoção do conjunto de elementos, enquanto que na etapa viscosa é calculado o tempo para as camadas expostas se deformarem. É preciso ressaltar que, após a remoção de um grupo de elementos, a taxa de deformação dos elementos da borda do poço é alta, dessa forma, são necessários incrementos de tempo suficientemente pequenos para garantir a qualidade dos resultados. Com a evolução da simulação, essa taxa diminui e pode-se utilizar incrementos de tempo maiores. Nesse contexto, o incremento de tempo é atualizado para o seu valor mínimo no início de cada etapa de perfuração.

Na formulação do SESTASAL, a pressão associada à lama de perfuração atinge apenas os elementos da borda do poço. Assim, a lista de elementos da parede do poço é atualizada a cada remoção dos grupos de elementos, reutilizando a mesma funcionalidade utilizada na simulação do repasse.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações de dois exemplos disponíveis na literatura. O primeiro exemplo utiliza a perfuração instantânea e o segundo utiliza a perfuração em etapas. A modelagem é realizada conforme descrito na Seção 3.1 para a simulação da perfuração instantânea e conforme a Seção 3.2 para a estratégia de perfuração em etapas. A reprodução desses exemplos tem o objetivo de validar os dois tipos de modelagem da perfuração, comparando os resultados obtidos com os fornecidos na literatura. Após a validação dos resultados, é definido um cenário de referência para avaliar o tempo computacional envolvido de acordo com o simulador utilizado. Adicionalmente, é apresentada uma comparação dos resultados entre os tipos de perfuração, avaliando a influência da consideração da ROP no fechamento do poço.

### 4.1 EXEMPLO 1: SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO INSTANTÂNEA

O cenário de estudo adotado para a simulação da perfuração instantânea é o poço 6-RJS-457. Firme (2013) e Firme et al. (2018) apresentam esse cenário, que possui uma camada de espessura de 405 m com intercalações de halita, anidrita e folhelho. O objetivo é garantir o correto funcionamento das rotinas de modelagem desenvolvidas, bem como os valores dos parâmetros considerados no modelo. Nesse contexto, é realizada a simulação numérica utilizando os simuladores SESTAL e ABAQUS.

Os valores numéricos associados às propriedades das rochas são disponibilizados por Firme (2013). Os valores de gradiente térmico e peso específico associados à cada rocha são apresentados na Tabela 4.1 e os valores das propriedades elásticas das rochas na Tabela 4.2. A halita é modelada como um material viscoelástico, com seu comportamento de fluência regido pelo mecanismo duplo de deformação (FIRME, 2013), conforme apresenta a Tabela 4.3). As rochas folhelho e anidrita são consideradas com comportamentos elastoplásticos representados pelo modelo de Mohr-Coulomb (FIRME, 2013), conforme exibe a Tabela 4.4).

Tabela 4.1 – Propriedades termomecânicas das rochas (Poço: 6-RJS-457)

Rochas	Peso Específico [kN/m <sup>3</sup> ]	Gradiente Térmico [°C/km]
Anidrita	28,63	12,00
Folhelho	22,56	30,00
Halita	21,70	12,00

Fonte: Firme (2013)

Tabela 4.2 – Propriedades elásticas das rochas (Poço: 6-RJS-457)

Rochas	$E$ [GPa]	$\nu$
Halita	25,37	0,36
Folhelho	19,10	0,15
Anidrita	55,11	0,36

Fonte: Firme (2013)

Na Tabela 4.2,  $E$  é o módulo de elasticidade da rocha e  $\nu$  é o seu coeficiente de Poisson.

Tabela 4.3 – Propriedades viscosas da halita (Poço: 6-RJS-457)

Propriedades	Valores
$\sigma_0$ [kPa]	9910,00
$\varepsilon_0$ [h <sup>-1</sup> ]	1,888 10 <sup>6</sup>
$T_0$ [°C]	86,00
$n_1$	3,36
$n_2$	7,55
$Q$ [kcal/mol]	12,00
$R$ [kcal/mol.K]	1,9858 10 <sup>-3</sup>

Fonte: Firme (2013)

Tabela 4.4 – Propriedades plásticas das rochas (Poço: 6-RJS-457)

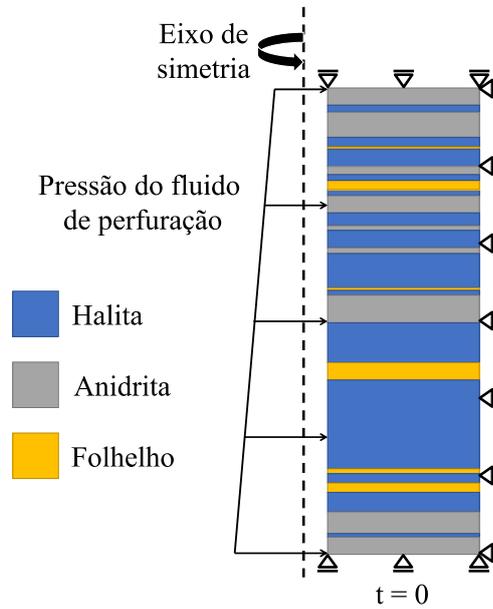
Rochas	$c$ [kPa]	$\phi$
Anidrita	900,00	37°
Folhelho	4800,00	22°

Fonte: Firme (2013)

Na Tabela 4.4,  $c$  é a coesão e  $\phi$  é o ângulo de atrito do modelo de Mohr-Coulomb.

A Figura 4.1 ilustra uma esquematização do perfil litológico do modelo com as restrições de deslocamento, além disso, a pressão do fluido de perfuração atua em toda parede do poço desde o instante inicial da simulação. As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os dados referentes à perfuração do poço e o perfil litológico do modelo, respectivamente.

Figura 4.1 – Perfil do modelo axissimétrico



Fonte: Adaptado de Firme (2013)

Tabela 4.5 – Dados do poço 6-RJS-457

Dados	Valores
Diâmetro da broca	12,25 pol
Peso do fluido de perfuração	14,30 ppg
Tensão geostática no topo do maciço	88,32 MPa
Temperatura no topo do maciço	116,86°C

Fonte: Firme (2013)

