UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A. C. SIMÕES
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL

CARLOS MIKAEL ALENCAR TENORIO

MODELAGEM DE POÇOS DIRECIONAIS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS TRIDIMENSIONAIS NO ABAQUS

Maceió-AL
2025

CARLOS MIKAEL ALENCAR TENORIO

MODELAGEM DE POÇOS DIRECIONAIS UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS TRIDIMENSIONAIS NO ABAQUS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Lima Santos.
Coorientadora: Ma. Catarina Nogueira de Araújo Fernandes.

Maceió-AL
2025

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

T312m Tenorio, Carlos Mikael Alencar.
Modelagem de poços direcionais utilizando elementos finitos tridimensionais no Abaqus / Carlos Mikael Alencar Tenorio. - 2025.
118 f. : il.

Orientador: João Paulo Lima Santos.
Co-orientadora: Catarina Nogueira de Araújo Fernandes.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.

Bibliografia: 116-118.

1. Fluência em rochas salinas. 2. Poços direcionais. 3. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDU: 531-142.36

FOLHA DE APROVAÇÃO

CARLOS MIKAEL ALENCAR TENORIO

Modelagem de poços direcionais utilizando elementos finitos tridimensionais no Abaqus. 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 do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. Aprovado em 22 de maio de 2025.

gov.br Documento assinado digitalmente
JOAO PAULO LIMA SANTOS
Data: 05/06/2025 10:54:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. João Paulo Lima Santos (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas

gov.br Documento assinado digitalmente
CATARINA NOGUEIRA DE ARAUJO FERNANDES
Data: 05/06/2025 15:17:41-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

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

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
EDUARDO NOBRE LAGES
Data: 05/06/2025 10:20:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

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

gov.br Documento assinado digitalmente
WILLIAM WAGNER MATOS LIRA
Data: 05/06/2025 10:47:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

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

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre iluminou meu caminho mesmo nos momentos de maior escuridão, fortalecendo minha fé, guiando minhas escolhas e sendo minha luz ao longo de toda essa caminhada. A cruz sagrada seja minha luz.

Aos meus pais, minha mais profunda gratidão. Pelo amor incondicional, pelo exemplo de coragem e persistência, pelo apoio constante em todas as fases da minha vida e por nunca medirem esforços para que eu pudesse conquistar meus objetivos.

À minha família, pelo suporte em todos os momentos, principalmente nos mais desafiadores. Aos meus avós, agradeço pelo exemplo de sabedoria, fé e perseverança que sempre me inspiraram.

Aos meus orientadores, João Paulo e Catarina, sou profundamente grato pela dedicação, paciência, orientação e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Aos professores da banca, Eduardo Nobre e William Lira, agradeço pelas valiosas observações, direcionamentos e pela disponibilidade em participar deste momento tão importante.

Agradeço também aos professores do curso de Engenharia Civil, que, ao longo desses anos, compartilharam conhecimento e experiências que foram fundamentais para a minha formação.

À Petrobras, pelo apoio financeiro e técnico, essencial para a realização desta pesquisa. Ao LCCV – Laboratório de Computação Científica e Visualização – agradeço pela infraestrutura, pelo suporte técnico, pelos professores e amigos que tanto contribuíram com este trabalho.

À Universidade Federal de Alagoas, especialmente ao Centro de Tecnologia, minha sincera gratidão pela formação de qualidade, pela convivência com colegas e professores que fizeram parte dessa trajetória e por todo o conhecimento adquirido ao longo dos anos. Aos colegas e amigos que fiz durante a graduação, agradeço pelas trocas, parcerias e pela convivência que tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe uma estratégia de modelagem tridimensional de poços direcionais que atravessam rochas salinas, com o objetivo de prever o fechamento dessas formações devido ao fenômeno de fluência. A perfuração de camadas espessas de rochas salinas, como ocorre nos campos do pré-sal, impõe desafios operacionais significativos, principalmente pela tendência dessas rochas de se deformarem ao longo do tempo, reduzindo o diâmetro do poço e, em casos extremos, levando ao aprisionamento da coluna de perfuração. A complexidade aumenta em poços inclinados, nos quais a variação angular rompe a simetria presente nos poços verticais e exige abordagens numéricas mais sofisticadas para representar adequadamente o sistema. A modelagem foi realizada com o software ABAQUS, que emprega o Método dos Elementos Finitos em sua formulação tridimensional e permite a implementação de leis constitutivas customizadas por meio de sub-rotinas. Inicialmente, conduziu-se uma análise comparativa entre duas leis de fluência: o Mecanismo Duplo de Deformação (MDD), amplamente utilizado na literatura nacional, e a Lei de Dupla Potência (LDP), que demonstrou compatibilidade com maior eficiência computacional. Em seguida, um modelo tridimensional de poço vertical com litologia única foi verificado por meio da comparação com um modelo axissimétrico do Abaqus, previamente validado pelo grupo de pesquisa. Optou-se por essa verificação com a geometria vertical devido à escassez de estudos tridimensionais de poços direcionais na literatura, sendo identificado apenas o modelo de Poiate (2012), utilizado como base no Estudo de Caso II. Após a verificação, realizaram-se simulações com diferentes inclinações e, posteriormente, com múltiplas litologias. Os resultados foram analisados com foco nos deslocamentos das paredes internas do poço. A investigação indicou que, embora a LDP gere deslocamentos ligeiramente maiores em comparação ao MDD, a diferença é tecnicamente aceitável, e seu uso demonstrou uma eficiência computacional cerca de 23 vezes superior em modelos bidimensionais. Para os modelos tridimensionais analisados, a inclinação do poço teve influência limitada sobre os deslocamentos radiais, sugerindo que, em certos cenários, modelagens bidimensionais podem ser suficientes. Esta pesquisa contribui para a compreensão do comportamento viscoplástico de rochas salinas em poços direcionais, oferecendo subsídios técnicos para o planejamento de poços mais seguros e eficientes em regiões salinas.

Palavras-chave: Fluência em Rochas Salinas, Poços Direcionais, Método dos Elementos Finitos Tridimensionais.

ABSTRACT

This work proposes a three-dimensional modeling strategy for directional wells intersecting salt rocks, aiming to predict the closure of these formations due to the creep phenomenon. Drilling thick layers of salt rock, as in pre-salt fields, poses significant operational challenges, mainly due to the tendency of these rocks to deform over time, reducing the well diameter and, in extreme cases, leading to the entrapment of the drill string. Complexity increases in inclined wells, where angular variation breaks the symmetry observed in vertical wells and requires more sophisticated numerical approaches to adequately represent the system. The modeling was carried out using the ABAQUS software, which applies the Finite Element Method (FEM) in its three-dimensional formulation and allows the implementation of customized constitutive laws through subroutines. A comparative analysis was initially conducted between two creep laws: the Double Mechanism of Deformation (MDD), widely used in national literature, and the Double Power Law (DPL), which showed compatible results with greater computational efficiency. A three-dimensional model of a vertical well with a single lithology was then verified through comparison with an axisymmetric Abaqus model previously validated by the research group. This verification used the vertical geometry due to the scarcity of three-dimensional directional well models in the literature—only one such study, by Poiate (2012), was identified and used as the basis for Case Study II. After verification, simulations were performed with varying inclinations and later with multiple lithologies. The results were analyzed focusing on the displacements of the inner walls of the well. The investigation showed that, although the DPL produced slightly higher displacements compared to the MDD, the difference was technically acceptable, and its application demonstrated approximately 23 times higher computational efficiency in two-dimensional models. For the three-dimensional models analyzed, well inclination had limited influence on radial displacements, suggesting that in certain scenarios, two-dimensional modeling may be sufficient. This research contributes to the understanding of the viscoplastic behavior of salt rocks in directional wells, providing technical support for the design of safer and more efficient wells in salt-bearing regions.

Keywords: Salt rocks creep, Directional wells, Three-dimensional finite elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios de fluência. 22
Figura 2 - Esquema de uma sonda durante4 atividade de perfuração. 28
Figura 3 - Intercorrências em perfurações em rochas evaporíticas. 29
Figura 4 - Poço direcional. 30
Figura 5 - Justificativas de poços direcionais. 31
Figura 6 - Elementos finitos triangulares e quadrilaterais. 34
Figura 7 - Elemento C3D10. 35
Figura 8 - Elemento C3D20R. 35
Figura 9 - Tentativas de geometria de modelagem do maciço. 39
Figura 10 - Criando uma “part”. 40
Figura 11 - Criando o desenho do semicilindro a ser extrudado. 41
Figura 12 - Definição da profundidade da extrusão. 41
Figura 13 - Sólido tridimensional. 42
Figura 14 - Criando uma partição. 42
Figura 15 - Selecionando os pontos para o plano de corte. 43
Figura 16 - Planos de referência no modelo ainda na configuração vertical. 44
Figura 17 - Planos de referência com o modelo inclinado. 44
Figura 18 - Criando a malha. 46
Figura 19 - Seleção das bordas circulares. 46
Figura 20 - Definição do tipo de discretização. 47
Figura 21 - Modelo após a distribuição nas bordas circulares. 47
Figura 22 - Definição do tipo de discretização. 48
Figura 23 - Distribuição das bordas radiais. 48
Figura 24 - Distribuição das bordas verticais. 49
Figura 25 - Modelo completo com distribuição. 49
Figura 26 - Gerando a malha. 50
Figura 27- Modelo discretizado. 50
Figura 28 - Poço discretizado. 51
Figura 29 - Criando os materiais. 52
Figura 30 - Adição da propriedade elástica. 53
Figura 31 - Definição do Módulo de Young e do Coeficiente de Poisson. 54
Figura 32 - Adição da propriedade de fluência. 55
Figura 33 - Definindo a lei de fluência. 56
Figura 34 - Seleção da ferramenta de rotação. 56
Figura 35 - Seleção da instância. 57
Figura 36 - Definição do vetor de eixo de rotação. 57
Figura 37 - Definição do ângulo de rotação. 58
Figura 38 - Modelo inclinado. 58
Figura 39 - Seleção da ferramenta de translação. 59
Figura 40 - Seleção do ponto de referência e definição da profundidade Z. 59
Figura 41 - Sets para definição de cargas e condições de contorno. 61
Figura 42 - Criando o passo geostático. 61
Figura 43 - Editando o passo geostático. 62
Figura 44 - Criação do passo elástico. 63
Figura 45 - Editando o passo elástico. 63
Figura 46 - Criação do passo viscoso. 64
Figura 47- Editando o passo viscoso (basic). 64
Figura 48 - Editando o passo viscoso (incrementation). 65
Figura 49 - Criando um carregamento. 66

Figura 50 - Seleção da região de atuação. 67
Figura 51 - Definição da distribuição. 67
Figura 52 - Criação do Analytical Field. 68
Figura 53 - Criando campo de expressão. 68
Figura 54 - Definição da distribuição após campo analítico criado. 69
Figura 55 - Criação da Força de Corpo. 70
Figura 56 - Seleção da região de atuação do carregamento. 70
Figura 57 - Definição das componentes da Força de Corpo. 71
Figura 58 - Modelo submetido ao carregamento. 71
Figura 59 - Criação do campo predefinido de tensão geostática. 73
Figura 60 - Seleção da região de atuação do carregamento. 73
Figura 61 - Seleção da região de atuação do carregamento. 74
Figura 62 - Modelo submetido ao carregamento. 74
Figura 63 - Criação do campo analítico de temperatura. 76
Figura 64 - Criação do campo de expressão de temperatura. 76
Figura 65 - Criação do campo predefinido de temperatura. 77
Figura 66 - Seleção da região de atuação do campo. 77
Figura 67 - Edição do campo predefinido de temperatura. 78
Figura 68 - Criando uma condição de contorno. 78
Figura 69 - Seleção da região submetida a condição de contorno. 79
Figura 70 - Travamento dos deslocamentos. 79
Figura 71 - Criando uma condição de contorno. 80
Figura 72 - Seleção da região submetida a condição de contorno. 80
Figura 73 - Acesso ao gerenciador de condições de contorno. 81
Figura 74 - Desativação dos travamentos da parede do poço no passo elástico. 81
Figura 75 - Travamento da parede do poco desativados. 81
Figura 76 - Criando uma condição de contorno para as paredes de simetria. 82
Figura 77 - Seleção da região submetida a condição de contorno. 82
Figura 78 - Travamento dos deslocamentos. 83
Figura 79 - Criação de um Set para monitoramento durante a simulação. 84
Figura 80 - Seleção dos nós a serem monitorados. 84
Figura 81- Criação de um Job. 85
Figura 82 - Edição do Job. 86
Figura 83 - Geração do arquivo input. 86
Figura 84 - Trecho a ser substituído. 87
Figura 85 - Adição da Lei de Dupla Potência ao arquivo Input. 88
Figura 86 - Linha de comando para rodar a simulação no Abaqus Command. 89
Figura 87 – Comparação entre o MDD e a LDP para Halita (T = 86ºC). 92
Figura 88 - Comparação entre o MDD e a LDP para Carnalita (T = 130°C). 92
Figura 89 - Comparação entre o MDD e a LDP para Taquidrita (T = 86ºC). 93
Figura 90 - Malha do poço vertical e modelo D2. 95
Figura 91 – Comparação dos deslocamentos radiais entre LDP e MDD ao longo do tempo. 95
Figura 92 - Modelos 2D deformados - LDP à esquerda e MDD à direita. 96
Figura 93 - Domínios modelados e seus pontos de interesse e profundidades. 100
Figura 94 - Deslocamento diametral obtido ao longo do tempo. 101
Figura 95 - Seção de sal. 103
Figura 96 - Modelos 3D e suas malhas. 104
Figura 97 - Comparação dos deslocamentos: 0° vs. 30° vs. 45º vs. 60°. 105
Figura 98 - Perfis de deslocamentos dos poços. 106
Figura 99 - Comparação do deslocamento ao longo em diferentes litologias no poço vertical.

.....108
Figura 100 - Modelo vertical 3D deformado: Fator de escala aumentado à esquerda e moderado à direita. 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros constitutivos da halita. 90
Tabela 2 - Parâmetros constitutivos da carnalita. 91
Tabela 3 - Parâmetros constitutivos da taquidrita. 91
Tabela 4 – Dados da análise MDD vs. LDP. 97
Tabela 5 - Parâmetros do problema do estudo de caso I. 100
Tabela 6 - Parâmetros das rochas do estudo de caso I. 100
Tabela 7 - Dados do estudo de caso II. 103
Tabela 8 - Parâmetros das rochas do estudo de caso II. 103
Tabela 9 – Comparação dos resultados com os de Poiate (2012). 107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANVEC	Código computacional desenvolvido por Costa (1984)
CAX8R	Elemento Quadrilateral de Oito Nós, Axissimétrico, Com Integração Reduzida (eight-node, quadratic, axisymmetric element with reduced integration)
C3D20R	Tijolo de vinte nós com integração reduzida (Twenty-node brick element Reduced Integration)
LDP	Lei de Dupla Potência
Gb	Giga byte
GHz	Giga Hertz
Int.	Integração
LCCV	Laboratório de Computação Científica e Visualização
MDD	Mecanismo Duplo de Deformação
MEF	Método dos Elementos Finitos
MHz	Mega Hertz
RAM	Memória de Acesso Aleatório (Random Access Memory)
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
$\dot{\varepsilon}_0$	Taxa de deformação de referência no regime de permanência
σ_{ef}	Tensão desviadora efetiva (von Mises)
σ_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
ν	Coeficiente de Poisson
$\dot{\varepsilon}^{cr}$	Taxa de deformação de fluência uniaxial equivalente
θ	Temperatura (Dupla Potência)
θ^Z	Zero absoluto
T_f	Tensão causada pelo fluido de perfuração
H	Soma de H_{mr} e H_p
H_{mr}	Altura da Mesa Rotativa
H_p	Profundidade de um certo ponto do poço
γ_f	Peso específico do fluido de perfuração
FC	Fator de conversão do peso específico de lb/gal para N/m³, no qual FC vale 1175,497
σ_v	Tensão geostática
$\Delta\sigma_v$	Diferença das tensões geostáticas
ΔH	Diferença de profundidade
ρ	Pressão equivalente
H	Profundidade
T	Temperatura para uma profundidade H qualquer
T_1	Temperatura do topo da camada
T_2	Temperatura da base da camada
H_1	Profundidade do topo da camada
H_2	Profundidade da base da camada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Objetivos 15
1.2 Justificativa 15
1.3 Metodologia 17
1.4 Delimitação do trabalho 19
2 ROCHAS EVAPORÍTICAS E SUAS PROPRIEDADES 20
3 PERFURAÇÃO DE POÇOS VERTICAIS E DIRECIONAIS EM ROCHAS SALINAS 27
3.1 Perfuração de poços 27
3.2 Poços Direcionais 30
4 SIMULAÇÕES DE PERFURAÇÃO DE POÇOS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS 33
5 ESTRATÉGIA DE MODELAGEM 38
5.1 Geometria 39
5.1.1 Geometria para o modelo com uma litologia 39
5.1.2 Geometria para modelo com múltiplas litologias 43
5.2 Malha 45
5.3 Materiais 52
5.4 Rotação 56
5.5 Translação 59
5.6 Passos, Carregamentos e Condições de Contorno 60
5.6.1 Passos 61
5.6.2 Carregamentos 65
5.6.3 Condições de contorno 78
5.7 Pré-simulação 83
5.7.1 Set de monitoramento 83
5.7.2 Job 84
5.7.3 Implementação da lei de fluência 86
5.7.4 Submissão da simulação 88
6 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS 90
6.1 Comparação entre o Mecanismo Duplo de Deformação e a Lei de Dupla Potência 90
6.2 Estudo de caso I: Modelo com apenas uma litologia 99
6.3 Estudo de caso II: Modelo com mais de uma litologia 102
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 111

REFERÊNCIAS.....114

1 INTRODUÇÃO

O petróleo continua sendo uma das principais fontes de energia no mundo, essencial para a economia e a produção industrial. Segundo Araújo (2012), com o esgotamento gradual das reservas mais acessíveis e a crescente demanda energética global, a indústria petrolífera está explorando campos em águas cada vez mais profundas e ultraprofundas. Essa transição, embora necessária, traz desafios técnicos e geológicos significativos. A descoberta das reservas de petróleo na camada pré-sal brasileira em 2006 revelou um enorme potencial de produção, mas também introduziu a complexidade de perfurar através de espessas camadas de sal. Para enfrentar esses desafios, a Petrobras e outras empresas do setor têm investido em estudos e tecnologias avançadas, buscando formas eficientes de exploração e garantindo a viabilidade e segurança das operações.

A presença de seções evaporíticas em áreas de prospecção de petróleo ou gás aumenta as probabilidades de sucesso devido às condições favoráveis para a geração e o aprisionamento de hidrocarbonetos. As rochas salinas são excelentes selantes naturais por sua plasticidade elevada, permitindo que se deformem sem fraturar e criem barreiras impermeáveis que evitam a migração dos hidrocarbonetos. Além disso, a alta solubilidade do sal em água facilita sua deposição em ambientes marinhos. Essas propriedades, combinadas com a capacidade do sal de fluir lentamente e preencher falhas nas rochas adjacentes, tornam essas formações eficazes na criação de armadilhas estruturais e estratigráficas, onde o petróleo e o gás podem se acumular em grandes volumes (POIATE et al., 2006).

Entretanto, a perfuração em rochas salinas é extremamente complexa devido à fluência. Araújo (2012) conta que esse fenômeno, conhecido como creep, é a tendência do sal a se deformar ao longo do tempo sob tensão constante, o que resulta na redução do diâmetro do poço e, em casos mais acentuados, pode levar ao aprisionamento da coluna de perfuração e outros graves problemas operacionais. Portanto, a compreensão detalhada dessas propriedades e dos comportamentos associados é crucial para o planejamento e a execução bem-sucedida de operações de perfuração em formações salinas.

Dado este complexo comportamento dos evaporitos, é necessário recorrer a métodos computacionais avançados para prever com precisão o comportamento dos maciços. Tradicionalmente, visto que perfurações direcionais não eram usuais em rochas salinas, a modelagem geomecânica de poços concentrou-se em configurações verticais, onde a distribuição de tensões ao redor do poço é simétrica, facilitando a análise e a previsão de comportamento. No entanto, torna-se cada vez mais comum perfurar trechos inclinados em

regiões salinas, o que levanta questões sobre o comportamento da fluência nesses cenários. A perfuração direcional de poços, que muitas vezes é necessária para otimizar a extração do reservatório e evitar obstáculos geológicos, apresenta uma complexidade adicional na modelagem numérica, uma vez que o problema não é mais axissimétrico. Isso exige a aplicação de modelagens tridimensionais, que são fundamentais para capturar as complexidades envolvidas e garantir a estabilidade do poço em condições não simétricas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste presente trabalho é desenvolver uma estratégia eficaz de modelagem tridimensional de poços direcionais em regiões salinas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do *software* comercial ABAQUS (ABAQUS, 2014), visando entender o que muda no comportamento dessas rochas quando o poço perfurado não é vertical, com foco na previsão do fechamento do poço devido à fluência.

1.1.1 Objetivos específicos

Além do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar e quantificar o impacto das variações do ângulo de inclinação do poço direcional no comportamento mecânico das rochas salinas, especialmente em relação ao fechamento do poço;
- Verificar a eficácia da lei de fluência de Dupla Potência (LDP) quanto a descrição do comportamento viscoelástico de evaporitos e as vantagens de seu uso em comparação ao Mecanismo Duplo de Deformação (MDD), modelo consolidado para descrever a fluência em rochas salinas brasileiras.

1.2 Justificativa

O crescimento contínuo da demanda por energia corrobora em novos desafios para as empresas do setor, especialmente na exploração de petróleo e gás em condições adversas, como no pré-sal brasileiro, onde foram estimadas grandes quantidades de hidrocarbonetos, elevando

o Brasil a um novo patamar em termos de reservas (PARANHOS SOBRINHO, 2019).

Esse cenário complexo tem levado a indústria petrolífera a realizar descobertas em campos cada vez mais profundos, como no caso das camadas de sal que podem atingir até 3000 metros de espessura, o que direciona as pesquisas para o estudo do comportamento dessas formações geológicas (GONÇALVES, 2011).

A principal razão para o estudo dos evaporitos está associada às suas propriedades peculiares, que facilitam o aprisionamento de hidrocarbonetos. No entanto, como destaca Gonçalves (2011), o sal também apresenta características indesejáveis, como sua tendência a sofrer fluência ao longo do tempo, o que pode representar grandes desafios para a perfuração e exploração em regiões salinas.

Apesar dos dados positivos sobre a quantidade e qualidade do óleo desses campos localizados em regiões salinas, colocá-los em produção exigiu grandes esforços das empresas, tanto na logística, como na tecnologia. Ainda, essa propriedade de fluência das rochas evaporíticas foi responsável por vários insucessos em perfurações na história da indústria de petróleo. A caracterização das propriedades do sal e o desenvolvimento de novas técnicas configurou-se como um importante passo para a otimização do processo de perfuração de poços no Pré-Sal, de forma que tornassem a atividade economicamente viável (TEIXEIRA, 2011).

Portanto, como conta Araújo (2012), grandes investimentos foram feitos nos estudos da mecânica das rochas salinas submetidas sob diferentes condições de temperatura e tensões, a fim de avaliar seu comportamento reológico e a integridade estrutural ao longo do tempo.

Modelagens numéricas tornaram-se uma grande ferramenta nos estudos do comportamento mecânico do sal. Simulações computacionais permitem maior domínio e entendimento no processo de operação de sistemas, proporcionam a obtenção de informações sem perturbação ao sistema e uma otimização do projeto antes de ser implantado fisicamente. Ainda, são processadas em um tempo menor ao do sistema real (LINS, 2009).

Muitos autores desenvolveram trabalhos focados nesta área. Paranhos Sobrinho (2019) conta que Costa (1984) realizou estudos sobre o comportamento de rochas salinas durante a perfuração aplicando leis constitutivas viscoplásticas e viscoelásticas e por meio de simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Botelho (2008) utilizou o ABAQUS (ABAQUS, 2014), para realizar estudos parecidos. Araújo (2009) desenvolveu uma ferramenta a fim de prever o fechamento de poços verticais.

O estudo sobre modelagens numéricas de previsão de fechamento de poços verticais é consolidado na literatura, uma vez que perfurações verticais eram predominantes. Porém, nos últimos anos, há um crescente interesse em perfurações direcionais. A perfuração direcional,

em comparação com as técnicas convencionais de perfuração vertical, permitiu o aumento da produtividade de poços perfurados, maximizou a recuperação de reservatórios já existentes e viabilizou a exploração de campos petrolíferos em áreas de difícil acesso, como zonas urbanas, de proteção ambiental, em lâminas d'água mais profundas e no Pré-Sal (SOUZA, 2011).

Portanto, a justificativa para este trabalho baseia-se na crescente importância econômica da exploração de petróleo na camada pré-sal brasileira, onde espessas camadas de rochas salinas representam tanto uma oportunidade quanto um desafio técnico. A perfuração em formações salinas enfrenta problemas associados à fluência (creep), o que pode resultar no fechamento do poço e em graves complicações operacionais. Embora a modelagem axissimétrica seja uma ferramenta consolidada para a análise de poços verticais, ela é insuficiente para capturar as complexidades introduzidas por poços direcionais, onde a inclinação altera a distribuição de tensões e o comportamento das rochas. Elementos finitos tridimensionais descrevem melhor o comportamento de poços em configurações não verticais.

Assim, o desenvolvimento de uma estratégia de modelagem tridimensional para investigar o comportamento mecânico em poços direcionais, utilizando o software comercial Abaqus (ABAQUS, 2014), justifica-se pela necessidade de aprimorar a capacidade de prever e mitigar o fechamento de poços em formações salinas, assegurando a eficiência e a segurança das operações. Este estudo pretende contribuir diretamente para o avanço do conhecimento técnico na área.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi dividida em cinco etapas principais, que visam desde a fundamentação teórica até a aplicação prática da modelagem numérica tridimensional de poços direcionais em rochas salinas.

Na primeira etapa, foi realizada uma revisão bibliográfica aprofundada sobre a geomecânica de rochas evaporíticas, com ênfase nos fenômenos de fluência e nos desafios associados à perfuração de poços em formações salinas, especialmente em configurações inclinadas. Também foram estudadas diferentes leis constitutivas aplicadas à fluência dessas rochas, com destaque para a Lei de Dupla Potência e o modelo conhecido como Mecanismo Duplo de Deformação. Estudos que empregam o Método dos Elementos Finitos (MEF) em softwares como o Abaqus (ABAQUS, 2014), com foco em modelagens tridimensionais, foram analisados, com especial atenção ao estudo de caso apresentado por Poiate (2012), que serve como referência principal para este trabalho. Poiate (2012) utiliza o Mecanismo Duplo de

Deformação como lei de fluência em seu trabalho.

Na segunda etapa, buscou-se avaliar a viabilidade de adoção da Lei de Dupla Potência como alternativa ao modelo Mecanismo Duplo de Deformação. Para isso, foram modelados dois casos axissimétricos bidimensionais equivalentes, cada um com uma das leis de fluência mencionadas. A adoção do modelo 2D se deveu à inviabilidade computacional de simular o modelo 3D com o Mecanismo Duplo de Deformação, cuja execução demandava tempo excessivo e não convergiu em tentativas prévias. Essa comparação teve como foco tanto a conformidade dos resultados obtidos quanto o desempenho computacional, permitindo identificar ganhos de eficiência e eventuais limitações da LDP, de modo a atestar a possibilidade de sua adoção.

A terceira etapa consistiu na modelagem tridimensional, no Abaqus, de um poço vertical inserido em uma única litologia (Estudo de Caso I). Para verificação da estratégia numérica utilizada, os resultados desse modelo foram comparados com os de um modelo axissimétrico vertical previamente consolidado pelo grupo de pesquisa (LCCV/UFAL), permitindo avaliar a consistência dos deslocamentos e o comportamento esperado da fluência. Embora o foco do trabalho sejam poços direcionais, optou-se por realizar a verificação utilizando a geometria vertical, dado que já se dispunha de um modelo axissimétrico validado e com comportamento bem conhecido.

Ressalta-se que a literatura apresenta escassez de modelos tridimensionais para poços direcionais em rochas salinas. Durante a revisão bibliográfica, foi identificado apenas um estudo com essa abordagem: o trabalho de Poiate (2012), que serviu como referência direta para a construção do modelo direcional tridimensional adotado no Estudo de Caso II. Portanto, a estratégia adotada neste trabalho foi verificar inicialmente o modelo tridimensional vertical com base em um caso controlado, para então aplicar a mesma metodologia ao modelo inclinado, utilizando como referência geométrica e estrutural o caso de Poiate.

Na quarta etapa, com o modelo tridimensional vertical verificado, foram realizadas novas simulações considerando diferentes inclinações do poço (20°, 40°, 60° e 80°), mantendo a mesma litologia (Estudo de Caso I). Essa fase teve como objetivo analisar o impacto da variação do ângulo de perfuração no fechamento do poço por fluência, buscando compreender como a geometria influencia no comportamento mecânico da formação.

Por fim, na quinta etapa, foram desenvolvidos os modelos tridimensionais dos poços inclinados com múltiplas litologias, conforme descrito na tese de Poiate (2012), configurando o Estudo de Caso II. Para cada inclinação simulada, foi realizada uma análise dos campos de deslocamento ao longo do tempo, com foco na evolução da fluência e na tendência de

fechamento do poço. A comparação entre diferentes tipos de rochas evaporíticas permitiu avaliar como a composição litológica influencia a deformação por fluência em poços direcionais, assim como entender o impacto da variação do ângulo de inclinação do poço no seu fechamento diametral por fluência.

1.4 Delimitação do trabalho

Para viabilizar a modelagem numérica e focar nos objetivos propostos, algumas simplificações e delimitações foram adotadas neste trabalho. A trajetória do poço é considerada com inclinação constante ao longo de todo o seu comprimento, desconsiderando curvaturas ou variações angulares. Além disso, não são consideradas descontinuidades naturais, como fraturas ou falhas, assumindo-se um meio rochoso contínuo. A perfuração é modelada como instantânea, desconsiderando efeitos transientes ou avanços progressivos ao longo do tempo. As rochas salinas são tratadas como materiais isotrópicos, sem anisotropias mecânicas, e o coeficiente de pressão lateral (k_0) é assumido igual a 1, implicando um estado inicial de tensões horizontais equivalente à tensão vertical. Essa adoção do valor de k_0 alinha-se à condição de tensões geostáticas hidrostáticas esperada em formações onde não são consideradas anomalias significativas na distribuição de tensões horizontais, como as induzidas pela presença de domos salinos.

2 ROCHAS EVAPORÍTICAS E SUAS PROPRIEDADES

Rochas evaporíticas, como a halita, são de grande interesse para a indústria de petróleo devido ao fato de estarem frequentemente associadas a grandes reservatórios de hidrocarbonetos. No entanto, essas rochas também apresentam propriedades mecânicas peculiares que complicam a exploração em regiões do pré-sal.

As rochas evaporíticas, também chamadas de rochas salinas, são formadas a partir do processo de evaporação da água do mar em bacias fechadas, sob condições climáticas áridas e com fluxos de água intermitentes. Entre essas rochas, destaca-se a halita (cloreto de sódio), amplamente conhecida como sal de cozinha, que é a única rocha comestível e tem relevância histórica desde os primórdios da civilização (POIATE, 2012).

Esses depósitos ocorrem em ambientes sedimentares com baixo aporte de material terrígeno, onde a evaporação da água supera a taxa de influxo de novas águas no local (BRESOLIN, 2010).

Thomas et al. (2001), citado por Gonçalves (2011), explicam que as rochas selantes, como os evaporitos, desempenham um papel fundamental na formação de reservas de petróleo, pois atuam como barreiras que interrompem a migração do óleo, permitindo sua acumulação. Sua principal característica é a baixa permeabilidade, aliada à plasticidade, que garante a manutenção dessa propriedade mesmo quando submetidas a esforços e deformações.

Ainda, as rochas salinas possuem porosidade e permeabilidade praticamente nulas, o que as torna altamente eficazes como rochas selantes, favorecendo o aprisionamento de fluidos e gases. Além disso, devido à sua capacidade de fluência, essas rochas também podem encapsular materiais de descarte, sendo que, em condições ideais, a poropressão não atua significativamente nos sais (FIRME, 2013).

Firme (2013), citando Dusseault (1989) e Dusseault et al. (1987), ainda ressalta que as rochas salinas possuem uma propriedade interessante conhecida como "self-healing" ou cicatrização, que permite o fechamento natural de descontinuidades, trincas e fraturas devido à fluência lenta do sal, mesmo sob altos níveis de deformação. Essa capacidade de cura é altamente desejável para garantir a estanqueidade em armazenamento de materiais. Além disso, as rochas salinas apresentam uma resistência à compressão simples de 35 a 40 MPa, comparável à do concreto, mas com a vantagem de suportar deformações de até 25% sem gerar trincas irreversíveis. Quanto à escavabilidade, possuem baixa dureza, o que facilita sua perfuração e conformidade com a geometria projetada.

Gonçalves (2011) também destaca que as rochas evaporíticas apresentam condições favoráveis para o aprisionamento de hidrocarbonetos, o que aumenta as chances de sucesso na prospecção de petróleo, pois essas rochas formam armadilhas naturais. Além disso, a capacidade selante das rochas evaporíticas também é vantajosa para o armazenamento de gás e resíduos atômicos em cavernas salinas. No entanto, esses depósitos apresentam desafios durante as escavações, especialmente devido à fluência, fenômeno em que o sal, submetido a tensões constantes, se deforma ao longo do tempo. Esse comportamento pode provocar o fechamento acelerado do poço durante a perfuração, levando ao aprisionamento da coluna de perfuração e ao possível colapso do revestimento.

A fluência é caracterizada como uma deformação plástica lenta e progressiva que ocorre ao longo do tempo quando um material está sob tensões e temperaturas constantes. Esse fenômeno afeta todos os materiais, com a taxa de deformação variando de acordo com a estrutura cristalina de cada material. Dependendo da magnitude dessa deformação, a fluência pode reduzir a vida útil de um produto ou até inviabilizar o uso de certos materiais, uma vez que deformações excessivas comprometem seu desempenho (POIATE, 2012).

