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

GLEIDE KAROLAYNE MELO LINS

ANÁLISE TERMO-POROELÁSTICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE BAINHAS DE CIMENTO EM POÇOS DE PETRÓLEO

MACEIÓ
2025

GLEIDE KAROLAYNE MELO LINS

ANÁLISE TERMO-POROELÁSTICA DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE BAINHAS DE CIMENTO EM POÇOS DE PETRÓLEO

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas.

Área de Concentração: Estruturas e Materiais

Orientador: Prof. Dr. William Wagner Matos Lira

MACEIÓ

2025

Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB-4/661

L759a Lins, Gleide Karolayne Melo.
Análise termo-poroelástica da integridade estrutural de bainhas de cimento em poços de petróleo / Gleide Karolayne Melo Lins. – 2025.
129 f. : il.

Orientador: William Wagner Matos Lira.
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 77-79.
Apêndices: f. 80-142.

1. Bainha de cimento. 2. Integridade estrutural. 3. Termo-poroelasticidade. 4. Modelagem numérica. 5. Estrutura dos materiais (Engenharia). I. Título.

CDU: 620.18

Ao meu avô, Aécio Fábio de Gusmão Lins (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e persistência para concluir mais esta importante etapa da minha vida.

À minha família, especialmente aos meus pais, Keegan e Marline, e à minha irmã, Gabriele, pelo apoio incondicional, compreensão, paciência, auxílio, amor constante e incentivo em todos os momentos. Vocês são minha base e inspiração.

Ao meu noivo, Matheus, por ser minha dupla em todos os desafios, pelas conversas enriquecedoras e incentivos contínuos. Você me ajuda diariamente a ser melhor e a acreditar em mim mesma. Obrigada por ser minha paz. Sua presença tornou essa jornada mais leve e alegre.

Ao meu orientador, prof. William Wagner, pelo empenho, paciência e valiosas orientações durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos pesquisadores Thiago e Catarina, pela disponibilidade, pelo apoio constante e pelas ideias fundamentais que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho.

À Maria Clara, aluna de graduação e bolsista de iniciação científica do laboratório, pelas discussões e pela colaboração na análise e verificação dos resultados obtidos.

Aos colegas de projeto, Luiz, Gilberto e Otávio, pelas conversas produtivas e enriquecedoras.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPGE/UFAL), pela troca constante de conhecimentos e pela colaboração ao longo do mestrado. Especialmente aos professores Eduardo Toledo, João Paulo e Lucas Gouveia, pelas importantes contribuições feitas durante minha banca de qualificação, enriquecendo o desenvolvimento da versão final desta dissertação.

À equipe do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV/UFAL), pelo ambiente acolhedor, infraestrutura e suporte técnico sempre oferecidos.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e à Fundação Universitária de Desenvolvimento de Extensão e Pesquisa (FUNDEPES), pelo apoio institucional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro concedido durante a realização desta pesquisa.

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

RESUMO

LINS, G. K. M. **Análise termo-poroelástica da integridade estrutural de bainhas de cimento em poços de petróleo**. 2025. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2025.

Este trabalho investiga a influência da consideração do comportamento poroso da bainha de cimento e da formação rochosa adjacente na distribuição de tensões no sistema revestimento–cimento–formação, bem como na integridade estrutural da própria bainha de cimento. Responsável por garantir o assentamento do revestimento à formação e a vedação hidráulica entre zonas permeáveis, a bainha de cimento desempenha um papel essencial na manutenção da integridade estrutural de poços de petróleo, atuando como uma das principais barreiras de segurança ao longo do ciclo de vida do poço. Para garantir seu desempenho ao longo do ciclo de vida do poço, é indispensável um dimensionamento mecânico adequado. Tradicionalmente, modelos termoelásticos têm sido amplamente utilizados para o dimensionamento da bainha de cimento. Contudo, estudos recentes indicam que o comportamento poroso do cimento pode afetar de forma significativa sua resposta mecânica, especialmente em condições térmicas variáveis. Para investigar essa influência, este estudo propõe uma metodologia estruturada em cinco etapas: (i) formulação do modelo matemático do problema; (ii) obtenção das soluções analítica termoelástica e termo-poroelástica; (iii) avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento por meio de critérios de resistência; (iv) comparação entre os resultados fornecidos por cada abordagem; e (v) modelagem numérica e verificação dos resultados baseada nas soluções analíticas. Os resultados indicam que a abordagem termo-poroelástica representa de forma mais realista o estado de tensões na bainha de cimento. Embora, na maioria dos casos analisados, a abordagem termoelástica apresente tensões efetivas mais elevadas, a análise termo-poroelástica fornece uma avaliação mais conservadora da integridade estrutural da bainha. A comparação entre os resultados numéricos e analíticos apresenta excelente concordância, com erros relativos inferiores a 2% na maior parte dos pontos analisados. Embora simplificada, a modelagem numérica adotada demonstra-se eficaz, permitindo sua extensão para estudos mais sofisticados e de difícil representação analítica. Assim, o trabalho contribui com subsídios técnicos relevantes para o dimensionamento da bainha de cimento, apoiando o aprimoramento das práticas de projeto na indústria de petróleo e gás. Os resultados aqui apresentados fornecem base sólida para investigações futuras envolvendo geometrias irregulares, materiais com comportamentos não lineares e carregamentos não uniformes.

Palavras-chave: bainha de cimento; integridade estrutural; termo-poroelasticidade; modelagem numérica.

ABSTRACT

LINS, G. K. M. **Thermo-poroelastic analysis of the structural integrity of cement sheaths in oil wells**. 2025. 143 f. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Alagoas, Maceió, 2025.

This work investigates the influence of considering the porous behavior of the cement sheath and the adjacent rock formation on the stress distribution within the casing–cement–formation system, as well as on the structural integrity of the cement sheath itself. Responsible for anchoring the casing to the formation and ensuring hydraulic isolation between permeable zones, the cement sheath plays a crucial role in maintaining the structural integrity of oil wells, acting as one of the main safety barriers throughout the well's lifecycle. To ensure its performance, proper mechanical design is essential. Traditionally, thermoelastic models have been widely used for cement sheath design. However, recent studies suggest that the porous nature of cement can significantly affect its mechanical response, especially under varying thermal conditions. To investigate this effect, the present study proposes a methodology structured in five steps: (i) mathematical modeling of the problem; (ii) derivation of analytical thermoelastic and thermo-poroelastic solutions; (iii) assessment of cement sheath integrity based on failure criteria; (iv) comparison of results from each approach; and (v) numerical modeling and validation against the analytical solutions. The results show that the thermo-poroelastic approach more realistically captures the stress state within the cement sheath. Although the thermoelastic approach generally results in higher effective stresses, the thermo-poroelastic analysis provides a more conservative evaluation of structural integrity. Numerical and analytical results show excellent agreement, with relative errors below 2% in most evaluated points. Despite its simplified configuration, the numerical model proves effective and can be extended to more complex scenarios where analytical solutions are not feasible. Therefore, this study offers relevant technical insights for cement sheath design, supporting the improvement of engineering practices in the oil and gas industry. The findings presented here establish a solid foundation for future research involving irregular geometries, nonlinear material behavior, and non-uniform loading conditions.