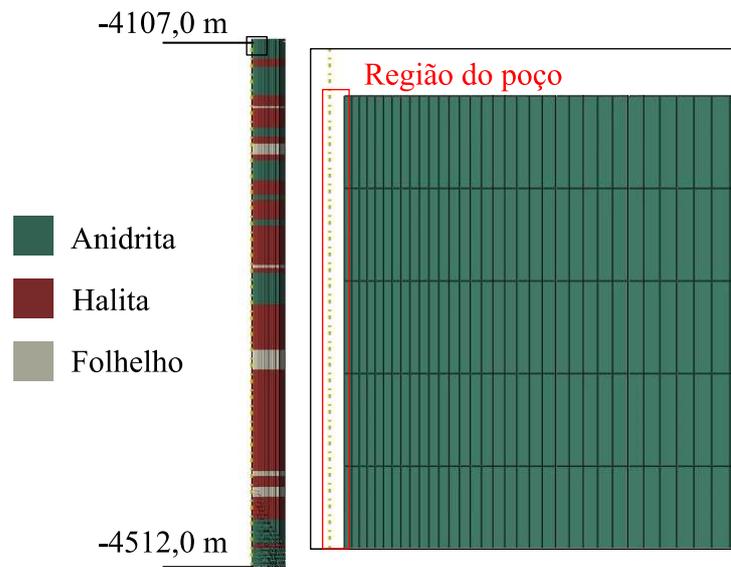
Tabela 4.6 – Litologia do modelo

Camada		Topo [m]	Base [m]
LDA	LDA	0,0	-345,0
Pós-Sal	Folhelho	-345,0	-4107,0
Camada 1	Anidrita	-4107,0	-4122,0
Camada 2	Halita	-4122,0	-4128,0
Camada 3	Anidrita	-4128,0	-4150,0
Camada 4	Halita	-4150,0	-4158,0
Camada 5	Folhelho	-4158,0	-4160,0
Camada 6	Halita	-4160,0	-4175,0
Camada 7	Anidrita	-4175,0	-4182,0
Camada 8	Halita	-4182,0	-4187,0
Camada 9	Folhelho	-4187,0	-4195,0
Camada 10	Halita	-4195,0	-4200,0
Camada 11	Anidrita	-4200,0	-4215,0
Camada 12	Halita	-4215,0	-4226,0
Camada 13	Anidrita	-4226,0	-4230,0
Camada 14	Halita	-4230,0	-4245,0
Camada 15	Anidrita	-4245,0	-4250,0
Camada 16	Halita	-4250,0	-4280,0
Camada 17	Folhelho	-4280,0	-4282,0
Camada 18	Halita	-4282,0	-4286,0
Camada 19	Anidrita	-4286,0	-4310,0
Camada 20	Halita	-4310,0	-4345,0
Camada 21	Folhelho	-4345,0	-4360,0
Camada 22	Halita	-4360,0	-4438,0
Camada 23	Folhelho	-4438,0	-4442,0
Camada 24	Halita	-4442,0	-4450,0
Camada 25	Folhelho	-4450,0	-4458,0
Camada 26	Halita	-4458,0	-4475,0
Camada 27	Anidrita	-4475,0	-4494,0
Camada 28	Halita	-4494,0	-4497,0
Camada 29	Anidrita	-4497,0	-4512,0

Fonte: Firme (2013)

É definido um modelo numérico bidimensional axissimétrico, aproveitando sua simetria em relação ao eixo central do poço. Adicionalmente, são definidas as cotas de topo e base para cada litologia, bem como sua discretização na malha de elementos finitos. É utilizada uma altura de elemento de 1 m para todas as litologias e uma discretização radial de 80 elementos, gerando uma malha com 98.171 nós e 32.400 elementos quadrilaterais de oito nós, axissimétricos, com integração completa. No ABAQUS esse elemento é denominado de CAX8. O detalhe da malha de elementos finitos na região do poço é mostrado na Figura 4.2.

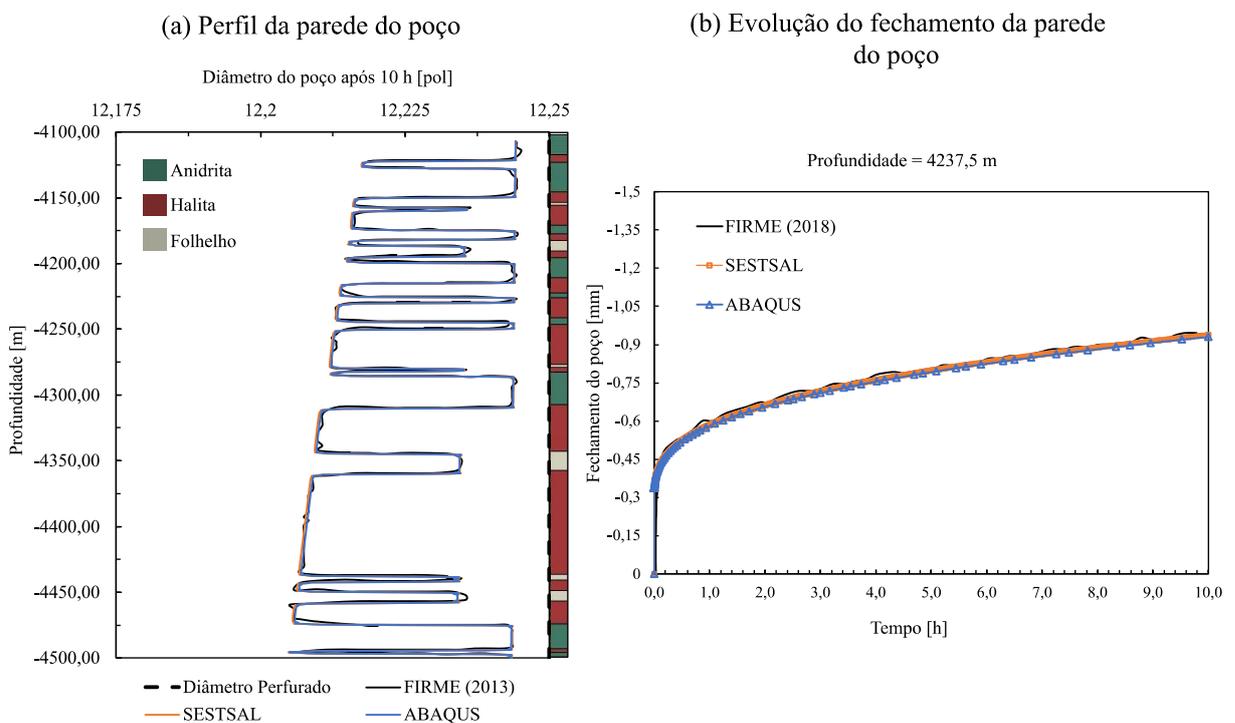
Figura 4.2 – Detalhe da malha de elementos finitos do modelo numérico do poço 6-RJS-457



Fonte: Autor, 2021

Os resultados de interesse são coletados e apresentados na Figura 4.3. Firme et al. (2018) definiram o meio de uma camada de halita (4237,5 m) para analisar o fechamento do poço ao longo do tempo de simulação.