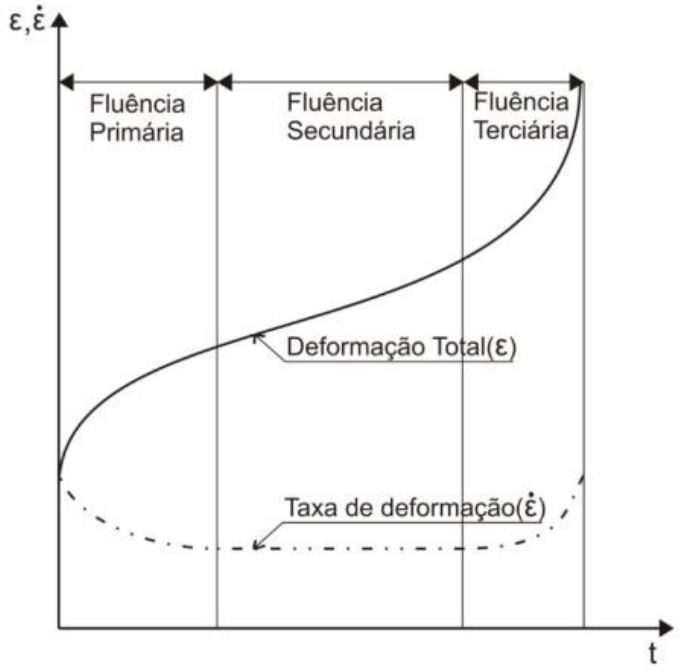
De acordo com Costa e Poiate (2008), citado por Araújo (2012), a maioria das rochas apenas apresenta deformação em regime de fluência quando submetidas a temperaturas e tensões superiores aos limites normalmente encontrados nas aplicações de engenharia. Entretanto, rochas salinas, assim como outros evaporitos e certos folhelhos, podem sofrer fluência significativa em faixas de temperatura e tensão típicas da Mecânica de Rochas. O fenômeno da fluência é fortemente influenciado por fatores como a espessura da camada de sal, a temperatura da formação, a composição mineralógica, o teor de água, a presença de impurezas e a tensão diferencial aplicada ao material salino. Esse comportamento peculiar é atribuído à grande quantidade de discordâncias ou faltas atômicas na estrutura cristalina das rochas salinas.

A evolução da deformação por fluência é dividida em três estágios principais observados em ensaios laboratoriais (Figura 1). Inicialmente, após a aplicação de uma tensão constante e temperatura no material, ocorre uma deformação elástica seguida pelo estágio de fluência primária, caracterizado por uma alta taxa de deformação que diminui gradualmente até se estabilizar. Esse momento marca o início da fluência secundária, na qual a taxa de deformação se mantém constante ao longo do tempo. No terceiro estágio, isto é, na fluência terciária, a taxa de deformação aumenta rapidamente, levando à ruptura do material (ARAÚJO, 2012).

Conforme mencionado por Paranhos Sobrinho (2019), a exposição prolongada dos materiais a altas temperaturas acentua significativamente o efeito da fluência, resultando em

um aumento da taxa de deformação. Dada a situação dos reservatórios no pré-sal, que estão sujeitos a elevadas pressões e temperaturas, o estudo do comportamento das rochas salinas em poços de petróleo se torna ainda mais crucial.

Figura 1 - Estágios de fluência.



Fonte: Gonçalves (2011).

Diante das características peculiares das rochas evaporíticas, especialmente sua elevada capacidade de deformação por fluência mesmo em condições típicas de engenharia, torna-se essencial o uso de modelos constitutivos que representem adequadamente esse comportamento no contexto de poços petrolíferos. A modelagem numérica da fluência em meios salinos se apresenta, portanto, como uma ferramenta indispensável para a previsão do fechamento de poços e para o dimensionamento adequado de soluções de revestimento e estabilização. Nesse sentido, a escolha da lei de fluência a ser adotada influencia diretamente a confiabilidade dos resultados simulados, bem como a viabilidade computacional das análises. A seguir, são apresentadas as leis de fluência analisadas neste trabalho e a metodologia adotada para comparação entre seus desempenhos.

Costa et al. (2005) apresenta a calibração do Mecanismo Duplo de Deformação, que descreve exclusivamente o regime secundário de fluência, representando uma simplificação do modelo de multimecanismo de deformação desenvolvido por Munson e Devries (1991). A

simplificação refere-se à consideração de apenas dois mecanismos do modelo original: o deslizamento de discordâncias e o mecanismo indefinido.

No Brasil, estudos como o de Rodrigues (2021), Mazon (2022) e Santos (2021) têm empregado a equação viscoelástica de fluência secundária do Mecanismo Duplo de Deformação, obtendo bons resultados quando comparados às respostas in-situ, o que demonstra uma tendência crescente na utilização desse modelo (ARAÚJO, 2012).

Desse modo, o modelo de Mecanismo Duplo de Deformação tem se mostrado eficaz na representação do comportamento de fluência viscoelástica das rochas salinas. De acordo com Araújo (2012), a principal vantagem desse modelo é sua capacidade de prever com precisão a taxa de deformação sob condições de equilíbrio. Poiate Jr. et al. (2006) aplicaram esse modelo em estudos experimentais com halita brasileira, obtendo uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais. A equação do modelo foi modificada para levar em consideração as propriedades específicas dos materiais estudados, confirmando ainda mais sua robustez para análises de fluência secundária.

A equação do modelo de Mecanismo Duplo de Deformação pode ser expressa da seguinte forma:

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

em que $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação desviadora, $\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deformação de referência no regime permanente, σ_{ef} é a tensão desviadora uniaxial equivalente (von Mises) — tais compreensões aprofundadas dos conceitos de tensão desviadora e equivalente são apresentadas por Neto et al. (2008), σ_0 é a tensão efetiva de referência, Q é a energia de ativação, T_0 é a temperatura de referência, T é a temperatura à qual a rocha está submetida e R é a constante universal dos gases. A definição da tensão equivalente de von Mises, aqui representada por σ_{ef}, bem como sua aplicação em leis constitutivas de fluência para materiais viscoplásticos, pode ser encontrada em obras clássicas de mecânica dos sólidos, como Neto et al. (2008), servindo de base teórica para o modelo adotado neste trabalho. O expoente de tensão n é definido por:

$$n = \begin{cases} n1, & se\ \sigma_{ef} \leq \sigma_0 \\ n2, & se\ \sigma_{ef} > \sigma_0 \end{cases} \tag{2}$$

No entanto, o modelo do Mecanismo Duplo de Deformação não está implementado nativamente no Abaqus, o que torna necessária sua codificação por meio de sub-rotinas externas

escritas em Fortran. Consequentemente, há a necessidade de instalar e vincular um compilador Fortran específico que seja compatível e se comunique adequadamente com o Abaqus, o que representa uma barreira adicional para a execução do modelo e pode tornar a simulação mais lenta.

Desse modo, a Lei de Dupla Potência foi adotada como modelo constitutivo do comportamento de fluência neste trabalho, uma vez que apresenta tempos de simulação significativamente menores que modelos que utilizam o Mecanismo Duplo de Deformação (MDD). Teoriza-se que essa lentidão de modelos com MDD se deve justamente ao fato de não serem nativos do Abaqus, exigindo comunicação adicional com o compilador externo, o que torna todo o processo mais lento. Além disso, a Lei de Dupla Potência já está incorporada nativamente ao software, o que elimina a necessidade de desenvolvimento e vinculação de sub-rotinas, simplificando a modelagem e reduzindo potenciais problemas de compatibilidade. Os parâmetros do modelo foram calibrados com base nas equações apresentadas por Forero et al. (2021), as quais permitem a obtenção de coeficientes equivalentes aos do Mecanismo Duplo de Deformação a partir de dados experimentais. No entanto, no presente trabalho, realiza-se uma nova comparação entre as duas formulações constitutivas — apresentada na Seção 6.1 — com o objetivo de verificar a compatibilidade entre os resultados também no contexto das simulações aqui desenvolvidas. De forma preliminar, observou-se que a LDP manteve um bom nível de concordância com o MDD, reforçando sua adoção como alternativa mais eficiente do ponto de vista computacional.

Considerando que o objetivo deste trabalho é modelar e entender o impacto da inclinação do poço no comportamento das rochas salinas, o estudo permanece válido utilizando a Lei de Dupla Potência. Com os parâmetros ajustados, ela gera resultados suficientemente próximos ao modelo de Mecanismo Duplo de Deformação, e a mesma lei foi aplicada a todos os modelos descritos e discutidos neste trabalho. A Lei de Dupla Potência é descrita por:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A_1 exp\left(-\frac{B_1}{(\theta - \theta^Z)}\right)\left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0}\right)^{C_1} + A_2 exp\left(-\frac{B_2}{(\theta - \theta^Z)}\right)\left(\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_0}\right)^{C_2} \qquad (3)$$

em que, $\dot{\varepsilon}^{cr}$ é a taxa de deformação de fluência uniaxial equivalente, σ_{ef} é a tensão desviadora uniaxial equivalente (von Mises), θ é a temperatura, θ^Z é o valor definido pelo usuário para o zero absoluto na escala de temperatura utilizada, σ_0 é a tensão normal, e A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 e C_2 são outros parâmetros do material, relacionados a diferentes mecanismos de deformação que compõem o comportamento de fluência.

Para a aplicação prática da Lei de Dupla Potência, é necessário definir os parâmetros constitutivos de forma compatível com os dados disponíveis e com o comportamento esperado da rocha. A seguir, apresenta-se o procedimento de ajuste adotado para a obtenção dos coeficientes A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 e C_2. Esse roteiro segue a metodologia apresentada por Forero et al. (2021), permitindo parametrizar o modelo de forma consistente com os mecanismos de fluência considerados.

Desse modo, os expoentes C_1 e C_2 são definidos como:

$$C_1 = n_1, \qquad C_2 = n_2 \tag{4}$$

A_1 e A_2 são definidos pelas seguintes expressões:

$$A_1 = \frac{exp(-cte_1)\sigma_0^{C_1}}{\exp\left(-\frac{Q}{RT_0}\right)}, \qquad A_2 = \frac{exp(-cte_1)\sigma_0^{C_2}}{\exp\left(-\frac{Q}{RT_0}\right)} \tag{5}$$

em que:

$$cte_1 = n_1 \ln(\sigma_0) - \ln(e_0), \;\; cte_2 = n_2 \ln(\sigma_0) - \ln(e_0) \tag{6}$$

e os parâmetros térmicos mantêm-se como:

$$B_1 = B_2 = \frac{Q}{R} \tag{7}$$

Desse modo, a verificação do ajuste foi realizada inicialmente por meio da comparação gráfica entre as curvas da Lei de Dupla Potência ajustada e as curvas do Mecanismo Duplo de Deformação para diferentes tipos de rochas salinas. Os gráficos log-log indicaram uma boa coincidência entre os modelos, confirmando a equivalência entre as abordagens. Essa comparação é fundamental, pois, embora o trabalho de Forero et al. (2021) tenha apresentado as equações de calibração para os parâmetros da Lei de Dupla Potência, ele não abrangeu o cálculo desses parâmetros para todas as rochas salinas utilizadas neste estudo. Portanto, a apresentação dos cálculos de calibração para as três rochas (Halita, Carnalita e Taquidrita), utilizando as equações fornecidas por Forero et al. (2021), tornou-se essencial. Essa etapa não

só garante a consistência e a robustez da nossa abordagem, mas também serve como uma validação empírica da aplicabilidade dessas equações no contexto específico das nossas simulações, fornecendo um entendimento mais aprofundado dos parâmetros utilizados.

Ainda, a verificação da calibração, bem como os parâmetros constitutivos obtidos para as três rochas analisadas — Halita, Carnalita e Taquidrita — serão apresentados no capítulo de Estudo de Caso e Resultados. Nesse mesmo capítulo, será realizada uma comparação numérica entre os dois modelos de lei de fluência aplicados a uma situação particular do estudo de caso (POIATE, 2012) referência para este trabalho, com o objetivo de analisar as discrepâncias observadas nos resultados de deslocamento e nos tempos de simulação. Essa análise das divergências visa verificar tanto o uso da Lei de Fluência de Dupla Potência como um modelo viável, preciso e com resultados confiáveis em alternativa ao Mecanismo Duplo de Deformação. Além disso, busca-se justificar tecnicamente a adoção dessa abordagem em detrimento da outra, com base em seu desempenho comparativo de custo computacional.

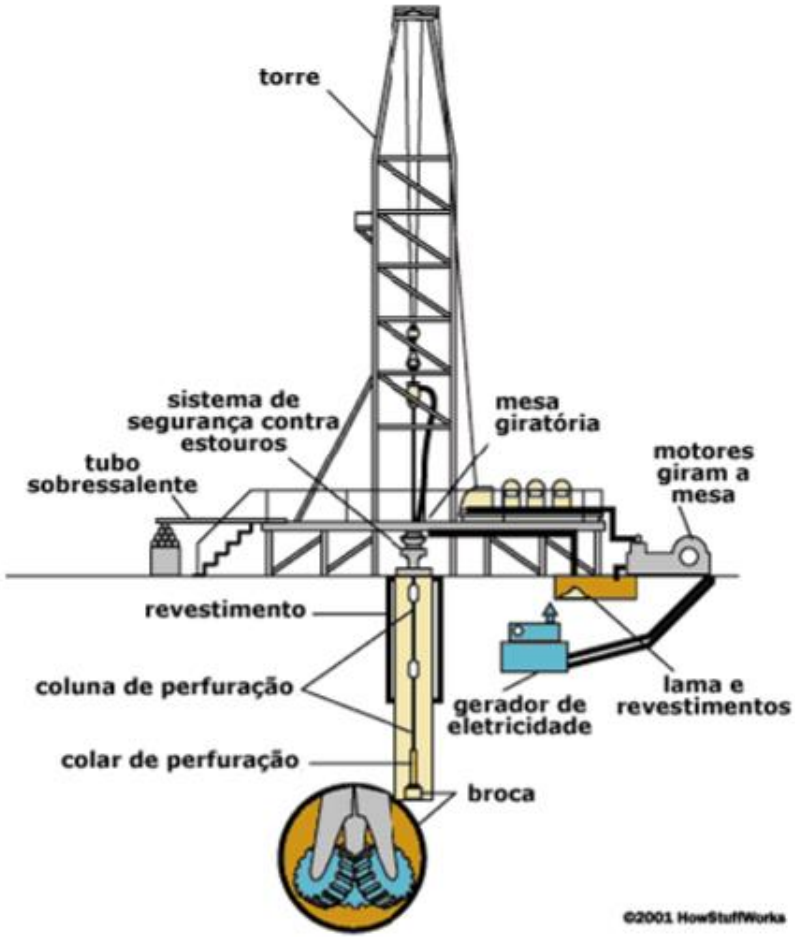
3 PERFURAÇÃO DE POÇOS VERTICAIS E DIRECIONAIS EM ROCHAS SALINAS

A perfuração de poços em ambientes geológicos complexos, como aqueles encontrados em regiões com presença de rochas salinas, representa um dos maiores desafios técnicos da indústria de petróleo. O comportamento mecânico peculiar dessas formações, notadamente sua elevada ductilidade e suscetibilidade à fluência, exige atenção redobrada no planejamento e execução das operações. Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos da perfuração de poços, com destaque para os processos aplicados em poços verticais e direcionais, discutindo-se as implicações geomecânicas associadas à interação entre o furo e o maciço salino. São abordados ainda os principais mecanismos de falha observados durante a escavação e os avanços tecnológicos que permitiram a perfuração segura em domínios salinos, especialmente no contexto do pré-sal brasileiro.

3.1 Perfuração de poços

Segundo Thomas (2001), a perfuração de um poço de petróleo ocorre por meio de uma sonda (Figura 2), em que as rochas são perfuradas pela rotação e pelo peso aplicados a uma broca na extremidade de uma coluna de perfuração, composta por tubos de paredes espessas e tubos de perfuração de paredes finas. O fluido de perfuração, utilizado para remover continuamente os fragmentos de rocha, é injetado por bombas e retorna à superfície pelo espaço anular entre a coluna e as paredes do poço. Em determinado ponto, a coluna de perfuração é removida e uma coluna de revestimento de aço é descida no poço, sendo o espaço entre ela e as paredes cimentado para isolar as rochas. Após a cimentação, uma nova broca, de menor diâmetro, é utilizada para continuar a perfuração, que ocorre em várias fases, cada uma com diâmetros diferentes de brocas.

Figura 2 - Esquema de uma sonda durante4 atividade de perfuração.



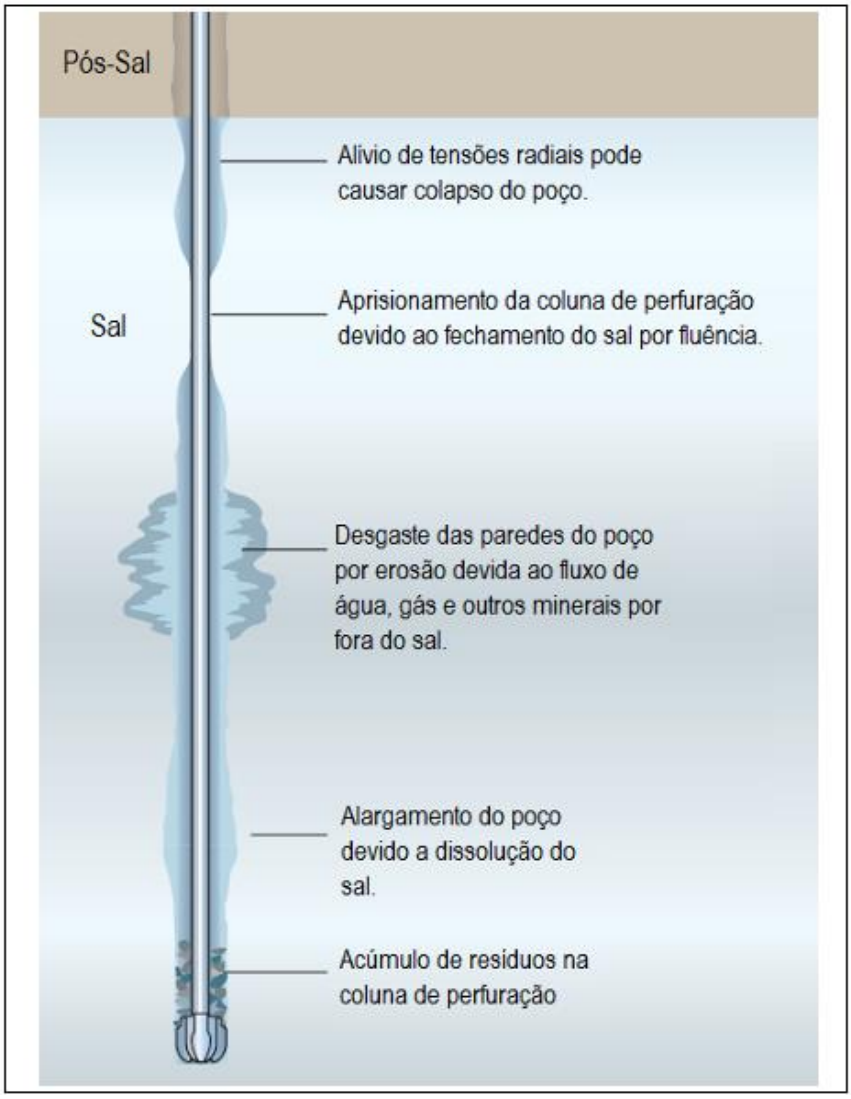
Fonte: Firme (2013).

Firme (2013) destaca que a perfuração de poços em rochas salinas é crucial para o acesso aos reservatórios carbonáticos do pré-sal brasileiro, representando um dos maiores desafios na engenharia de petróleo. Após a perfuração, o poço se torna um concentrador de tensões, uma vez que altera o estado contínuo da formação em que foi realizado. O estado de tensão ao redor do poço deixa de ser hidrostático, e a perfuração é acompanhada pela injeção de fluido, que gera uma contrapressão nas paredes do poço, restabelecendo parcialmente as tensões horizontais que foram suprimidas pela remoção do confinamento lateral. Durante um período operacional em que o poço permanece não revestido, é fundamental garantir sua estabilidade, evitando rupturas e deformações excessivas.

A perfuração de poços em rochas salinas pode resultar em uma variedade de problemas operacionais (Figura 3) durante a fase de perfuração e o período em que o poço permanece não revestido. Do ponto de vista mecânico, o alívio de tensões causado pela perfuração gera uma

considerável energia de deformação, que é dissipada pelo fenômeno da fluência. Se essa fluência não for adequadamente controlada pela pressão do fluido de perfuração, pode atingir níveis que levam a rupturas nas paredes do sal, potencialmente resultando no colapso do poço. As deformações causadas pela fluência podem fechar o furo, levando à prisão da coluna de perfuração. Além disso, do ponto de vista físico-químico, o fluxo de água e outros fluidos ao redor da parede do poço em sal exposto pode induzir processos de erosão, lixiviação e dissolução, causando desgastes e formação de cavidades. As rochas salinas, sendo altamente solúveis, contribuem ainda mais para a formação de cavidades e cavernas ao longo do poço (FIRME, 2013).

Figura 3 - Intercorrências em perfurações em rochas evaporíticas.

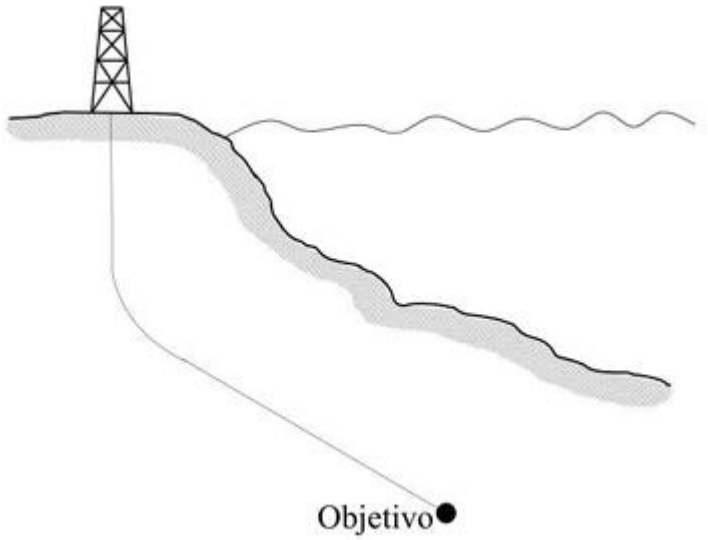


Fonte: Firme (2013).

3.2 Poços Direcionais

Segundo Silva et al. (2021), citando Rocha (2011) e Duque Neto (2015), com a descoberta do Pré-Sal, tecnologias como a perfuração direcional, que antes não eram amplamente utilizadas no Brasil, passaram a ser aplicadas com frequência em regiões que exigem a superação de obstáculos. Essa técnica já era comum em países como os Estados Unidos desde a década de 1930. A perfuração direcional se torna essencial para lidar com reservatórios desafiadores, onde podem ocorrer problemas como influxo de fluidos indesejados (kick), perda de circulação e prisão da coluna de perfuração. Além disso, essa tecnologia permite enfrentar os desafios de perfurar próximo a domos salinos e atravessar feições cársticas.

Figura 4 - Poço direcional.



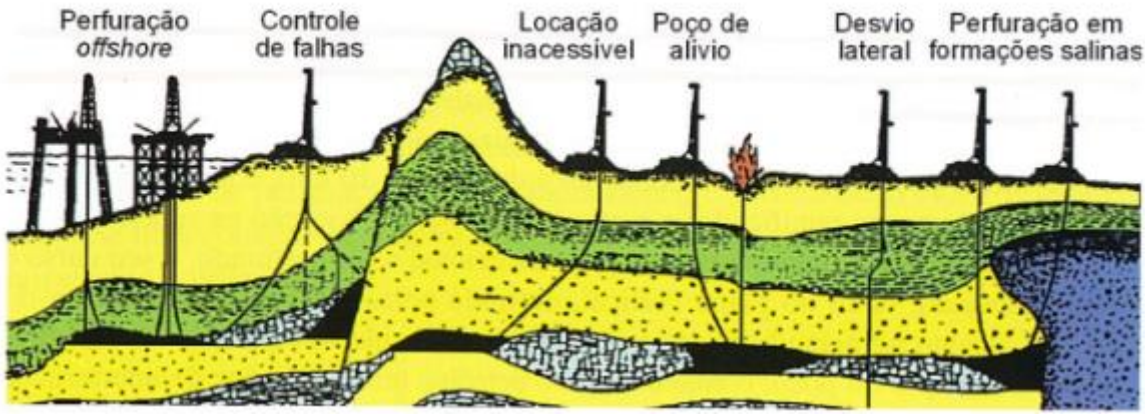
Fonte: Rocha et al. (2011).

Ainda, a indústria petrolífera tem desenvolvido, ao longo do tempo, técnicas cada vez mais eficientes para a perfuração de poços. A crescente necessidade de extrair petróleo de reservatórios situados em águas profundas e ultraprofundas tem sido uma conquista progressiva. Para a indústria do petróleo, a maioria dos poços de desenvolvimento utiliza poços direcionais com grandes inclinações e poços horizontais. A perfuração direcional, que desperta grande interesse na área, tem atraído a atenção de especialistas por ser um método que reduz os impactos ambientais, ao mesmo tempo em que aumenta a produtividade do poço (SOUZA,

2018).

A perfuração direcional é uma técnica que visa desviar intencionalmente a trajetória de um poço da vertical para atingir objetivos que não estão diretamente abaixo de sua localização na superfície. Essa técnica é utilizada para várias finalidades, entre as quais se destacam o controle de um poço em blowout com a perfuração de poços de alívio, a obtenção de formações produtoras que estejam localizadas sob áreas inacessíveis, o desvio da trajetória do poço de acidentes geológicos, a perfuração de vários poços a partir de um único ponto, especialmente em plataformas marítimas, e o desvio de poços que enfrentaram problemas operacionais, como a prisão da coluna de perfuração (THOMAS, 2001).

Figura 5 - Justificativas de poços direcionais.



Fonte: Thomas (2001).

De acordo com Firme (2013), um dos principais fatores que valorizam a perfuração direcional no atual cenário é sua ampla aplicação na perfuração de poços no Pré-Sal. Essa região apresenta constituições geológicas específicas, caracterizadas por rochas salinas altamente dúcteis e com comportamento plástico. Essas rochas, que possuem resistência relativamente baixa, representam um dos desafios para a perfuração em águas profundas e ultraprofundas, pois formam domos de sal.

A perfuração direcional é aplicada com o objetivo de aumentar a produtividade dos poços e minimizar o impacto ambiental. Entretanto, a construção de poços em condições ambientais adversas pode tornar essa atividade significativamente custosa. Nesse contexto, qualquer problema operacional durante a perfuração de poços de petróleo pode resultar em tempo não produtivo, elevando os custos do projeto e, em alguns casos, até inviabilizando sua execução (MIYOSHI, 2020).

Um desses problemas operacionais que ocorrem frequentemente é o aprisionamento da coluna de perfuração. De acordo com Miyoshi (2020), o aprisionamento mecânico ocorre quando a coluna de perfuração está em movimento, sendo causado por obstrução ou restrição física.

Diante dos desafios operacionais e geomecânicos apresentados na perfuração de poços em rochas salinas, especialmente no contexto de poços direcionais, torna-se essencial compreender como essas formações se comportam sob diferentes condições de carga e geometrias de poço. Nesse sentido, a modelagem numérica surge como uma ferramenta fundamental para prever o comportamento dessas estruturas e mitigar riscos durante a perfuração. No capítulo seguinte, será abordada a aplicação do Método dos Elementos Finitos na simulação de poços verticais e direcionais, com ênfase em estudos prévios que utilizaram essa técnica para analisar os efeitos da fluência e da instabilidade em maciços compostos por rochas evaporíticas.

4 SIMULAÇÕES DE PERFURAÇÃO DE POÇOS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Considerando os desafios operacionais e geomecânicos envolvidos na perfuração de poços em rochas salinas — discutidos no capítulo anterior —, a simulação computacional torna-se uma ferramenta essencial para antecipar comportamentos estruturais e prever falhas associadas à fluência dessas formações. Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos (MEF) destaca-se como uma abordagem robusta e amplamente validada para a análise de problemas envolvendo geometrias complexas e condições de contorno realistas. Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos do MEF, com ênfase em sua aplicação à modelagem de poços verticais e direcionais, além de destacar os principais estudos que embasam a escolha da abordagem adotada neste trabalho.

Em muitos campos da engenharia e ciências, o uso de métodos analíticos clássicos para resolver equações diferenciais parciais é inviável para geometrias complexas. Nesses casos, o método dos elementos finitos (MEF) surge como uma abordagem numérica eficiente, que permite a solução aproximada dessas equações. Na engenharia, essa técnica é amplamente utilizada em várias aplicações, como análise de tensões e transferência de calor. (FISH; BELYTSCHKO, 2000)

De acordo com Francisco (2020), citando Araújo (2009), o método dos elementos finitos baseia-se na divisão do meio contínuo em pequenos subdomínios, cujas propriedades são conhecidas. Isso possibilita a modelagem e solução numérica de problemas que seriam difíceis ou inviáveis de resolver por métodos analíticos tradicionais. As funções de interpolação usadas nesses subdomínios garantem a continuidade das variáveis fundamentais — como os deslocamentos — ao longo do modelo discretizado. No entanto, nas interfaces entre elementos, outras grandezas derivadas, como tensões e deformações, podem apresentar descontinuidades, o que é uma característica esperada dessa formulação numérica.

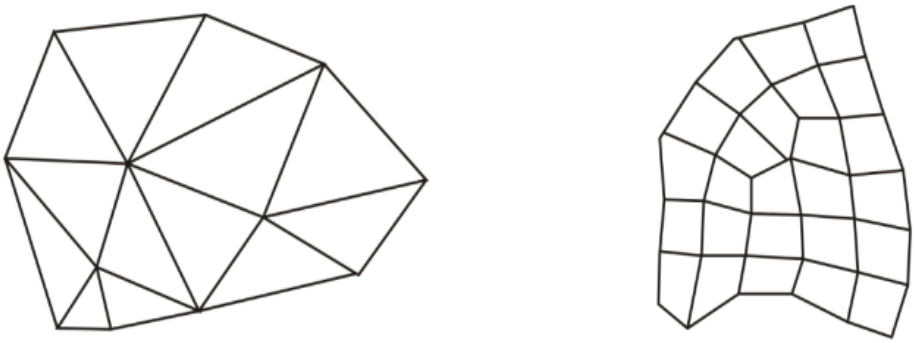
Os domínios bidimensionais podem ser divididos em elementos como triângulos ou quadriláteros (Figura 6). A solução obtida pelo MEF é aproximada, e o erro dessa solução pode ser minimizado tanto pelo aumento do grau do polinômio usado para aproximar o campo em questão quanto pelo refinamento da malha. No entanto, o refinamento da malha implica um aumento no tempo de processamento. O analista deve, então, avaliar o erro e verificar se a solução obtida é satisfatória, ponderando a necessidade de maior processamento para melhorar a precisão (GONÇALVES, 2011).

Conforme explicado por Fish e Belytschko (2000), os elementos tridimensionais podem

ser divididos basicamente em duas categorias: os elementos hexaédricos e os elementos tetraédricos. Os hexaédricos são generalizações dos elementos quadrilaterais, enquanto os tetraédricos são generalizações dos elementos triangulares. Elementos em forma de cunha podem ser formados ao colapsar os nós de um elemento hexaédrico, da mesma maneira que um triângulo pode ser formado a partir de um quadrilátero. Em cada categoria, existem os elementos básicos de ordem inferior, como o hexaédrico de oito nós (ou trilinear) e o tetraédrico de quatro nós, além de elementos de ordem superior, que podem ter faces curvas ou planas.

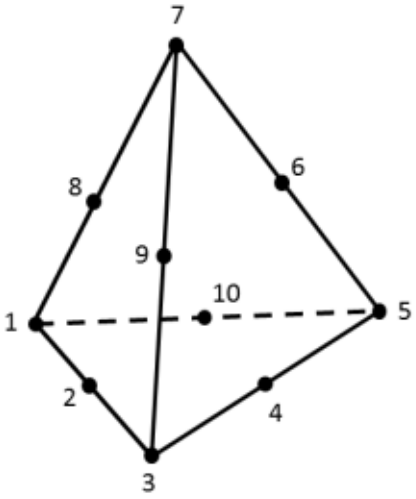
Ainda, no caso dos modelos tridimensionais, pode-se representar o modelo sólido por um conjunto de elementos de tetraedros. Segundo Wojciechowski (2022), esses elementos possuem pontos, chamados nós, onde são calculadas as grandezas físicas de interesse. Um exemplo é o elemento C3D10, utilizado no software Abaqus, que corresponde a um tetraedro quadrático com 10 nós (Figura 7). Ademais, Bucknell (2016) mostra outro exemplo de elemento presente no Abaqus, o elemento C3D20R (elemento finito hexaédrico tridimensional de segunda ordem com 20 nós e integração reduzida), como mostra a Figura 8, o qual será utilizado no modelo do estudo de caso deste presente trabalho.

Figura 6 - Elementos finitos triangulares e quadrilaterais.



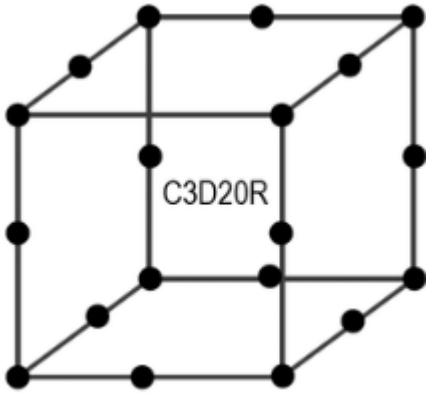
Fonte: Adaptado de Gonçalves (2011).

Figura 7 - Elemento C3D10.



Fonte: Wojciechowski (2022).

Figura 8 - Elemento C3D20R.



Fonte: Adaptado de Bucknell (2016).

Nesse contexto, tem-se que o Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser uma ferramenta amplamente utilizada para estudar o comportamento de materiais complexos, como as rochas salinas, durante a sua perfuração. Devido à capacidade do MEF de simular a deformação e o fluxo de tensões em materiais sujeitos a condições extremas de pressão e temperatura, ele é ideal para avaliar os desafios associados à fluência das rochas salinas, ajudando a prever problemas como o fechamento do poço e o desgaste das paredes durante a

perfuração em domos de sal.

O Abaqus é um software de elementos finitos amplamente utilizado para solucionar diversos tipos de problemas de engenharia, incluindo análises estruturais. O software calcula inicialmente os parâmetros desconhecidos, como deslocamentos e rotações nodais, a partir dos quais outras grandezas, como deformações, tensões e forças de reação, são derivadas. O Abaqus/CAE permite criar, analisar e visualizar modelos e simulações de elementos finitos, sendo amplamente utilizado em diversas indústrias para análise de integridade estrutural, vibrações e desempenho de componentes e conjuntos (ABAQUS/CAE, 2024).