Keywords: cement sheath; structural integrity; thermo-poroelasticity; numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Representação de um poço típico composto pelos seus principais componentes: revestimento, bainha de cimento e formação 14

Figura 2.1 – Representação da seção transversal de um poço composta pelo sistema revestimento-cimento-formação 24

Figura 2.2 – Representação esquemática de um elemento infinitesimal em coordenadas cilíndricas, sem tensões cisalhantes e sem forças de corpo 26

Figura 3.1 – Modelo de um cilindro de raio interno ri e raio externo ro, submetido à pressão Pi na superfície interna e à pressão Po na superfície externa 31

Figura 4.1 – Representação da geometria adotada para o modelo numérico 37

Figura 4.2 – Representação das restrições de contorno e carregamentos utilizadas no modelo numérico 40

Figura 6.1 – Representação esquemática do poço e da seção transversal selecionada para análise da integridade da bainha de cimento 46

Figura 6.2 – Estado de carregamento na superfície interna e externa do revestimento e da formação no Evento 1 49

Figura 6.3 - Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil 50

Figura 6.4 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil 52

Figura 6.5 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil 54

Figura 6.6 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos e termoelásticos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil 56

Figura 6.7 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos e termoelásticos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil 57

Figura 6.8 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos e termoelásticos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil 57

Figura 6.9 – Funções de falha de Mohr-Coulomb e Mogi-Coulomb ao longo da espessura da bainha de cimento para os diferentes eventos operacionais avaliados: comparação entre as abordagens termo-poroelástica e termoelástica 59

Figura 6.10 – Exemplo de refinamento da malha de elementos finitos nas regiões do revestimento e do cimento, com discretização nas direções tangencial e radial 63

Figura 6.11 – Configurações inicial e final da malha de elementos finitos utilizadas no estudo de convergência 64

Figura 6.12 – Deslocamento radial na interface revestimento-cimento (raio de 17,78 cm) para o Evento 1 ao longo dos refinamentos realizados – abordagem termoelástica 65

Figura 6.13 - Tempo de simulação para cada tipo de elemento finito utilizado ao longo dos refinamentos realizados 66

Figura 6.14 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil (análise termoelástica) 67

Figura 6.15 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil (análise termoelástica) 67

Figura 6.16 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil (análise termoelástica) 68

Figura 6.17 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil (análise termo-poroelástica) 68

Figura 6.18 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil (análise termo-poroelástica)..... 68

Figura 6.19 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil (análise termo-poroelástica)..... 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Propriedades dos componentes da seção avaliada do poço 46

Tabela 6.2 – Condição de carregamento para cada evento de vida útil do poço 47

Tabela 6.3 – Erro relativo (%) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σr), tangencial ($\sigma \theta$) e vertical (σz), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termoelástica 70

Tabela 6.4 – Erro relativo (%) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σr), tangencial ($\sigma \theta$) e vertical (σz), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termo-poroelástica 70

Tabela 6.5 – Diferença absoluta (MPa) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σr), tangencial ($\sigma \theta$) e vertical (σz), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termoelástica 71

Tabela 6.6 – Diferença absoluta (MPa) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σr), tangencial ($\sigma \theta$) e vertical (σz), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termo-poroelástica 71

Tabela 6.7 – Comparação entre os resultados numéricos e analíticos para a tensão efetiva vertical ao longo dos eventos, para a abordagem termo-poroelástica 73

Tabela 6.8 – Comparação entre os resultados numéricos e analíticos para o deslocamento radial para o Evento 5 para a abordagem termo-poroelástica 73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1. MOTIVAÇÃO 17

1.2. JUSTIFICATIVA 19

1.3. OBJETIVOS 20

1.4. METODOLOGIA 21

2. FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA REVESTIMENTO–CIMENTO–FORMAÇÃO 23

2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PROBLEMA 23

2.2. HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS 24

2.3. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES 25

2.3.1. Equação de equilíbrio 26

2.3.2. Relações de compatibilidade cinemática 26

2.3.3. Relações constitutivas 27

2.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONTINUIDADE 29

3. SOLUÇÃO ANALÍTICA DO MODELO MATEMÁTICO ADOTADO 30

3.1. SOLUÇÃO PARA CILINDRO ÚNICO SOB PRESSÕES INTERNA E EXTERNA 30

3.2. SOLUÇÃO PARA TRÊS CILINDROS CONCÊNTRICOS: REVESTIMENTO, CIMENTO E FORMAÇÃO 33

4. MODELAGEM NUMÉRICA DO SISTEMA REVESTIMENTO–CIMENTO–FORMAÇÃO 36

4.1. GEOMETRIA E DOMÍNIOS DO MODELO 36

4.2. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS 37

4.3. MALHA E TIPO DE ELEMENTOS FINITOS 38

4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS 39

5. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DA BAINHA DE CIMENTO 41

5.1. CRITÉRIO DE FALHA POR TRAÇÃO 41

5.2. CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB 42

5.3. CRITÉRIO DE MOGI-COULOMB 43

6. RESULTADOS 45

6.1. CENÁRIO DE ESTUDO ADOTADO 45

6.2. SOLUÇÃO ANALÍTICA DO CENÁRIO DE ESTUDO 47

6.2.1. Distribuição de tensões para o modelo termo-poroelástico 49

6.2.2. Distribuição de tensões para o modelo termoelástico 55

6.2.3. Avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento: Análise Termoelástica vs. Termo-Poroelástica 58

6.3. MODELAGEM NUMÉRICA DO CENÁRIO DE ESTUDO 61

6.3.1. Ajuste do estado de tensões inicial da bainha de cimento 61

6.3.2. Estudo de convergência da malha de elementos finitos 62

6.3.3. Comparação com os resultados da solução analítica 66

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS 74

REFERÊNCIAS 77

APÊNDICE A – HISTÓRICO DO ESTUDO DE CONVERGÊNCIA REALIZADO 81

APÊNDICE B – TUTORIAL PARA MODELAGEM TERMO-POROELÁSTICA DO CENÁRIO DE ESTUDO NO ABAQUS® 83

B.1 SALVAMENTO E CRIAÇÃO DO ARQUIVO .CAE 83

B.2 DEFINIÇÃO DO DIRETÓRIO DE TRABALHO (WORK DIRECTORY) 84

B.3 CRIAÇÃO DA PART 84

B.4 DEFINIÇÃO E ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ÀS REGIÕES DO MODELO 94

B.5 MONTAGEM DO MODELO 102

B.6 CRIAÇÃO DAS ETAPAS DE ANÁLISE (STEP) 103

B.7 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS 107

B.8 GERAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS 130

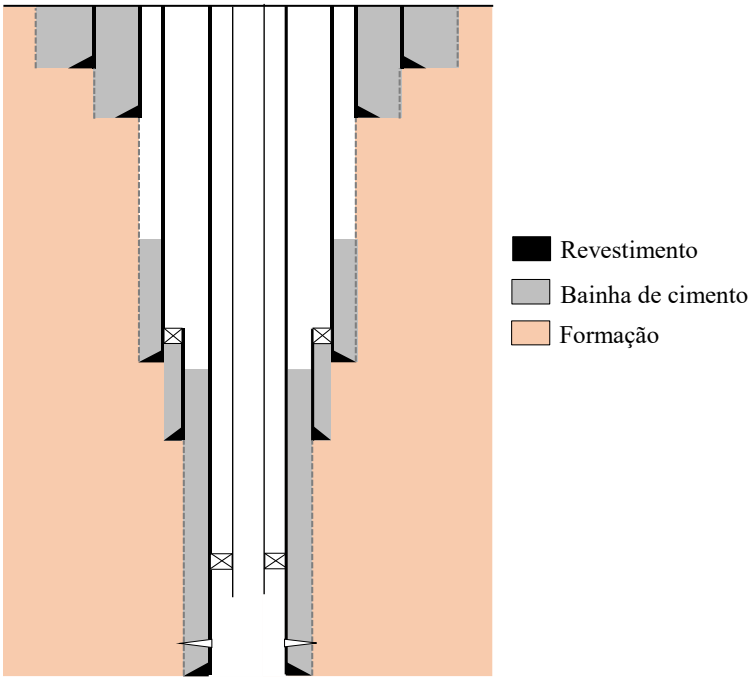
B.9 CRIANDO E SUBMETENDO UM TRABALHO PARA ANÁLISE 139

1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás desempenha um papel estratégico na matriz energética global, sendo um dos setores de maior impacto econômico e tecnológico. No Brasil, o setor representa aproximadamente 11% do produto interno bruto (PIB) do país (Morais e Oliveira, 2022) e é responsável por 35,1% da oferta interna de energia (EPE, 2024).