Figura 4.3 – Comparação dos resultados obtidos entre a estratégia de perfuração instantânea e os apresentados por Firme (2013) e Firme et al. (2018)



Fonte: Autor, 2021

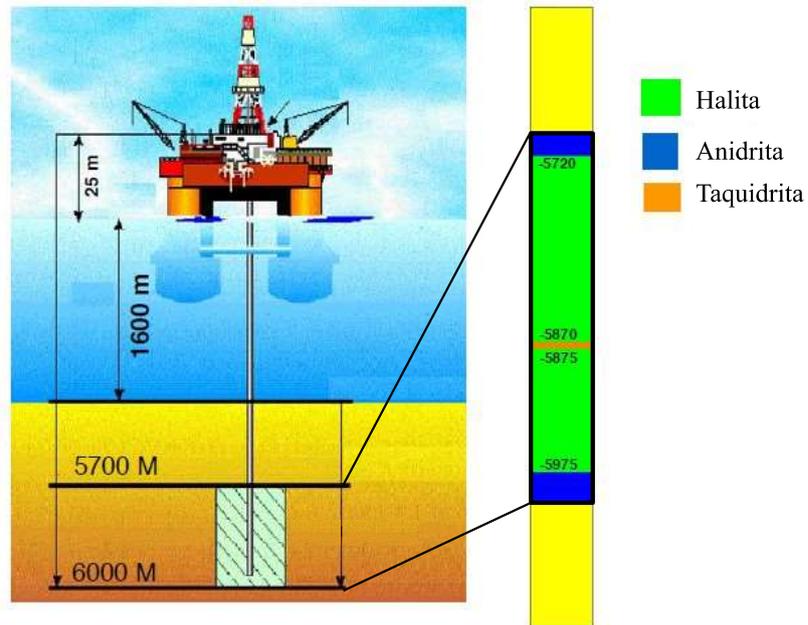
Os resultados apresentados por Firme (2013) e Firme et al. (2018) são coletados diretamente a partir das imagens dos gráficos disponíveis, de forma que são valores aproximados. Apesar disso, observa-se uma boa conformidade entre os resultados fornecidos pelo ABAQUS, SESTALS e por Firme (2013) para o perfil do poço após 10 h e Firme et al. (2018) para o seu fechamento ao longo do tempo. Dessa forma, verifica-se que a rotina elaborada está correta, uma vez que a simulação forneceu resultados em conformidade com a literatura. Com relação a utilização do ABAQUS e do SESTALS, é verificada uma diferença máxima de 0,824% nos resultados de fechamento do poço. Desse modo, verifica-se que a perfuração instantânea pode ser simulada por meio do ABAQUS ou do SESTALS, sem grande diferença entre os resultados. Uma comparação do tempo computacional envolvido com o uso dos simuladores é realizada na Seção 4.3.1.

## 4.2 EXEMPLO 2: SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO EM ETAPAS

O cenário de estudo da simulação da perfuração em etapas é apresentado por Costa et al. (2011). O objetivo é verificar a estratégia da perfuração em etapas, bem como avaliar o correto funcionamento das rotinas de modelagem desenvolvidas. Portanto, é realizada a simulação numérica utilizando os simuladores SESTALS e ABAQUS.

Este cenário possui uma camada de espessura de 300 m, como pode ser visto na Figura 4.4. Os dados do cenário e as propriedades elásticas usadas na modelagem dos materiais são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8, respectivamente. Em seus estudos, Costa et al. (2011) não fornecem os valores para alguns parâmetros, diante disso, os valores usados para os dados elastoplásticos da anidrita, densidades da anidrita e halita são iguais aos descritos na Seção 4.1. Os valores das propriedades de fluência e densidades da taquidrita são disponibilizados por Poiate Jr, Costa e Falcão (2006) e são descritas na Tabela 4.9.

Figura 4.4 – Perfil geológico



Fonte: Adaptado de Costa et al. (2011)

Tabela 4.7 – Dados do poço simulado

Dados	Valores
Diâmetro da broca	12,25 pol
Peso do fluido de perfuração	12,00 ppg
Tensão geostática no topo do maciço	107,63 MPa
Temperatura no topo do maciço	140,00°C
Taxa de penetração	10 m/h

Fonte: Costa et al. (2011)

Tabela 4.8 – Propriedades elásticas das rochas

Rochas	$E$ [GPa]	$\nu$
Halita	20,40	0,36
Taquidrita	4,92	0,33

Fonte: Costa et al. (2011)

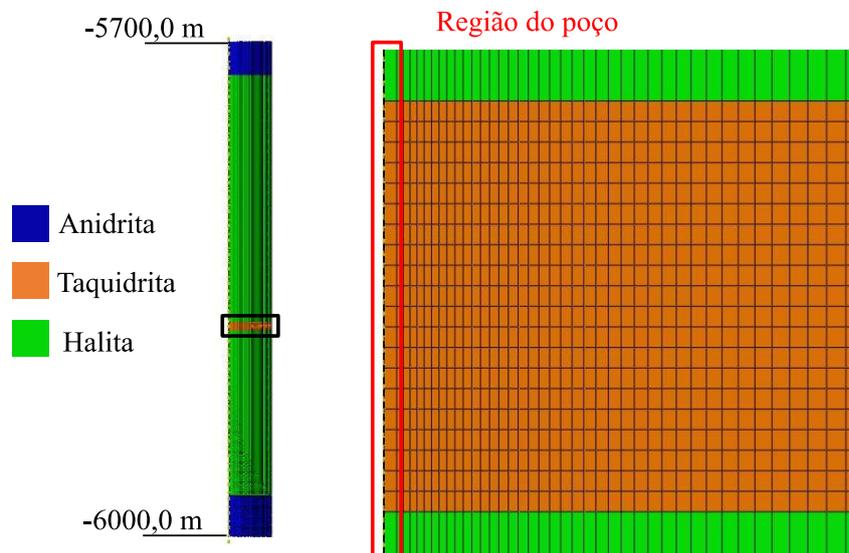
Tabela 4.9 – Propriedades viscosas da taquidrita

Propriedades	Valores
$\sigma_0$ [KPa]	7023,00
$\varepsilon_0$ [h <sup>-1</sup> ]	$1,1256 \times 10^{-4}$
$T_0$ [°C]	86,00
$n_1$	2,40
$n_2$	7,12
$Q$ [Kcal/mol]	12,00
$R$ [Kcal/mol.K]	$1,9858 \times 10^{-3}$

Fonte: Poiate Jr, Costa e Falcão (2006)

O modelo numérico é construído de forma análoga ao que foi apresentado na Seção 4.1. Com relação a malha de elementos finitos, são adicionados elementos na região do poço, os quais serão removidos durante a simulação, de largura igual ao raio do poço e altura de 1 m nas camadas de halita e anidrita. Devido a maior mobilidade da taquidrita e ser a região de interesse para coleta dos resultados, é adotada uma altura do elemento de 0,25 m nesta camada. Com isso são gerados 77.338 nós e 25.515 elementos quadrilaterais de oito nós, axissimétricos, com integração completa. O detalhe da malha de elementos finitos na região do poço é mostrado na Figura 4.5.