Modelagens tridimensionais envolvendo materiais geomecanicamente complexos, como as rochas salinas, apresentam elevado custo computacional, sobretudo quando se utilizam leis constitutivas não lineares, como os modelos de fluência. O tempo necessário para a execução de uma única simulação pode se tornar impraticável em contextos onde há elevada densidade de malha, grande número de incrementos de tempo ou múltiplas combinações de carregamentos e condições de contorno. Essa limitação impacta diretamente a viabilidade de estudos paramétricos, calibrações ou análises de sensibilidade, restringindo o número de simulações que podem ser realizadas em tempo hábil. Diante disso, torna-se essencial a adoção de estratégias que acelerem o processo computacional, reduzindo o tempo de processamento sem comprometer a precisão dos resultados. Entre essas estratégias, destaca-se a paralelização, cuja aplicação prática no contexto deste trabalho será apresentada a seguir.

Devido à complexidade computacional envolvida nas simulações tridimensionais de poços em rochas salinas — especialmente quando se utiliza uma malha refinada e modelos com leis de fluência —, é fundamental otimizar o tempo de processamento por meio de estratégias de paralelização. O Abaqus oferece suporte nativo à execução paralela, tanto em análises estáticas quanto dinâmicas, por meio do uso de múltiplos núcleos de processamento. Essa paralelização pode ocorrer via threads ou via MPI (Message Passing Interface), sendo possível configurar o número de CPUs a serem utilizadas e o tipo de paralelismo diretamente nos parâmetros do job (ABAQUS, 2023). A execução paralela permite que diferentes regiões do domínio finito sejam processadas simultaneamente, o que reduz significativamente o tempo total de simulação e viabiliza a modelagem de geometrias mais complexas, como poços direcionais em domínios com múltiplas litologias. O uso eficaz dessa funcionalidade se mostrou essencial para a realização das simulações neste trabalho, garantindo maior eficiência sem comprometer a precisão dos resultados.

Segundo Santos et al. (2018), a modelagem de um problema no Abaqus envolve a construção da configuração do problema proposto, que abrange a definição do domínio, a

geração da malha de elementos finitos, a determinação das propriedades dos materiais, bem como a definição das condições de contorno e iniciais do problema. Segundo Santos (2021), na fase de análise numérica, o modelo é simulado utilizando a formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF), embora o foco do trabalho não seja detalhar essa formulação. No entanto, ela é apresentada por Fish e Belytschko (2000) e aplicada ao contexto da perfuração de poços verticais por Araújo (2012).

Como dito anteriormente, o MEF é uma ótima ferramenta para a modelagem de poços. Nesse sentido, diversos trabalhos sobre o fechamento de poços verticais foram realizados por Santos (2021), Araújo (2012), Rodrigues (2021), Francisco (2020), Paranhos Sobrinho (2018) e Gonçalves (2011). No caso dos poços direcionais, Miyoshi (2020), Mendes (2012), Lins (2010) e Barcelos et al. (2017) apresentam estudos sobre modelagem destes tipos particulares de poços, mas não têm o fechamento do poço como objeto de estudo principal dos trabalhos. O fechamento de poços direcionais é abordado no trabalho de Poiate (2012), no qual estuda-se, por meio de modelagem 3D no simulador ANVEC, o impacto da variação do ângulo de perfuração no fechamento do poço para diferentes tipos de rochas salinas. O modelo estudado por Poiate (2012) é utilizado como uma das referências para verificação da estratégia e resultados apresentados neste presente trabalho.

Dessa forma, observa-se que o Método dos Elementos Finitos, aliado ao uso de ferramentas computacionais robustas como o Abaqus, permite simular com precisão os efeitos da fluência em poços perfurados em rochas salinas, inclusive em geometrias tridimensionais com diferentes inclinações. Com base nesse embasamento teórico e nas referências adotadas, o próximo capítulo apresenta a estratégia de modelagem implementada no software Abaqus, detalhando passo a passo o processo de construção dos modelos simulados neste trabalho.

5 ESTRATÉGIA DE MODELAGEM

Este capítulo descreve a estratégia adotada para a modelagem numérica de poços direcionais utilizando o software Abaqus, com foco na simulação do comportamento de rochas salinas submetidas à fluência. A modelagem foi concebida em etapas sistemáticas, abrangendo desde a definição geométrica do domínio tridimensional até a configuração final da simulação, incluindo malha, materiais, carregamentos, condições de contorno e submissão do job. O procedimento parte de modelos com uma única litologia, estendendo-se posteriormente à consideração de múltiplas camadas salinas, com adaptações pontuais na construção da geometria. A abordagem busca garantir a reprodutibilidade do processo e a fidelidade às condições geológicas representadas, sendo apresentada de forma detalhada, com o auxílio de figuras, caixas de diálogo e instruções baseadas na interface gráfica do software e no uso de scripts em Python.

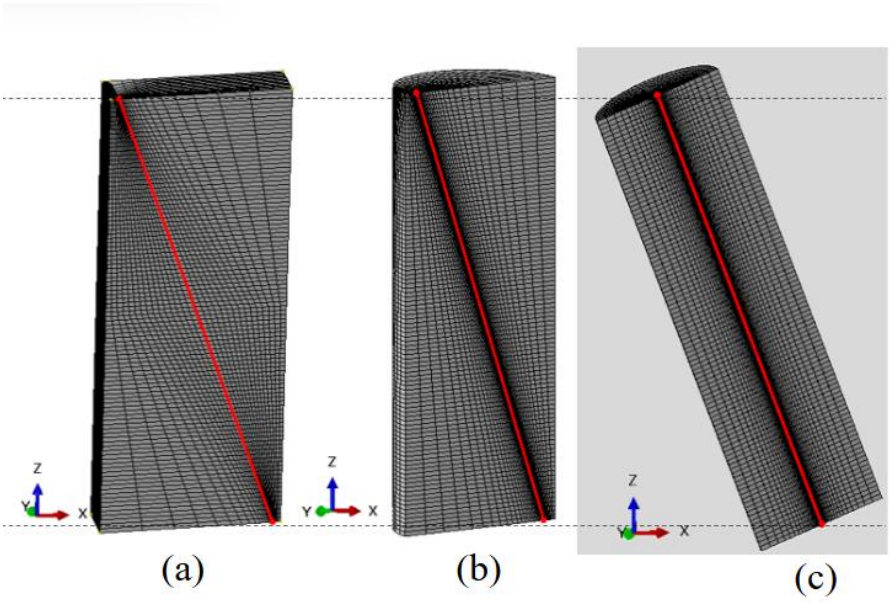
Para simplificar a interpretação dos resultados, seções do poço com uma única inclinação são inicialmente modeladas, considerando-se um modelo composto por uma única litologia. O software comercial ABAQUS (ABAQUS, 2014) é utilizado para modelar e estudar o problema, e suas rotinas em macro, em Python, são de grande utilidade para automatizar o processo de geração. Como adota-se uma única inclinação, é possível modelar o poço vertical e, em seguida, aplicar uma rotação em torno de um eixo cartesiano.

Além do modelo com uma única litologia, considera-se também um segundo caso mais complexo, envolvendo múltiplas litologias salinas. A principal diferença entre os dois modelos está na definição da geometria, onde diferentes camadas devem ser representadas no domínio tridimensional. No entanto, as demais etapas da modelagem — como definição de propriedades dos materiais, aplicação de carregamentos, geração da malha e condições de contorno — permanecem praticamente as mesmas, permitindo que o detalhamento nas seções seguintes se baseie no caso com litologia única. As adaptações específicas para o caso com múltiplas litologias serão discutidas na subseção 5.1.2.

Quanto a discretização dos modelos apresentados neste trabalho, utiliza-se elementos do tipo C3D20R (elemento finito hexaédrico tridimensional de segunda ordem com 20 nós e integração reduzida). Em relação à geometria, uma tentativa inicial é feita utilizando um design semelhante ao apresentado por Poiate (2012) (Figura 9 (a)). No entanto, as malhas geradas pelo Abaqus apresentaram um condicionamento inadequado, mesmo após tentar várias partições diferentes dentro do modelo. Para melhorar a qualidade da malha, considera-se a geometria da Figura 9 (b), onde o maciço é modelado como um cilindro. Embora há melhorias na qualidade

da malha, modelar inclinações maiores usando essa geometria exigiria um número significativamente alto de elementos, o que não é ideal para o propósito deste estudo, que é desenvolver uma estratégia de modelagem econômica e eficaz analisar poços direcionais com diferentes inclinações. Consequentemente, adota-se a geometria mostrada na Figura 9 (c) para a modelagem neste trabalho.

Figura 9 - Tentativas de geometria de modelagem do maciço.



Fonte: Autor (2024).

Após definir a geometria do problema, o processo de modelagem passo a passo é semelhante ao que o grupo já vinha realizando no estudo do problema vertical, o qual será detalhado mais adiante nas seções seguintes.

5.1 Geometria

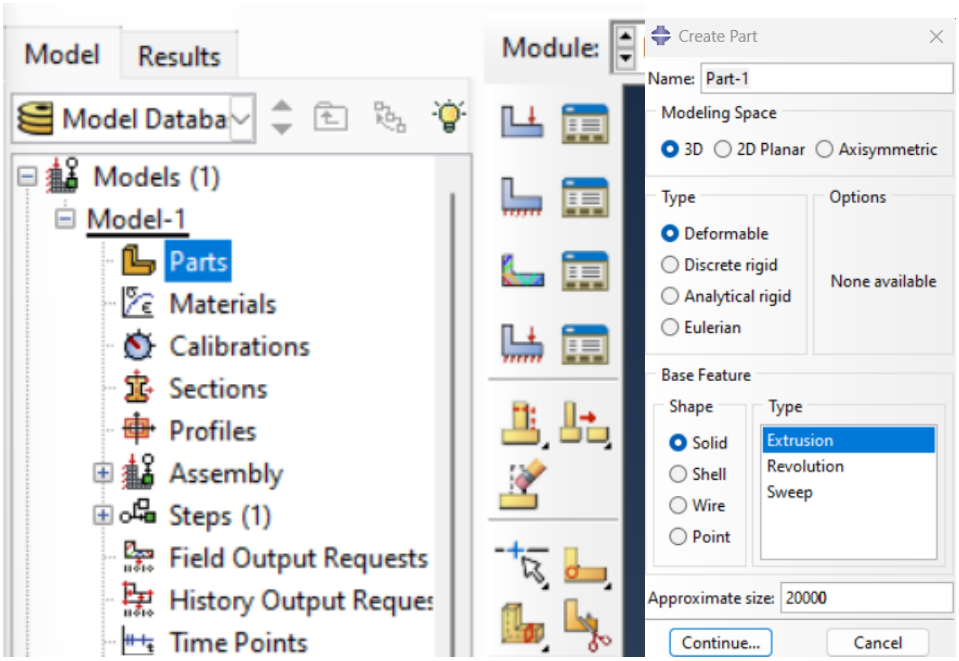
5.1.1 Geometria para o modelo com uma litologia

Para definir a geometria, são necessários os seguintes dados: cota de topo, cota de base, altura da mesa rotativa (MR), raio interno do poço e largura do maciço (raio externo). O primeiro passo na modelagem de um problema no Abaqus é criar uma "part", onde a geometria do maciço é definida. O semicilindro é um sólido 3D deformável do tipo Extrusão, em que um

semicírculo com raio externo (r0) centrado na origem é definido como a face a ser extrudada, e em seguida a extensão do modelo é estabelecida.

Para criarmos a “Part”, como apresentado pela Figura 10, dá-se clique duplo em “Parts” no menu lateral (Árvore de modelo) do Abaqus, selecionando as configurações do modelo. Para o caso estudado, seleciona-se: o espaço a ser modelado (3D) e o tipo (Deformável). Ainda, para as configurações de base, especifica-se: a forma (Sólido) e o tipo (Extrusão). Define-se, também, um tamanho aproximado.

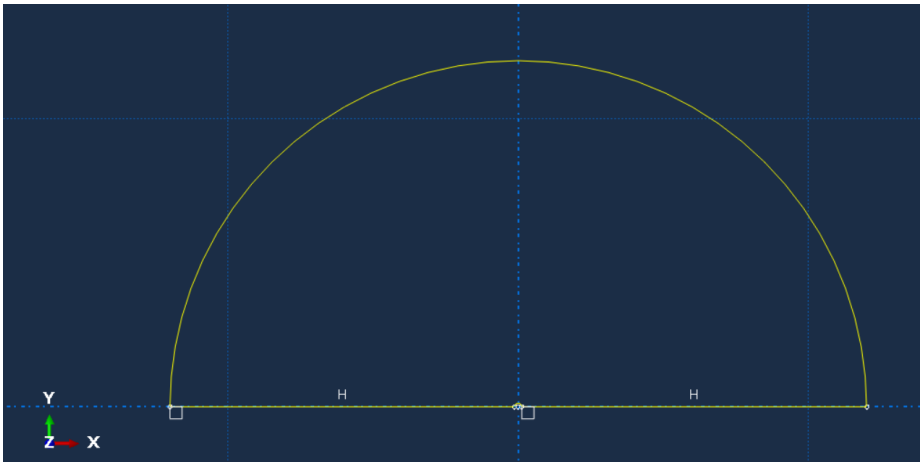
Figura 10 - Criando uma “part”.



Fonte: Autor (2024).

O próximo passo é desenhar o semicírculo maior que representa o maciço e o semicírculo menor que representa o poço. Ambos os semicírculos têm o centro no eixo de origem do software. O desenho da forma proposta pode ser realizado de várias maneiras utilizando as ferramentas de desenho no menu lateral. Para este caso, utiliza-se a ferramenta de Arco para a criação dos dois semicírculos e a ferramenta de Linha para a junção destes. Ao completar o desenho, tem-se a vista da planta do semicilindro a ser extrudado.

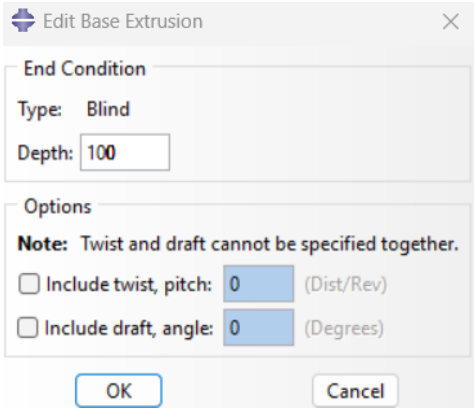
Figura 11 - Criando o desenho do semicilindro a ser extrudado.



Fonte: Autor (2024).

Após a definição do desenho, seleciona-se “Done” no menu inferior para concluir a tarefa. Uma caixa de diálogo será aberta para a especificação da profundidade (Depth) da base de extrusão, o qual será a altura do modelo do problema (Ver Figura 12).

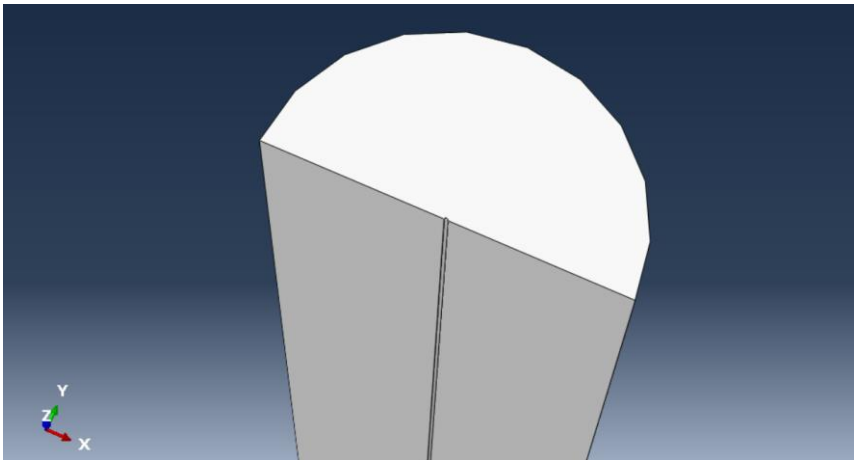
Figura 12 - Definição da profundidade da extrusão.



Fonte: Autor (2024).

Após a conclusão das etapas acima apresentadas, tem-se o sólido semi cilíndrico tridimensional do maciço e do “vazio” do poço (Figura 13).

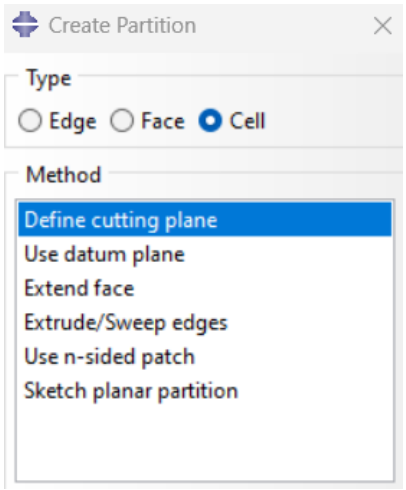
Figura 13 - Sólido tridimensional.



Fonte: Autor (2024).

A próxima etapa é criar uma partição que auxiliará na definição da Malha e sua qualidade, posteriormente. No módulo “Part”, seleciona-se a opção “Create Partition” no menu lateral. A Figura 14 mostra a caixa de diálogo para a definição do tipo e método de partição. Seleciona-se o tipo “célula” (Cell) e o método de definição de plano de corte (Define cutting plane).

Figura 14 - Criando uma partição.

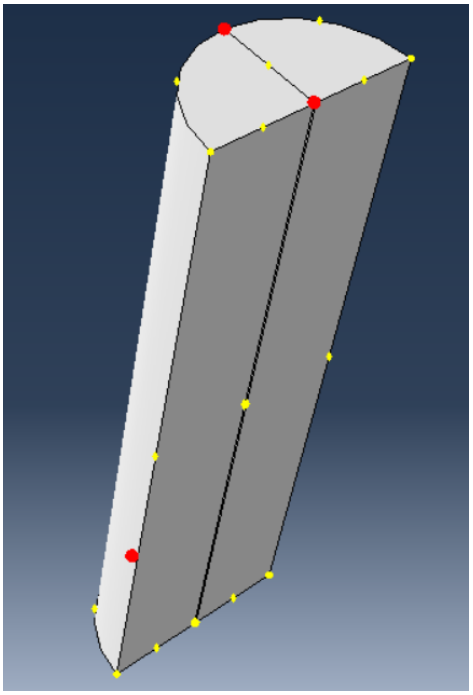


Fonte: Autor (2024).

Após a definição do tipo de partição, como mostra Figura 15, deve-se selecionar três pontos para a criação do plano de corte. Seleciona-se, portanto, o ponto no centro do semicírculo

menor no topo do modelo, o extremo ponto do eixo Y na parede externa do maciço, tanto no topo como na base. Após a conclusão desta etapa, o modelo será particionado, evidenciado por um plano cortando o semicilindro em duas partes iguais.

Figura 15 - Selecionando os pontos para o plano de corte.



Fonte: Autor (2024).

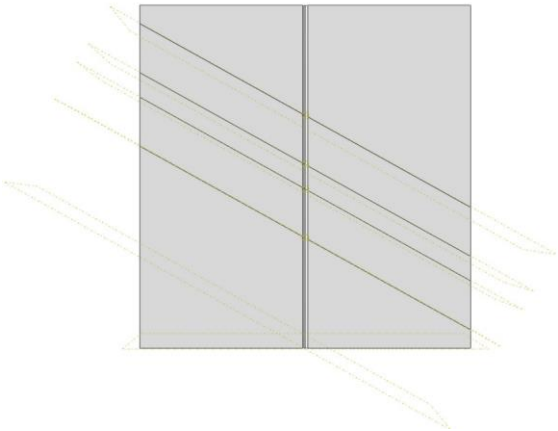
5.1.2 Geometria para modelo com múltiplas litologias

No caso de poços compostos por diferentes camadas litológicas, a construção da geometria requer a subdivisão vertical do maciço, representando as interfaces entre as distintas unidades geológicas. Essa subdivisão pode ser realizada por meio de partições horizontais aplicadas ao sólido previamente criado, permitindo assim que cada camada possua uma região geométrica própria dentro do modelo.

Cada uma dessas regiões será posteriormente associada a uma seção distinta no ABAQUS, permitindo a atribuição de diferentes propriedades de material conforme as características de cada litologia — por exemplo, halita, taquidrita ou carnalita. Essa estratégia garante a fidelidade do modelo à estratigrafia do poço real, sem comprometer a continuidade das demais etapas do processo de modelagem, que seguem conforme o descrito para o modelo com uma única litologia.

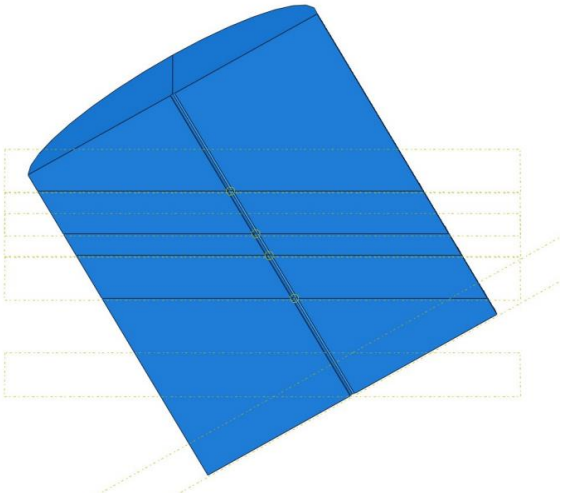
Portanto, após a criação do maciço vertical, como descrito na subseção anterior, criam-se “Datum Planes”, os quais são planos de referência para a criação de partições que subdividem as diferentes camadas do modelo. A esses planos de referência são atribuídas coordenadas de forma a obter as cotas corretas das diferentes camadas de sal do exemplo a ser estudado. Ademais, os planos são gerados com inclinações específicas, de modo que, após a rotação do modelo para a inclinação de estudo, os cortes das partições realizados com esses planos de referência tornem-se perfeitamente horizontais.

Figura 16 - Planos de referência no modelo ainda na configuração vertical.



Fonte: Autor (2025).

Figura 17 - Planos de referência com o modelo inclinado.



Fonte: Autor (2025).

5.2 Malha

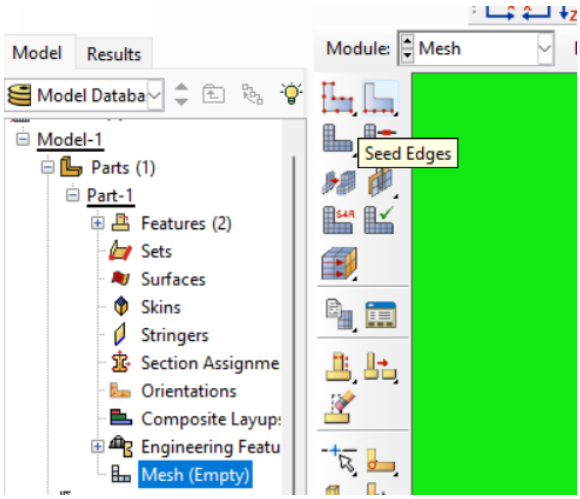
Em seguida, o modelo é discretizado. A grade na modelagem corresponde à discretização geométrica do domínio, subdividindo-o em pequenas partes chamadas elementos, que representam um domínio contínuo do problema de interesse. Para obter resultados mais precisos, é necessário utilizar grades mais finas, ou seja, grades com maior discretização espacial. No entanto, o processamento dessas grades requer técnicas de otimização para a definição da estrutura de armazenamento e dos algoritmos que operam nelas devido à demanda computacional aumentada (CARNEIRO, 2022).

Para o estudo da fluência em poços perfurados em rochas de sal, há configurações de malhas que apresentam melhores resultados. Para a discretização do domínio, segundo Araújo (2012), utiliza-se a técnica de refinar mais a malha na região próxima à borda do poço, aumentando gradualmente esse refinamento conforme se afasta do poço. Na direção radial do poço é definido o número de elementos desejados e a razão de dimensão entre o elemento mais próximo e o mais afastado da borda do poço. Na direção vertical, a discretização é realizada pela definição do tamanho do elemento, o qual é definido a depender do tipo de rocha de sal, uma vez que há rochas evaporíticas que exigem um maior refinamento para alcançar resultados mais precisos.

Portanto, as bordas verticais são divididas em um número igual de partes, e as bordas circulares são particionadas de forma semelhante. As bordas radiais (na parte superior e base do modelo) são divididas considerando uma razão (BIAS) entre o tamanho do primeiro elemento (mais próximo ao poço) e o último elemento (mais distante do poço). O tipo de elemento escolhido é o “Twenty-node brick element”, isto é, o “tijolo de vinte nós” com integração reduzida (C3D20R), e a técnica de controle de malha é definida como estruturada. O passo a passo será descrito abaixo.

Inicialmente, no módulo “Mesh”, utiliza-se a ferramenta “Seed Edges” (Figura 18). Com esta ferramenta, seleciona-se cada borda do modelo e define-se como será a discretização.

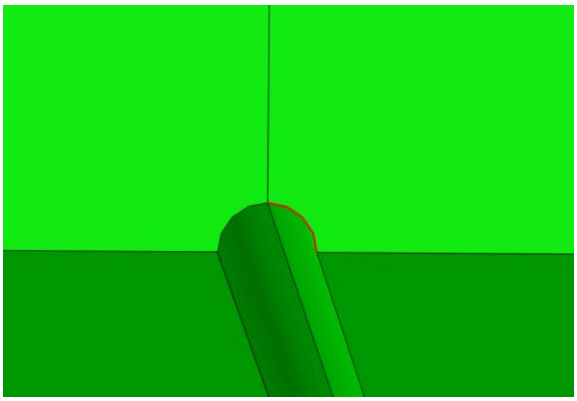
Figura 18 - Criando a malha.



Fonte: Autor (2024).

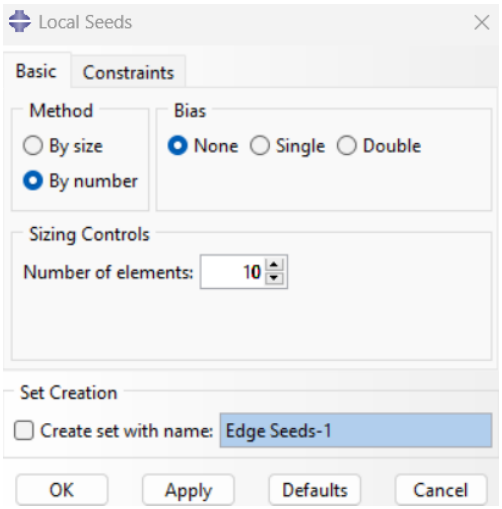
Como mostrado na Figura 19, selecionam-se as bordas curvas dos semicírculos, tanto a interna (poço), como a externa (maciço), nas faces de topo e base do sólido. Após concluir a seleção clicando em “Done”, define-se na caixa de diálogo “Local Seeds” (ver Figura 20), o método, se há razão (BIAS) e o número de elementos ou o tamanho, a depender do método selecionado. Para o caso deste trabalho. As bordas circulares são definidas por número de elementos (By number), sem BIAS, e com número exato de elementos informado pelo usuário (Number of elements). Após a conclusão desta primeira região, nosso modelo ficará como apresentado pela Figura 21.

Figura 19 - Seleção das bordas circulares.



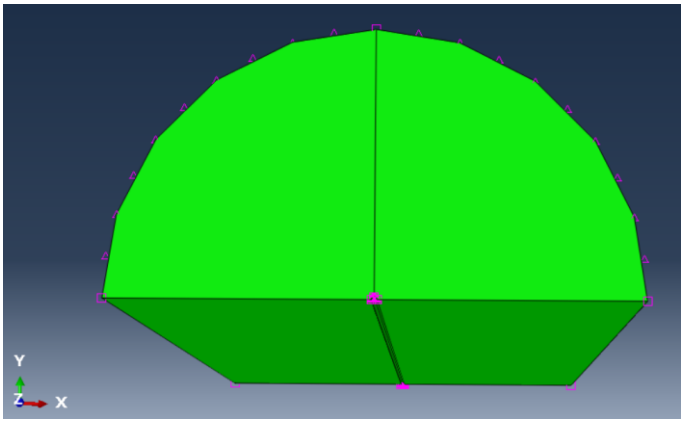
Fonte: Autor (2024).

Figura 20 - Definição do tipo de discretização.



Fonte: Autor (2024).

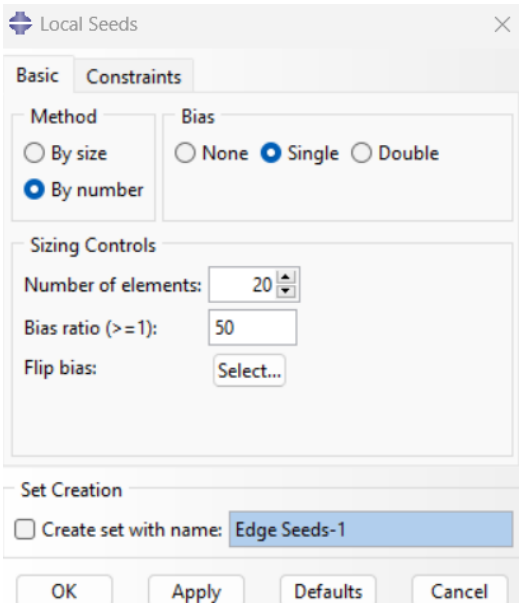
Figura 21 - Modelo após a distribuição nas bordas circulares.



Fonte: Autor (2024).

A próxima região a ser definida é a das bordas radiais. Estas são definidas por número de elementos (By number) e com razão entre os elementos (BIAS), na configuração “Single”. O usuário deve informar o número de elementos e o “Bias ratio”, isto é, a razão de tamanho entre o elemento mais afastado da borda do poço e o mais próximo (ver Figura 22).

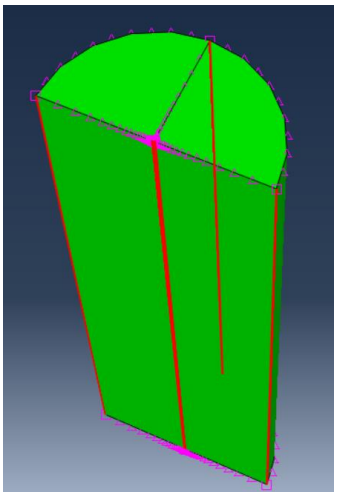
Figura 22 - Definição do tipo de discretização.



Fonte: Autor (2024).

Após a definição da distribuição desta região, tem-se o modelo apresentado na Figura 23.

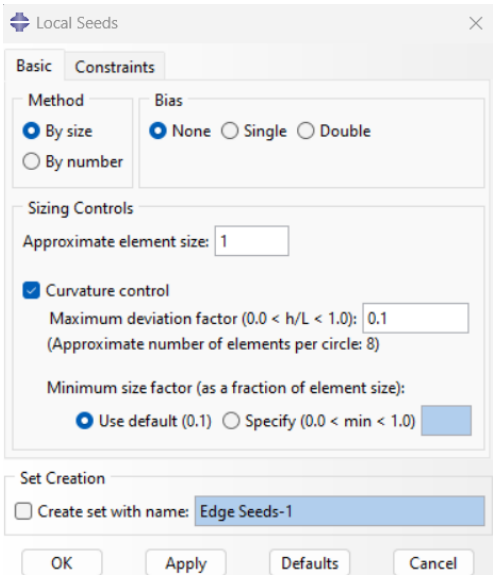
Figura 23 - Distribuição das bordas radiais.



Fonte: Autor (2024).

O próximo passo é definir a distribuição das bordas verticais. Estas são definidas por tamanho (By size) e sem BIAS. Tem como dado de entrada o tamanho aproximado do elemento (Figura 24).

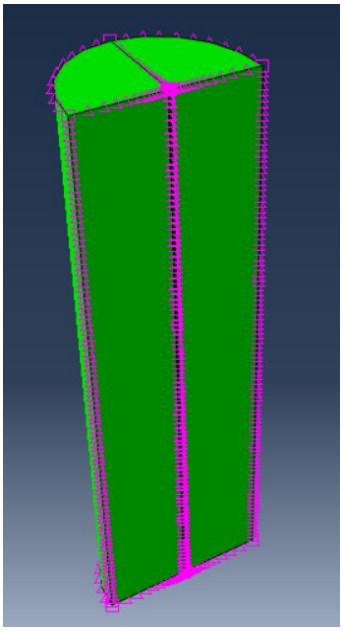
Figura 24 - Distribuição das bordas verticais.



Fonte: Autor (2024).

Concluída esta etapa, tem-se o modelo com todas as bordas distribuídas (Figura 25).

Figura 25 - Modelo completo com distribuição.



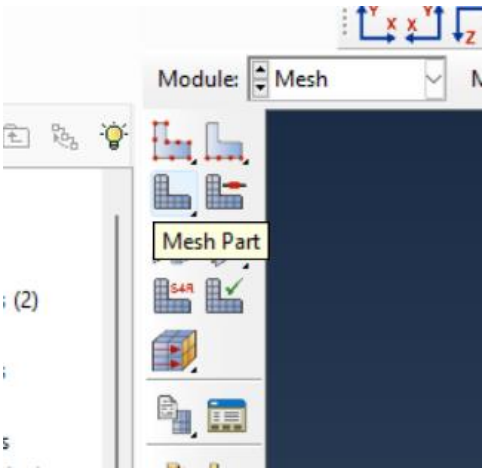
Fonte: Autor (2024).

Por fim, pode-se gerar a malha. No módulo “Mesh”, selecione a ferramenta “Mesh Part”

e confirme (Figura 26). A discretização do modelo será gerada de acordo com as configurações previamente definidas (Figura 27 e

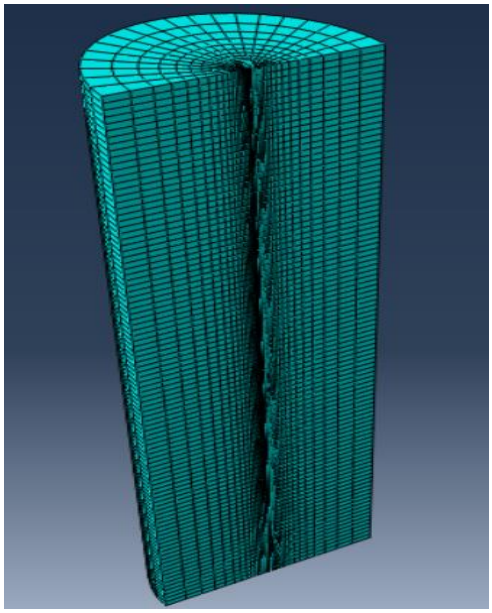
Figura 28).