Os poços de petróleo são estruturas complexas, compostas por diferentes elementos que desempenham funções específicas. Entre os principais componentes, destacam-se os revestimentos, as bainhas de cimento e a formação rochosa adjacente (Figura 1.1). O revestimento é responsável por garantir a estabilidade estrutural do poço, isolando as zonas produtoras das camadas não exploráveis e impedindo a migração de fluidos indesejados. A bainha de cimento, por sua vez, atua como um elemento de fixação do revestimento à formação, vedando espaços anulares de zonas permeáveis e proporcionando suporte mecânico adicional (Nelson e Guillot, 2006). Já a formação rochosa representa o meio geológico que envolve a bainha de cimento e o revestimento, sendo um fator determinante no dimensionamento dos esforços atuantes na estrutura (Thomas, 2004).

Figura 1.1 – Representação de um poço típico composto pelos seus principais componentes: revestimento, bainha de cimento e formação



Fonte: Autor (2025).

O comportamento do revestimento metálico é predominantemente elástico para níveis de tensão dentro do limite de escoamento do material. No entanto, quando submetido a tensões

superiores ao seu limite de escoamento, o revestimento pode entrar em regime plástico, podendo sofrer deformações permanentes (Gouveia *et al.*, 2020; Nunes *et al.*, 2020).

Com relação à bainha de cimento, Nelson e Guillot (2006) explicam que o cimento endurecido pode apresentar também regimes elástico e plástico, a depender do nível de carregamento suportados. Além disso, estudos como os de Thiercelin *et al.* (1998), Gray, Podnos e Becker (2009) e Simone, Pereira e Roehl (2017) destacam que o cimento endurecido é um material poroso, ou seja, sua resposta mecânica é afetada pela interação entre a matriz sólida e os fluidos presentes nos seus poros. Essa característica influencia diretamente a distribuição de tensões na bainha e sua capacidade de vedação.

O comportamento das formações rochosas adjacentes varia conforme sua litologia e condições geomecânicas. Rochas sedimentares, por exemplo, apresentam comportamento poroso e são sensíveis às variações de pressão de poros (Altmann, 2010). Rochas salinas, como o sal-gema, apresentam porosidade praticamente nula e um comportamento altamente viscoelástico, podendo fluir lentamente ao longo do tempo sob tensões diferenciais (Firme, 2013).

Para assegurar o funcionamento seguro de um poço de petróleo, é fundamental garantir a manutenção de sua integridade estrutural. Essa integridade refere-se à capacidade dos componentes do poço de suportarem, de forma segura e eficiente, os esforços oriundos das fases de construção (perfuração e completação), bem como das condições operacionais ao longo de sua vida útil (Silva *et al.*, 2020). O conceito está diretamente associado às barreiras de segurança, cuja função é conter ou isolar os fluidos provenientes das zonas permeáveis, prevenindo falhas operacionais e mitigando riscos ambientais, econômicos e humanos. A presença de múltiplas barreiras independentes é, inclusive, uma exigência normativa em diversas diretrizes de segurança para garantir a resiliência do sistema frente a falhas (IBP, 2022).

O dimensionamento estrutural do poço segue diretrizes normativas que definem parâmetros mínimos para a concepção do projeto. Essas normas determinam o número de revestimentos, a quantidade e a profundidade das fases de perfuração e os requisitos mínimos de resistência e altura mínima de cimentação do revestimento. No entanto, antes da execução, o projeto do poço deve ser validado por meio de verificações que assegurem que todos os seus componentes essenciais - revestimento, cimento e formação - resistirão adequadamente às variações de carregamento térmico, mecânico e hidráulico induzidas pelas condições do fundo do poço (Nelson e Guillot, 2006).

Tais verificações podem ser realizadas por meio de análises experimentais, analíticas e/ou numéricas. As análises experimentais envolvem ensaios laboratoriais e de campo destinados a avaliar o comportamento de materiais e sistemas estruturais sob diferentes condições de carregamento, permitindo observar, por exemplo, os limites de resistência à ruptura e os níveis de deformação. No entanto, apesar de sua importância, essas análises nem sempre reproduzem com facilidade as condições reais de operação no fundo do poço. Nesse contexto, análises analíticas e, sobretudo, numéricas assumem papel central na avaliação da integridade estrutural, pois oferecem precisão satisfatória, além de flexibilidade para simular diversos cenários operacionais e estimar a distribuição de tensões nos componentes do poço em resposta às variações de pressão e temperatura ao longo do tempo (Nelson e Guillot, 2006).

Tanto as análises analíticas quanto as numéricas têm como ponto de partida um modelo matemático, o qual busca representar o comportamento físico do sistema por meio da formulação de equações diferenciais que expressam as leis fundamentais envolvidas, como equilíbrio mecânico, conservação de energia e transporte de fluido. Quando essas equações admitem solução exata, obtêm-se as soluções analíticas, que fornecem expressões fechadas para a avaliação de grandezas de interesse e permitem interpretações diretas sobre o efeito de diferentes parâmetros de projeto. No entanto, essas soluções geralmente requerem simplificações significativas para viabilizar sua resolução matemática. Em consequência, podem não representar adequadamente cenários reais mais complexos, como aqueles envolvendo geometrias irregulares, materiais com comportamentos não-lineares ou carregamentos não uniformes.

Diante das limitações das soluções analíticas, as modelagens numéricas são necessárias para a solução de problemas mais complexos. A modelagem numérica parte do mesmo modelo matemático das soluções analíticas, mas em vez de buscar uma solução exata, aproxima-se a solução por meio de métodos computacionais, como o Método dos Elementos Finitos (MEF). As soluções numéricas permitem modelar geometrias complexas e propriedades variáveis, considerar múltiplos carregamentos simultaneamente e realizar simulações realistas para a verificação estrutural de projetos de poços. O avanço de *softwares* especializados, como Abaqus®(Dassault Systèmes, 2019), tem permitido maior precisão e confiabilidade nos estudos de integridade estrutural.

Tanto as análises analíticas quanto as numéricas fornecem subsídios essenciais para a avaliação do estado de tensões e deformações nos componentes do sistema analisado. No entanto, para determinar se os níveis de tensão alcançados são críticos, é necessário adotar

critérios de resistência, que estabelecem os limites entre os estados admissíveis e os estados de falha do material. Por meio desses critérios, verifica-se, em pontos específicos do domínio, se a combinação de tensões excede a resistência do material, permitindo a identificação de regiões suscetíveis à ruptura. Essa etapa é fundamental no processo de dimensionamento de revestimentos, por exemplo, o qual envolve a definição dos carregamentos atuantes ao longo da vida útil do poço e sua comparação com as resistências dos tubulares, conforme estabelecido por normas técnicas, como a API TR 5C3 (2018), que fornece métodos determinísticos e probabilísticos para cálculo das resistências (Araújo *et al.*, 2020). A verificação dos estados limites por meio de critérios de resistência, portanto, contribui diretamente para a tomada de decisões de projeto e para a garantia da integridade estrutural do sistema ao longo de seu ciclo de vida.

1.1. MOTIVAÇÃO

A bainha de cimento desempenha um papel fundamental na integridade estrutural de poços de petróleo, atuando como uma das principais barreiras de segurança ao promover a vedação hidráulica entre o revestimento e a formação rochosa. Sua função é essencial para assegurar o isolamento zonal e evitar a migração indesejada de fluidos entre diferentes zonas permeáveis, o que pode comprometer não apenas a produtividade do poço, mas também a segurança operacional e ambiental ao longo de todo o seu ciclo de vida (Nelson e Guillot, 2006).

Durante as fases de perfuração, completação, produção e estimulação, a bainha de cimento está sujeita a variações significativas de pressão e temperatura. Tais variações podem induzir tensões mecânicas capazes de exceder a resistência do cimento, ou de suas interfaces. Nessas condições, a estrutura pode falhar, gerando canais de comunicação que comprometem a isolação zonal. Casos emblemáticos como o vazamento da plataforma Montara, em 2009, e o desastre da plataforma do Deepwater Horizon, em 2010, ilustram os impactos críticos associados à falha da cimentação - ambos resultantes de deficiências na bainha de cimento (Australia, 2010; Heathman e Beck, 2006). Esses eventos reforçam a importância de um projeto criterioso e de análises rigorosas que garantam o desempenho mecânico adequado da bainha sob diferentes condições de carregamento.