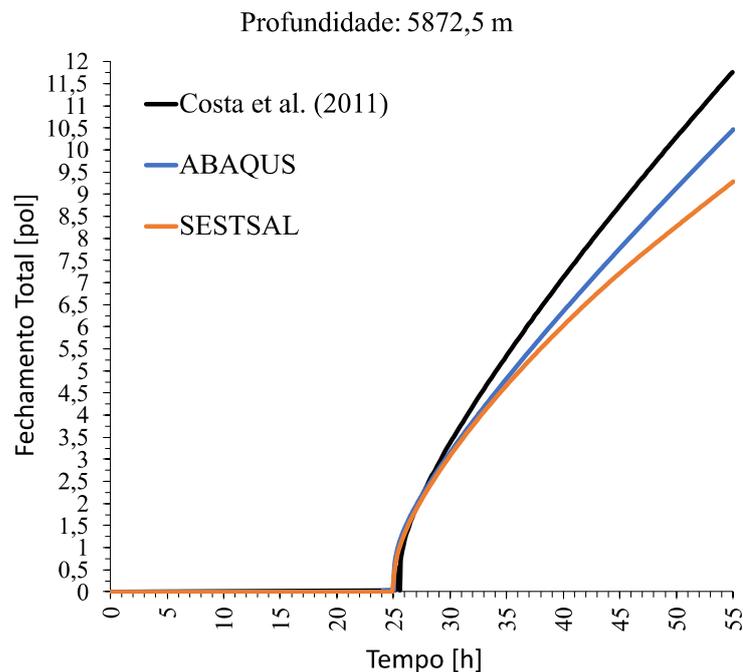
Figura 4.5 – Detalhe da malha de elementos finitos do modelo numérico



Fonte: Autor, 2021

Os resultados após a análise numérica são apresentados na Figura 4.6. Costa et al. (2011) fornecem apenas de forma gráfica os resultados de fechamento do poço ao longo do tempo no meio da camada de taquidrita (5872,5 m), sendo assim, os valores plotados no gráfico são aproximados.

Figura 4.6 – Curvas do fechamento do poço no meio da camada de taquidrita



Fonte: Autor, 2021

A diferença entre os resultados de fechamento do poço fornecidos pelo ABAQUS com os apresentados por Costa et al. (2011) é de aproximadamente 11%, para o SESTALS a diferença é de aproximadamente 21%. Um dos motivos que pode ter gerado essa diferença decorre da utilização de valores distintos dos usados por Costa et al. (2011) para a descrever o comportamento de fluência da taquidrita. De forma semelhante, os valores de densidade não são fornecidos, logo as tensões geostáticas utilizadas neste trabalho podem ser diferentes das usadas por Costa et al. (2011). Como o cálculo das deformações por meio do mecanismo duplo de deformação depende desses dois fatores, os resultados da simulação desse modelo foram discrepantes. Adicionalmente, a integração temporal no SESTALS é explícita, sendo necessário utilizar incrementos de tempo suficientemente pequenos para garantir a qualidade dos resultados. No ABAQUS é feita a integração implícita, na qual é possível trabalhar com incrementos de tempo maiores com menos prejuízo na qualidade do resultado. A utilização de diferentes estratégias para integração temporal e para o cálculo adaptativo dos incrementos de tempo, pode ser mais um motivo que explique a diferença observada entre os simuladores.

### 4.3 ESTUDOS COMPARATIVOS

O objetivo desta etapa é comparar o tempo computacional envolvido para simular a perfuração no SESTALS e no ABAQUS utilizando a perfuração instantânea e em etapas. Adicionalmente, é verificada a influência das estratégias de perfuração no fechamento do poço.

Nesta etapa é modelado o cenário apresentado por Firme (2013). A litologia do cenário, dados de perfuração do poço e os valores das propriedades das rochas são discutidos na Seção 4.1.

Entretanto, é considerado apenas o intervalo entre -4107,0 m à -4250 m. Como se trata de um modelo reduzido, a simulação é realizada mais rapidamente, permitindo fazer mais análises sobre o modelo em questão. Em seu estudo, Firme (2013) não considera a perfuração em etapas e o tempo de simulação utilizado é de apenas 10 h. Esse tempo não é suficiente para remover toda a região do poço utilizando a estratégia da perfuração em etapas de acordo com os valores de ROP adotados neste trabalho. Diante destas considerações, é realizada a reprodução da perfuração do cenário estudado considerando um tempo de simulação de 100 h em três situações:

1. de forma instantânea
2. em etapas, considerando o valor da taxa de penetração de 10 m/h para todo o maciço
3. em etapas, considerando um valor específico de taxa de penetração para cada litologia

Existem inúmeros fatores que interferem no valor da ROP, como diâmetro do poço, profundidade, propriedades da litologia perfurada e do fluido da perfuração, tipo da broca e o seu desgaste (HAPNES, 2014). Diante disso, os valores utilizados aqui são fictícios, mas possuem ordem de grandeza realista. Por exemplo, Costa et al. (2011) consideram em seus estudos uma taxa de penetração de 10 m/h para um maciço composto por intercalações de halita, anidrita e taquidrita. Segundo Firme (2013), no caso de evaporitos duros como a anidrita, essa velocidade é menor. Em Mohriak, Szatmari e Anjos (2009) é apresentado um intervalo de 3 a 7 m/h para a perfuração de um maciço composto também por intercalações de halita, anidrita e taquidrita. Nesse contexto, na modelagem da perfuração em etapas com a ROP associada à litologia (situação 3) é adotada a velocidade de 10 m/h para a halita e folhelho e 3 m/h para a anidrita.

#### 4.3.1 AVALIAÇÃO DO TEMPO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO

O objetivo nesta etapa é verificar a eficiência dos simuladores, avaliando o tempo computacional envolvido e a qualidade dos resultados obtidos. Nesse contexto, após a análise numérica das três situações mencionadas na Seção 4.3, é gerado o gráfico do perfil do poço para cada situação no tempo final da simulação e também os gráficos do fechamento do poço ao longo do tempo no meio da camada mais profunda de halita (4237,5 m). A Figura 4.7 compara os resultados fornecidos pelos simuladores para a perfuração de forma instantânea, a Figura 4.8 faz essa mesma análise, considerando a simulação da perfuração em etapas e o valor da ROP constante (10 m/h) para todo o maciço, já a Figura 4.9 considera a simulação da perfuração em etapas com o valor da ROP associado à litologia.