Figura 26 - Gerando a malha.



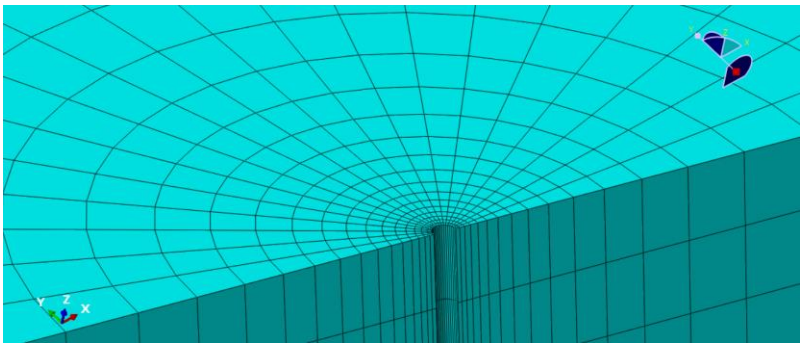
Fonte: Autor (2024).

Figura 27- Modelo discretizado.



Fonte: Autor (2024).

Figura 28 - Poço discretizado.



Fonte: Autor (2024).

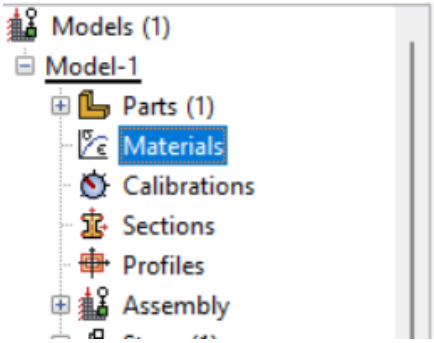
A definição do grau de refinamento da malha no presente trabalho foi estabelecida a partir de considerações e experiências prévias do grupo de pesquisa com a discretização de modelos bidimensionais de poços em rochas salinas, os quais historicamente produzem bons resultados com as configurações empregadas. Nesse sentido, a estratégia adotada para as arestas verticais e radiais baseou-se nessas práticas consolidadas. Para as arestas verticais, buscou-se uma discretização que refletisse a suscetibilidade à deformação de cada litologia: utilizou-se um tamanho de elemento de 0,50 m para rochas com baixa deformação por fluência, como a halita, e um refinamento maior, com elementos de 0,20 m, para rochas que deformam mais, como a taquidrita e a carnalita. Nas bordas radiais, considerando raios externos de 10 m, empregou-se aproximadamente 20 elementos com um fator BIAS de 50, concentrando o refinamento próximo ao poço. Para as arestas circulares, procurou-se manter uma proporcionalidade de tamanho semelhante, adotando-se também cerca de 20 elementos. Portanto, a malha tridimensional foi projetada buscando replicar o padrão de refinamento que já se provou eficaz em modelos bidimensionais do grupo de pesquisa, garantindo uma base para bons resultados. Ainda sobre a questão de uma malha menos refinada, tentou-se realizar estudos de sensibilidade do refinamento da malha para os modelos tridimensionais; no entanto, o tempo limitado para a execução do trabalho e o alto custo computacional envolvido inviabilizaram uma investigação exaustiva. Essa análise de otimização da malha em 3D, visando identificar configurações com resultados satisfatórios e menor custo computacional, é reconhecida como um ponto importante e recomendado para futuros estudos.

5.3 Materiais

O material é criado definindo suas propriedades mecânicas, como o coeficiente de Poisson e o módulo de Young para o modelo elástico. O modelo de fluência adotado neste trabalho é a Lei de Dupla Potência, cujos parâmetros foram ajustados de modo a reproduzir os resultados obtidos com o Mecanismo Duplo de Deformação (MDD). Neste contexto, os valores de referência utilizados foram inicialmente apresentados por Poiate (2012), que caracterizou as propriedades de diferentes rochas salinas brasileiras a partir do modelo MDD. Posteriormente, Forero et al. (2021) ajustaram esses parâmetros para que pudessem ser utilizados com a Lei de Dupla Potência, mantendo a equivalência dos resultados. Esses ajustes foram adotados no presente trabalho.

Para a criação do material, inicialmente, dá-se clique duplo em “Materials” (Figura 29).

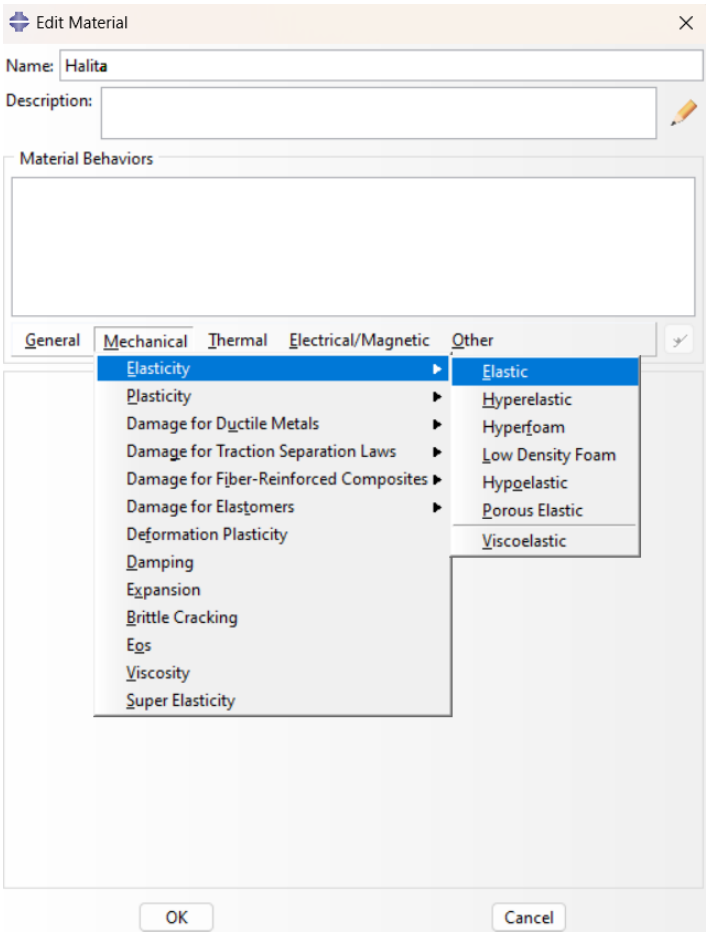
Figura 29 - Criando os materiais.



Fonte: Autor (2024).

Em seguida, na caixa de diálogo “Edit Material” são criados e nomeados os materiais e, ainda, configuradas suas propriedades. No caso das rochas salinas, as quais são os materiais objeto de estudo deste trabalho, serão definidas as propriedades Elástica e de Fluência. Portanto, a Figura 30 apresenta a adição das propriedades elásticas do material, selecionando inicialmente o comportamento mecânico, em seguida a elasticidade e, por fim, o comportamento “Elástico”.

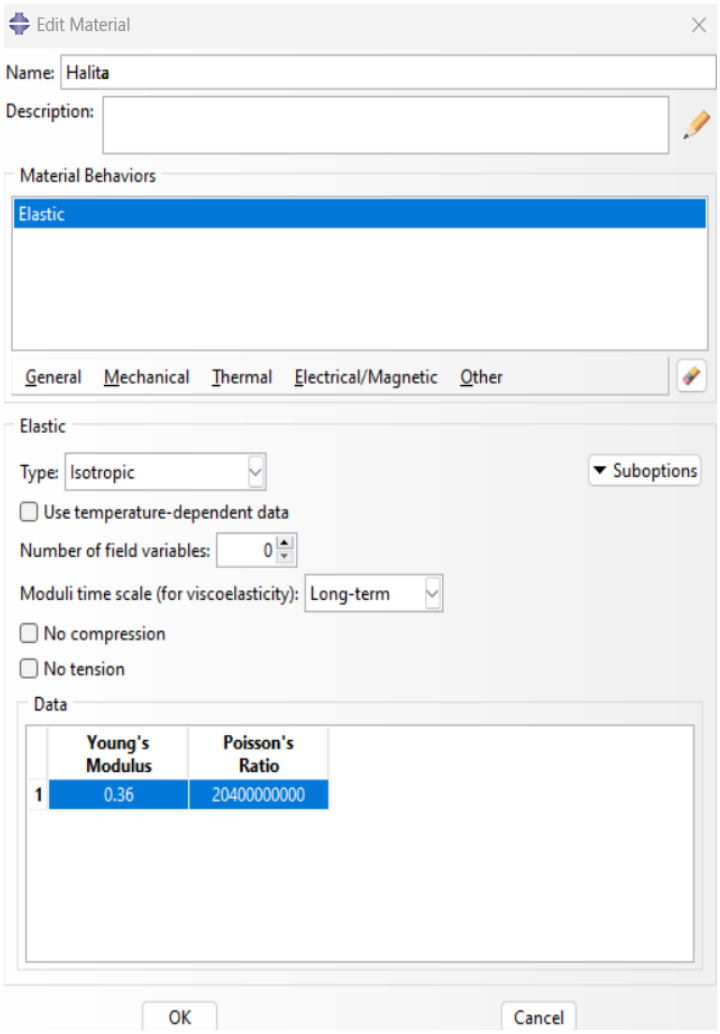
Figura 30 - Adição da propriedade elástica.



Fonte: Autor (2024).

Depois de adicionar o comportamento elástico, deve-se definir o Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson (Figura 31).

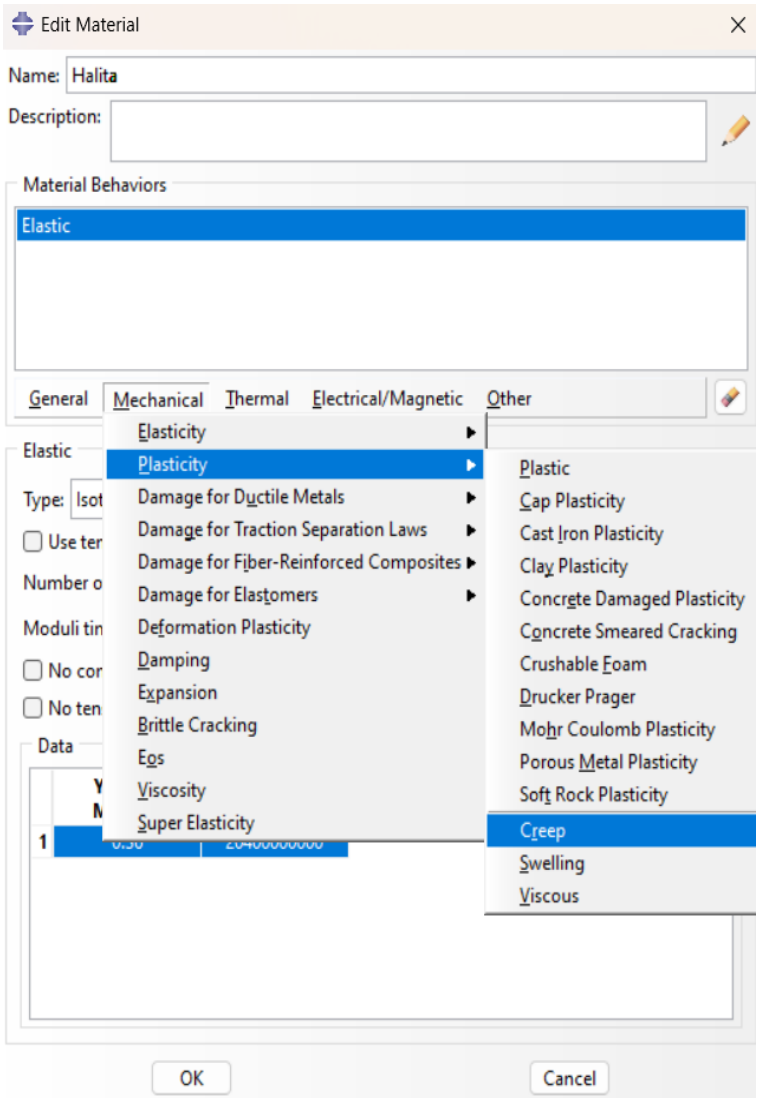
Figura 31 - Definição do Módulo de Young e do Coeficiente de Poisson.



Fonte: Autor (2024).

Ademais, como apresentado na Figura 32, deve-se adicionar a propriedade de fluência, selecionando o comportamento mecânico, posteriormente o de plasticidade e, finalmente, a fluência (creep).

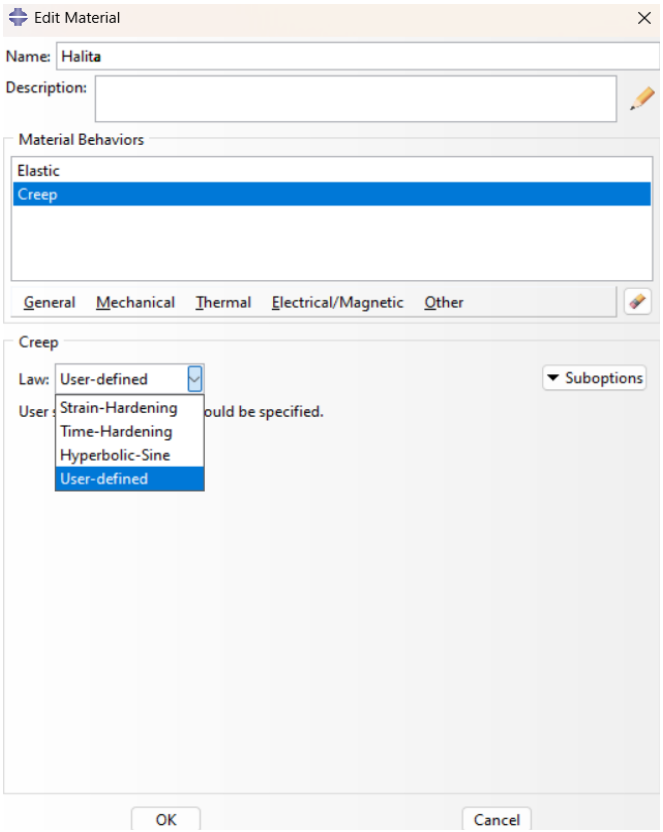
Figura 32 - Adição da propriedade de fluência.



Fonte: Autor (2024).

Após isso, deve-se adicionar a lei de fluência adotada. Em versões mais recentes do software, a Lei de Dupla Potência está incorporada à interface, porém a versão utilizada neste trabalho não possui esta funcionalidade. Neste caso, portanto, o usuário deve definir a função posteriormente no arquivo com extensão “inp” ao final da modelagem, antes de rodar a simulação. Desse modo, na etapa atual, é selecionada a opção “User-defined”, o que facilita a futura definição da lei pelo usuário (ver Figura 33).

Figura 33 - Definindo a lei de fluência.

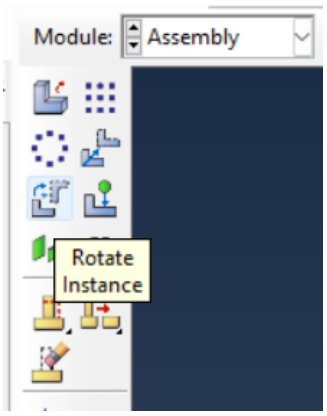


Fonte: Autor (2024).

5.4 Rotação

A rotação do modelo deve ser realizada no módulo Assembly, no qual a ferramenta “Rotate Instance” deve ser selecionada (Figura 34).

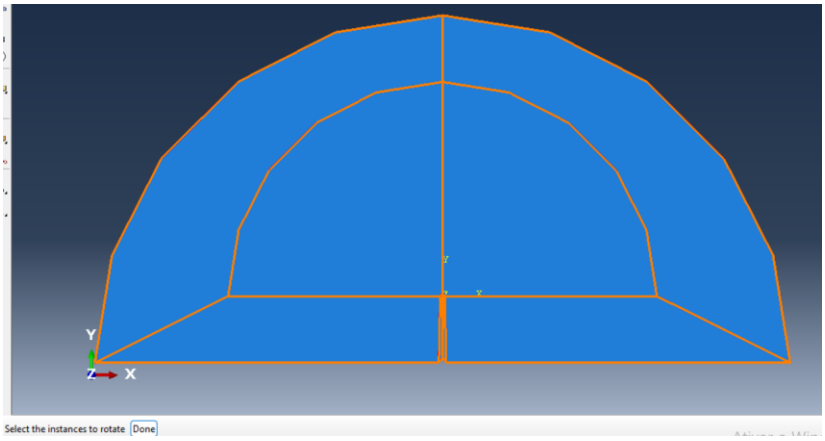
Figura 34 - Seleção da ferramenta de rotação.



Fonte: Autor (2024).

Em seguida, deve-se selecionar a instância a ser rotacionada (Figura 35)

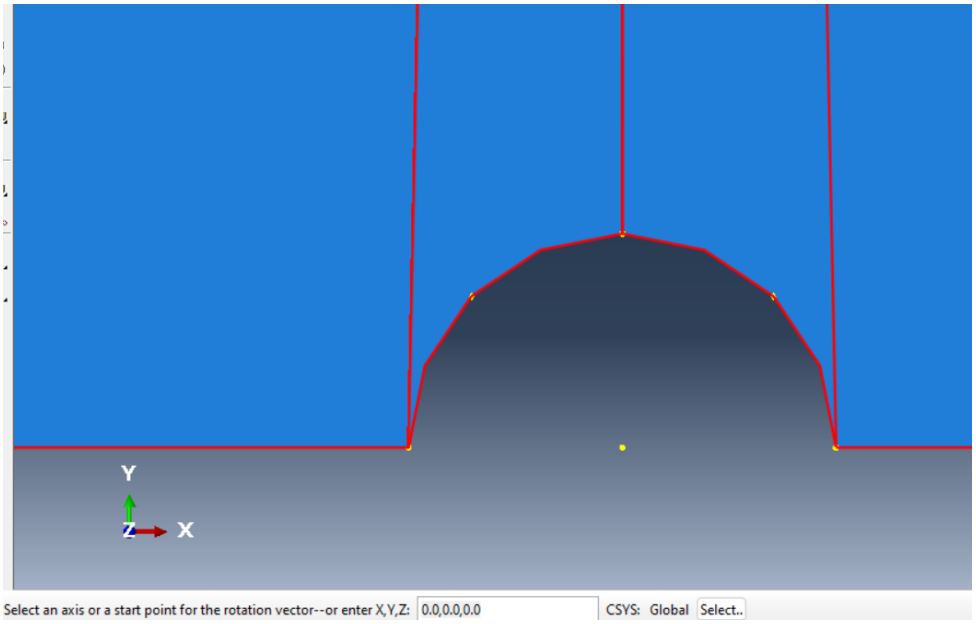
Figura 35 - Seleção da instância.



Fonte: Autor (2024).

Após isso, é necessário selecionar dois pontos para definir um vetor como eixo de rotação. Neste caso, são escolhidos o centro do semicírculo e o ponto extremo positivo do eixo Y (Figura 36).

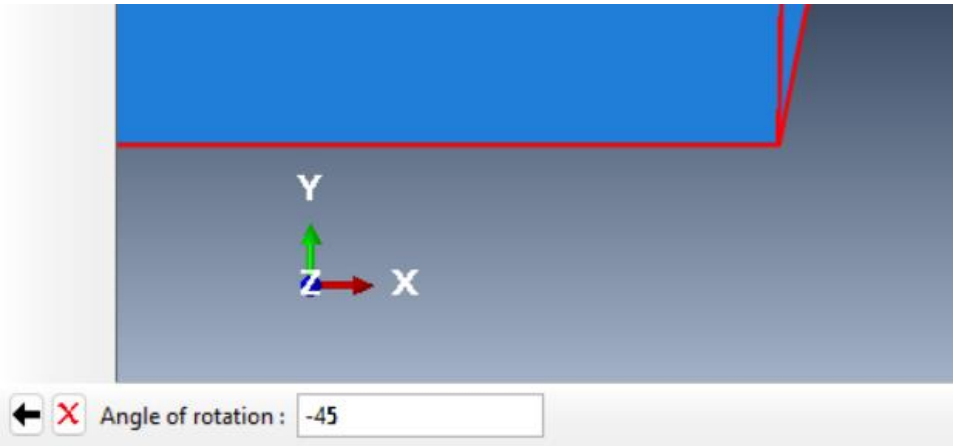
Figura 36 - Definição do vetor de eixo de rotação.



Fonte: Autor (2024).

Selecionado o eixo de rotação, deve-se informar o ângulo de rotação (Figura 37).

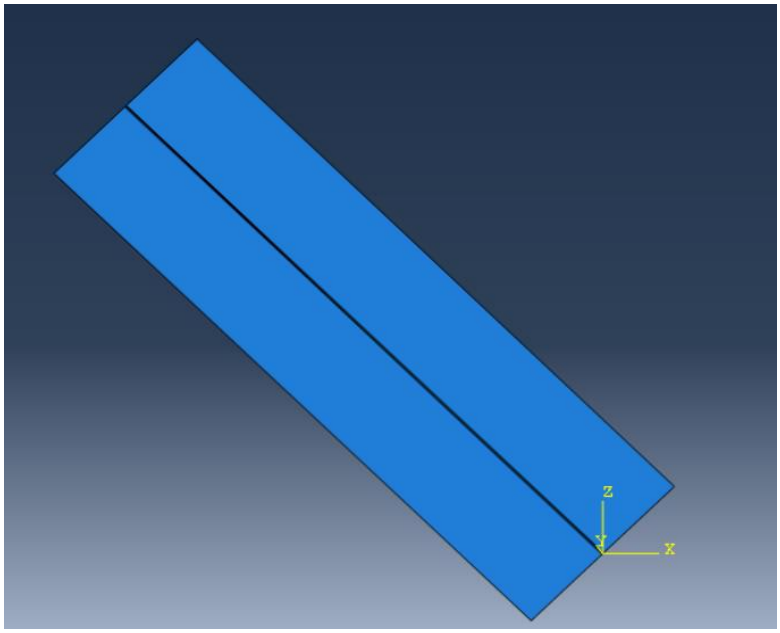
Figura 37 - Definição do ângulo de rotação.



Fonte: Autor (2024).

Após a realização dos procedimentos acima citados, tem-se o modelo inclinado no ângulo informado pelo usuário (Figura 38).

Figura 38 - Modelo inclinado.



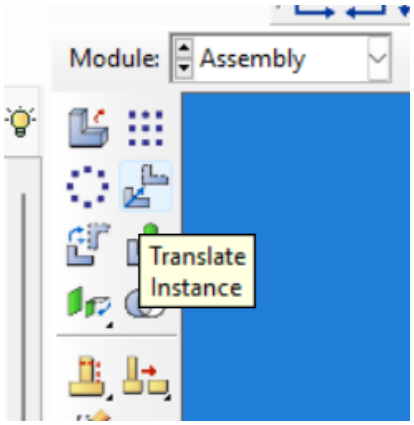
Fonte: Autor (2024).

5.5 Translação

Até o presente momento, toda a modelagem foi realizada a partir da origem e, portanto, o maciço não está localizado na profundidade correta. Deste modo, translada-se o maciço para a cota desejada.

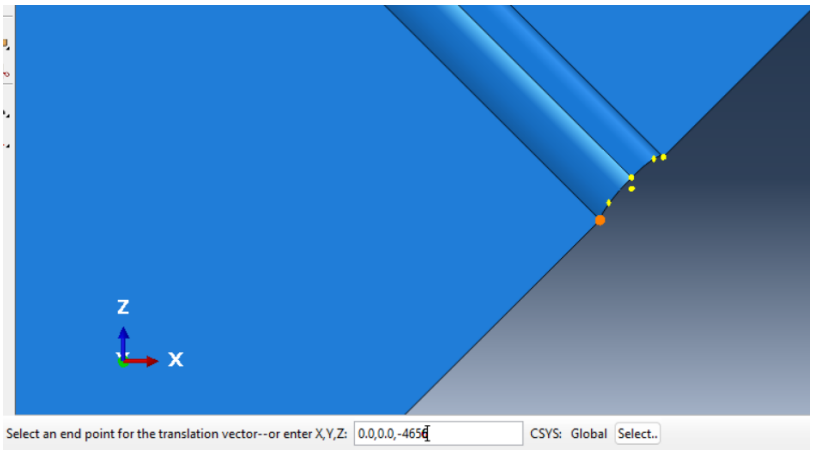
Para a realização deste passo, seleciona-se a ferramenta “Translate Instance”, no módulo Assembly (Figura 39). Em seguida, seleciona-se um ponto de referência, o qual, para esse caso, será o ponto mais inferior da parede do poço (Figura 40). Ainda, após a seleção do ponto, deve-se informar a coordenada Z desejada.

Figura 39 - Seleção da ferramenta de translação.



Fonte: Autor (2024).

Figura 40 - Seleção do ponto de referência e definição da profundidade Z.



Fonte: Autor (2024).

5.6 Passos, Carregamentos e Condições de Contorno

Com a geometria e o modelo estabelecidos, a próxima etapa é definir os passos (steps) de simulação, as cargas (loads) e as condições de contorno (boundary conditions). Para estabelecer o equilíbrio geostático, que representa o estado do maciço antes da perfuração do poço, é definido um passo geostático. Segundo Araújo (2012), devido à zero porosidade das rochas salinas, não há pressão de poros, fazendo com que as tensões totais sejam iguais às tensões efetivas. O estado de tensões geostáticas é determinado pelo peso das camadas sobrepostas e pelo coeficiente de pressão lateral da terra (k_0). A tensão geostática é aplicada como um "Campo Predefinido" atuando em todo o domínio do problema, desde o primeiro até o último passo da simulação.

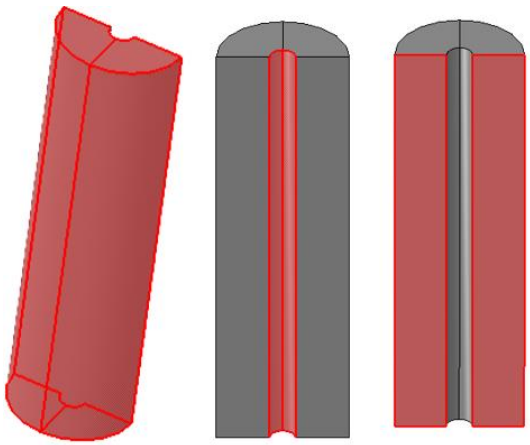
Outro "Campo Predefinido" é a temperatura, que permanece constante durante todos os passos de simulação. Ela é definida, em Kelvin, por um "Campo Analítico" que estabelece a temperatura em função da profundidade (z). O peso do maciço, que equilibra a variação de tensão geostática com a profundidade, é definido como uma "Força de Corpo" (Body Force) e também permanece inalterado ao longo dos passos temporais.

Quanto às condições de contorno, os deslocamentos nas três direções coordenadas são restringidos nas superfícies superior, inferior e radial externa (Figura 41 (a)) durante toda a simulação. A superfície que define as paredes do poço (Figura 41 (b)) tem seus deslocamentos restringidos em todas as direções cartesianas durante o passo geostático, uma vez que o poço ainda não é considerado nessa etapa, assumindo-se que o maciço está em equilíbrio sem deslocamentos. A superfície de simetria (Figura 41 (c)) possui uma condição de simetria de deslocamento ao longo do eixo y, mantida ao longo de todos os passos de simulação.

Em seguida, é adicionado um passo elástico para estabelecer as condições iniciais do passo "Visco" subsequente, que utiliza uma lei constitutiva de fluência para descrever o comportamento da rocha salina, levando em consideração a dependência da fluência com a temperatura e o tempo.

Nesses dois passos, as condições de carregamento e contorno são idênticas. A única mudança em relação ao passo geostático ocorre na superfície da parede do poço (Figura 41 (e)), onde as restrições de deslocamento são desativadas e uma carga de "Pressão" é aplicada, representando a pressão do fluido de perfuração usado na construção do poço. A magnitude dessa pressão é definida por um campo analítico em função da profundidade (Z), correspondendo à pressão estática do fluido preenchendo o poço desde a mesa rotativa.

Figura 41 - Sets para definição de cargas e condições de contorno.



(a) (b) (c)

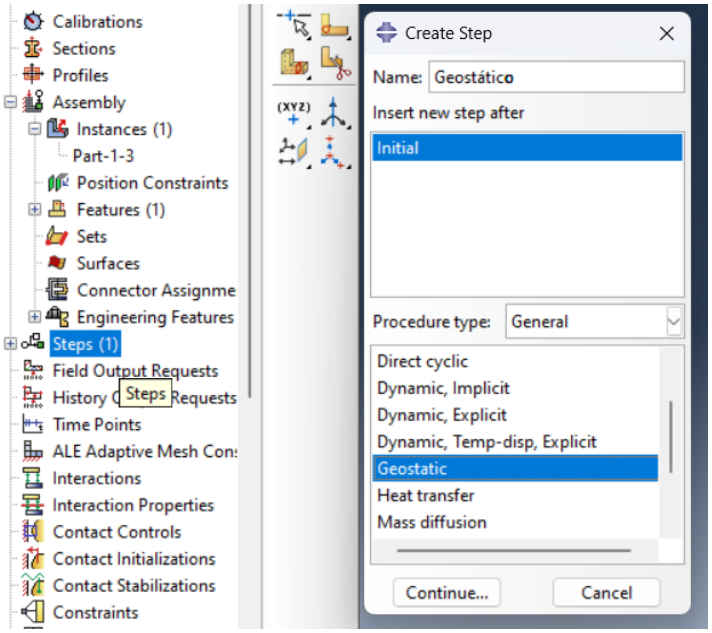
Fonte: Autor (2024).

5.6.1 Passos

Inicia-se pela criação dos passos (steps), cujo o primeiro passo a ser criado é o Geostático, o qual simula o estado de tensão natural no subsolo, refletindo as forças geológicas que atuam sobre as rochas antes de qualquer intervenção humana.

Dá-se clique duplo em Steps, de modo a abrir a caixa de diálogo “Create Step”, na qual define-se o tipo de procedimento como Geostatic (Figura 42).

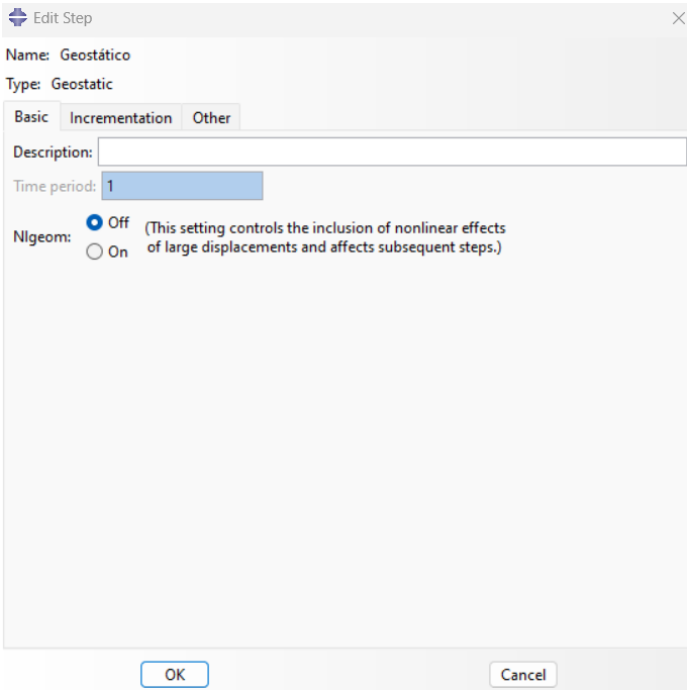
Figura 42 - Criando o passo geostático.



Fonte: Autor (2024).

Em Edit Step, não há necessidade de alteração para o passo geostático, basta apenas confirmar a configuração pré-definida (Figura 43).

Figura 43 - Editando o passo geostático.

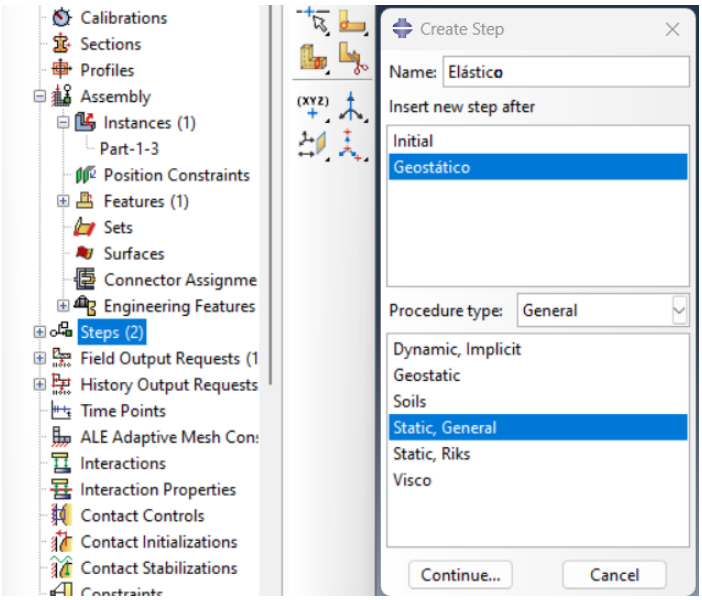


Fonte: Autor (2024).

Em seguida, cria-se o passo elástico, modela a resposta elástica das rochas salinas às tensões induzidas pela perfuração. Durante esta fase, a perfuração é simulada considerando as propriedades elásticas das rochas, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Este passo é importante para calcular as deformações e tensões instantâneas que ocorrem quando o poço é perfurado, refletindo como as rochas reagem de maneira imediata às novas condições de carga.

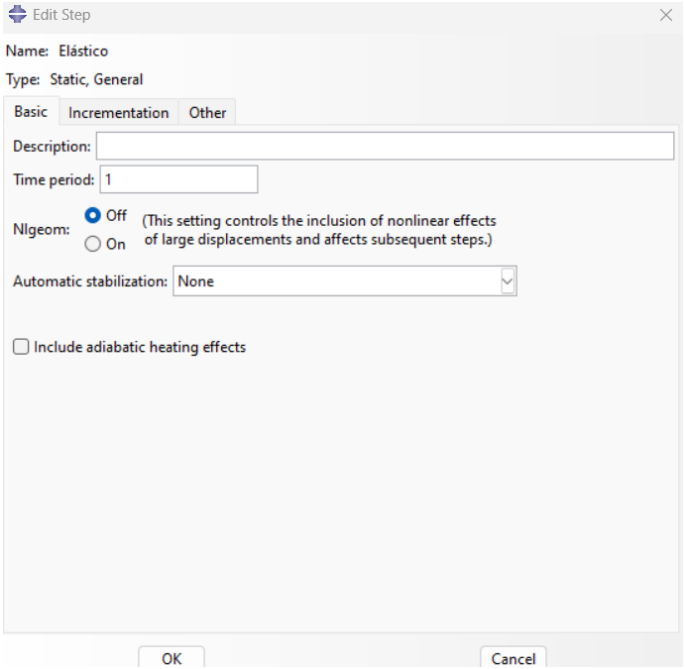
Para a criação deste passo, as mesmas etapas do passo anterior podem ser seguidas, contudo o tipo de procedimento neste caso é “Static, General”. Em Edit Step, também não há necessidade de alteração (Figuras 44 e 45).