O dimensionamento da bainha de cimento é realizado por meio de modelos que avaliam sua resistência mecânica frente às tensões induzidas pelas condições operacionais previstas. Esses modelos podem ser analíticos ou numéricos, e uma das decisões fundamentais no processo de modelagem é como representar o cimento: como um sólido homogêneo e

impermeável, ou como um meio poroso, sujeito ao acúmulo e dissipação de pressão nos poros. Tradicionalmente, muitos estudos têm adotado uma abordagem termoelástica, desconsiderando os efeitos associados à porosidade do cimento (Wang *et al.*, 2022). No entanto, estudos recentes, como os de Wang *et al.* (2022) e Meng *et al.* (2021), ressaltam que a porosidade do cimento pode afetar significativamente sua resposta mecânica, especialmente sob variações de temperatura.

Wang *et al.* (2022) avaliaram o desempenho termo-poro-mecânico de bainhas de cimento em poços com injeção cíclica de vapor e demonstraram que o aumento da temperatura pode elevar a pressão de poros no interior do cimento, alterando seu estado de tensões efetivas. O estudo evidenciou que, quando a bainha de cimento está confinada entre dois revestimentos (sem contato com a formação), a pressão de poros permanece elevada, gerando tensões trativas que aumentam o risco de falha por tração. Já em regiões onde a bainha de cimento está em contato com a formação rochosa, a dissipação de pressão ocorre com o tempo, mitigando tais tensões. Esse comportamento, ausente em modelos termoelásticos convencionais, só pode ser capturado por abordagens que considerem o caráter poroso do material.

De modo similar, Meng *et al.* (2021) propuseram um modelo transiente termo-poroelástico para o sistema revestimento-cimento-formação, incorporando condições iniciais de pressão de poro e tensão. Os autores observaram que variações térmicas rápidas geram picos de pressão na bainha de cimento que não se dissipam a tempo, intensificando as tensões internas, enquanto mudanças térmicas mais lentas permitem o alívio dessas pressões. Esses resultados indicam que o uso de modelos termo-poroelásticos fornece uma estimativa mais realista do estado de tensões na bainha de cimento, evitando a subestimação de modos de falha estruturais relevantes.

As normas técnicas internacionais, como a API Standard 65-2 (2010), e as boas práticas da indústria do petróleo reconhecem a importância de definir corretamente a resistência mecânica do cimento endurecido no projeto de poço. No entanto, essas normas não estabelecem uma metodologia específica de modelagem para a avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento. A API 65-2, por exemplo, recomenda que a pasta de cimento desenvolva propriedades mecânicas adequadas ao longo da vida útil do poço e estabelece que, para que a bainha de cimento seja considerada uma barreira válida, ela deve atingir uma resistência à compressão mínima de 50 psi, valor restrito ao contexto da validação de barreiras, e não a um critério amplamente aplicado em análises estruturais. Além disso, normas como as da API e da ISO não especificam valores mínimos para resistência à tração ou ao cisalhamento, grandezas

fundamentais para avaliar o risco de falha da bainha de cimento. Segundo Liu (2021), uma prática comum na indústria é exigir que o cimento atinja pelo menos 500 psi (3,5 MPa) de resistência à compressão em 24 horas para permitir a retomada da perfuração.

Na prática, grandes operadoras como a Petrobras, bem como empresas de cimentação como Halliburton, SLB e Baker Hughes, usualmente adotam abordagens que desconsideram a pressão de poros na análise estrutural da bainha de cimento. Por outro lado, empresas como a Curistec vêm desenvolvendo modelos mais avançados, que incorporam a poropressão por meio de *softwares* especializados. Apesar de sua robustez, essas ferramentas ainda enfrentam resistência à adoção em larga escala, devido à complexidade dos modelos e à exigência de um número elevado de parâmetros de entrada, o que pode limitar sua aplicabilidade em projetos convencionais.

É importante ressaltar, contudo, que o cimento é, por natureza, um material poroso, e essa característica influencia diretamente sua resposta estrutural, especialmente em ambientes com gradientes térmicos e pressões elevadas. A ausência da consideração do comportamento poroso nas práticas tradicionais representa uma limitação relevante, uma vez que pode comprometer a confiabilidade das análises estruturais da bainha de cimento. Diante desse cenário, torna-se essencial investigar se os efeitos do comportamento poroso exercem influência significativa sobre a resposta estrutural da bainha e se sua incorporação nos modelos contribui para avaliações mais precisas e seguras.

1.2. JUSTIFICATIVA

Nesse contexto, este trabalho justifica-se por quatro aspectos principais:

i) **Relevância da integridade estrutural da bainha de cimento**: sua falha pode comprometer a isolação entre zonas permeáveis, favorecer a migração de fluidos indesejados e prejudicar a segurança operacional do poço;

ii) **Influência do comportamento poroso na resposta mecânica do sistema**: a não consideração do comportamento poroso pode levar a uma estimativa imprecisa das tensões atuantes, impactando diretamente as análises de integridade estrutural e levando a decisões de projeto inadequadas;

iii) **Carência de modelos realistas no dimensionamento da bainha**: embora a modelagem termo-poroelástica já seja reconhecida na literatura, sua adoção prática ainda é limitada. O uso de soluções analíticas e numéricas verificadas

contribui para validar a aplicação da modelagem termo-poroelástica no dimensionamento da bainha de cimento em contextos de projeto;

iv) **Ausência de diretrizes normativas específicas**: as normas técnicas vigentes não estabelecem critérios claros sobre o modelo constitutivo a ser adotado no dimensionamento da bainha de cimento, o que evidencia a necessidade de estudos que fundamentem, tecnicamente, recomendações futuras para a indústria.

Dessa forma, este estudo busca preencher uma lacuna importante ao avaliar, de forma simples e fundamentada, a influência do comportamento poroso na análise da integridade estrutural da bainha de cimento, oferecendo uma contribuição técnica relevante para o aprimoramento de metodologias de projeto aplicadas à engenharia de poços.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência do comportamento poroso da bainha de cimento na distribuição de tensões do sistema revestimento-cimento-formação e na integridade estrutural da própria bainha, utilizando, para isso, uma relação constitutiva termo-poroelástica.

Para atingir o objetivo geral, espera-se cumprir os seguintes objetivos específicos:

i) Utilizar e adaptar um modelo matemático, baseado em um modelo físico termo-poroelástico, para representar o sistema revestimento–cimento–formação, com base em formulações existentes na literatura;
ii) Obter a solução analítica do modelo matemático para o caso termo-poroelástico, avaliando os efeitos de diferentes condições de confinamento e variações térmicas;
iii) Resolver o modelo matemático considerando o comportamento termoelástico, para o mesmo cenário de estudo, a fim de comparar os efeitos da presença ou ausência do comportamento poroso no estado de tensões;
iv) Avaliar a integridade estrutural da bainha de cimento com base nas soluções obtidas, utilizando critérios de falha por tração e cisalhamento; e
v) Realizar a modelagem numérica do modelo matemático nos casos termoelástico e termo-poroelástico, por meio do *software* Abaqus®, e comparar os resultados obtidos com aqueles derivados das soluções analíticas.

Ao atingir esses objetivos, este trabalho destacará a importância de considerar o comportamento poroso da bainha de cimento na análise de sua integridade estrutural em poços de petróleo, evidenciando como a porosidade influencia a distribuição de tensões. Além disso, este trabalho também evidenciará que, mesmo por meio de uma abordagem analítica simplificada, é possível incorporar os efeitos da porosidade no modelo e observar sua relevância nos resultados obtidos, contribuindo com subsídios valiosos para o dimensionamento inicial da bainha de cimento em projetos de poços.