Figura 4.7 – Comparação entre simuladores utilizando a perfuração instantânea

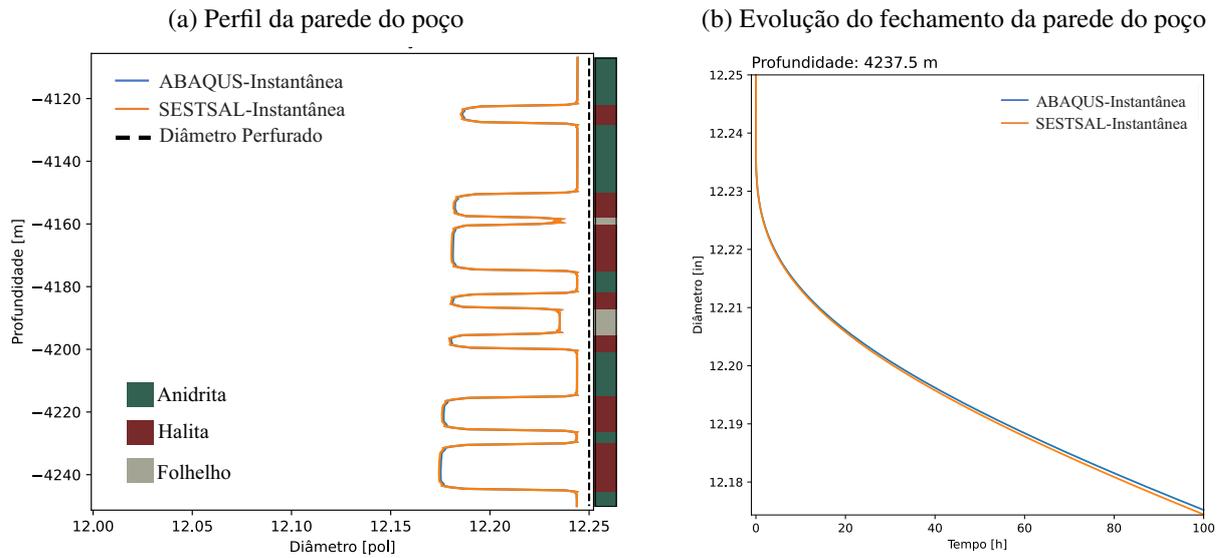


Figura 4.8 – Comparação entre simuladores utilizando a perfuração em etapas e ROP constante

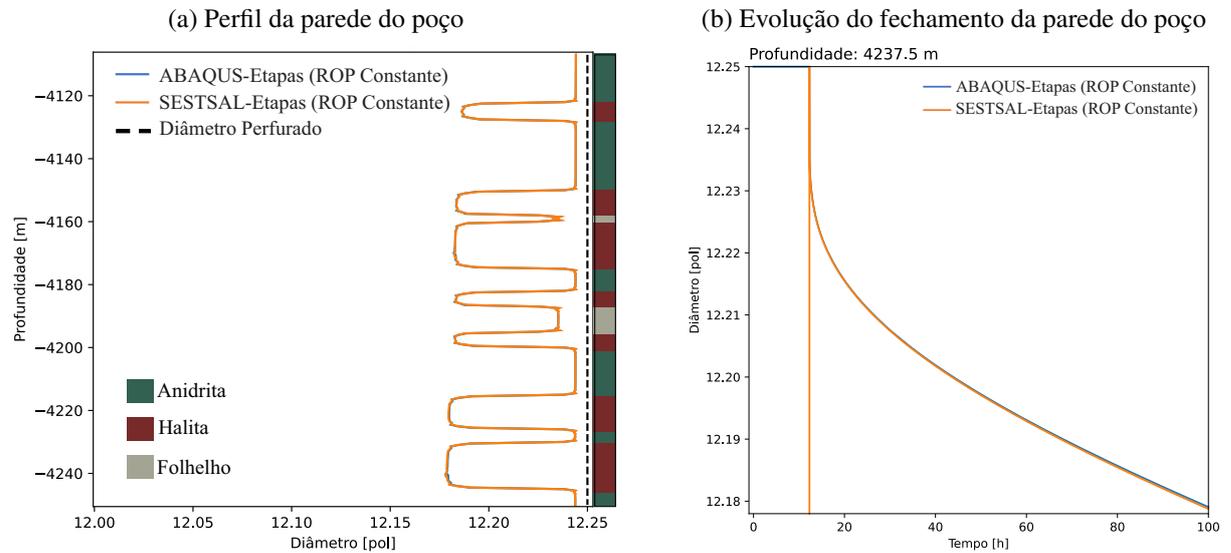
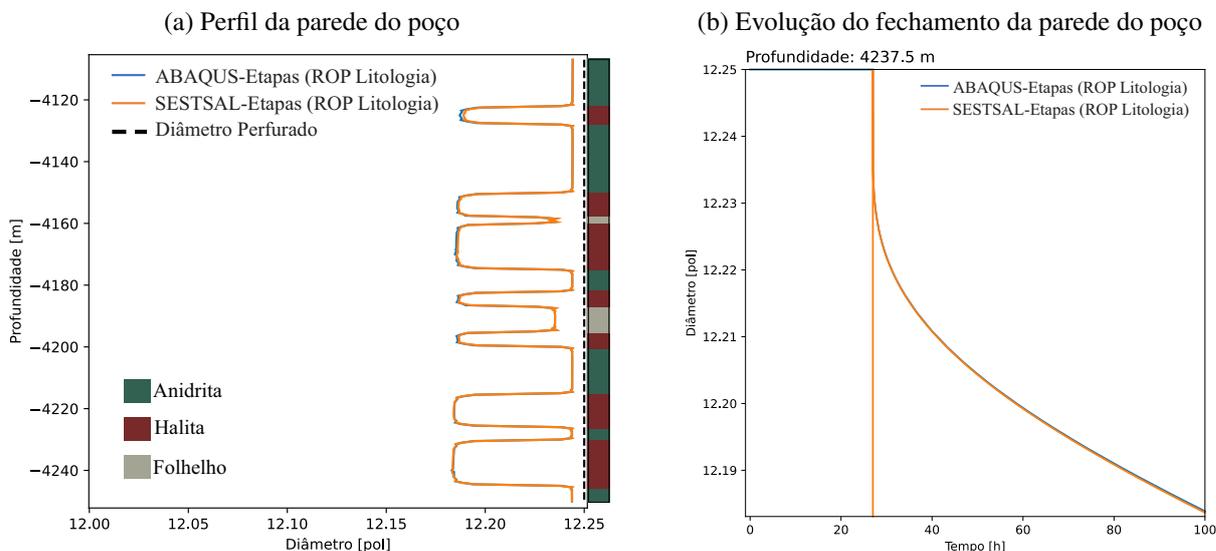


Figura 4.9 – Comparação entre simuladores utilizando a perfuração em etapas e ROP associada à litologia



Fonte: Autor, 2021

A Tabela 4.10 mostra a diferença máxima, entre os resultados de fechamento do poço obtidos com os simuladores. É preciso ressaltar que os valores de todos os parâmetros usados nas simulações são idênticos e a análise é realizada por meio do MEF, logo os resultados deveriam ser iguais. Entretanto, como dito anteriormente, o tipo de integração dos simuladores é diferente. No ABAQUS é feita a integração implícita, na qual é possível trabalhar com incrementos de tempo maiores com menos prejuízo na qualidade do resultado. No SESTALS é feita a integração explícita, na qual são utilizados incrementos de tempo menores para manter a qualidade do resultado. A utilização de diferentes estratégias para integração temporal e para o cálculo adaptativo dos incrementos de tempo, também pode justificar a diferença observada entre os simuladores.