Figura 44 - Criação do passo elástico.



Fonte: Autor (2024).

Figura 45 - Editando o passo elástico.



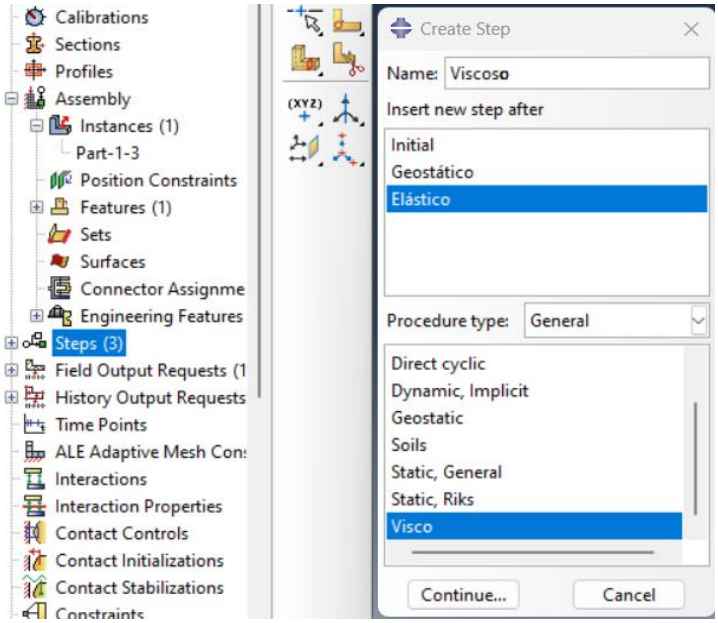
Fonte: Autor (2024).

Por fim, cria-se o passo viscoso, o qual simula a fluência das rochas salinas ao longo do tempo devido às tensões aplicadas. Nesta fase, utiliza-se um modelo de fluência para representar a deformação lenta e contínua das rochas salinas sob carga constante. Este passo considera a dependência da temperatura e do tempo na taxa de fluência, permitindo a modelagem do comportamento viscoelástico das rochas salinas, que é crítico para prever o

fechamento do poço ao longo do tempo.

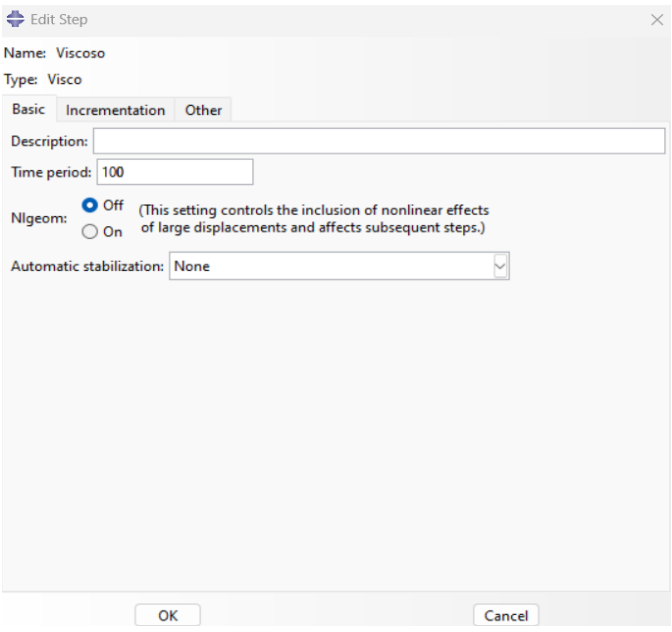
Primeiramente, seguem-se as mesmas etapas dos passos anteriores, todavia na definição do tipo de procedimento, seleciona-se o Visco (Figura 46). Em Edit Step, o usuário informa o tempo de perfuração em Time Period. Na aba “incrementation”, definem-se o tamanho dos incrementos e as tolerâncias de erro (Figuras 47 e 48).

Figura 46 - Criação do passo viscoso.



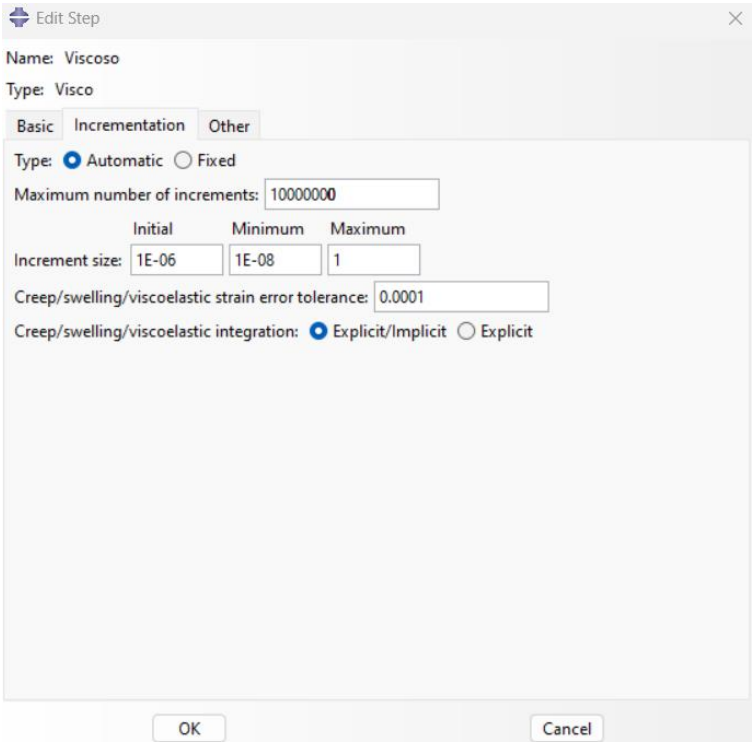
Fonte: Autor (2024).

Figura 47- Editando o passo viscoso (basic).



Fonte: Autor (2024).

Figura 48 - Editando o passo viscoso (incrementation).



Fonte: Autor (2024).

5.6.2 Carregamentos

São definidos os carregamentos e campos que o modelo está submetido, sejam eles de tensão ou temperatura. Portanto, tem-se:

- Pressão do fluido de perfuração

O fluido de perfuração é utilizado para manter a estabilidade do poço, lubrificar e resfriar a broca, e transportar os detritos da perfuração para a superfície. A pressão gerada pelo fluido de perfuração é essencial para equilibrar as pressões das formações rochosas e evitar colapsos das paredes do poço. Esta pressão é determinada pela densidade do fluido e pela profundidade do poço, garantindo que o fluido exerce uma força suficiente para prevenir o influxo de fluidos da formação e manter a integridade estrutural do poço durante todo o processo de perfuração. Portanto, a pressão do fluído de perfuração é dada por:

$$T_f = H \cdot \gamma_f \cdot FC \tag{8}$$

em que,

T_f é a tensão causada pelo fluido de perfuração em Pa.

H é dado pela soma de H_{mr} e H_p.

H_{mr} é a altura da Mesa Rotativa.

H_p é a profundidade de um certo ponto do poço em m.

γ_f é o peso específico do fluido de perfuração em lb/gal.

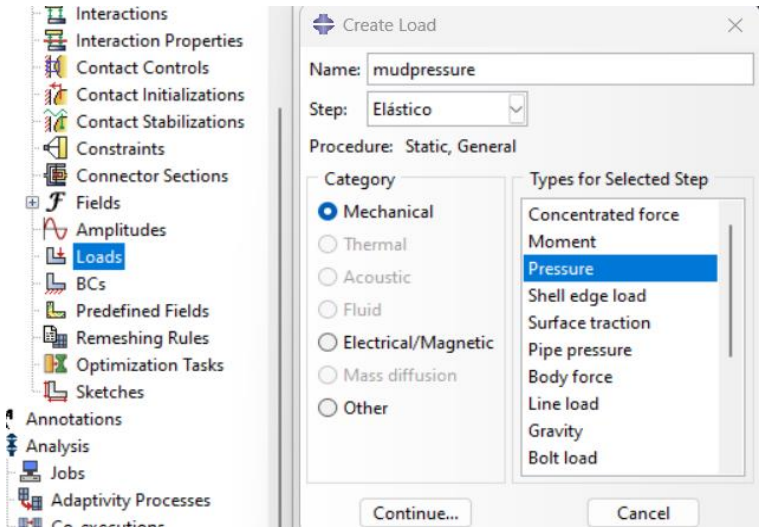
FC é o fator de conversão do peso específico de lb/gal para N/m³, no qual FC vale 1175,497.

Sabe-se que a pressão hidrostática aumenta em função da profundidade. Portanto, é necessária uma equação que descreva essa variação. Logo, uma rocha salina com cota de topo H_1 e de base H_2, por interpolação, tem a seguinte função para a pressão de fluido de perfuração:

$$T_f(H) = H_1 \cdot \gamma_f \cdot FC + \frac{((-H) - H_1) \cdot (H_2 \cdot \gamma_f \cdot FC)) - (H_1 \cdot \gamma_f \cdot FC)}{H_2 - H_1} \quad (9)$$

Neste caso, para a incorporação deste carregamento no modelo, é necessário criar um "Load". No menu lateral, dá-se duplo clique em Loads e configura o tipo de carregamento na caixa de diálogo Create Load, onde são definidos o nome, o passo vinculado, categoria e tipos. Para este caso, o carregamento é definido no passo elástico, na categoria mecânica e de tipo "Pressure" (Figura 49).

Figura 49 - Criando um carregamento.

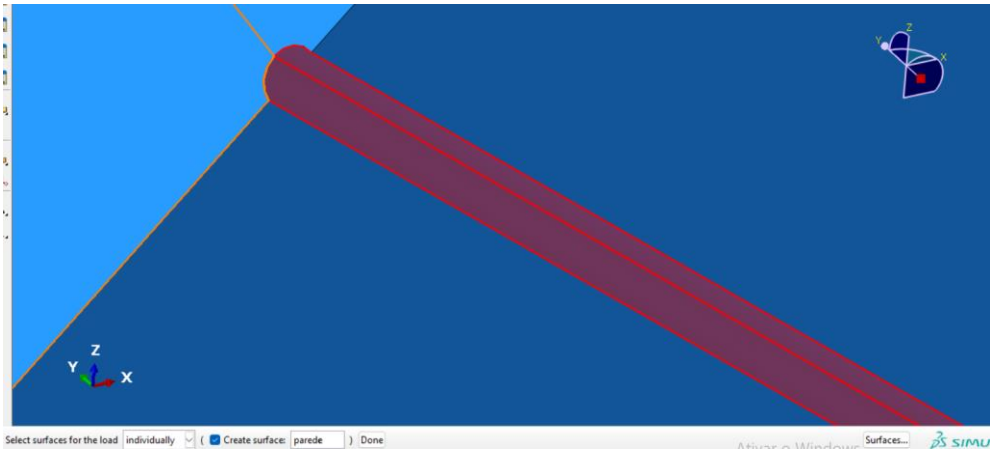


Fonte: Autor (2024).

Após esta etapa, seleciona-se a região de atuação, neste caso é a região das paredes do

poço (Figura 50).

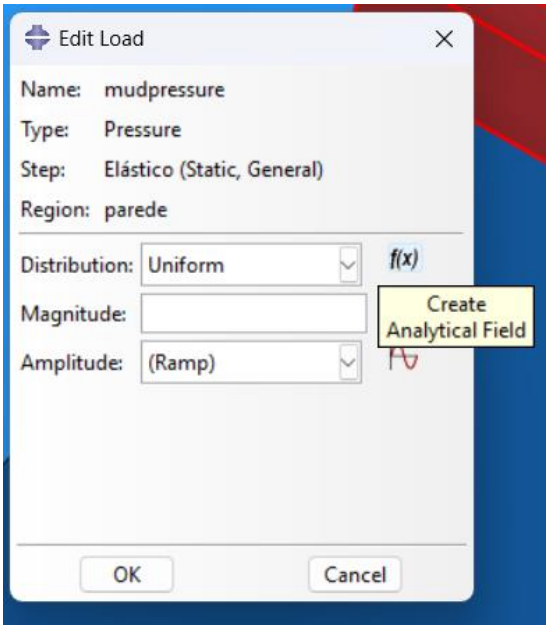
Figura 50 - Seleção da região de atuação.



Fonte: Autor (2024).

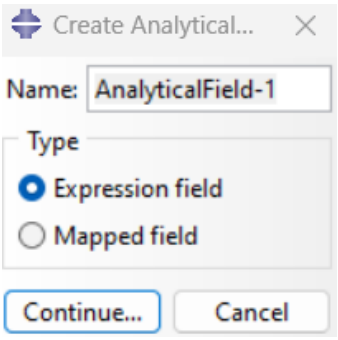
Depois de definida a região, deve-se informar a distribuição do problema. Como ainda não há um campo analítico, deve-se criar um (Figura 51) em “Create Analytical Field”, escolher o tipo “Expression Field” e continuar (Figura 52).

Figura 51 - Definição da distribuição.



Fonte: Autor (2024).

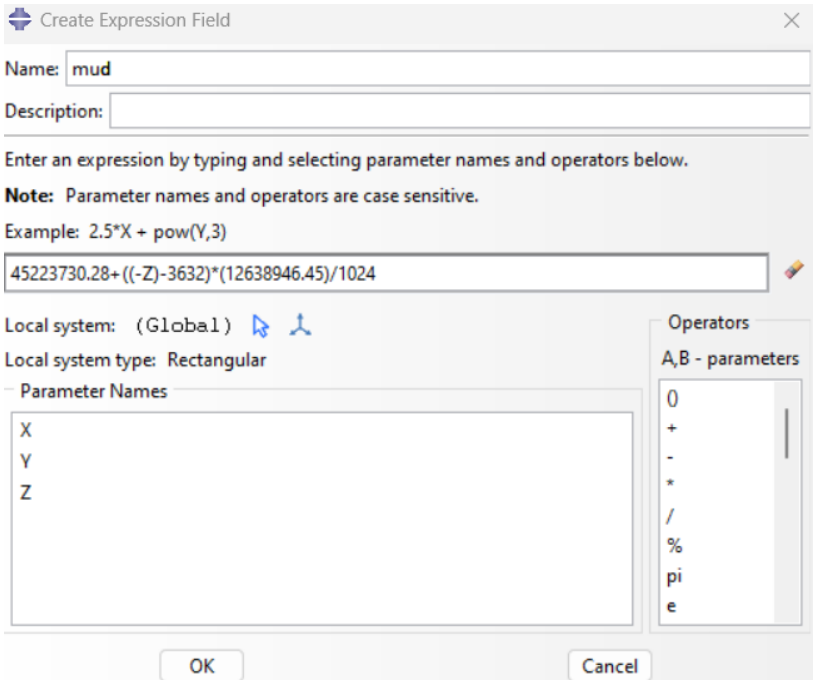
Figura 52 - Criação do Analytical Field.



Fonte: Autor (2024).

Em seguida, deve-se informar a equação que descreve a pressão exercida pelo fluido de perfuração em função da profundidade Z (Figura 53).

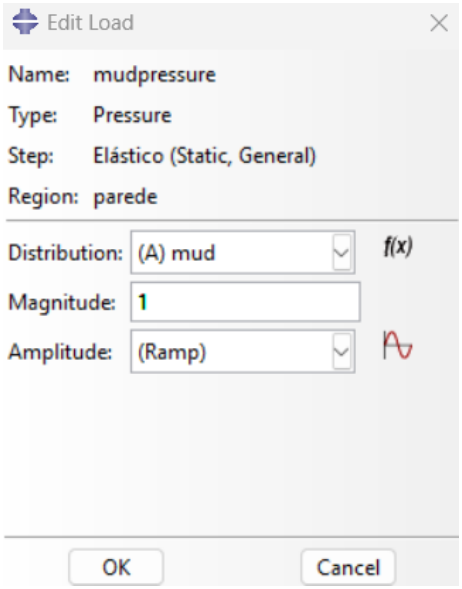
Figura 53 - Criando campo de expressão.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, após criar o campo analítico de pressão exercida pelo fluido de perfuração, seleciona-se este campo no item de distribuição na caixa de diálogo Edit Load (Figura 54), informando, também, a magnitude igual a 1.

Figura 54 - Definição da distribuição após campo analítico criado.



Fonte: Autor (2024).

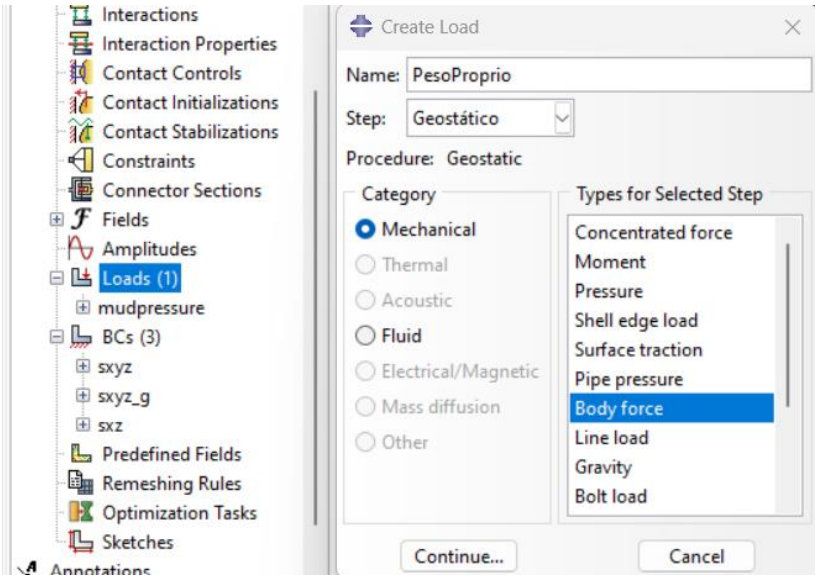
- Body Force (Força de corpo)

A força de corpo, também conhecida como força de volume, é uma força que atua em todo o volume de um corpo material. Diferente das forças de superfície, que agem sobre áreas específicas, as forças de corpo são distribuídas uniformemente por toda a massa do material. Ela pode ser obtida pela razão entre a diferença das tensões geostáticas ($\Delta\sigma_v$) em Pa pela diferença de profundidade (ΔH) em metros. Portanto, tem-se:

$$B_f = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta H} \tag{10}$$

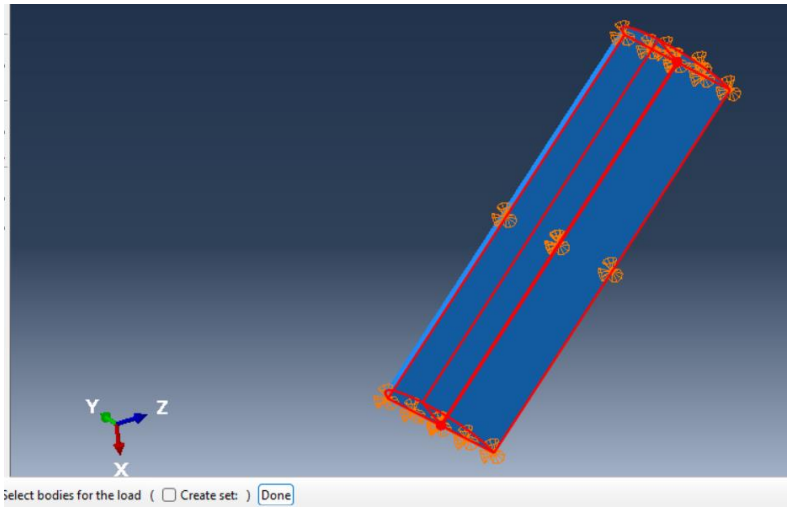
Para a adição do carregamento de Força de corpo, o processo é semelhante ao acima citado, porém o passo selecionado é o Geostático e o tipo é “Body Force” (Figura 55). Em seguida, seleciona-se todo o modelo para receber o carregamento (Figura 56). Na caixa de diálogo Edit Load, informam-se o tipo de distribuição e as três componentes, sendo as duas primeiras nulas e a terceira calculada a partir da fórmula apresentada (Figura 57). Ao realizar todas estas etapas, tem-se o modelo submetido a este carregamento (Figura 58).

Figura 55 - Criação da Força de Corpo.



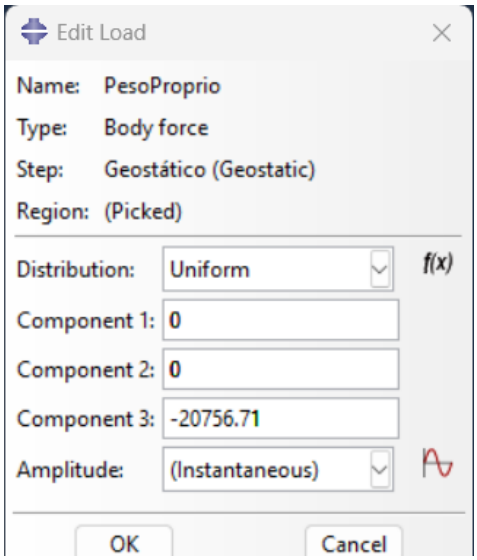
Fonte: Autor (2024).

Figura 56 - Seleção da região de atuação do carregamento.



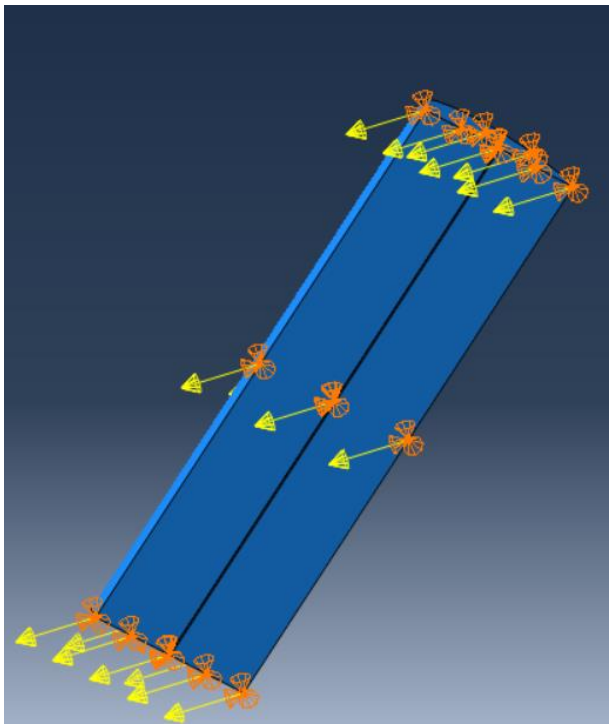
Fonte: Autor (2024).

Figura 57 - Definição das componentes da Força de Corpo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 58 - Modelo submetido ao carregamento.



Fonte: Autor (2024).

- Tensão Geostática

A tensão geostática refere-se ao estado de tensão que existe naturalmente no subsolo devido ao peso das camadas de rocha sobrejacentes. Portanto, define-se como tensão geostática a pressão exercida por essas camadas em um ponto específico no subsolo, a qual aumenta linearmente com a profundidade. Para o cálculo dessa tensão, utilizam-se as pressões equivalentes das camadas de rocha sobrejacentes e a profundidade do poço. A tensão geostática σ_v, portanto, é definida pela seguinte fórmula:

$$\sigma_v = \rho \cdot H \cdot FC \tag{11}$$

em que,

σ_v é a tensão geostática em Pa.

ρ é a pressão equivalente em lb/gal.

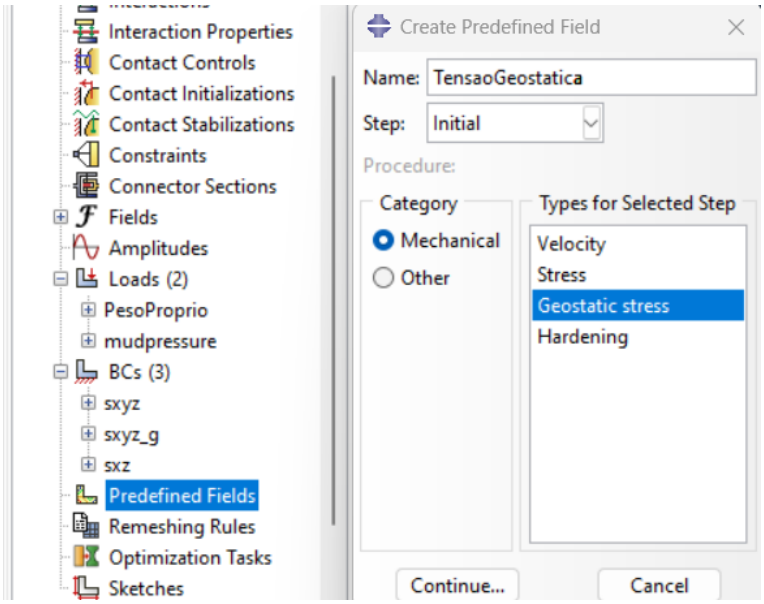
H é a profundidade, dada pela soma da mesa rotativa e da cota do poço.

FC é o fator de conversão do peso específico de lb/gal para N/m³, no qual FC vale 1175,497.

Para a resolução da modelagem, é crucial que as coordenadas de topo e base do problema estejam contidas no intervalo dos dados das tensões geostáticas disponíveis. Isso garante que todas as camadas e pressões atuantes no modelo sejam corretamente representadas, proporcionando resultados mais precisos e realistas para a análise e simulação.

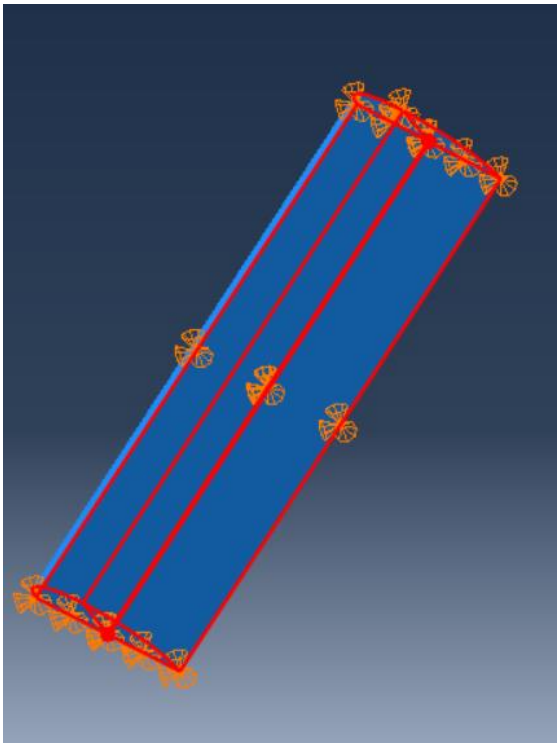
Neste caso, cria-se um campo predefinido com clique duplo em “Predefined Fields”, no passo inicial, na categoria Mecânica e tipo “Geostatic Stress” (Figura 59). Seleciona-se todo o modelo (Figura 60) e informa, na caixa de diálogo Edit Predefined Field (Figura 61), as coordenadas verticais e suas respectivas magnitudes de tensão calculadas pela fórmula acima citada. Ainda, define-se o coeficiente lateral (k_0) igual a 1. A Figura 62 apresenta o modelo submetido à tensão geostática.

Figura 59 - Criação do campo predefinido de tensão geostática.



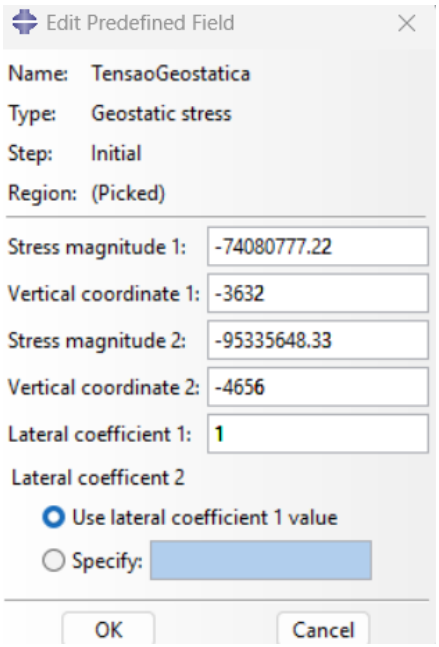
Fonte: Autor (2024).

Figura 60 - Seleção da região de atuação do carregamento.



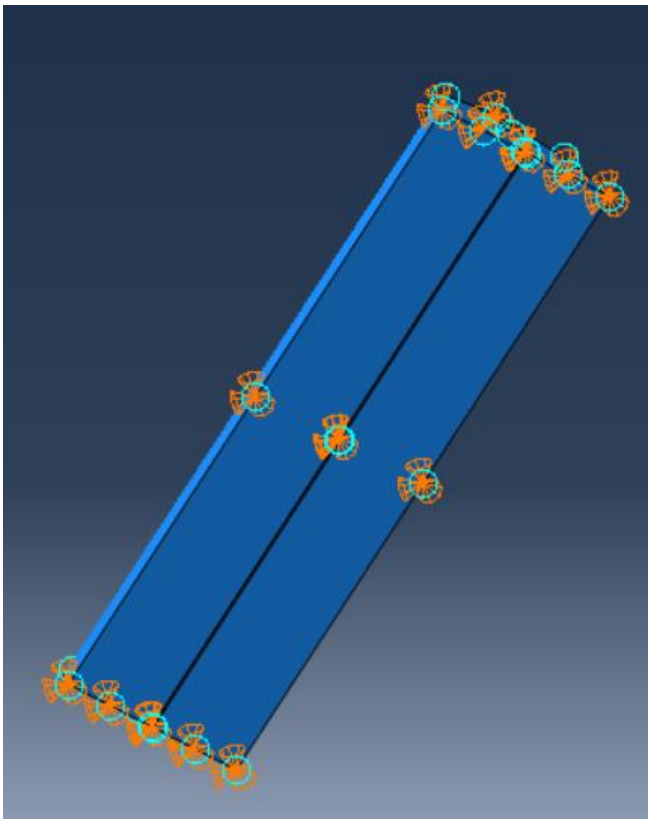
Fonte: Autor (2024).

Figura 61 - Seleção da região de atuação do carregamento.



Fonte: Autor (2024).

Figura 62 - Modelo submetido ao carregamento.



Fonte: Autor (2024).

- Temperatura

Na modelagem do comportamento de rochas salinas, a temperatura é um fator crucial, pois influencia significativamente a taxa de fluência e a plasticidade das rochas. Aumentos de temperatura resultam em maior fluência e redução da resistência ao cisalhamento e compressão, afetando a estabilidade do poço. A temperatura varia de acordo com a profundidade. Logo, faz-se necessário a definição de uma equação que descreva a temperatura em função da mudança de cota. Por interpolação, tem-se:

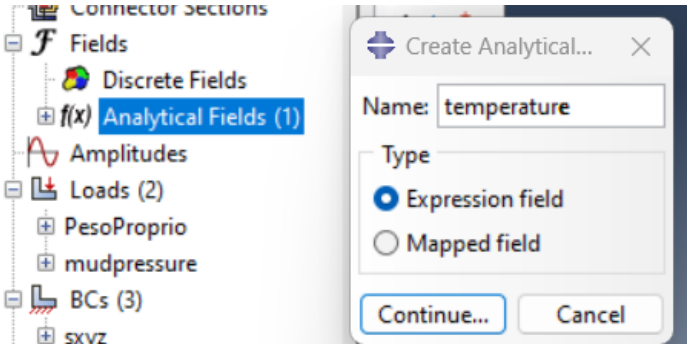
$$T = T_2 + \frac{((T_2 - T_1) * (H - H_1))}{(H_2 - H_1)} \quad (12)$$

onde,

T é a temperatura para uma profundidade H qualquer.
T_1 é a temperatura do topo da camada.
T_2 é a temperatura da base da camada.
H_1 é a profundidade do topo da camada.
H_2 é a profundidade da base da camada.

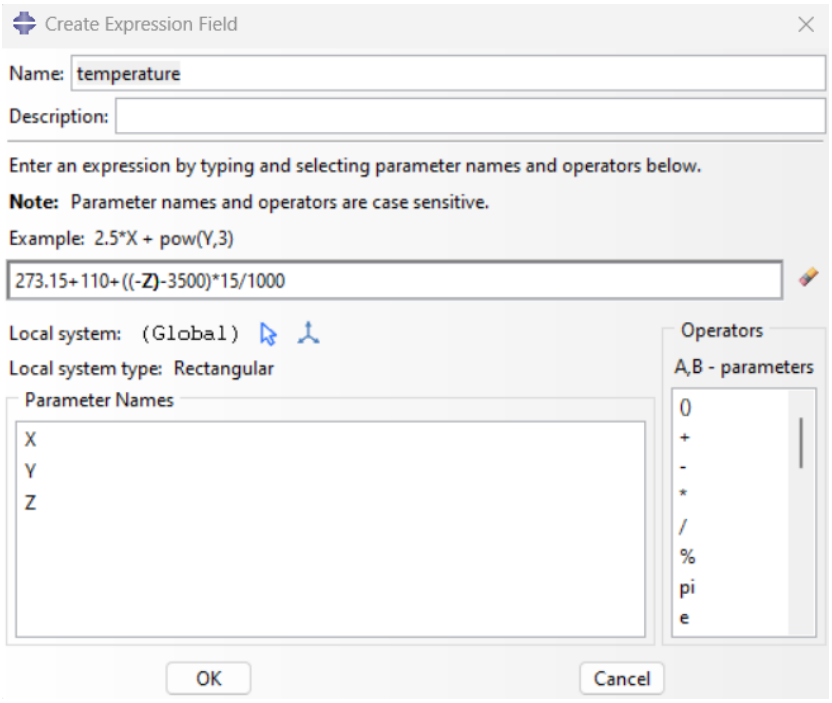
Para a inclusão do campo de temperatura no modelo, cria-se um campo analítico, por meio de duplo clique na opção “Analytical Fields” no menu lateral e, posteriormente, na caixa de diálogo de criação, seleciona-se a tipo “Expression Field” (Figura 63). Na caixa de diálogo de criação do campo de expressão é inserida a função de temperatura com relação a profundidade, a qual é desenvolvida por meio da fórmula acima citada (Figura 64). Após a criação do campo analítico, cria-se o campo predefinido, configurando-o para o passo inicial, no procedimento “Other” e tipo “Temperature” (Figura 65). Em seguida, seleciona-se a região submetida ao campo (Figura 66). Por fim, na caixa de diálogo de edição do campo predefinido, seleciona-se o campo analítico de temperatura criado, definem-se a variação da seção como constante e a magnitude igual a 1 (Figura 67).