Adicionalmente, a modelagem numérica desenvolvida com o apoio das soluções analíticas fornecerá uma base conceitual sólida para a realização de estudos mais avançados, que envolvam, por exemplo, a consideração de comportamentos não lineares dos materiais, presença de múltiplas bainhas e revestimentos, escoamentos em regime transiente, bem como aspectos geométricos mais realistas como descentralização e ovalização do revestimento. Tais análises, por sua complexidade, não são viáveis por meios puramente analíticos e demandam o uso de modelagens numéricas verificadas e fundamentadas, como a proposta neste trabalho.

1.4. METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada neste estudo é estruturada nas seguintes etapas:

i) **Formulação do modelo matemático** representativo do sistema revestimento-cimento-formação, considerando relações constitutivas termo-poroelástica e termoelástica;
ii) **Resolução analítica do modelo matemático**, com aplicação inicial da formulação termo-poroelástica e, posteriormente, da termoelástica, visando à obtenção da distribuição de tensões no sistema;
iii) **Avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento** com base nas distribuições de tensões obtidas pelas soluções analíticas, por meio da aplicação de critérios de falha por tração e cisalhamento em ambas as abordagens;
iv) **Comparação dos resultados obtidos** quanto à distribuição de tensões e à integridade estrutural da bainha nas abordagens termoelástica e termo-poroelástica; e
v) **Modelagem numérica do modelo matemático** no *software* Abaqus®, replicando os mesmos cenários analisados nas soluções analíticas para os casos termoelástico e termo-poroelástico, com o objetivo de verificar a consistência dos resultados numéricos.

Cabe destacar que, na etapa (ii), a sequência adotada para as análises - com a aplicação inicial da formulação termo-poroelástica, seguida da termoelástica – se justifica pela escolha do trabalho de referência da literatura, o qual apresenta de forma consolidada a formulação matemática e a solução analítica para o caso termo-poroelástico. Assim, o desenvolvimento inicial dos estudos analíticos na abordagem termo-poroelástica verifica os resultados obtidos por meio da replicação dos cenários propostos nesse estudo de referência. Em um segundo momento, a abordagem termoelástica é incorporada por meio da adoção do coeficiente de Biot igual a zero, o que permite uma comparação direta entre ambas as abordagens a partir de uma base previamente verificada, assegurando maior controle e confiabilidade nos resultados.

2. FORMULAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA REVESTIMENTO-CIMENTO-FORMAÇÃO

Nesta seção, apresenta-se a formulação do modelo matemático adotado para representar o comportamento mecânico do sistema composto por revestimento, bainha de cimento e formação rochosa de uma seção transversal de um poço vertical de petróleo. O objetivo é descrever, com base em fundamentos da elasticidade linear e da termo-poroelasticidade, como o sistema responde a variações térmicas e pressões internas, considerando-se os efeitos da poropressão nos domínios porosos (bainha de cimento e formação). Para isso, são detalhadas a caracterização física do problema, as hipóteses simplificadoras, as equações governantes envolvidas no equilíbrio mecânico e na resposta termo-poroelástica, além das condições de contorno e propriedades materiais adotadas para a análise.

2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO PROBLEMA

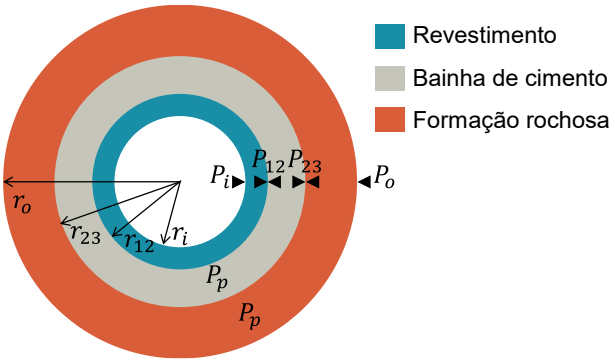
O modelo matemático formulado neste trabalho representa o sistema composto por revestimento, bainha de cimento e formação rochosa em um poço de petróleo, com análise realizada na seção transversal do poço. O sistema é idealizado como constituído por três domínios cilíndricos ocos e concêntricos:

- **Revestimento**: estrutura tubular de aço localizada na região interna, assumido com comportamento termoelástico;
- **Bainha de cimento**: camada intermediária entre o revestimento e a formação, modelada com comportamento termo-poroelástico; e
- **Formação rochosa**: meio geológico que envolve o poço, também com comportamento termo-poroelástico.

A formulação é construída em coordenadas cilíndricas, considerando simetria axial e estado plano de deformação. Essas suposições permitem desconsiderar variações ao longo do eixo longitudinal do poço (direção axial), assumindo-se deformações nulas nessa direção e simplificando a análise para o plano transversal.

A Figura 2.1 ilustra a representação esquemática do sistema, onde o revestimento, o cimento e a formação são modelados como cilindros ocos concêntricos.

Figura 2.1 – Representação da seção transversal de um poço composta pelo sistema revestimento-cimento-formação



Fonte: Autor (2025).

Na representação da Figura 2.1:

- P_i indica a pressão aplicada à parede interna do revestimento;
- P_o representa a pressão aplicada à parede externa da formação;
- P_{12} e P_{23} referem-se às pressões de contato entre o revestimento e o cimento, e entre o cimento e a formação, respectivamente; e
- P_p corresponde à poropressão considerada nos domínios porosos (cimento e formação).

Quanto às dimensões geométricas, tem-se:

- r_i: raio interno do revestimento;
- r_{12}: raio da interface revestimento/cimento;
- r_{23}: raio da interface cimento/formação; e
- r_o: raio externo da formação rochosa.

2.2. HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS

Para viabilizar a formulação e a resolução do modelo, são adotadas as seguintes hipóteses:

- Consideram-se deformações e deslocamentos pequenos, o que permite a linearização das equações e a aplicação da teoria da elasticidade linear;
- Todos os materiais envolvidos - revestimento, bainha de cimento e formação rochosa - são tratados como homogêneos e isotrópicos e perfeitamente aderidos;

- O problema é formulado em estado plano de deformação, desconsiderando-se variações ao longo do eixo do poço e concentrando a análise na seção transversal;
- O revestimento é modelado com comportamento termoelástico, enquanto o cimento e a formação rochosa adjacente são modelados como materiais termo-poroelásticos;
- A resposta mecânica é avaliada como estática, ou quase-estática, desconsiderando efeitos dinâmicos;
- Temperatura e poropressão são assumidas constantes ao longo do raio da seção analisada;
- As variações térmicas são consideradas a partir de campos de temperatura previamente definidos. Além disso, supõe-se a mesma variação para a toda a seção;
- A poropressão é imposta como condição de contorno, permitindo entrada ou saída de fluido nos nós conforme necessário para manter a pressão prescrita. Dessa forma, o escoamento de fluido no meio poroso não é modelado;
- A propriedade porosa dos materiais é considerada apenas por meio do coeficiente de Biot. Parâmetros como porosidade, permeabilidade, peso específico do fluido e módulo volumétrico do fluido nos poros não influenciam nos resultados em razão da prescrição da poropressão;
- O meio poroso é considerado totalmente saturado;
- Não são considerados efeitos químicos, reações de hidratação do cimento nem processos de degradação dos materiais ao longo do tempo;
- As forças de corpo são desconsideradas;
- As interfaces entre o revestimento, a bainha de cimento e a formação rochosa são consideradas perfeitamente aderidas; e
- O estudo considera que o poço já está construído, com o revestimento e a bainha de cimento devidamente assentados.

2.3. FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Esta subseção apresenta o conjunto de equações que descrevem o comportamento físico-mecânico do sistema analisado. Com base nas hipóteses previamente estabelecidas, são introduzidas as equações de equilíbrio do meio contínuo, as relações de compatibilidade

cinemática e as leis constitutivas que regem o comportamento termoelástico e termo-poroelástico dos materiais. A formulação está adaptada para coordenadas cilíndricas com simetria axial, refletindo a geometria e as condições reais do problema físico considerado.