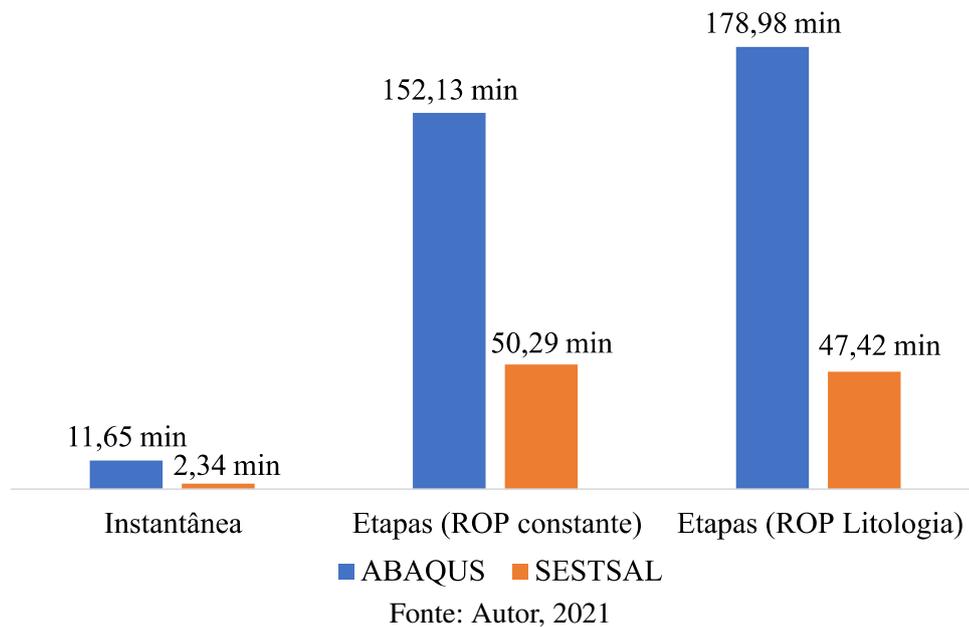
Tabela 4.10 – Diferença máxima entre os simuladores

Estratégia de simulação da perfuração	Diferença [%]
Instantânea	1,046
Etapas (ROP constante)	0,180
Etapas (ROP por litologia)	0,595

Fonte: Autor, 2021

O gráfico da Figura 4.10 apresenta a comparação do tempo computacional para completar cada uma das simulações apresentadas anteriormente. É utilizado um computador com processador Intel Core i7-7500U CPU 2.9 GHz, com memória RAM de 8 GB. O SESTALS apresenta-se como uma ferramenta bem mais ágil em relação ao ABAQUS.

Figura 4.10 – Tempo computacional associado às estratégias e simuladores



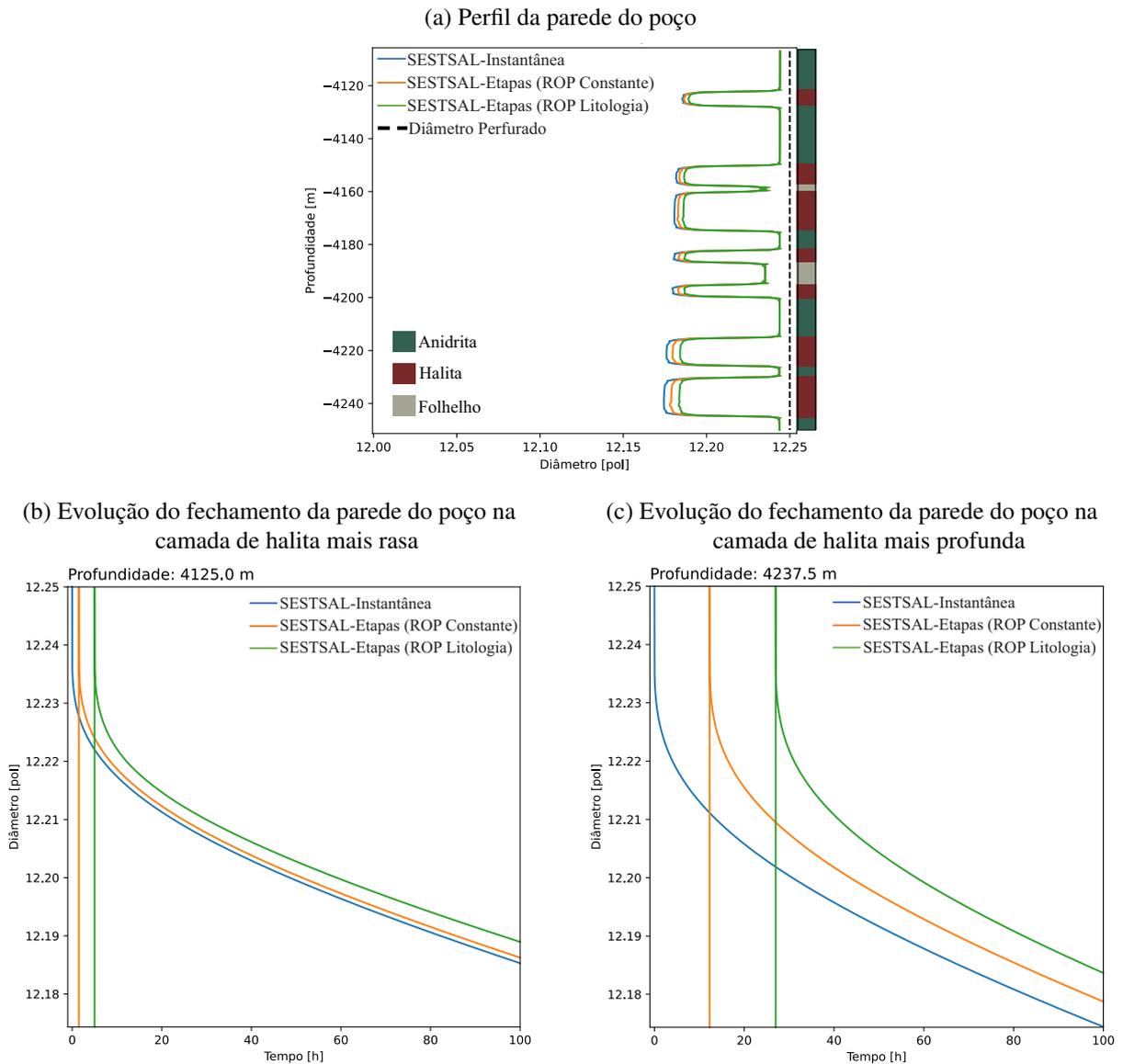
Para a estratégia da simulação da perfuração instantânea os resultados são obtidos 5 vezes mais rápido com o SESTALS. Para a estratégia da perfuração em etapas, tanto com a utilização da ROP padrão como com a ROP associada a cada litologia, os resultados foram obtidos cerca de 3 vezes mais rápido.