Figura 63 - Criação do campo analítico de temperatura.



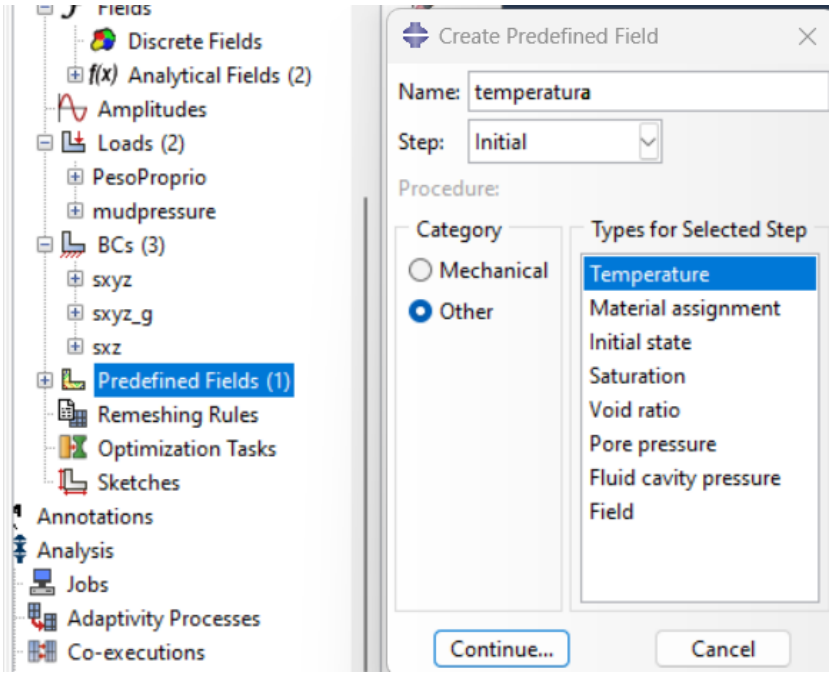
Fonte: Autor (2024).

Figura 64 - Criação do campo de expressão de temperatura.



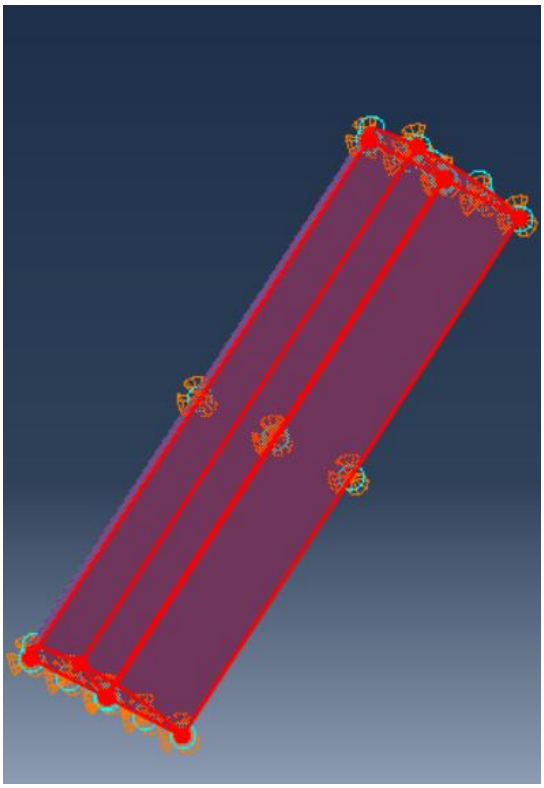
Fonte: Autor (2024).

Figura 65 - Criação do campo predefinido de temperatura.



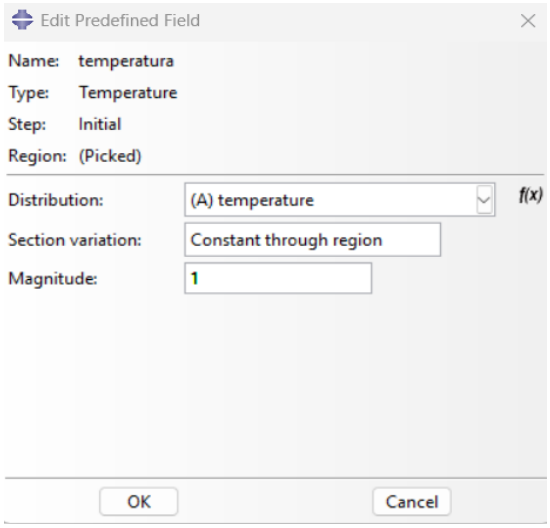
Fonte: Autor (2024).

Figura 66 - Seleção da região de atuação do campo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 67 - Edição do campo predefinido de temperatura.

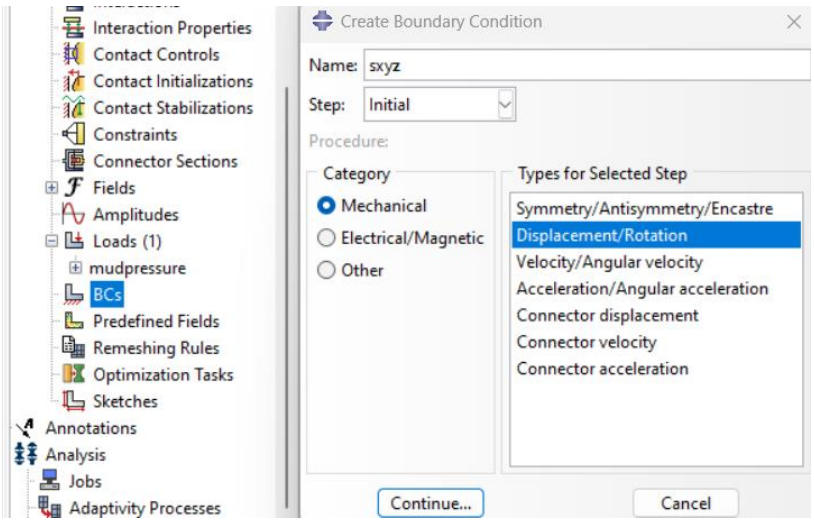


Fonte: Autor (2024).

5.6.3 Condições de contorno

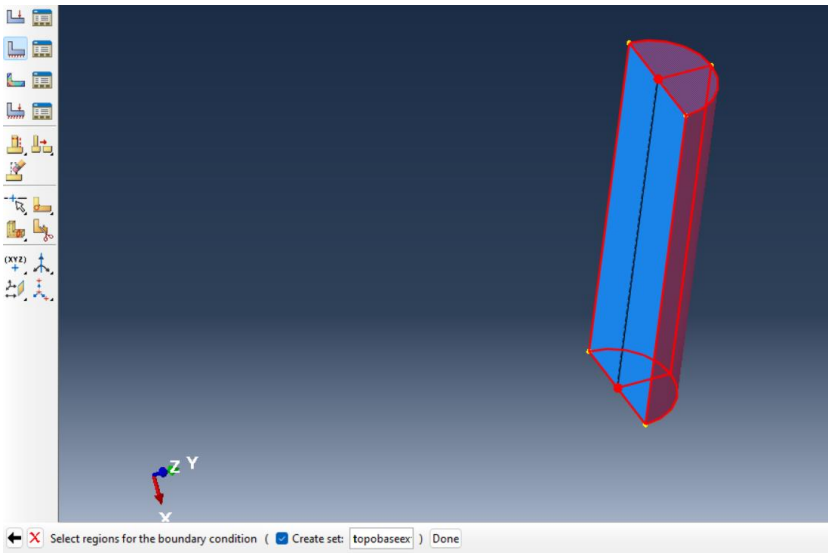
A primeira etapa para a criação de uma condição de contorno é acessar o menu lateral e dar duplo clique na opção “BCs”. Em seguida, define-se o nome, o passo, a categoria e o tipo associados à condição de contorno. Inicialmente, cria-se a condição de contorno para as faces de topo, base e face externa, para o passo inicial, na categoria mecânica e no tipo “Displacement/Rotation” (Figura 68). Selecionam-se as faces que serão submetidas a essas condições de contorno (Figura 69). Após isso, na caixa de diálogo “Edit Boundary Condition”, define-se em quais direções o deslocamento será travado. Neste caso, as três direções têm o deslocamento travado (Figura 70).

Figura 68 - Criando uma condição de contorno.



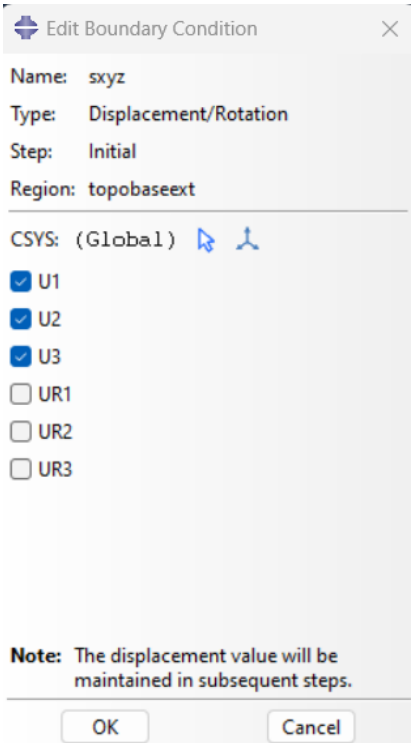
Fonte: Autor (2024).

Figura 69 - Seleção da região submetida a condição de contorno.



Fonte: Autor (2024).

Figura 70 - Travamento dos deslocamentos.

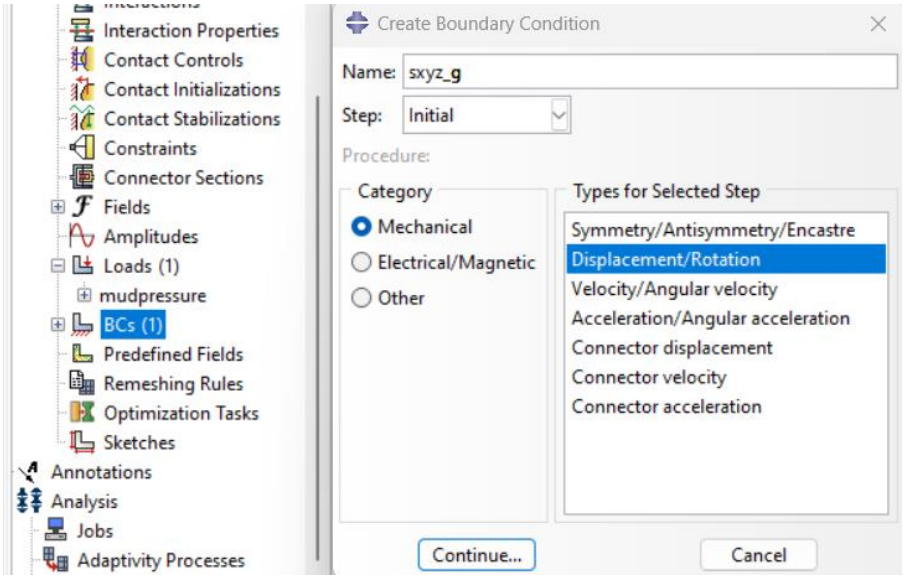


Fonte: Autor (2024).

A próxima condição de contorno criada refere-se a região da parede do poço. Cria-se, pelo mesmo método, a condição de contorno (Figura 71). Seleciona-se a região da parede do poço (Figura 72) e é realizado o travamento das três direções. Contudo, estes travamentos

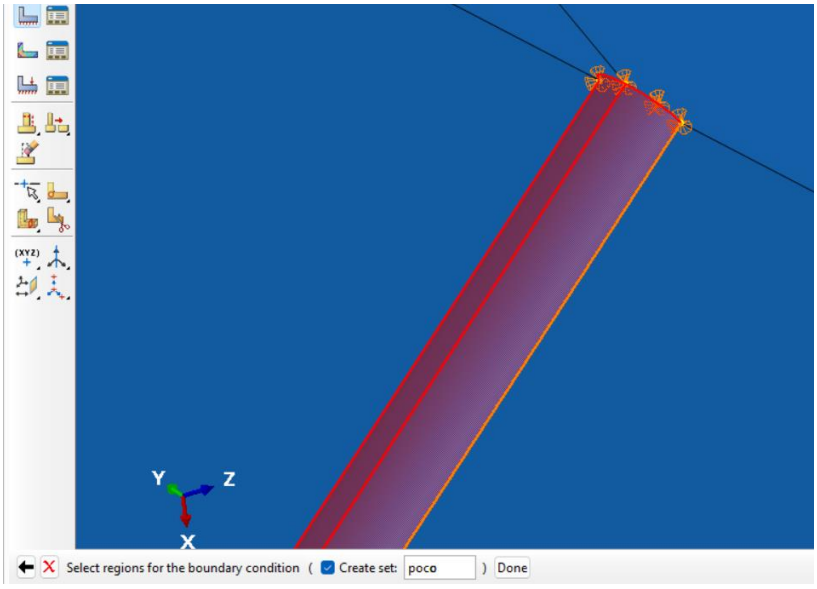
deixam de ser exercidos no passo elástico. Portanto, deve-se desativar essa condição de contorno neste passo. Para isso, utiliza-se a ferramenta “Boundary Condition Manager” (Figura 73), na qual é selecionada a opção correspondente à condição de contorno que se deseja desativar e a desativa (Figura 74), de modo que a condição de contorno em questão apresente a condição de “Inactive” a partir do passo Elástico, como mostra a Figura 75.

Figura 71 - Criando uma condição de contorno.



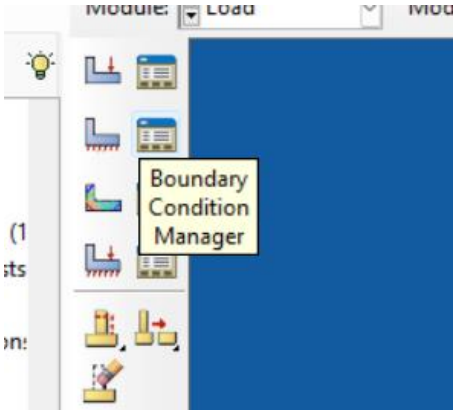
Fonte: Autor (2024).

Figura 72 - Seleção da região submetida a condição de contorno.



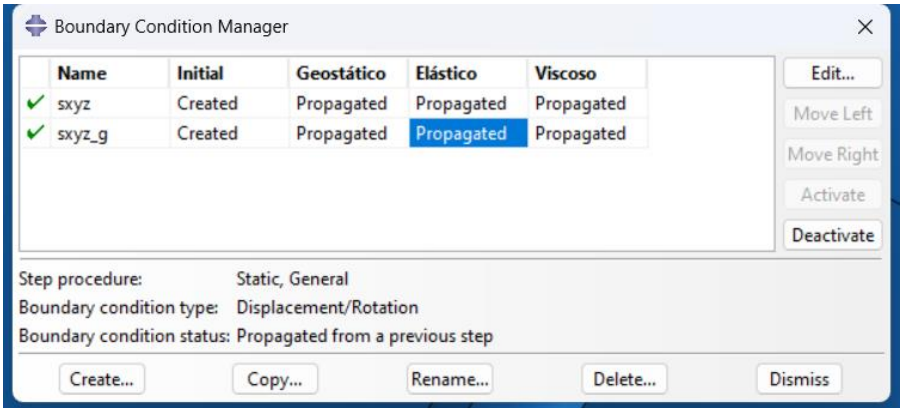
Fonte: Autor (2024).

Figura 73 - Acesso ao gerenciador de condições de contorno.



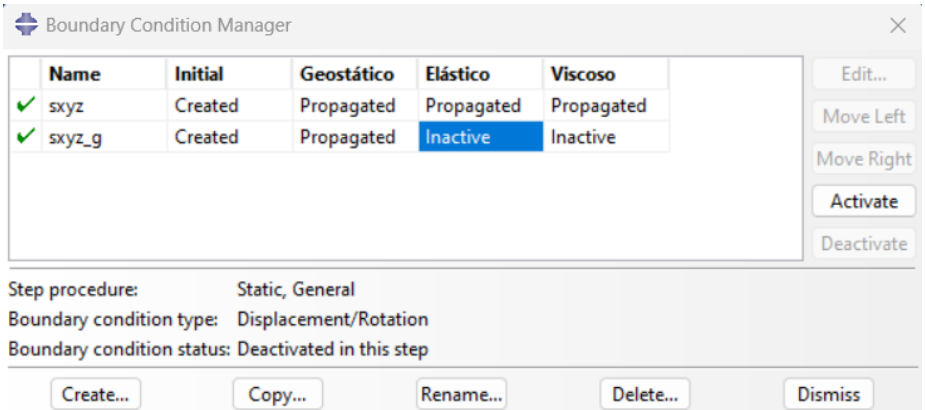
Fonte: Autor (2024).

Figura 74 - Desativação dos travamentos da parede do poço no passo elástico.



Fonte: Autor (2024).

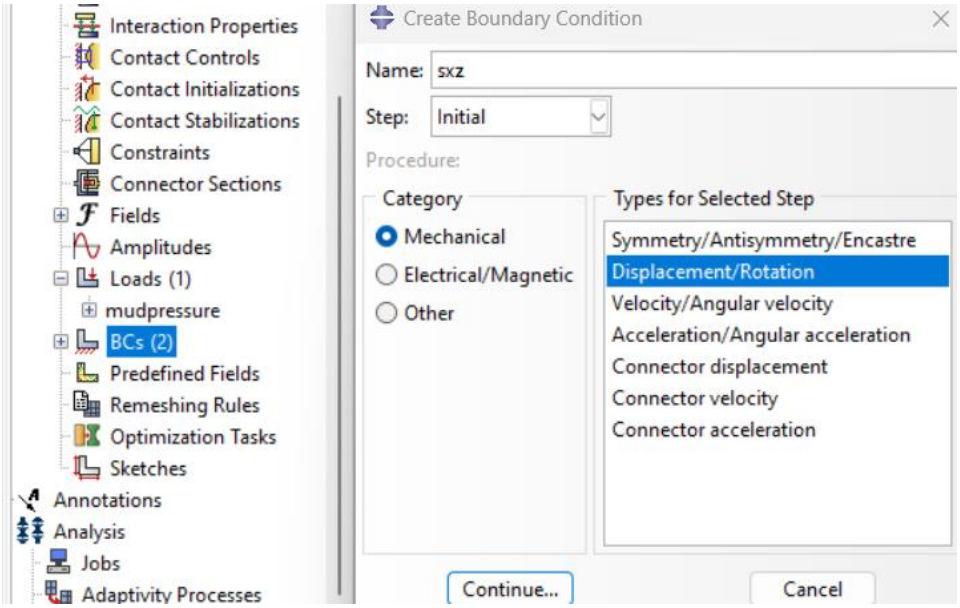
Figura 75 - Travamento da parede do poco desativados.



Fonte: Autor (2024).

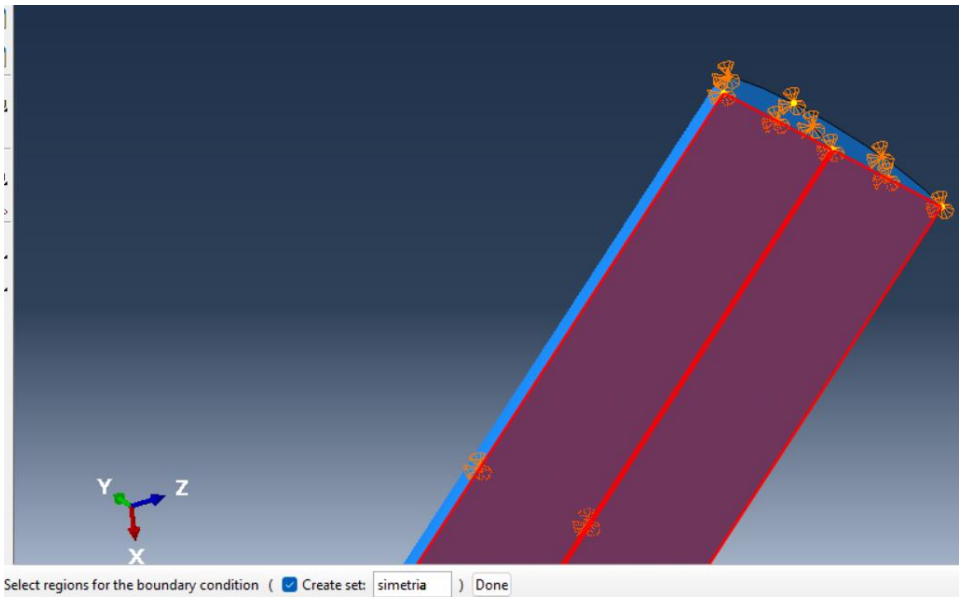
Por fim, uma condição de contorno para as paredes de simetria do maciço é criada. Cria-se a condição pelo mesmo método apresentado (Figura 76). Posteriormente, a região é selecionada (Figura 77). A última etapa é o travamento do deslocamento nas direções desejadas (X e Z) (Figura 78).

Figura 76 - Criando uma condição de contorno para as paredes de simetria.



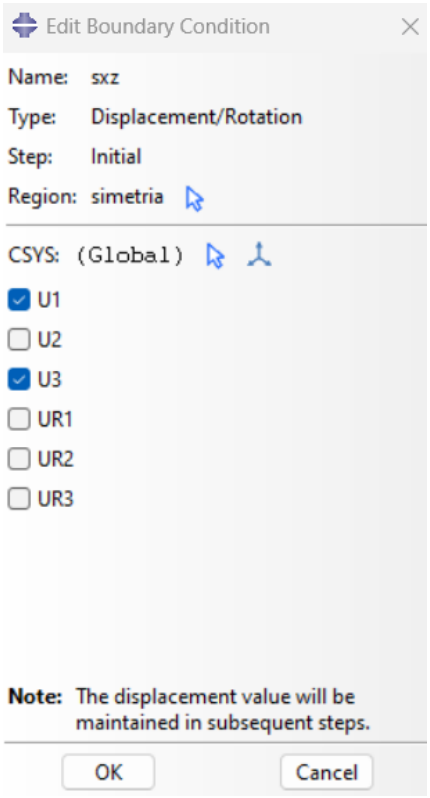
Fonte: Autor (2024).

Figura 77 - Seleção da região submetida a condição de contorno.



Fonte: Autor (2024).

Figura 78 - Travamento dos deslocamentos.



Fonte: Autor (2024).

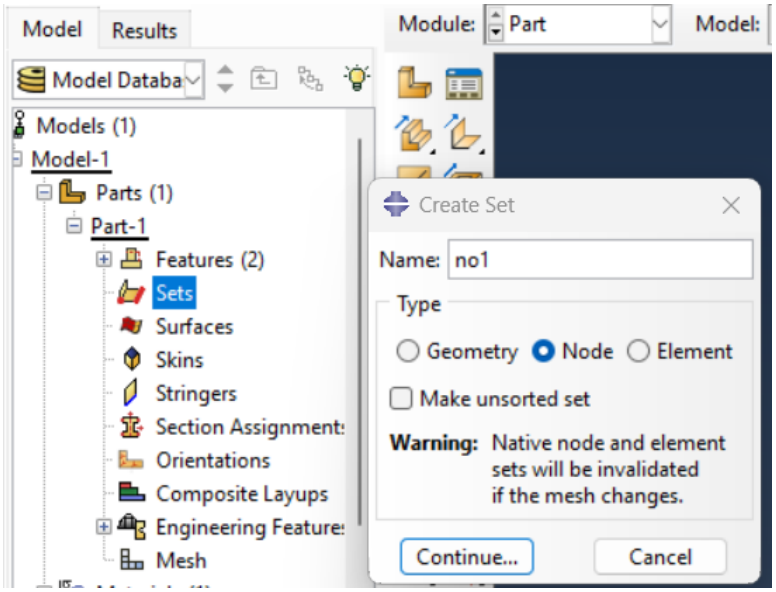
5.7 Pré-simulação

5.7.1 Set de monitoramento

A criação de sets de nós é uma etapa essencial para o monitoramento de resultados em pontos específicos do modelo, em regiões consideradas críticas, de modo a facilitar a análise de grandezas como deslocamentos e tensões.

A opção “Sets” é utilizada para a criação do set de monitoramento, por meio de duplo clique, no menu lateral. Na caixa de diálogo “Create Set” é determinado o nome do set e o tipo (Node), pois para este caso, “nós” em pontos críticos serão monitorados (Figura 79).

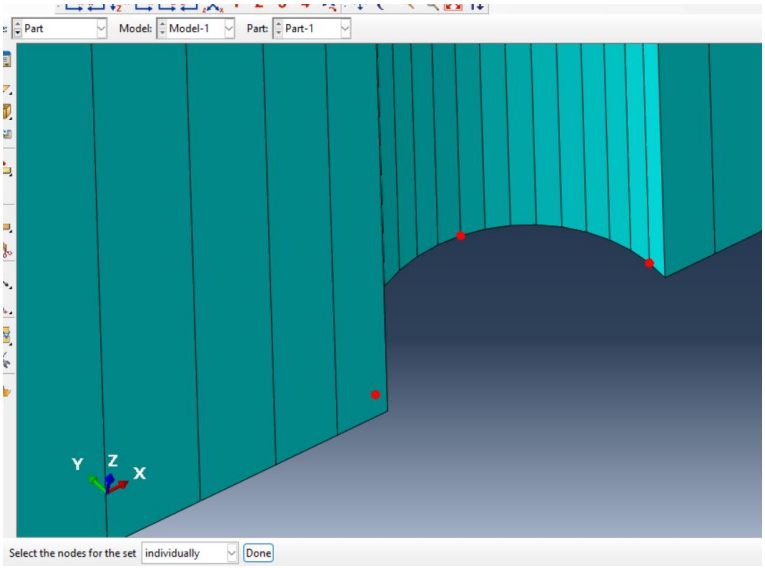
Figura 79 - Criação de um Set para monitoramento durante a simulação.



Fonte: Autor (2024).

Em seguida, os nós a serem monitorados devem ser selecionados. Neste caso, seleciona-se três nós em paredes opostas para uma melhor análise dos resultados.

Figura 80 - Seleção dos nós a serem monitorados.



Fonte: Autor (2024).

5.7.2 Job

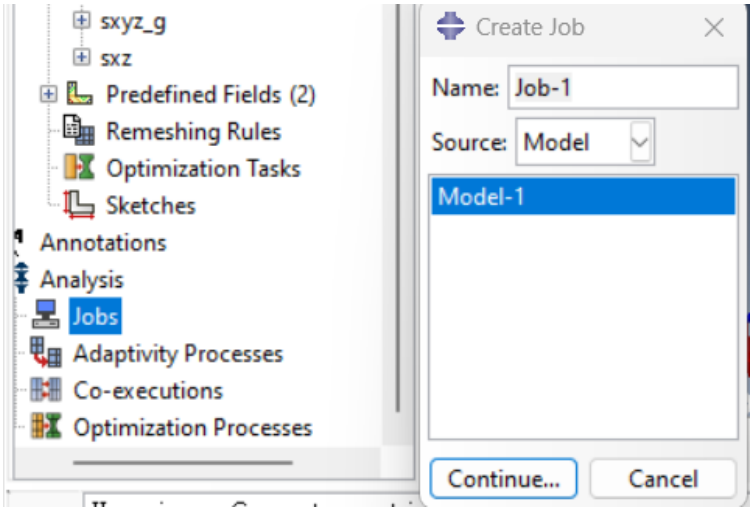
O próximo passo é a criação de um Job, etapa imprescindível para a simulação. O job é

basicamente um centro de controle da simulação. Ao configurá-lo, definem-se as opções como o nome da simulação, o número de processadores utilizados, a subrotina (caso seja necessário), o tipo de análise, além da configuração de parâmetros de saída e checkpoints para monitoramento. Geralmente, após a configuração, o job é submetido ao solver, que processa os dados e gera os resultados para análise posterior. Neste caso, como a lei de fluência adotada não está presente na interface do software, o Job não é submetido diretamente. Antes, são necessárias alterações no arquivo Input.

Para criar um Job, utiliza-se a opção “Jobs” no menu lateral, por meio de um clique duplo. Nomeia-se o job e seleciona o modelo de referência (Figura 81). Após a criação, pode-se configurar o Job na caixa de diálogo “Edit Job”. Neste caso, não há necessidade de nenhuma alteração da configuração padrão (Figura 82).

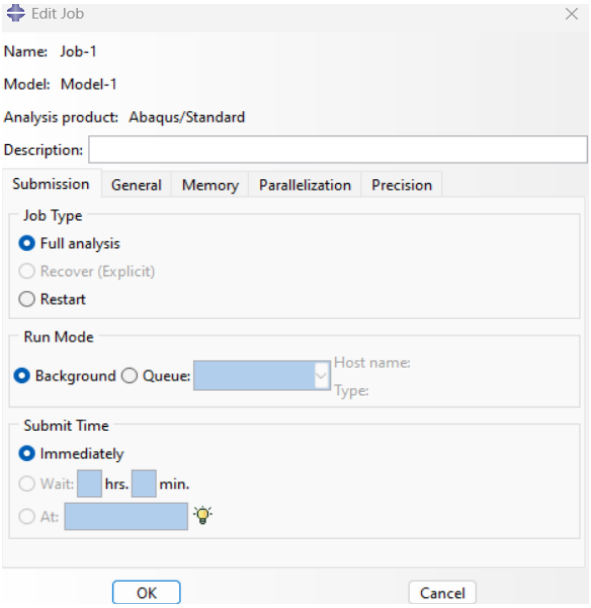
.

Figura 81- Criação de um Job.



Fonte: Autor (2024).

Figura 82 - Edição do Job.



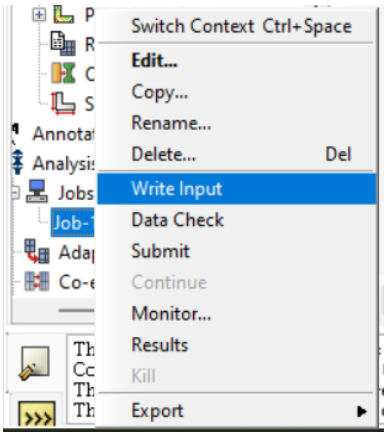
Fonte: Autor (2024).

5.7.3 Implementação da lei de fluência

Como dito anteriormente, a Lei de Dupla Potência não está disponível para seleção na interface desta versão do Abaqus. Portanto, faz-se necessário a implementação desta por outros meios. Neste caso, a lei foi implementada pelo arquivo Input, gerado por meio do Job.

Primeiramente, utiliza-se o botão direito do mouse sobre o Job criado e seleciona-se a opção “Write Input” (Figura 83). Desse modo, um arquivo com extensão “inp” será gerado na pasta de trabalho utilizada.

Figura 83 - Geração do arquivo input.



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, o arquivo Input gerado é aberto, por qualquer editor de texto. A Figura 84 mostra as linhas de texto que devem ser substituídas.

Figura 84 - Trecho a ser substituído.

```
** MATERIALS
**
*Material, name=Carnalita
*Creep, law=USER
*Elastic
14940., 0.26
*Material, name=Halita
*Creep, law=USER
*Elastic
20970., 0.3
*Material, name=Taquidrita
*Creep, law=USER
*Elastic
823., 0.32
```

Fonte: Autor (2024).

A Figura 85 apresenta as linhas de texto que devem ser adicionadas como substitutas das linhas de texto mostradas na Figura 84. Os parâmetros e o material dependem do tipo de rocha salina do modelo. Por fim, salva-se o arquivo com as novas alterações.

Figura 85 - Adição da Lei de Dupla Potência ao arquivo Input.

```
** MATERIALS
*Material, name=Carnalita
*Creep, law=DOUBLE POWER
3144.744, 6042.9,  2.87, 3144.744, 6042.9, 7.17,   5.71
*Elastic
14940., 0.26
*Material, name=Halita
*Creep, law=DOUBLE POWER
38.305, 6042.9,  3.364, 38.305, 6042.9, 7.5641,   9.91
*Elastic
20970., 0.3
*Material, name=Taquidrita
*Creep, law=DOUBLE POWER
6082.54, 6042.9,  2.59, 6082.54, 6042.9, 7.49,   8.14
*Elastic
823., 0.32
```

Fonte: Autor (2024).

5.7.4 Submissão da simulação

Na última etapa, roda-se o modelo e inicia-se a simulação. Como neste caso o arquivo Input foi alterado manualmente, a simulação deve ser iniciada por meio do Abaqus Command,

e não pela interface gráfica do Abaqus/CAE. Inicialmente, é fundamental garantir que o diretório de trabalho esteja corretamente configurado, ou seja, o terminal deve estar localizado no mesmo diretório em que se encontra o arquivo Input. Para iniciar a simulação, utiliza-se o comando apresentado na Figura 86, especificando o nome do arquivo de entrada. Sempre que possível, empregou-se a paralelização do processamento, informando explicitamente o número de processadores a serem utilizados. Essa prática reduz significativamente o tempo de execução da simulação, especialmente em modelos tridimensionais mais complexos.

Figura 86 - Linha de comando para rodar a simulação no Abaqus Command.

```
abaqus job=poco40 cpus=30
```

Fonte: Autor (2024).

6 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os estudos de caso e os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho. Inicialmente, realiza-se uma comparação entre a Lei de Dupla Potência e o Mecanismo Duplo de Deformação, com o objetivo de avaliar a capacidade da primeira em reproduzir o comportamento viscoplástico das rochas salinas, bem como atestar sua vantagem em termos de menor custo computacional — fator decisivo para simulações tridimensionais mais complexas. Em seguida, são explorados dois estudos de caso: o primeiro considerando uma formação composta por uma única litologia, e o segundo, mais completo, abordando um modelo com múltiplas litologias, permitindo analisar com maior profundidade os efeitos da inclinação do poço sobre o fechamento por fluência. Ao longo do capítulo, são discutidos aspectos como deslocamentos radiais, desempenho computacional, impacto da paralelização (técnica que permite distribuir os cálculos entre múltiplos núcleos de processamento, acelerando significativamente o tempo de simulação) e sensibilidade das diferentes litologias à deformação.

6.1 Comparação entre o Mecanismo Duplo de Deformação e a Lei de Dupla Potência

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os parâmetros constitutivos para cada uma das três rochas estudadas: Halita, Carnalita e Taquidrita. A primeira coluna exibe os valores utilizados no modelo global baseado no Mecanismo Duplo de Deformação de Poiate (2012), enquanto a segunda coluna apresenta os valores recalibrados para a Lei de Dupla Potência, calculados a partir das equações apresentadas por Forero et al. (2021). A calibragem foi realizada com base nas Equações 4 a 7, apresentadas no capítulo 2, as quais descrevem o comportamento viscoplástico das rochas salinas segundo os modelos adotados neste trabalho.