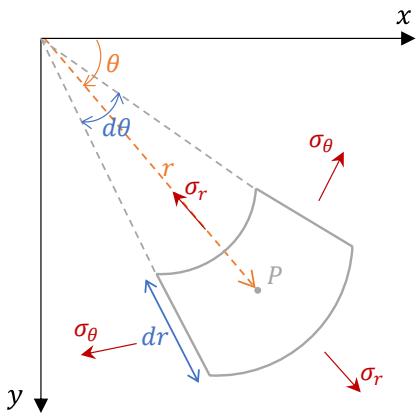
2.3.1. Equação de equilíbrio

Em regime quase-estático, assumindo simetria axial, ausência de forças de corpo e de tensões cisalhantes, o equilíbrio de um elemento infinitesimal em coordenadas cilíndricas reduz-se à seguinte equação diferencial na direção radial (Timoshenko e Goodier, 1970):

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \tag{2.1}$$

sendo σ_r a componente de tensão normal na direção radial, σ_θ a componente de tensão normal na direção tangencial, também chamada de tensão circunferencial, e r a coordenada radial no sistema cilíndrico. Esta equação é deduzida a partir do balanço de forças em um setor anular infinitesimal, levando-se em conta as variações espaciais das tensões normais no sistema cilíndrico. A Figura 2.2 ilustra o elemento diferencial adotado nesse tipo de análise.

Figura 2.2 – Representação esquemática de um elemento infinitesimal em coordenadas cilíndricas, sem tensões cisalhantes e sem forças de corpo



Fonte: Autor (2025).

2.3.2. Relações de compatibilidade cinemática

As equações que relacionam as componentes de deformação com os deslocamentos, conhecidas como equações de compatibilidade cinemática, em coordenadas cilíndricas e sob simetria axial, são (Timoshenko e Goodier, 1970):

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \qquad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \qquad \gamma_{r\theta} = 0, \tag{2.2}$$

em que ε_r é a componente da deformação normal na direção radial, ε_θ é a componente da deformação normal na direção tangencial, $\gamma_{r\theta}$ é a componente da deformação por cisalhamento no plano $r\theta$, que é nula pela simetria axial e u_r é o deslocamento na direção radial.

2.3.3. Relações constitutivas

No contexto da teoria de Biot, assume-se que, em meios porosos saturados, as deformações mecânicas ocorrem em resposta às tensões efetivas atuantes no esqueleto sólido. Dessa forma, as equações constitutivas devem ser formuladas em termos dessas tensões, que representam a parcela da tensão total efetivamente transmitida à estrutura do material. Para um meio termo-poroelástico, isotrópico e linearmente elástico, as relações constitutivas em coordenadas cilíndricas são expressas por (Detournay e Cheng, 1993):

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}[\sigma_r' - \nu(\sigma_\theta' + \sigma_z')] + \beta\tau$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta' - \nu(\sigma_r' + \sigma_z')] + \beta\tau \tag{2.3}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z' - \nu(\sigma_r' + \sigma_\theta')] + \beta\tau.$$

Nessas expressões, ε_r, ε_θ e ε_z correspondem às componentes radial, tangencial e axial da deformação; σ_r', σ_θ' e σ_z' são as tensões efetivas associadas a cada direção; E é o módulo de Young; ν, o coeficiente de Poisson; β, o coeficiente de expansão térmica linear; e τ, a variação de temperatura.

Assumindo a convenção em que tensões totais compressivas são negativas, as tensões efetivas relacionam-se às tensões totais por meio da equação clássica da teoria de Biot:

$$\sigma_i' = \sigma_i + \alpha P_p, \qquad \text{com } i = r, \theta, z \tag{2.4}$$

em que α é o coeficiente de Biot e P_p representa a pressão de poros. Nessa convenção, a poropressão atua no sentido de tornar as tensões totais mais trativas (menos compressivas), exigindo, portanto, a adição do termo poroelástico na definição da tensão efetiva.

Substituindo a Equação 2.4 nas expressões constitutivas da Equação 2.3 obtêm-se as equações constitutivas em função das tensões totais, nas quais os efeitos da poropressão são explicitamente incorporados:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}\left[\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z) + \alpha(1-2\nu)P_p\right] + \beta\tau$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}\left[\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z) + \alpha(1-2\nu)P_p\right] + \beta\tau \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) + \alpha(1-2\nu)P_p\right] + \beta\tau.$$

Dadas as condições de deformação plana, a relação constitutiva da Equação 2.5 torna-se:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E^*}\left[\sigma_r + \nu^*\sigma_\theta - \alpha^* P_p\right] + \beta^*\tau$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E^*}\left[\sigma_\theta - \nu^*\sigma_r + \alpha^* P_p\right] + \beta^*\tau \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_z \equiv 0,$$

com os seguintes coeficientes para condições de deformação plana:

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$$

$$\nu^* = \frac{\nu}{1-\nu}$$

$$\alpha^* = \frac{1-2\nu}{1-\nu}\alpha \tag{2.7}$$

$$\beta^* = (1+\nu)\beta.$$

Além disso, considerando as suposições feitas, tem-se $\varepsilon_{r\theta}$, ε_{rz}, $\varepsilon_{\theta z} = 0$. Ao expressar a tensão em função das deformações na Equação 2.6, considerando $\varepsilon_z \equiv 0$ e os coeficientes definidos na Equação 2.7, obtém-se:

$$\sigma_r = \frac{E^*}{1-\nu^{*2}}\left[\varepsilon_r + \nu^*\varepsilon_\theta - (1+\nu^*)\beta^*\tau\right] - \frac{1}{1-\nu^*}\alpha^* P_p$$

$$\sigma_\theta = \frac{E^*}{1-\nu^{*2}}\left[\nu^*\varepsilon_r + \varepsilon_\theta - (1+\nu^*)\beta^*\tau\right] - \frac{1}{1-\nu^*}\alpha^* P_p \tag{2.8}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha(1-2\nu)P_p - \beta E\tau.$$

E ao usar as relações de compatibilidade para coordenadas cilíndricas (Equação 2.2), é possível expressar a tensão radial e tangencial em termos de deslocamento:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E^*}{1-\nu^{*2}}\left[\frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu^*\frac{u_r}{r} - (1+\nu^*)\beta^*\tau\right] - \frac{1}{1-\nu^*}\alpha^* P_p \\ \sigma_\theta &= \frac{E^*}{1-\nu^{*2}}\left[\nu^*\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} - (1+\nu^*)\beta^*\tau\right] - \frac{1}{1-\nu^*}\alpha^* P_p.\end{aligned} \tag{2.9}$$

No caso de um sólido termoelástico, as mesmas expressões podem ser utilizadas definindo o coeficiente de Biot igual a zero.

2.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO E CONTINUIDADE

As condições de contorno e continuidade aplicadas ao modelo são:

- Continuidade de deslocamentos e tensões entre revestimento, cimento e formação;
- Poropressão e temperatura prescritas em cada domínio como campos constantes;
- Condição de contorno na face interna do revestimento: tensão radial prescrita; e
- Condição de contorno na face externa da formação: tensão radial prescrita (geralmente correspondente à pressão de confinamento).

O modelo estabelecido nesta seção serve de base para a obtenção de soluções analíticas (Capítulo 3) e para a modelagem numérica no *software* Abaqus® (Capítulo 4).

3. SOLUÇÃO ANALÍTICA DO MODELO MATEMÁTICO ADOTADO

Esta seção apresenta a solução analítica do modelo matemático desenvolvido para o sistema composto por revestimento, bainha de cimento e formação rochosa, considerando carregamentos térmicos e mecânicos. O objetivo é obter expressões analíticas para o campo de deslocamentos e para as tensões nos três domínios do sistema, a fim de avaliar sua resposta estrutural e verificar a integridade da bainha de cimento.