A reprodução da perfuração em etapas é mais dispendiosa que a simulação da perfuração instantânea. Um dos motivos que eleva o custo computacional está relacionado a novos desequilíbrios de tensões que ocorrem à medida em que cada grupo de elementos é removido, o que gera a necessidade de reduzir o incremento de tempo a cada nova etapa. Com relação à ferramenta de simulação utilizada, o tempo computacional usando o ABAQUS é elevado em relação ao SESTALS e os resultados são satisfatórios em ambas ferramentas, verificando, assim, a eficiência do uso do SESTALS. Desse modo, na Seção 4.3.2, a avaliação entre os tipos de estratégias é realizada considerando apenas o simulador SESTALS.

#### 4.3.2 AVALIAÇÃO ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO DA PERFURAÇÃO

O objetivo nesta etapa é verificar a influência da utilização das estratégias de perfuração nos resultados do perfil do modelo ao final da simulação e o fechamento do poço ao longo do tempo. De forma semelhante à avaliação do custo computacional, são gerados os gráficos dos resultados de interesse. Para este caso, as regiões de interesse são o meio da camada mais profunda de halita (4237,5 m) e o meio da camada mais rasa de halita (4125,0 m). Os gráficos apresentados na Figura 4.11 comparam os resultados entre os tipos de estratégias de simulação da perfuração.

Figura 4.11 – Comparação entre os tipos de estratégias de simulação da perfuração



Fonte: Autor, 2021

De acordo com os gráficos da Figura 4.11 o fechamento do poço é menor utilizando a perfuração em etapas. A Tabela 4.11 mostra a diferença máxima do fechamento do poço entre as estratégias de simulação da perfuração em etapas com relação à da perfuração instantânea. Observa-se também que, para cotas mais profundas, a utilização da perfuração em etapas produz deslocamentos menores em relação à estratégia de perfuração instantânea. Por outro lado, para cotas mais rasas, a diferença entre as duas alternativas é reduzida. Isso ocorre uma vez que o período de exposição da rocha em camadas rasas é próximo em ambas as estratégias. Entretanto, com a adoção da perfuração em etapas, camadas mais profundas só são expostas várias horas após o início da perfuração.

Tabela 4.11 – Diferença máxima em relação a perfuração instantânea

Estratégia de simulação da perfuração	Diferença [%]
Em etapas (ROP constante)	5,90
Em etapas (ROP por litologia)	12,48

Fonte: Autor, 2021

A perfuração instantânea tende a sobrestimar o fechamento do poço. Desse modo, uma vantagem de usar essa estratégia refere-se que ela está a favor da segurança. Além disso, os resultados são obtidos de forma mais rápida em relação à simulação da perfuração em etapas. Por outro lado, a estratégia de perfuração em etapas tende a gerar resultados mais realistas, com valores menores de fechamento do poço. Dessa forma, uma das vantagens é a possibilidade de reduzir custos em projetos de perfuração de poços. Entretanto, o tempo computacional é mais elevado em relação à perfuração instantânea.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de duas estratégias de simulação da perfuração de poços verticais no comportamento mecânico de rochas salinas. Neste trabalho, foram utilizadas a estratégia da perfuração instantânea, que não considera a taxa de penetração (ROP) em sua modelagem, e estratégia da perfuração em etapas, que considera a ROP na sua modelagem. As simulações foram realizadas por meio do *software* comercial ABAQUS e do *software in-house* do LCCV, SESTSAL. As estratégias adotadas foram validadas mediante a comparação entre os resultados obtidos pelos simuladores e os disponíveis na literatura.

A partir de um cenário de referência, foi possível avaliar o tempo computacional envolvido na simulação da perfuração de poços verticais. A simulação do cenário com o SESTSAL foi cerca de 5 vezes mais rápida que a simulação por meio do ABAQUS, para a estratégia da perfuração instantânea, e 3 vezes mais rápida para a estratégia de perfuração em etapas, fornecendo resultados equivalentes. Como esperado, é verificada a eficiência do SESTSAL em relação ao ABAQUS para a simulação da perfuração de poços, visto que o SESTSAL é direcionado para solução desse tipo de problema.

Com relação à influência do tipo de estratégia, a perfuração instantânea tende a sobrestimar o fechamento do poço, com um custo computacional relativamente baixo. Por outro lado, a estratégia de perfuração em etapas tende a gerar resultados mais realistas, com valores menores de fechamento do poço em cotas mais profundas, porém com um custo computacional mais elevado. Por exemplo, no cenário estudado, a diferença entre os deslocamentos obtidos chegou a 12,48%. Portanto, em situações em que o custo computacional é relevante, pode-se utilizar a estratégia de perfuração instantânea. Embora represente uma metodologia mais conservadora para estimativa do fechamento, ela está a favor da segurança. Portanto, caso a precisão dos resultados seja importante, sugere-se utilizar a estratégia da perfuração em etapas, desde que seja possível aguardar o tempo demandado. Assim, é possível trabalhar com valores de fechamento do poço mais realistas e inferiores aos estimados utilizando a estratégia de perfuração instantânea. É preciso ressaltar que as conclusões são válidas para os cenários de estudo apresentados neste trabalho.

O desenvolvimento deste trabalho contribuiu para previsão do comportamento geomecânico do maciço salino durante a perfuração de poços, utilizando diferentes estratégias de simulação computacional do problema em questão. A simulação da perfuração em etapas ainda é bastante dispendiosa computacionalmente. Uma sugestão para trabalhos futuros é investigar os critérios para o cálculo do incremento de tempo adaptativo, uma vez que as simulações considerando a perfuração em etapas exigiram a utilização de parâmetros de incrementos de tempo menores, o que interfere fortemente no tempo computacional. Outra sugestão, é simular a perfuração de mais de uma fase do poço em um mesmo modelo, de forma a considerar também a interação da rocha com o cimento, e deste com o revestimento, assim como a interação entre

camadas perfuradas por diferentes fases. Além disso, é importante realizar a comparação entre as estratégias de modelagem da perfuração para outros cenários, com diferentes profundidades e tipos de rochas.