Tabela 1 - Parâmetros constitutivos da halita.

Mecanismo Duplo de Deformação		Lei de Dupla Potência	
R/Q [10^{-4} 1/K]	1,655	A_1 [1/h]	38,305
σ_0 [MPa]	9,91	A_2 [1/h]	38,305
ϵ_0 [10^{-6} 1/h]	1,888	B_1 [K]	6042,905
T_0 [K]	359,15	B_2 [k]	6042,905
n_1	3,364	C_1	3,364
n_2	7,564	C_2	7,564

Fonte: Autor (2025).

Tabela 2 - Parâmetros constitutivos da carnalita.

Mecanismo Duplo de Deformação		Lei de Dupla Potência	
R/Q [10^{-4} 1/K]	1,655	A_1 [1/h]	3144,75
σ_0 [MPa]	5,72	A_2 [1/h]	3144,75
c_0 [10^{-6} 1/h]	155	B_1 [K]	6042,905
T_0 [K]	359,15	B_2 [k]	6042,905
n_1	2,87	C_1	2,87
n_2	7,17	C_2	7,17

Fonte: Autor (2025).

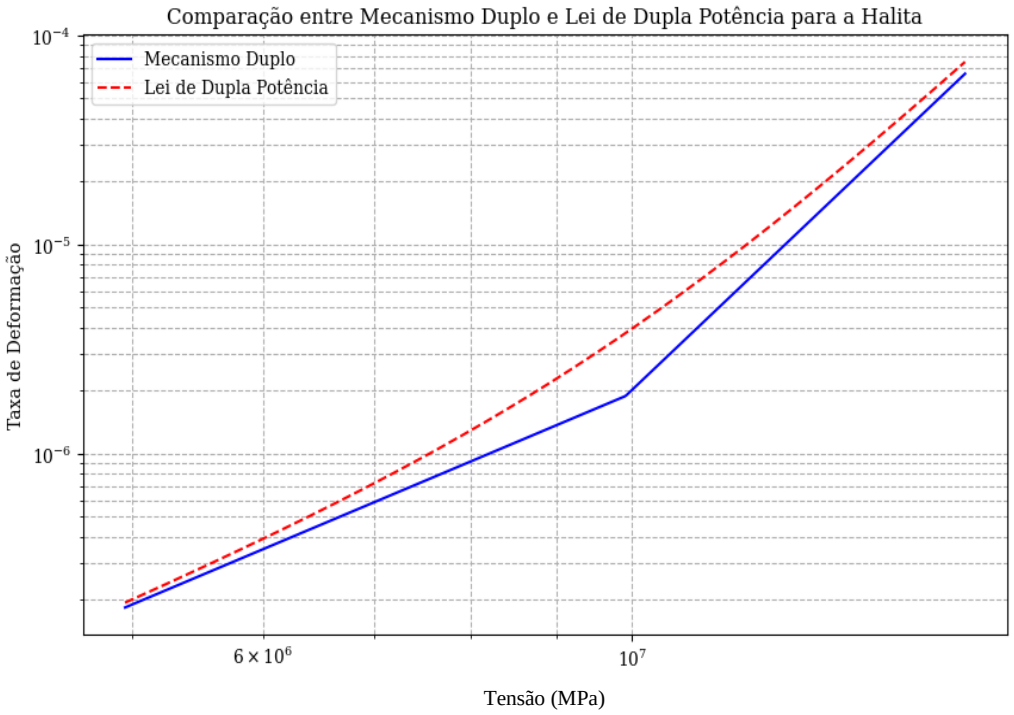
Tabela 3 - Parâmetros constitutivos da taquidrita.

Mecanismo Duplo de Deformação		Lei de Dupla Potência	
R/Q [10^{-4} 1/K]	1,655	A_1 [1/h]	6082,54
σ_0 [MPa]	8,14	A_2 [1/h]	6082,54
c_0 [10^{-6} 1/h]	299,8	B_1 [K]	6042,905
T_0 [K]	359,15	B_2 [k]	6042,905
n_1	2,59	C_1	2,59
n_2	7,49	C_2	7,49

Fonte: Autor (2025).

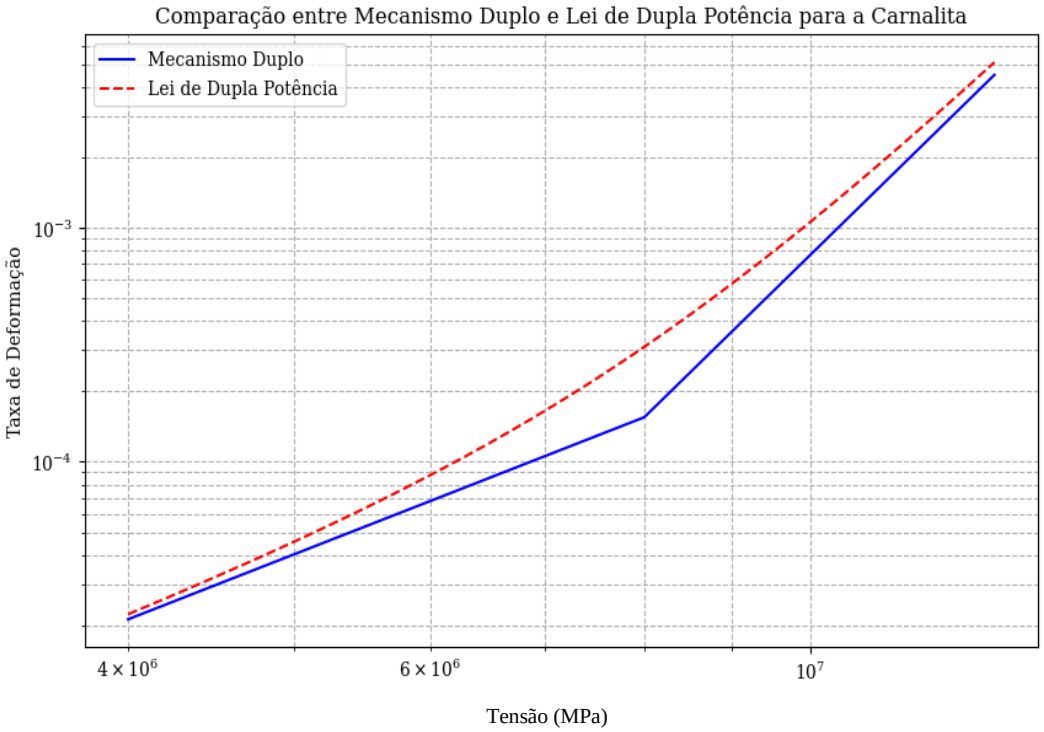
Nesta subseção, o foco recai na análise comparativa do comportamento das leis constitutivas de fluência, e não na modelagem de um poço específico, cujo detalhamento será abordado em seções subsequentes. Os gráficos comparativos a seguir ilustram a taxa de deformação obtida para cada uma das rochas para diferentes níveis de tensão desviadora, considerando uma temperatura fixa. A curva em azul representa os resultados obtidos com o modelo do Mecanismo Duplo de Deformação, enquanto a curva vermelha tracejada corresponde à resposta da Lei de Dupla Potência com os parâmetros ajustados. Observa-se que os ajustes dos parâmetros permitiram uma boa concordância entre os modelos. Para os casos analisados neste estudo, a Lei de Dupla Potência apresentou taxas de deformação ligeiramente superiores às obtidas com o Mecanismo Duplo de Deformação. No entanto, esse comportamento não deve ser interpretado como uma tendência geral, uma vez que depende diretamente dos parâmetros adotados e das características específicas de cada rocha. Estudos futuros sobre esse tema devem ser realizados para verificar o comportamento para outros parâmetros.

Figura 87 – Comparação entre o MDD e a LDP para Halita (T = 86ºC).



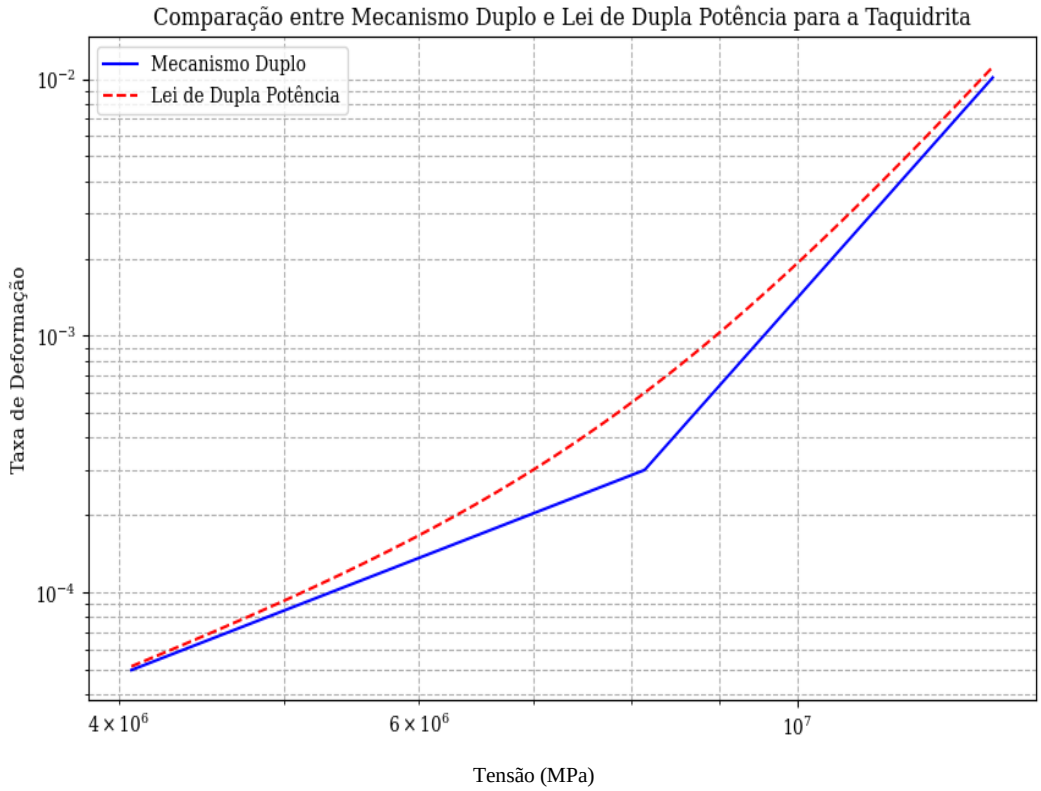
Fonte: Autor (2025).

Figura 88 - Comparação entre o MDD e a LDP para Carnalita (T = 130°C).



Fonte: Autor (2025).

Figura 89 - Comparação entre o MDD e a LDP para Taquidrita (T = 86ºC).



Fonte: Autor (2025).

Ainda, com o objetivo de realizar uma análise mais aprofundada sobre o tema e obter resultados numéricos objetivos, foram desenvolvidas duas versões bidimensionais de um mesmo poço, considerando a configuração vertical do modelo tridimensional apresentado por Poiate (2012), o qual será adotado como estudo de caso deste trabalho. Essa comparação tem como finalidade verificar se a Lei de Dupla Potência, após ser devidamente calibrada, é capaz de reproduzir resultados compatíveis com os obtidos pelo Mecanismo Duplo de Deformação — modelo amplamente validado na literatura para simulações em rochas salinas. A análise dos deslocamentos ao longo do tempo (480h) entre os dois modelos permite avaliar a fidelidade da Lei de Dupla Potência em relação ao comportamento viscoplástico esperado, validando sua aplicação no restante deste trabalho como alternativa mais eficiente do ponto de vista computacional. Os dados e características desse modelo serão detalhados nas próximas subseções. As duas modelagens bidimensionais foram construídas com os mesmos parâmetros de entrada e condições de contorno, diferindo unicamente quanto à lei de fluência adotada: uma simulação utilizou a Lei de Fluência de Dupla Potência, enquanto a outra foi baseada no Mecanismo Duplo de Deformação. Vale ressaltar que ambos os modelos são compostos por

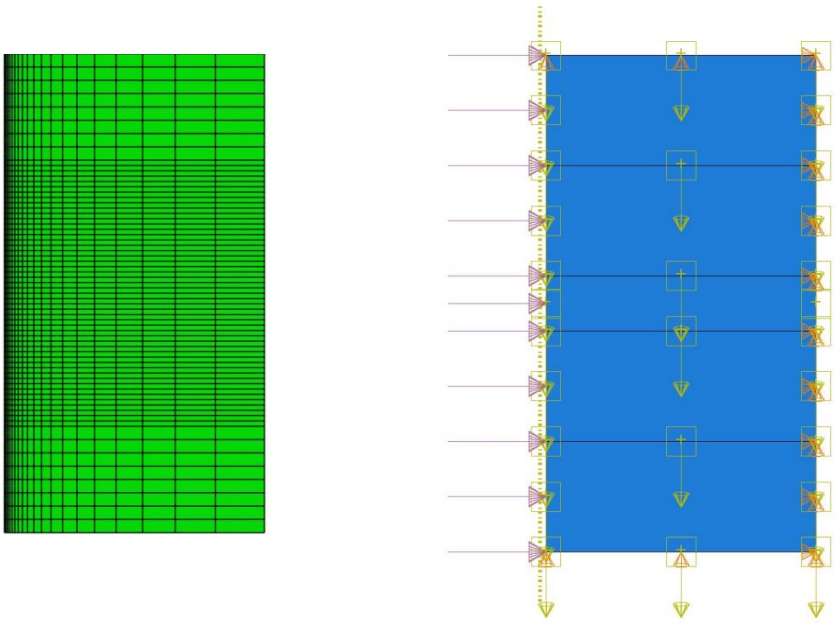
4133 nós e 1320 elementos CAX8R, isto é, elementos axissimétricos com 8 nós com integração reduzida (Figura 90).

A escolha dessa configuração de malha bidimensional baseou-se na vasta experiência do grupo de pesquisa com modelos axissimétricos em rochas salinas, que historicamente demonstraram produzir resultados convergidos e satisfatórios para as análises de fluência. Esse grau de refinamento foi estabelecido ao longo de estudos anteriores, onde análises de sensibilidade da malha foram realizadas para garantir a precisão sem incorrer em custos computacionais desnecessários. Assim, a malha empregada é considerada adequada para capturar os principais efeitos da fluência nesse cenário bidimensional, proporcionando a confiança necessária nos resultados comparativos obtidos, mesmo sem a necessidade de um refinamento adicional que poderia ser demandado em modelos tridimensionais de maior complexidade.

Além disso, visando à otimização do custo computacional em ambos os modelos, definiu-se a coleta de dados de saída de forma seletiva, restringindo-se aos deslocamentos e calculando-os apenas para os nós da parede do poço. Essa estratégia de filtragem de resultados contribui significativamente para a redução do tempo de simulação e do volume dos arquivos de saída, maximizando a eficiência do processamento sem comprometer a análise das grandezas de interesse para o estudo do fechamento do poço por fluência. A Figura 91 apresenta as curvas de deslocamento ao longo do tempo para os dois modelos, assim como a Figura 92 demonstra os modelos deformados.

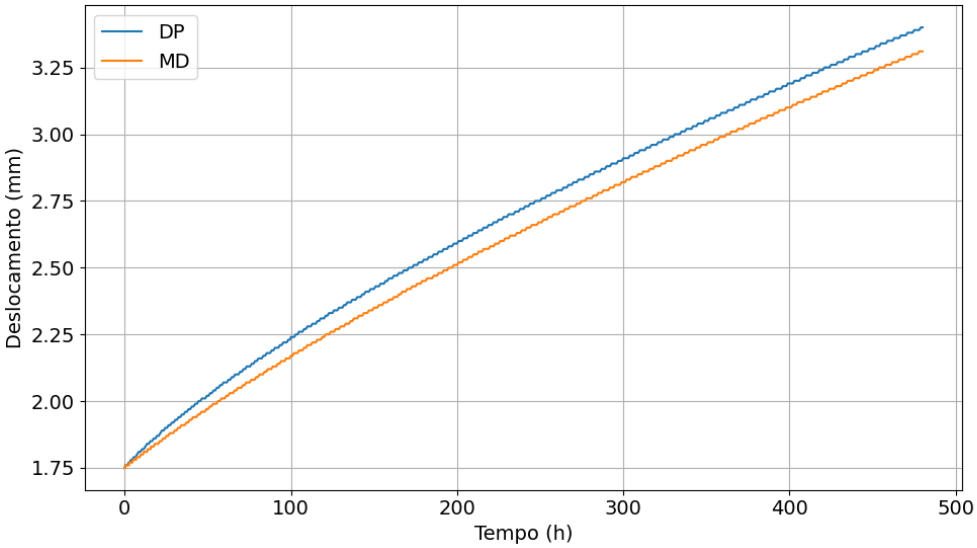
É importante ressaltar que, na busca por modelos de poços direcionais tridimensionais na literatura para fins de verificação, constatou-se uma significativa escassez. Diante dessa dificuldade, o trabalho de Poiate (2012), que aborda o fechamento de poços direcionais em 3D, foi a principal referência encontrada e, de fato, será empregado como base para a verificação do Estudo de Caso II, nas subseções a seguir. Deste modo, a presente comparação inicial com um modelo vertical 2D serve como uma etapa preliminar de validação da lei constitutiva e da estratégia geral de modelagem para o comportamento de fluência, antes da aplicação em cenários tridimensionais e direcionais mais complexos.

Figura 90 - Malha do poço vertical e modelo D2.



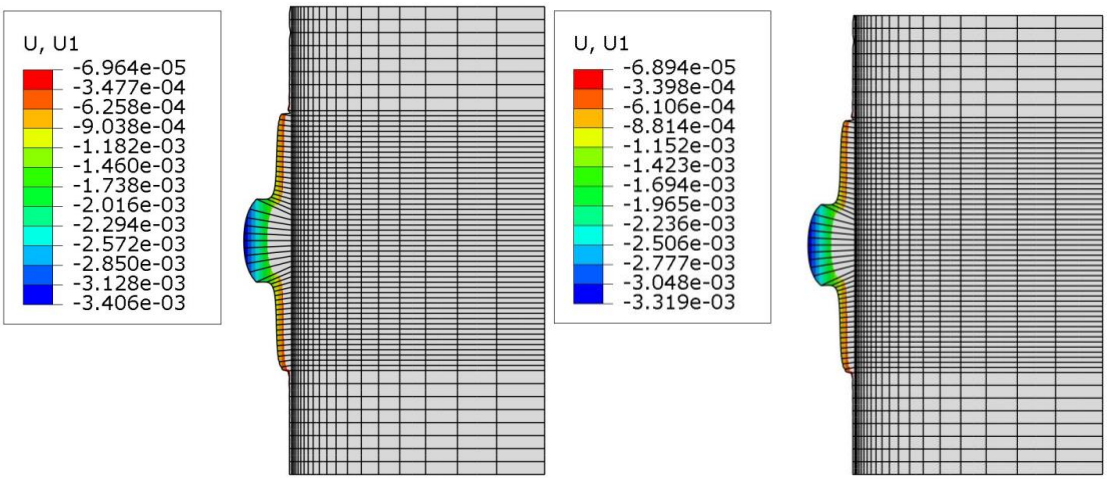
Fonte: Autor (2025).

Figura 91 – Comparação dos deslocamentos radiais entre LDP e MDD ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2025).

Figura 92 - Modelos 2D deformados - LDP à esquerda e MDD à direita.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados das simulações foram comparados ao valor de referência do modelo tridimensional vertical apresentado na tese de Poiate (2012), que indicou um deslocamento máximo de 3,40 mm na região composta por Taquidrita — a rocha que mais sofre deformações por fluência. No modelo bidimensional desenvolvido com a Lei de Fluência baseada no Mecanismo Duplo de Deformação, o deslocamento obtido nesse mesmo ponto foi de 3,32 mm, o que representa uma diferença de 2,52% em relação ao resultado de Poiate. Enquanto o modelo com a Lei de Dupla Potência resultou em um deslocamento de 3,41 mm, tendo uma diferença percentual em relação ao modelo de Poiate de 0,044%. A diferença entre os dois modelos bidimensionais representa um acréscimo percentual de 2,57% nos resultados da Lei de Dupla Potência em relação ao Mecanismo Duplo de Deformação, sendo considerada uma divergência baixa e aceitável do ponto de vista técnico.

Quanto ao desempenho computacional, observou-se uma diferença significativa no tempo de simulação entre os dois modelos. O modelo com o Mecanismo Duplo de Deformação demandou 184 segundos para ser processado, enquanto a simulação com a Lei de Dupla Potência foi concluída em apenas 8 segundos — ou seja, aproximadamente 23 vezes mais rápida. Essa disparidade na velocidade de processamento é, em grande parte, atribuída à forma de implementação de cada lei no software Abaqus. O Mecanismo Duplo de Deformação, por exigir o uso de sub-rotinas externas escritas em Fortran e, portanto, a necessidade de instalação e vinculação de um compilador compatível, impõe uma sobrecarga computacional devido à

comunicação entre o Abaqus e esses módulos externos. Em contrapartida, a Lei de Dupla Potência já está incorporada nativamente ao software, o que elimina a necessidade de desenvolvimento e vinculação de sub-rotinas, simplificando a modelagem e otimizando o desempenho computacional. Para este caso, como se trata de um modelo bidimensional reduzido, foi possível realizar ambas as simulações em um computador pessoal sem dificuldades. A máquina utilizada possui 12 GB de memória RAM e processador AMD Ryzen 7 5700U com Radeon Graphics, 1.80 GHz. Esses resultados reforçam a viabilidade da Lei de Dupla Potência como uma alternativa eficiente, tanto em termos de precisão quanto de desempenho computacional, especialmente em aplicações onde o tempo de simulação é um fator crítico.

Para o caso em questão, é importante destacar que, apesar da diferença observada no tempo de simulação entre o Mecanismo Duplo de Deformação e a Lei de Dupla Potência, ambos os modelos apresentaram um tempo de processamento notavelmente rápido, com resultados obtidos em segundos, diferentemente do que seria esperado para modelagens desse tipo, que comumente demandam minutos ou até horas. Essa celeridade é justificada pela natureza do modelo adotado: trata-se de uma configuração bidimensional (2D) reduzida, que inerentemente exige um volume computacional significativamente menor em comparação com simulações tridimensionais. Adicionalmente, a otimização do custo computacional foi aprimorada pela estratégia de coleta seletiva de dados de saída, na qual foram calculados apenas os deslocamentos e exclusivamente para os nós localizados na parede do poço. Tais definições contribuíram substancialmente para a redução tanto do tempo de simulação quanto do volume dos arquivos de saída, uma vez que se evitou o processamento e o armazenamento de informações não essenciais para os objetivos específicos da análise.

Na Tabela 4, apresenta-se um resumo dos dados obtidos:

Tabela 4 – Dados da análise MDD vs. LDP.

	Deslocamento (mm)	Diferença Percentual DM vs. DP	Tempo de simulação (s)	Razão do Tempo DM/DP
3D Vertical (POIATE, 2012)	3,40		-	
2D Vertical MD (AUTOR, 2025)	3,32	2,57%	184	23
2D Vertical DP (AUTOR, 2025)	3,41		8	

Fonte: Autor (2025).

Portanto, embora o Mecanismo Duplo de Deformação seja amplamente utilizado na modelagem da fluência em rochas salinas, os resultados apresentados anteriormente evidenciam

que a adoção da Lei de Dupla Potência também pode oferecer resultados precisos e consistentes, com vantagens significativas que justificam sua aplicação no presente estudo.

A principal vantagem da Lei de Dupla Potência está na sua implementação direta no Abaqus, sem a necessidade de subrotinas personalizadas. O Mecanismo Duplo de Deformação, por outro lado, exige a criação de subrotinas UMAT ou CREEP, que devem ser escritas em Fortran e compiladas antes da execução da simulação. Esse processo não apenas adiciona uma etapa extra na preparação do modelo, mas também exige a instalação e vinculação de compiladores específicos (Compilador Intel Fortran), o que pode ser um desafio, especialmente em ambientes de computação profissional com acesso remoto e compartilhado, onde a configuração do software nem sempre é flexível.

Outro ponto crítico é a eficiência computacional. Como demonstrado, a Lei de Dupla Potência permitiu a realização da simulação em apenas 8 segundos, enquanto o modelo com Mecanismo Duplo de Deformação levou 184 segundos, mesmo em um modelo bidimensional e utilizando a mesma máquina. Essa diferença representa um ganho de desempenho de 23 vezes em termos de tempo de simulação. Essa disparidade na velocidade de processamento pode ser atribuída, principalmente, à forma de implementação de cada lei no software Abaqus. O Mecanismo Duplo de Deformação, por exigir o uso de sub-rotinas externas (escritas em Fortran, por exemplo), impõe uma sobrecarga computacional devido à necessidade de comunicação contínua entre o Abaqus e esses módulos externos durante a simulação. Em contrapartida, a Lei de Dupla Potência já está incorporada nativamente ao software, eliminando essa barreira de comunicação e, consequentemente, tornando seu processamento mais ágil. Vale ressaltar que, independentemente da lei constitutiva utilizada, o processo de simulação em ambos os modelos pode ser substancialmente acelerado com a ativação da paralelização, que consiste na divisão de uma tarefa computacional em múltiplos subprocessos executados simultaneamente por diferentes núcleos de um processador, otimizando o tempo de processamento e permitindo análises mais complexas em prazos menores (Grama et al., 2003). Contudo, para a comparação bidimensional aqui apresentada, a paralelização não foi ativada, a fim de isolar e analisar o impacto direto da implementação da lei constitutiva no desempenho. A paralelização será, no entanto, um recurso essencial e amplamente empregado nas simulações tridimensionais abordadas nas próximas subseções, dada a complexidade e a demanda computacional desses modelos.

Além disso, a calibração realizada demonstrou que a Lei de Dupla Potência reproduziu o deslocamento máximo na região da Taquidrita com uma diferença percentual de apenas 2,57% em relação ao Mecanismo Duplo, evidenciando sua capacidade de representar com

precisão o comportamento viscoplástico das rochas salinas estudadas. Dessa forma, sua aplicação não compromete a qualidade dos resultados, ao mesmo tempo em que simplifica a modelagem e reduz o custo computacional.

Portanto, a escolha da Lei de Dupla Potência se justifica não apenas por sua praticidade e facilidade de implementação, mas também por seu desempenho computacional superior e sua confiabilidade nos resultados semelhante ao modelo amplamente utilizado. Esses fatores tornam esse modelo uma alternativa viável, eficiente e promissora para a previsão do fechamento de poços direcionais em rochas salinas.

Ademais, nos estudos apresentados a seguir, o foco é no entendimento da influência da inclinação do poço no seu fechamento em região salina, todas as modelagens apresentadas a seguir consideram o modelo de Dupla Potência, garantindo que única diferença entre os modelos seja a inclinação do poço.

6.2 Estudo de caso I: Modelo com apenas uma litologia

Uma vez definido o procedimento de modelagem passo a passo, um poço sintético em um cenário similar aos encontrados no pré-sal brasileiro é adotado. Devido ao alto consumo de memória e tempo de processamento, apenas um trecho de 100 metros foi considerado. Com base na experiência do grupo em modelagem de problemas axissimétricos, bem como no que é apresentado na literatura (por exemplo, Firme et al. (2018)), simular um trecho de 100 metros é suficiente para eliminar os efeitos de borda, de modo que simular toda a fase levaria a resultados similares. A Tabelas 5 e 6 descrevem os dados do poço e rocha.

A Lei de Dupla Potência foi usada como modelo constitutivo para descrever a deformação induzida pela fluência neste problema. Os parâmetros elásticos e aqueles do Mecanismo Duplo de Deformação foram apresentados por Poiate (2012), sendo utilizados e ajustados como apresentado por Forero et al. (2021), para garantir que os resultados obtidos fossem semelhantes entre os dois modelos de fluência (Tabela 5).

Tabela 5 - Parâmetros do problema do estudo de caso I.

Parâmetros do modelo		Parâmetros constitutivos da Halita			
Parâmetros	Valores	Global e DM (Poiate (2012))		Dupla Potência	
Diâmetro do poço ($2rw$)	12,5”	R/Q [10^{-4} 1/K]	1,655	A_1 [1/h]	38,305
Raio externo ($r0$)	15 m	σ_0 [MPa]	9,91	A_2 [1/h]	38,305
Temperatura (topo/base)	110ºC/115ºC	ϵ_0 [10^{-6} 1/h]	1,888	B_1 [K]	6042,905
Peso do fluido	10,5 ppg	T_0 [K]	359,15	B_2 [K]	6042,905
Pressão do fluido no topo	64,7 MPa	n_1	3,364	C_1	3,364
Tensão geostática no topo	93,7 MPa	n_2	7,564	C_2	7,564

Fonte: Autor (2024).

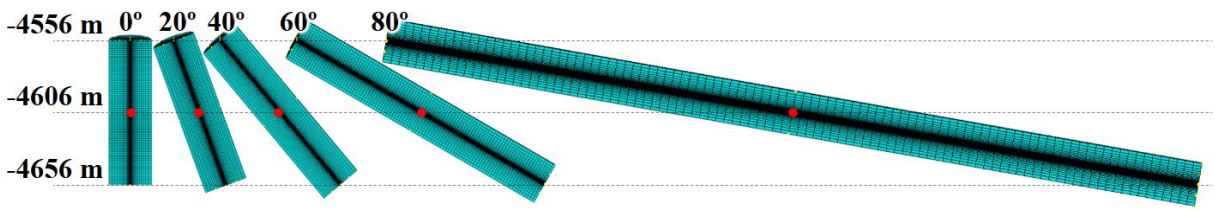
Tabela 6 - Parâmetros das rochas do estudo de caso I.

Rocha	E (GPa)	Coeficiente de Poisson
Halita	20,4	0,36

Fonte: Autor (2024).

Além do modelo axissimétrico 2D, foram modelados poços 3D com diferentes inclinações em relação ao eixo vertical: 0º, 20º, 40º, 60º e 80º (Figura 93). No modelo axissimétrico bidimensional, uma fase completa de 1024 metros foi simulada, enquanto nos modelos tridimensionais, apenas os 100 metros mais profundos foram modelados e discretizados em 100.000 elementos C3D20R (elemento finito hexaédrico tridimensional de segunda ordem com 20 nós e integração reduzida). Os resultados observados e discutidos são nas paredes do poço, 50 metros acima do fundo da fase e durante 100 horas de fechamento por fluência.

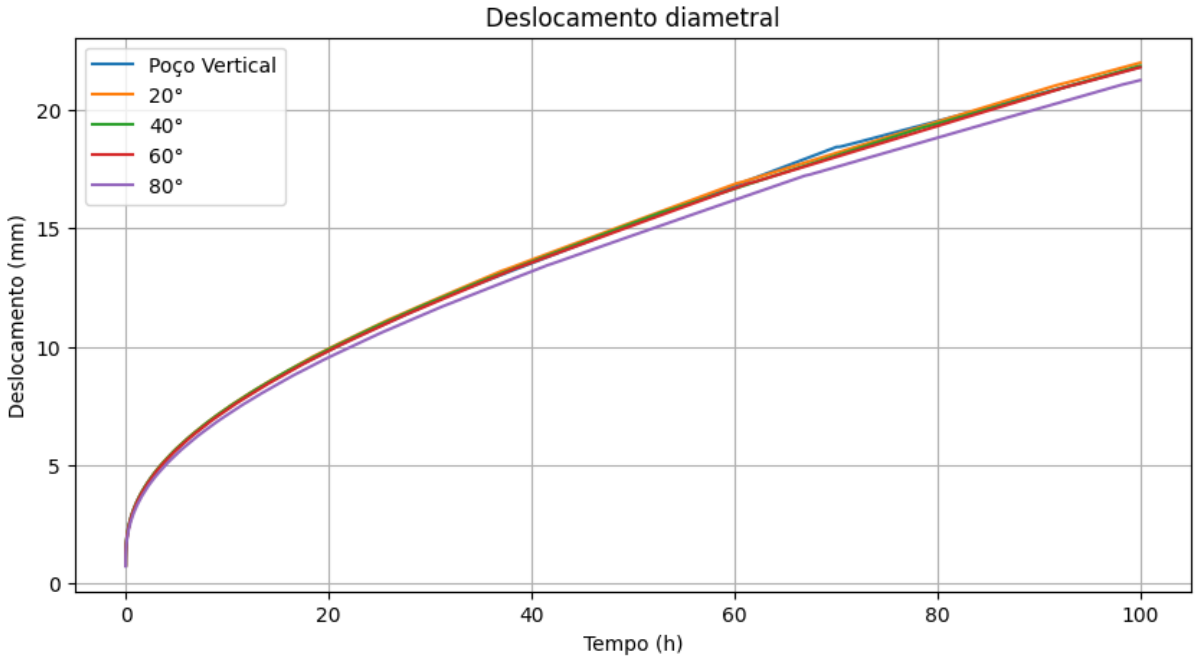
Figura 93 - Domínios modelados e seus pontos de interesse e profundidades.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 94 mostra o deslocamento diametral dos poços modelados ao longo do tempo. O deslocamento diametral é definido como a variação no diâmetro do poço, medido entre duas paredes opostas. Nos poços verticais, tanto na modelagem vertical axissimétrica 2D quanto no modelo vertical 3D, qualquer posição da parede apresentou deslocamento igual devido à simetria do problema. Portanto, nesses casos, o deslocamento diametral é dado como duas vezes o deslocamento radial. No caso de poços direcionais, pontos em lados opostos mostraram deslocamentos ligeiramente diferentes devido à inclinação do poço, sendo necessário somar o deslocamento desses pontos.

Figura 94 - Deslocamento diametral obtido ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2024).

O fechamento na região de estudo fornecida pelo modelo axissimétrico e pelo modelo vertical 3D apresentou uma diferença de menos de 0,01%, levando à conclusão de que a abordagem de modelagem 3D é válida, pelo menos para configurações verticais. Os resultados da simulação (Figura 94) mostraram que a inclinação do poço impacta os deslocamentos diametrais, mesmo que minimamente. Era esperado que quanto maior a inclinação do poço, maior seria o deslocamento. No entanto, os dados obtidos foram ligeiramente diferentes do esperado, resultando em uma correlação não linear. A maior discrepância foi observada no poço

com inclinação de 80 graus, onde a contração diametral absoluta foi 2,61% menor que a do modelo vertical.