A formulação é conduzida em coordenadas cilíndricas com simetria axial e estado plano de deformação. A abordagem parte da solução clássica do problema de cilindro espesso submetido a pressões interna e externa, como forma de ilustrar o comportamento de um único domínio homogêneo. Em seguida, a análise é estendida para um sistema com três cilindros concêntricos, representando o revestimento, a bainha de cimento e a formação rochosa.

Para cada domínio, a distribuição de deslocamentos radiais é obtida a partir da equação de equilíbrio e das relações constitutivas em regime termoelástico ou termo-poroelástico, conforme o material. As constantes de integração são determinadas com base nas condições de contorno externas e nas condições de continuidade de deslocamentos e tensões nas interfaces entre os domínios.

Com isso, obtêm-se soluções fechadas para os campos de tensão e deslocamento ao longo da seção transversal do poço, que serão posteriormente utilizadas na avaliação da integridade da bainha de cimento e na comparação com os resultados obtidos via modelagem numérica.

3.1. SOLUÇÃO PARA CILINDRO ÚNICO SOB PRESSÕES INTERNA E EXTERNA

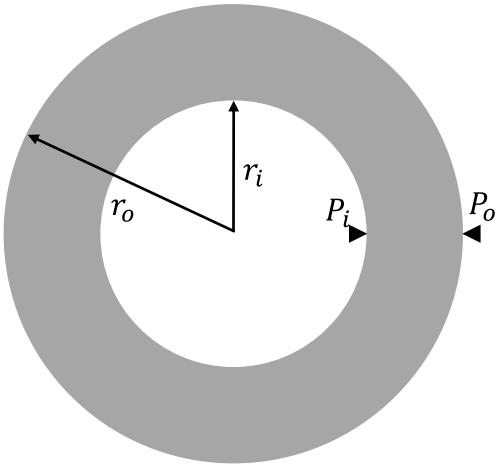
Nesta subseção, é analisado o caso clássico de um cilindro espesso, homogêneo, isotrópico e sujeito a pressões internas e externas. A solução aqui desenvolvida é válida tanto para materiais com comportamento termoelástico quanto termo-poroelástico. No caso termoelástico, basta considerar o coeficiente de Biot $\alpha = 0$, de modo que a contribuição da poropressão nas tensões totais seja anulada.

A formulação elástica clássica para cilindros espessos pode ser encontrada em Timoshenko e Goodier (1970), sendo amplamente utilizada como base para análises estruturais em meios contínuos com simetria cilíndrica. Para a generalização termo-poroelástica, adotam-se os princípios da termoelasticidade, conforme discutido por Nowacki (1986), e a teoria de Biot para meios porosos saturados, conforme apresentado por Detournay e Cheng (1993),

Coussy (2004) e Wang (2000). Essa abordagem permite incorporar os efeitos acoplados da poropressão e da variação de temperatura nas equações de equilíbrio mecânico.

Considera-se um cilindro de raio interno r_i e raio externo r_o, submetido à pressão P_i na superfície interna e à pressão P_o na superfície externa (Figura 3.1). Assume-se que o carregamento possui simetria axial, a deformação ocorre em regime plano (sem variação ao longo do eixo do cilindro) e que não há forças de corpo.

Figura 3.1 – Modelo de um cilindro de raio interno r_i e raio externo r_o, submetido à pressão P_i na superfície interna e à pressão P_o na superfície externa



Fonte: Autor (2025).

Substituindo a Equação 2.9 na equação de equilíbrio (Equação 2.1), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial(ru_r)}{\partial r}\right] = (1+\nu^*)\beta^*\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{1+\nu^*}{E^*}\alpha^*\frac{\partial P_p}{\partial r}. \tag{3.1}$$

A solução da equação diferencial anterior é da forma:

$$u_r = u = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{1}{r}(1+\nu^*)\beta^*\int \tau r\, dr + \frac{1}{r}\frac{1+\nu^*}{E^*}\alpha^*\int Pr\, dr, \tag{3.2}$$

onde C_1 e C_2 são as constantes de integração. Se a variação de temperatura no poço for uniforme, tal que $\frac{\partial \tau}{\partial r} = 0$ e $\tau = \Delta T$, e a pressão de poros também for uniforme em todo o domínio do cimento e da formação, tal que $\frac{\partial P_p}{\partial r} = 0$, a Equação 3.1 diferencial torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial(ru_r)}{\partial r}\right] = 0 \tag{3.3}$$

e sua solução apresentada na Equação 3.2 reduz-se a:

$$u_r = u = C_1 r + \frac{C_2}{r}. \tag{3.4}$$

Substituindo a solução da Equação 3.4 para o deslocamento nas expressões de tensão da Equação 2.9, obtém-se:

$$\sigma_r = \frac{E^*}{1-\nu^*}C_1 - \frac{E^*}{1+\nu^*}\frac{C_2}{r^2} - \frac{E^*}{1-\nu^*}\beta^*\Delta T - \frac{1}{1-\nu^*}\alpha^* P_p$$
$$\sigma_\theta = \frac{E^*}{1-\nu^*}C_1 + \frac{E^*}{1+\nu^*}\frac{C_2}{r^2} - \frac{E^*}{1-\nu^*}\beta^*\Delta T - \frac{1}{1-\nu^*}\alpha^* P_p. \tag{3.5}$$

As constantes de integração C_1 e C_2 são determinadas pelas condições de contorno:

$$\sigma_r|_{r=r_i} = -P_i$$
$$\sigma_r|_{r=r_o} = -P_o. \tag{3.6}$$

Dessa forma, as constantes de integração são, portanto:

$$C_1 = \frac{1-\nu^*}{E^*}\frac{1}{r_o^2 - r_i^2}(r_i^2 P_i - r_o^2 P_o) + \beta^*\Delta T + \frac{1}{E^*}\alpha^* P_p$$
$$C_2 = \frac{1+\nu^*}{E^*}\frac{r_i^2 r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}(P_i - P_o). \tag{3.7}$$

Com isso, obtém-se a expressão analítica que descreve a distribuição das tensões nas direções radial, tangencial e vertical ao longo da espessura do cilindro:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\left(1 - \frac{r_o^2}{r^2}\right)P_i - \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}\left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right)P_o$$
$$\sigma_\theta = \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\left(1 + \frac{r_o^2}{r^2}\right)P_i - \frac{r_o^2}{r_o^2 - r_i^2}\left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right)P_o \tag{3.8}$$
$$\sigma_z = \frac{2\nu}{r_o^2 - r_i^2}(r_i^2 P_i - r_o^2 P_o) - \alpha(1-2\nu)P_p - \beta E\Delta T.$$

As expressões resultantes para as tensões radial e tangencial assumem a mesma forma funcional da solução clássica de Lamé para cilindros espessos submetidos a pressões interna e externa (Timoshenko e Goodier, 1970). Por outro lado, a tensão vertical, conserva os efeitos da poropressão e da variação térmica.

Por fim, as tensões efetivas associadas ao problema podem ser obtidas a partir das tensões totais utilizando a relação apresentada na Equação 2.4, segundo a teoria de Biot.

Por fim, substituindo as soluções de C_1 e C_2 na solução de deslocamento da Equação 3.4, tem-se:

$$u = \frac{r}{E^*(r_o^2 - r_i^2)}\left[\left((1-\nu^*)r_i^2 + (1+\nu^*)\frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}\right)P_i - \left((1-\nu^*)r_o^2 + (1+\nu^*)\frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}\right)P_o\right] + \beta^*\Delta T\, r + \frac{1}{E^*}\alpha^* P_p\, r. \tag{3.9}$$

As Equações descritas na Equação 3.8 e 3.9 permitem descrever o campo de tensão efetiva e deslocamento, respectivamente, no cilindro. Essas soluções serão base para a descrição da solução analítica no caso composto por três cilindros concêntricos, a ser abordado na próxima subseção.