## Referências

- ABAQUS. **Abaqus Scripting User's Guide**. 2014. Disponível em: <<http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/cmd/default.htm?startat=book01.html#cmd>>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2020.
- AMARAL, C. et al. Descrição do sistema sigma—sistema integrado em geotecnia para múltiplas análises. **Agreement TecGraf/PUC-Rio—CENPES/PETROBRAS**, 1996.
- ANP. **Produção de petróleo no pré-sal ultrapassa pela primeira vez a do pós-sal**. 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/anp-e-p/3912-producao-de-petroleo-no-pre-sal-ultrapassa-pela-primeira-vez-a-do-pos-sal>>. Acesso em: 30 de Março de 2020.
- ANP. **Boletim Mensal da Produção de petróleo e Gás Natural**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural#>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2021.
- ARAÚJO, C. N. **Um modelo simplificado para a simulação do comportamento viscoso de rochas salinas para a previsão do fechamento de poços**. 2009. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas.
- ARAÚJO, C. N. **Desenvolvimento de um elemento finito para modelagem do comportamento de poços verticais em rochas salinas**. 127 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.
- BAAR, C. **Applied salt-rock mechanics 1: the in-situ behavior of salt rocks**. [S.l.]: Elsevier, 2013. v. 16.
- BORGES, R. G. **Avaliação numérica de perturbações de tensões associadas a estruturas salíferas e suas influências na estabilidade de poços**. 122 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- BOTELHO, F. V. C. **Análise numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo**. 211 f. Dissertação (Mestrado) — Dissertação (Mestrado), PUC-RJ, 2008.
- CANDOL, F. S.; CORRÊA, L. L. B. **Análise estatística do custo métrico de perfuração de poços de petróleo**. 2012. 80 f. Projeto de graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/Escola Politécnica.
- CARDOSO, L. C. **Petróleo: do poço ao posto**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.
- COSTA, A. et al. Geomechanics applied to the well design through salt layers in brazil: A history of success. In: **Multiscale and Multiphysics Processes in Geomechanics**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 165–168.
- COSTA, A. M. et al. Triaxial creep tests in salt applied in drilling through thick salt layers in campos basin - brazil. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE/IADC Drilling Conference**. Amsterdam, 2005.

COSTA, A. M. D.; PEREIRA, A. M. P.; EBECKEN, N. F. F. Aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análise de escavações subterrâneas. **Mecânica Computacional**, v. 2, n. 5, p. 226–242, 1985.

FERREIRA, Y. A. **Análise numérica da perfuração e cimentação de poços de petróleo em evaporitos**. 187 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

FIRME, P. **Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal**. 232 f. Tese (Doutorado) — PhD thesis, MSc. Dissertation, Department of Civil Engineering — PUC-Rio, 2013.

FIRME, P. A. et al. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. **Acta Geotechnica**, Springer, v. 13, n. 6, p. 1329–1340, 2018.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um primeiro curso em elementos finitos**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

FRANCISCO, J. F. **Contribuição à modelagem do repasse em poços verticais em rochas salinas**. 32 f. Monografia — Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Alagoas., Maceió, 2020.

GONÇALVES, G. G. **Estudo paramétrico da influência da temperatura na análise termomecânica durante a escavação em rochas salinas**. 117 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

HAPNES, M. **Drilling in Salt Formations and Rate of Penetration Modelling**. 137 f. Dissertação (Mestrado) — Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk, 2014.

LIRA, W. W. M. **Modelagem geométrica para elementos finitos usando multi-regiões e superfícies paramétricas**. 118 f. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil. PUC-RIO, Brasil, 2002.

MACHADO, L. C. et al. Projeto de perfuração de um poço de petróleo: Estudo de caso de um poço marítimo vertical com quatro fases e completação molhada. **Anais do III Congresso Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – V Workshop de Engenharia de Petróleo.**, Salvador, 2018.

MARTINEZ, I. M. R. **Modelagem numérica do processo de corte em rocha para perfuração de poços de petróleo**. 101 f. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

MELLO, E. V. **Top drive: aplicações e experiências em sistemas de perfuração**. 2014. 112 f. Monografia (Bacharel em Engenharia de Petróleo), UFF (Universidade Federal Fluminense), Niterói.

MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. M. C. Sal: Geologia e tectônica; exemplos nas bacias brasileiras. **Terrae Didatica**, v. 4, n. 1, p. 90–91, 2009.

MUNSON, D. E.; DEVRIES, K. L. Development and validation of a predictive technology for creep closure of underground rooms in salt. **7th International Congress on Rock Mechanics**, 1991.

Paranhos Sobrinho, E. S. **Consideração do repasse na modelagem do fechamento de poços verticais em rochas salinas**. 121 f. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

Paranhos Sobrinho, E. S. et al. **Consideration of Backreaming in Vertical Wells Closure Modeling in Salt Rock**. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS - SPE. [S.l.], 2020.

PASQUALINO, I. P. **Notas de aula de sistemas submarinos**. Rio de Janeiro - RJ: [s.n.], 2011.

PETROBRAS. **Tecnologias pioneiras do PRÉ-SAL**. 2020. Disponível em: <<https://presal.hotsitespetrobras.com.br/tecnologias-pioneiras/#0>>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2020.

Poiate Jr, E. **Mecânica das rochas e mecânica computacional para projeto de poços de petróleo em zonas de sal**. 462 f. Dissertação (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

Poiate Jr, E.; COSTA, A. M.; FALCÃO, J. L. Well design for drilling through thick evaporite layers in santos basin - brazil. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **IADC/SPE Drilling Conference**. Miami, 2006.

SANTOS, G. L. L. et al. Modelagem de cavernas salinas para estocagem de hidrocarbonetos. **Anais do XI Congresso de Engenharia, Ciência e Tecnologia.**, Maceió, 2018.

SANTOS, K. R. M. D. **Análise de risco durante a perfuração de poços em rochas salinas**. 2011. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas.

SHAMES, I. H. **Elastic and inelastic stress analysis**. [S.l.]: CRC Press, 1997.

WIKIMEDIA COMMONS. **File:Oil Rig NT8.svg**. 2020. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil\\_Rig\\_NT8.svg#filelinks](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oil_Rig_NT8.svg#filelinks)>. Acesso em: 17 de Novembro de 2020.

YARIM, G. et al. A guide to successful backreaming real-time case histories. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. [S.l.], 2008.