Outro ponto relevante sobre a modelagem e as simulações é a significativa capacidade de processamento necessária para executá-las, especialmente em termos de memória. O uso de computadores pessoais de médio desempenho não foi suficiente para realizar as simulações. Foi necessário recorrer a máquinas de alto desempenho, dedicadas exclusivamente a esse tipo de tarefa, incluindo uma máquina equipada com um processador AMD Ryzen 7 5700G e 64 GB de RAM. Além disso, a simulação foi acelerada ao gerar resultados apenas para as variáveis e nós de interesse, o que ajudou a reduzir os custos computacionais.

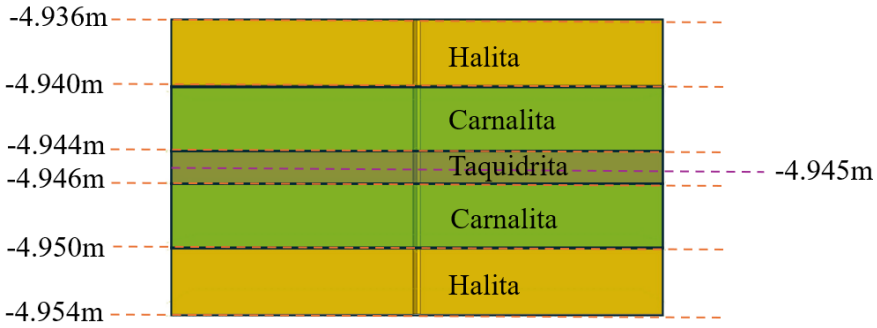
A fim de estudar com mais aprofundamento o impacto da inclinação do poço no seu fechamento por fluência, modela-se também um problema com múltiplas rochas salinas, baseado em um modelo apresentado no trabalho de Poiate (2012).

6.3 Estudo de caso II: Modelo com mais de uma litologia

Neste estudo de caso, utilizou-se como referência o trabalho de Poiate (2012), no qual estuda-se um poço perfurado em uma formação salina composta por diferentes litologias. O modelo inclui poços com inclinações de 0° (vertical), 30°, 45º e 60°, permitindo a análise do impacto da variação da inclinação sobre o comportamento mecânico do sal.

As condições geométricas e operacionais adotadas seguem as mesmas do estudo original, com lâmina d’água de 2.000 m, espessura total da camada de sal de 18 m, diâmetro de poço de 17 ½” e peso do fluido de perfuração de 14 lb/gal, considerando uma única etapa de perfuração. O tempo de perfuração considerado é de 480h. Os demais dados estão descritos nas Tabelas 7 e 8. A litologia da formação salina (Figura 95) segue a sequência H-C-T-C-H, composta por uma camada central de taquidrita (T) de 2 m, envolvida por camadas de carnalita (C) de 4 m, e, acima e abaixo dessas, camadas externas de halita (H) de 4 m. Essa estrutura estratigráfica é mantida na mesma profundidade para todos os modelos e está sujeita às mesmas condições de gradiente térmico e de soterramento.

Figura 95 - Seção de sal.



Fonte: Autor (2025).

Adicionalmente, foi considerado um peso específico médio de 22,56 kN/m³ (equivalente a 1 psi/ft) para todas as rochas do modelo, incluindo a formação salina e as rochas acima dela, e um peso específico da água de 10 kN/m³. O gradiente de temperatura adotado para os sedimentos acima da camada de sal foi de 30 °C/km.

Tabela 7 - Dados do estudo de caso II.

Parâmetros do modelo	
Parâmetros	Valores
Diâmetro do poço ($2rw$)	17,5”
Raio externo ($r0$)	10 m
Temperatura (topo)	53ºC
Peso do fluido	14 ppg
Pressão do fluido no topo	81,2 MPa
Tensão geostática no topo	86,2 MPa

Fonte: Autor (2025).

Tabela 8 - Parâmetros das rochas do estudo de caso II.

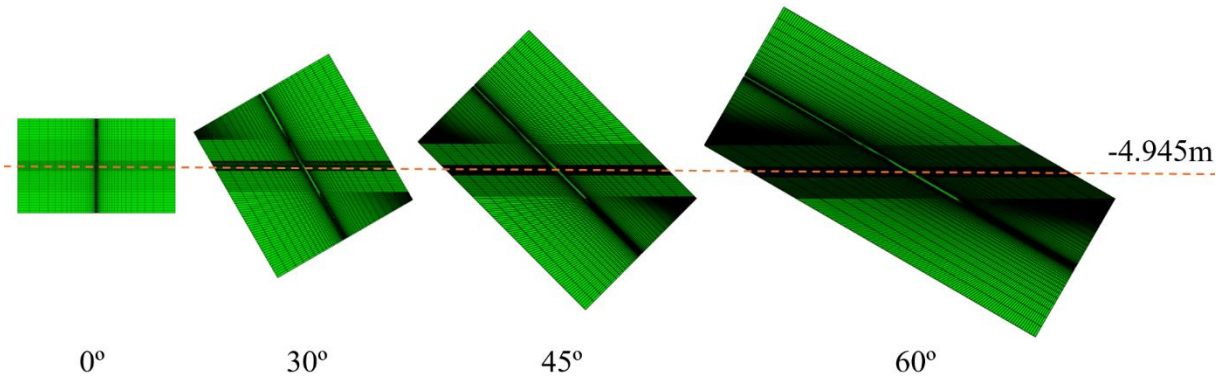
Rocha	E (GPa)	Coeficiente de Poisson
Halita	20,97	0,30
Carnalita	14,94	0,26
Taquidrita	0,823	0,32

Fonte: Autor (2025).

A Figura 96 apresenta os modelos e as malhas tridimensionais utilizadas nas simulações

para os poços com inclinações de 0° (vertical), 30°, 45º e 60°. As estruturas foram discretizadas com elementos hexaédricos C3D20R (elemento finito hexaédrico tridimensional de segunda ordem com 20 nós e integração reduzida), mantendo a mesma configuração de litologias (H-C-T-C-H) e condições de contorno em todos os casos. O modelo vertical possui 288.527 nós e 68.000 elementos, enquanto o modelo de 30° possui 569.726 nós e 135.000 elementos e, ainda, o de 45º tem 825.743 nós e 196.000 elementos e, por fim, o modelo de 60º possui 1.312.595 nós e 312.000 elementos. A disposição lado a lado (Figura 96) permite visualizar as adaptações da malha em função da inclinação, com destaque para a região central da Taquidrita, onde se concentram as maiores deformações.

Figura 96 - Modelos 3D e suas malhas.

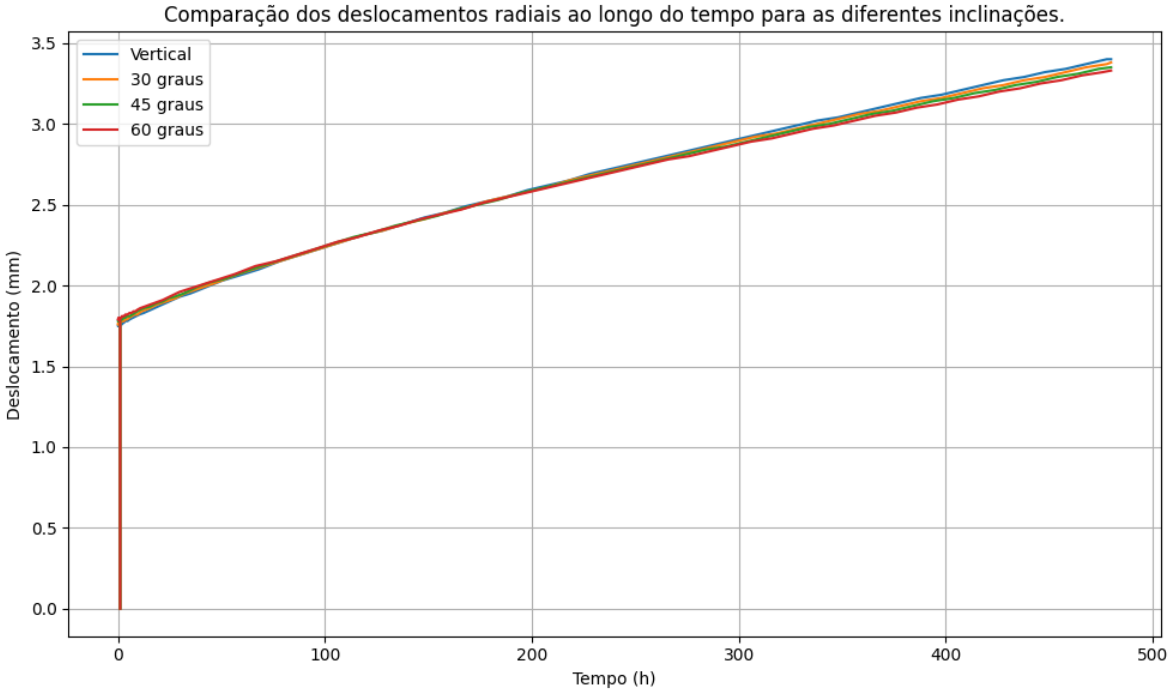


Fonte: Autor (2025).

Os resultados das simulações, apresentados na Figura 97 e na Tabela 9, mostram a evolução do deslocamento radial na região da Taquidrita (cota -4.945 m) para quatro diferentes inclinações: 0°, 30°, 45° e 60°. O poço vertical (0°) apresentou o maior deslocamento, com 3,401 mm após 480 horas de simulação. Para os poços inclinados, os deslocamentos foram de 3,38 mm (30°), 3,35177 mm (45°) e 3,33 mm (60°), indicando reduções graduais de 0,73%, 1,46% e 2,14% em relação ao caso vertical, respectivamente. Esses resultados mostram que, embora a inclinação do poço exerça alguma influência sobre o fechamento por fluência, seu impacto, nas condições analisadas, é bastante limitado, com variações percentuais discretas mesmo em ângulos mais acentuados. Essa baixa sensibilidade à inclinação é esperada, pois, no presente estudo, o coeficiente de pressão lateral (k_0) foi assumido como 1, implicando em um estado de tensões geostáticas hidrostático, onde as tensões horizontais são equivalentes às

tensões verticais. Nessas condições, a inclinação do poço tende a ter um impacto reduzido na redistribuição de tensões e, consequentemente, na deformação por fluência. Essa observação diverge, no entanto, dos resultados apresentados por Poiate (2012), onde o efeito da inclinação do poço se mostrou mais pronunciado.

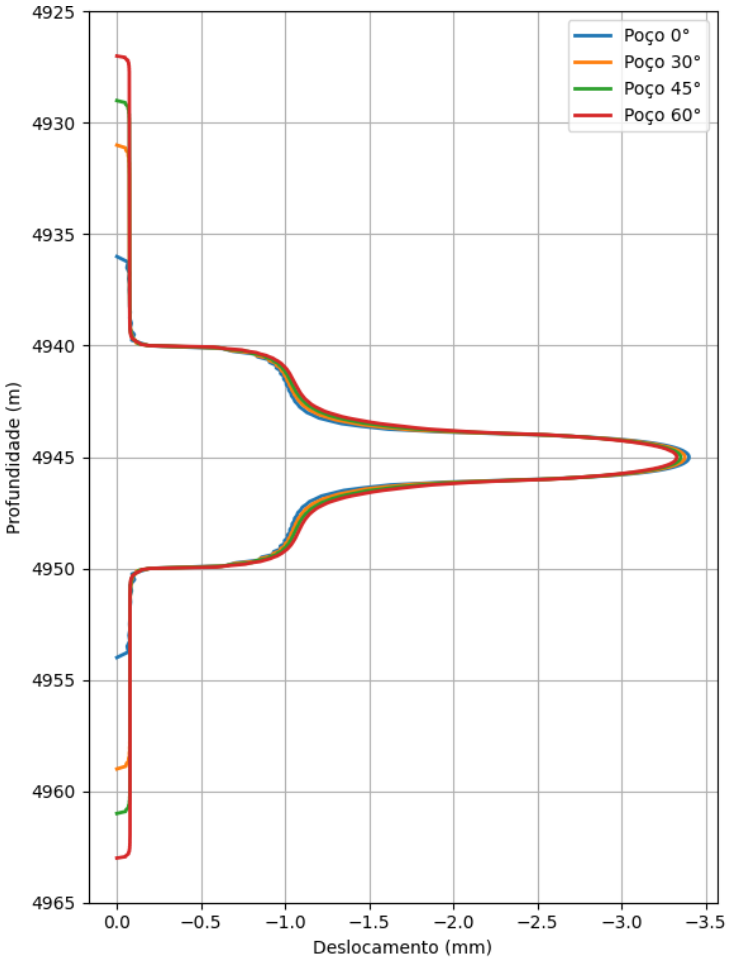
Figura 97 - Comparação dos deslocamentos: 0° vs. 30° vs. 45º vs. 60°.



Fonte: Autor (2025).

Os perfis de deslocamento ao longo da profundidade dos poços, como apresentado pela Figura 98, evidencia, mais uma vez, o pouco impacto da variação da inclinação do poço no deslocamento radial, apresentado resultados parecidos com o poço de configuração vertical.

Figura 98 - Perfis de deslocamentos dos poços.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados das simulações apresentadas neste trabalho, conforme demonstrado na Tabela 9, mostram uma excelente concordância com os dados de Poiate (2012) para o poço vertical, com uma diferença percentual de apenas 0,10%. Para essa configuração, o deslocamento radial obtido por Poiate foi de 3,405 mm, enquanto o valor simulado neste estudo foi de 3,401 mm. No entanto, à medida que a inclinação aumenta, as diferenças entre os resultados tornam-se mais significativas. Para o poço com 30° de inclinação, o modelo do Abaqus obteve deslocamento de 3,38 mm, contra 3,11 mm de Poiate, resultando em uma diferença de 8,56%. Para 45°, a discrepância atinge 24,02%, com valores de 3,35 mm (Abaqus) e 2,70 mm (Poiate). A maior divergência foi observada na inclinação de 60°, em que o deslocamento obtido neste trabalho foi de 3,33 mm, frente a 2,05 mm de Poiate, totalizando

uma diferença de 62,28%.

Esses resultados evidenciam que, embora ambos os estudos indiquem uma tendência de redução do fechamento com o aumento da inclinação, a sensibilidade do deslocamento à variação angular é consideravelmente maior nos dados de Poiate. Tal diferença pode estar associada às diferenças nas condições de contorno empregadas em cada modelagem. No presente trabalho, a resposta mecânica da Taquidrita mostrou-se mais estável frente às inclinações, enquanto no modelo de Poiate a deformação foi significativamente mais reduzida em ângulos maiores.

Tabela 9 – Comparação dos resultados com os de Poiate (2012).

Deslocamento radial na região da Taquidrita (mm)			
Inclinação	Poiate (2012)	Autor (2025)	Diferença Percentual - Poiate (2012) vs. Autor (2025)
0º	3,405	3,401	0,10%
30º	3,11	3,38	8,56%
45º	2,70	3,35	24,02%
60º	2,05	3,33	62,28%

Fonte: Autor (2025).

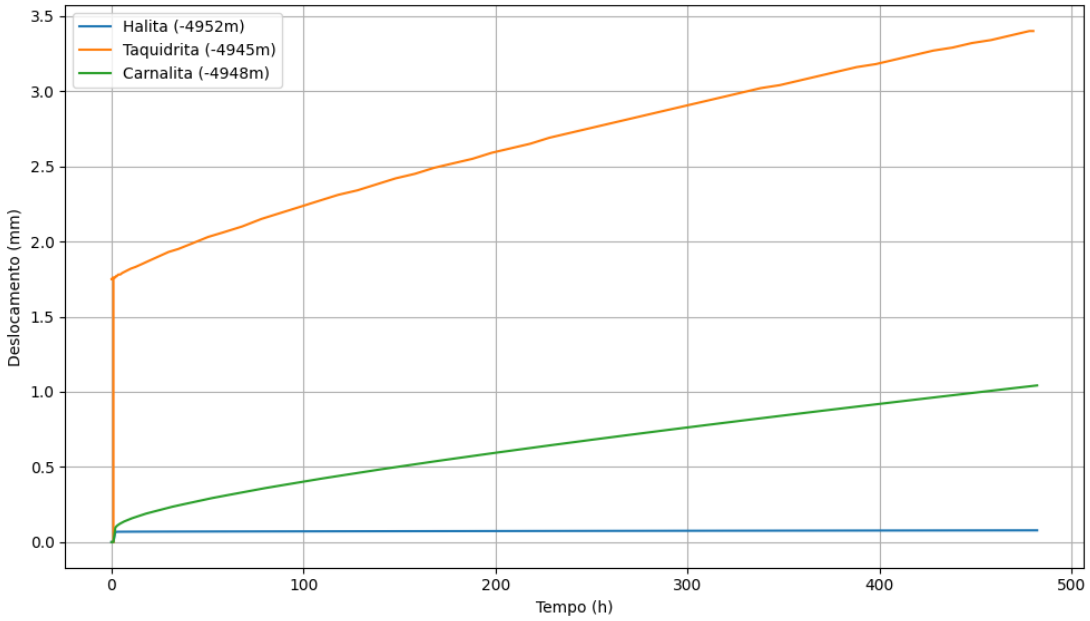
Tanto os resultados obtidos neste trabalho quanto os de Poiate (2012) demonstram que o aumento da inclinação do poço reduz o fechamento por fluência. No entanto, essa influência se mostrou significativamente mais acentuada nos dados de Poiate: enquanto em seu modelo a redução do deslocamento chegou a 39,74% a 60° em relação ao vertical, nas simulações realizadas no Abaqus essa queda foi de apenas 2,14%. Essa diferença evidencia que a metodologia adotada neste trabalho apresenta menor sensibilidade à inclinação em comparação aos modelos apresentados por Poiate.

Vale destacar que a baixa sensibilidade dos deslocamentos em relação à inclinação do poço já havia sido observada no Estudo de Caso I, que considerou uma formação composta apenas por Halita, que tem propriedades mais estáveis. Naquele cenário, embora as variações nos deslocamentos também tenham sido pequenas, não foi identificada uma relação clara e contínua entre o aumento da inclinação e a redução do fechamento — em ângulos menores, os deslocamentos chegaram a ser ligeiramente maiores ao do modelo vertical, enquanto em ângulos maiores, apresentaram reduções discretas. No entanto, no Estudo de Caso II, que incorpora múltiplas litologias, essa característica de variação limitada do deslocamento permanece, mas com um comportamento mais definido: quanto maior a inclinação, menor o deslocamento radial observado na Taquidrita, seguindo uma tendência decrescente clara (0° >

30° > 45° > 60°), ainda que com diferenças percentuais pouco expressivas.

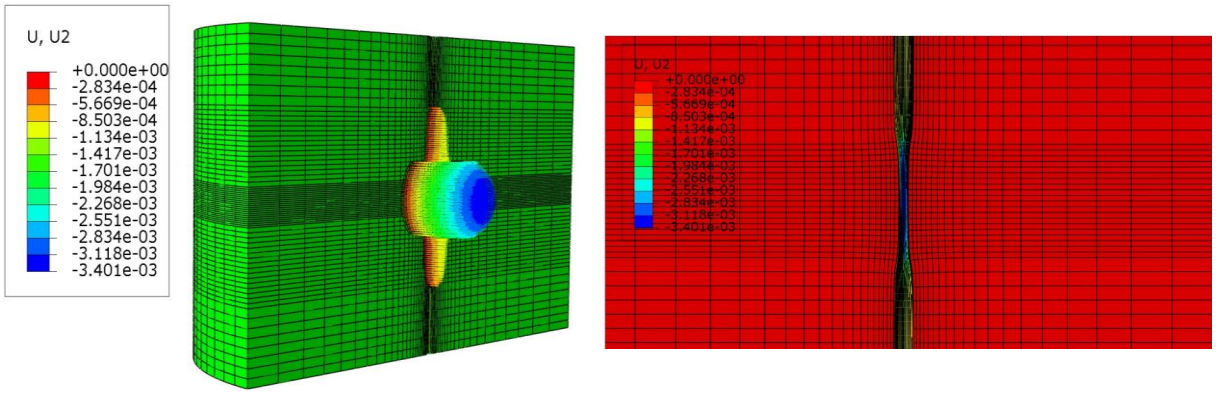
Ademais, os resultados das simulações para o poço vertical (Figura 99 e Figura 100) confirmam o padrão clássico de comportamento das rochas salinas descrito na literatura. A Taquidrita se destacou como a litologia com maiores deformações por fluência, apresentando um deslocamento radial de 3,40139 mm na cota de -4.945 m. Esse valor é 3,3 vezes maior que o deslocamento observado na Carnalita (1,042 mm a -4.948 m) e 43,6 vezes superior ao da Halita (0,078 mm a -4.952 m).

Figura 99 - Comparação do deslocamento ao longo em diferentes litologias no poço vertical.



Fonte: Autor (2025).

Figura 100 - Modelo vertical 3D deformado: Fator de escala aumentado à esquerda e moderado à direita.



Fonte: Autor (2025).

A expressiva diferença nos deslocamentos entre as litologias pode ser atribuída às características reológicas intrínsecas de cada rocha. Enquanto a Taquidrita apresenta maiores deformações por fluência devido à sua estrutura cristalina e propriedades viscoplásticas, a Halita demonstra comportamento mais rígido. A Carnalita, por sua vez, ocupa uma posição intermediária, como era esperado. Esses resultados não apenas validam a metodologia empregada neste trabalho, como também reforçam a importância de considerar as variações litológicas em projetos de poços em formações salinas, onde a presença de Taquidrita pode significar desafios significativos para a estabilidade do poço.

A análise comparativa entre as litologias confirma que a Halita (H) apresenta comportamento distinto, com efeitos mínimos de fluência nas condições estudadas, enquanto a Taquidrita se destaca como a mais suscetível à deformação viscoplástica. No entanto, considerando que os deslocamentos variaram pouco entre as diferentes inclinações, os resultados indicam que o comportamento geral do maciço salino pode ser bem estimado por meio de análises bidimensionais, menos custosas do ponto de vista computacional. Assim, a escolha do ângulo de perfuração, dentro da faixa analisada, não altera substancialmente os deslocamentos radiais observados, o que reforça a viabilidade de modelos mais simplificados para representar a resposta mecânica dessas formações.

Portanto, resumidamente, infere-se que os resultados obtidos com os modelos tridimensionais validam a metodologia proposta neste trabalho para os casos analisados, demonstrando que a estratégia de modelagem adotada é capaz de representar com fidelidade o comportamento viscoplástico das formações salinas simuladas. Contudo, dentro do escopo dos modelos investigados neste estudo, observou-se que a variação da inclinação do poço teve uma influência aparentemente limitada sobre os deslocamentos radiais. Essa observação, para as configurações aqui analisadas, sugere que modelagens bidimensionais poderiam, em certos contextos, ser suficientes para capturar com razoável precisão os principais efeitos da fluência, oferecendo a vantagem de um custo computacional significativamente inferior. Dessa forma, embora a modelagem 3D demonstre validade e consistência técnica, sua aplicação mais detalhada poderia ser reservada a cenários que demandem maior complexidade geométrica ou condições que extrapolem as abordagens deste trabalho. Adicionalmente, ressalta-se a importância de investigar outros diferentes cenários e configurações para consolidar a consistência dos resultados e verificar se o mesmo padrão de comportamento se mantém em outras condições de poços direcionais.

Por fim, assim como no Estudo de Caso I, as simulações 3D deste estudo demandaram recursos computacionais significativos, exigindo o uso de máquinas de alto desempenho com

processador AMD Ryzen 7 5700G e 64 GB de RAM. A adoção de estratégias de otimização foi crucial para viabilizar os cálculos: a criação de sets específicos contendo apenas os nós de interesse reduziu consideravelmente o custo computacional, enquanto a escolha da Lei de Dupla Potência — que apresenta implementação nativa mais eficiente no Abaqus — permitiu executar simulações tridimensionais complexas com desempenho satisfatório. Os tempos de simulação variaram conforme a inclinação do poço, sendo de aproximadamente 3h55 para 0°, 9h19 para 30°, 17h51 para 45° e 34h55 para 60°, com uma média de 16h30. Esse tempo contrasta radicalmente com as tentativas frustradas de utilizar o Mecanismo Duplo de Deformação, cujos testes ultrapassavam 10 dias sem conclusão, além de sofrerem interrupções frequentes devido à instabilidade em cálculos prolongados. A eficiência da Dupla Potência foi potencializada pela ativação da paralelização, que distribuiu as tarefas entre múltiplos núcleos do processador — vantagem já apresentada na Seção 6.1. Esses resultados reforçam não apenas a viabilidade técnica do método adotado, mas também sua eficiência operacional em cenários complexos com múltiplas litologias.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma abordagem para modelagem tridimensional de poços direcionais em formações salinas, utilizando o software Abaqus com implementação da Lei de Dupla Potência. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do método proposto, tanto em termos de precisão quanto de desempenho computacional. Ademais, o trabalho contribuiu para o entendimento do impacto da variação do ângulo de inclinação do poço no seu fechamento por fluência.

A análise comparativa entre os mecanismos de fluência evidenciou que a Lei de Dupla Potência apresenta vantagens expressivas frente ao tradicional Mecanismo Duplo de Deformação. Apesar das diferenças numéricas serem mínimas, com uma variação de apenas 2,56755% no caso vertical, essa discrepância é considerada aceitável no contexto de simulações geomecânicas, onde variações pequenas são frequentemente toleradas em função da complexidade do comportamento reológico das rochas. Além disso, a Lei de Dupla Potência demonstrou ser significativamente mais eficiente do ponto de vista computacional, reduzindo o tempo de simulação em 23 vezes, devido à sua implementação direta no Abaqus. Ainda, há a possibilidade de um multiuso de processamento pela paralelização. Essa superioridade em desempenho é particularmente relevante em modelos tridimensionais complexos, nos quais a otimização dos recursos computacionais é essencial para garantir a viabilidade das análises.

A partir dos resultados do modelo com apenas uma litologia (halita), pode-se inferir que o deslocamento apresenta ligeiras variações dependendo da inclinação do poço. Para inclinações menores, o deslocamento é ligeiramente maior do que em poços verticais. À medida que a inclinação do poço aumenta, o deslocamento apresenta valores mais baixos em comparação com o poço vertical. Obteve-se, portanto, um impacto mínimo das variações das inclinações no deslocamento da parede do poço.

Quanto ao comportamento das diferentes litologias, no estudo de caso II, os resultados confirmaram os padrões estabelecidos na literatura. A Taquidrita destacou-se como a rocha mais suscetível à fluência, com deslocamentos significativamente maiores (43,6 vezes) que os observados na Halita. Esta hierarquia de deformação (Taquidrita > Carnalita > Halita) foi consistentemente reproduzida em todos os modelos testados, validando a abordagem adotada.

No que diz respeito à influência da inclinação do poço, a partir do modelo com mais de uma litologia, os resultados indicaram uma tendência de redução do fechamento por fluência com o aumento do ângulo de inclinação. No entanto, essa variação mostrou-se bastante discreta nas condições analisadas, com diferenças percentuais pouco expressivas entre os diferentes

ângulos. Ainda assim, observou-se uma relação consistente: quanto maior a inclinação, menor o deslocamento radial na região da Taquidrita. Resumidamente, os resultados deste trabalho sugerem uma variação menor de deslocamentos quando se varia os ângulos dos poços direcionais em relação aos resultados obtidos por Poiate (2012). Essa diferença pode estar associada a diversos fatores, como: (1) variações nas propriedades reológicas adotadas para a Taquidrita, (2) diferenças na discretização da malha (elementos/tipo de elementos), ou (3) distinções no tratamento das condições de contorno para poços inclinados. A menor sensibilidade à inclinação observada nos resultados pode indicar que, para as condições adotadas neste trabalho, o fechamento do poço é menos afetado pela geometria inclinada do que no estudo de referência, possivelmente devido a uma maior dominância do comportamento viscoplástico homogêneo do material sobre os efeitos geométricos.

A metodologia tridimensional desenvolvida e aplicada neste trabalho demonstrou-se válida para os modelos estudados, sendo capaz de representar com precisão o comportamento viscoplástico das formações salinas simuladas sob diferentes inclinações. No entanto, para o contexto específico das configurações e parâmetros analisados neste estudo, os resultados indicaram que a influência da inclinação do poço sobre o fechamento por fluência foi pouco expressiva. Essa constatação difere, em certa medida, de resultados encontrados em outros trabalhos na literatura, como o de Poiate (2012), onde o efeito da inclinação pareceu ser mais relevante na magnitude do deslocamento. Para os modelos investigados, essa baixa sensibilidade angular levanta uma discussão relevante sobre a necessidade de se recorrer à modelagem tridimensional em todos os casos, considerando seu alto custo computacional, especialmente quando análises bidimensionais se mostraram capazes de fornecer estimativas muito próximas e com grande economia de tempo e recursos para as condições aqui avaliadas.

Ainda assim, é importante destacar que as conclusões aqui obtidas se aplicam unicamente aos cenários avaliados. A discrepância observada em relação aos resultados de Poiate (2012) sugere que outros fatores — como as condições de contorno, a distribuição de tensões in situ e o coeficiente de pressão lateral k_0 — podem influenciar significativamente a sensibilidade da deformação à inclinação. Dessa forma, recomenda-se a realização de estudos adicionais, explorando uma variedade maior de condições geomecânicas, como diferentes temperaturas, gradientes de tensão, valores de k_0 e arranjos litológicos. Só a partir dessa investigação mais ampla será possível avaliar com maior segurança em que situações a modelagem tridimensional é indispensável e em quais a abordagem bidimensional permanece adequada.

A diferença entre os resultados observados neste trabalho e no trabalho de Poiate (2012)

sugere a elaboração de trabalhos futuros direcionados a realizar uma investigação do raio externo considerado e do refinamento da malha.

Ademais, alguns outros estudos são propostos:

- Análise de sensibilidade dos parâmetros constitutivos
- Estudo de configurações estratigráficas mais complexas
- Estudos de refinamento de malha
- Valores do coeficiente de pressão lateral (k_0) diferentes de 1. Devem gerar resultados interessantes, uma vez que se sabe que a mobilidade do sal, especialmente em formações de domo, pode alterar a distribuição da tensão geostática

Em conclusão, a metodologia desenvolvida neste trabalho mostrou-se robusta e eficiente, oferecendo uma ferramenta valiosa para a previsão do comportamento de poços direcionais em formações salinas. Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para decisões de projeto e operação, contribuindo para a redução de riscos e custos em operações de perfuração em ambientes complexos como o pré-sal brasileiro.

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#cd>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

Abaqus/CAE. Disponível em: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/cae>. Acesso em: 15 out. 2024.

ABAQUS. Parallel Execution in Abaqus/Standard. 2023. Disponível em: https://docs.software.vt.edu/abaqusv2023/English/SIMACAEEXCRefMap/simaexc-c-stdparallel.htm. Acesso em: 3 jun. 2025.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

BARCELOS, Johann Goethe Alrutz et al. Modelagem matemática do aumento de pressão nos anulares (APB) em poços de petróleo. 2017.

BOTELHO, F. V. C. Análise numérica do comportamento mecânico do sal em poços de petróleo. 211 f. Dissertação (Mestrado) — Dissertação (Mestrado), PUC-RJ, 2008.

BUCKNELL, J. et al. Improved Understanding of Foundation Strength for Piled Offshore Structures. In: Offshore Technology Conference Asia. OTC, 2016. p. D031S023R003.

BRESOLIN, G. **Simulação do comportamento dúctil de rochas salinas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 2010.

COSTA, A. M. **Uma aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análise se escavações destinadas à mineração subterrânea**. 1488 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984.

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.

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.

DUQUE NETO, O. A. **Estudo do Escoamento de Suspensões e da Perda de Carga em Fraturas**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2015.

LINS, Filipe; KAYO, G.; MEDEIROS, Adelardo; COSTA, Rutacio. **Modelagem dinâmica e simulação computacional de poços de petróleo verticais e direcionais com elevação por bombeio mecânico.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 5., 2009, Fortaleza. **Anais eletrônicos**... Fortaleza: ABPG, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277811204_Modelagem_dinamica_e_simulacao_computacional_de_pocos_de_petroleo_verticais_e_direcionais_com_elevacao_por_bombeio_mecanico. Acesso em: 10 nov. 2024.

FIRME, P. A. L. P. **Modelagem Constitutiva e Análise Probabilística Aplicadas a Poços em Zonas de Sal**. 2013. 231 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FIRME, Pedro ALP et al. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks. **Acta Geotechnica**, v. 13, p. 1329-1340, 2018.

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

FORERO, J. H., CALVAY, F. K., PIMENTEL, I. A., and S. A. B. FONTOURA. "Bayesian Inference Framework for Predicting Creep Strain for Brazilian Carnallite and Tachyhydrite Evaporites Rocks." Paper presented at the 55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Virtual, June 2021.

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.

LINS, F. C. A. **Modelagem e simulação de um sistema de bombeio mecânico em poços direcionais utilizando parâmetros concentrados**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MAZON, A. L. **MODELAGEM NUMÉRICA DE EVAPORITOS PARA FINS DE BARREIRA NATURAL NO ABANDONO DE POÇOS DE PETRÓLEO**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro / PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2022.

MENDES, F. A. A. **Estudo experimental, simulação numérica e modelagem fenomenológica da separação gravitacional de gás no fundo de poços direcionais**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MIYOSHI, Maryelen Hissae. **Modelagem do deslocamento de uma coluna de perfuração imersa em leito de cascalhos**. 2020.

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**.

NETO, E. A. de S.; PERIĆ, D.; OWEN, D. R. J. **Computational Methods for Plasticity**: Theory and Applications. 1. ed. Chichester: WILEY, 2008. 816 p.

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.

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.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; TASSINARI, C. C. G. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista Usp**, n. 95, p. 33-42, 2012.

ROCHA, L. A. S. **Perfuração Direcional**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 368 p.

RODRIGUES, Otávio Bruno de Araújo et al. **Estudo numérico de ensaios triaxiais aplicado à perfuração de poços em rochas salinas.** 2021.

SANTOS, G. 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.

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.

SOUZA, L. Z. **Estudo do Estado da Arte da Perfuração Direcional de Poços de Petróleo**. 2011. 134 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

SOUZA, H. M. et al. PERFURAÇÃO DE POÇOS DIRECIONAIS NA INDÚSTRIA DE PETROLÍFERA. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 4, n. 3, p. 39-39, 2018.

TEIXEIRA, L. F. B.. **Perfuração de poços na província do Pré-Sal.** 2001. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Petróleo, Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2011.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência; Petrobras, 2004.

WOJCIECHOWSKI, Renan Bueno. **Validação do Modelo de Elementos Finitos 3D/Método dos Blocos para Laminação de Produtos Planos**. 2022. Dissertação de Mestrado.