3.2. SOLUÇÃO PARA TRÊS CILINDROS CONCÊNTRICOS: REVESTIMENTO, CIMENTO E FORMAÇÃO

Considerando agora o sistema completo de três cilindros vazados concêntricos representando o revestimento, a bainha de cimento e a formação rochosa, a solução analítica envolve a aplicação das condições de contorno e de continuidade nos limites entre os domínios.

A pressão P_i é aplicada na parede interna do revestimento, enquanto P_o é aplicada na parede externa da formação. As pressões de contato P_{12} e P_{23} correspondem às interfaces entre revestimento-cimento e cimento-formação, respectivamente. As interfaces são consideradas perfeitamente aderidas, o que implica continuidade de deslocamentos radiais entre os domínios.

A solução é conduzida em etapas, iniciando pela imposição de continuidade de deslocamentos na interface entre o cimento e a formação, ou seja:

$$u_2|_{r=r_{23}} = u_3|_{r=r_{23}}. \tag{3.10}$$

Com base na Equação 3.9, a expressão para o deslocamento radial ao longo da região correspondente à bainha de cimento em $r = r_{23}$ é dada por:

$$u_2|_{r=r_{23}} = \frac{r_{23}}{E_2^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)}\{2r_{12}^2 P_{12} - [(1-\nu_2^*)r_{23}^2 + (1+\nu_2^*)r_{12}^2]P_{23}\} + \beta_2^* \Delta T\, r_{23} + \frac{1}{E_2^*}\alpha_2^* P_p r_{23} \tag{3.11}$$

e os deslocamentos radiais para a região da formação em $r = r_{23}$:

$$u_3|_{r=r_{23}} = \frac{r_{23}}{E_3^*(r_o^2 - r_{23}^2)}\{[(1-\nu_3^*)r_{23}^2 + (1-\nu_3^*)r_o^2]P_{23} - 2r_o^2 P_o\} + \beta_3^* \Delta T\, r_{23} + \frac{1}{E_3^*}\alpha_3^* P_p\, r_{23}. \tag{3.12}$$

Ressalta-se que, na equação anterior, r_o corresponde ao raio externo da formação.

Substituindo as Equações 3.11 e 3.12 na Equação 3.10, obtém-se:

$$\begin{aligned} &E_3^*(r_o^2 - r_{23}^2)2r_{12}^2 P_{12} + E_2^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)2r_0^2 P_0 \\ &\quad + E_2^* E_3^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)(r_o^2 - r_{12}^2)(\beta_2^* - \beta_3^*)\Delta T \\ &\quad + (r_{23}^2 - r_{12}^2)(r_o^2 - r_{23}^2)(E_3^*\alpha_2^* - E_2^*\alpha_3^*)P_p \\ &\quad = \{E_2^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)[(1-\nu_3^*)r_{23}^2 + (1+\nu_3^*)r_o^2] \\ &\quad + E_3^*(r_o^2 - r_{23}^2)[(1-\nu_2^*)r_{23}^2 + (1+\nu_2^*)r_{12}^2]\}P_{23}. \end{aligned} \tag{3.13}$$

Simplificando a expressão, tem-se:

$$P_{23} = I_{23}P_{12} + O_{23}P_o + A_{23}\Delta T + B_{23}P_p, \tag{3.14}$$

onde os coeficientes I_{23}, O_{23}, A_{23} e B_{23} são definidos como:

$$\begin{aligned} I_{23} &= E_3^*(r_0^2 - r_{23}^2)2r_{12}^2/C_{23} \\ O_{23} &= E_2^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)2r_0^2/C_{23} \\ A_{23} &= E_2^* E_3^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)(r_0^2 - r_{23}^2)(\beta_2^* - \beta_3^*)/C_{23} \\ B_{23} &= (r_{23}^2 - r_{12}^2)(r_0^2 - r_{23}^2)(E_3^*\alpha_2^* - E_2^*\alpha_3^*)/C_{23} \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned} C_{23} = {} & E_3^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)[(1-\nu_3^*)r_{23}^2 + (1+\nu_3^*)r_0^2] \\ & + E_3^*(r_0^2 - r_{23}^2)[(1-\nu_2^*)r_{23}^2 + (1+\nu_2^*)r_{12}^2]. \end{aligned}$$

Usando a continuidade dos deslocamentos na interface entre o revestimento e o cimento, obtém-se a expressão para P_{12}:

$$P_{12} = I_{12}P_i + O_{12}P_{23} + A_{12}\Delta T + B_{12}P_p, \tag{3.16}$$

onde os coeficientes I_{12}, O_{12}, A_{12} e B_{12} são definidos como:

$$\begin{aligned} I_{12} &= E_2^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)2r_i^2/C_{12} \\ O_{12} &= E_1^*(r_{12}^2 - r_i^2)2r_{23}^2/C_{12} \\ A_{12} &= E_1^*E_2^*(r_{12}^2 - r_i^2)(r_{23}^2 - r_{12}^2)(\beta_1^* - \beta_1^*)/C_{12} \\ B_{12} &= (r_{12}^2 - r_i^2)(r_{23}^2 - r_{12}^2)(E_2^*\alpha_1^* - E_1^*\alpha_2^*)/C_{12} \end{aligned} \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned} C_{12} = {} & E_1^*(r_{12}^2 - r_i^2)[(1 - \nu_2^*)r_{12}^2 + (1 + \nu_2^*)r_{23}^2] \\ & + E_2^*(r_{23}^2 - r_{12}^2)[(1 - \nu_1^*)r_{12}^2 + (1 + \nu_1^*)r_i^2]. \end{aligned}$$

Ao resolver o sistema formado pelas Equações 3.14 e 3.16, obtém-se:

$$\begin{aligned} P_{12} = {} & \frac{1}{1 - O_{12}I_{23}}\big[I_{12}P_i + O_{12}O_{23}P_o + (A_{12} + O_{12}A_{23})\Delta T \\ & + (B_{12} + O_{12}B_{23})P_p\big] \\ P_{23} = {} & \frac{1}{1 - O_{12}I_{23}}\big[I_{23}I_{12}P_i + O_{23}P_o + (A_{23} + I_{23}A_{12})\Delta T \\ & + (B_{23} + I_{23}B_{12})P_p\big]. \end{aligned} \tag{3.18}$$

Utilizando os valores calculados das pressões de contato P_{12} e P_{23} nas Equações 3.8 e 3.9, obtém-se os perfis de tensão e de deslocamento da seção transversal do poço. Esses perfis correspondem à solução analítica do modelo matemático proposto no Capítulo 2 para o sistema composto por revestimento, cimento e formação, fornecendo uma representação precisa da distribuição de esforços internos e deslocamentos radiais resultantes dos carregamentos mecânicos e térmicos impostos.

4. MODELAGEM NUMÉRICA DO SISTEMA REVESTIMENTO-CIMENTO-FORMAÇÃO

Esta seção apresenta a modelagem numérica do sistema composto por revestimento, bainha de cimento e formação rochosa, desenvolvida com o uso do *software* Abaqus®. O objetivo principal é resolver numericamente o modelo matemático proposto no Capítulo 2 para obter os campos de deslocamentos e tensões nos três domínios do sistema, sob as mesmas condições térmicas e mecânicas consideradas na solução analítica.

A adoção de uma abordagem numérica para o mesmo problema tem como propósito estabelecer uma base metodológica inicial de modelagem numérica termo-poroelástica, que possa ser expandida em trabalhos futuros com a incorporação de geometrias não convencionais, propriedades materiais não lineares e efeitos físicos adicionais de difícil representação em abordagens analíticas, de modo a tornar o modelo mais aderente às condições operacionais reais.

Para garantir uma comparação consistente entre as soluções analíticas e numéricas, todas as hipóteses físicas, propriedades dos materiais e condições de contorno aplicadas no modelo matemático são replicadas no modelo numérico. A partir dessa comparação, busca-se verificar a compatibilidade entre as soluções e avaliar o grau de concordância dos resultados, especialmente no que se refere à distribuição de tensões e deslocamentos na bainha de cimento.

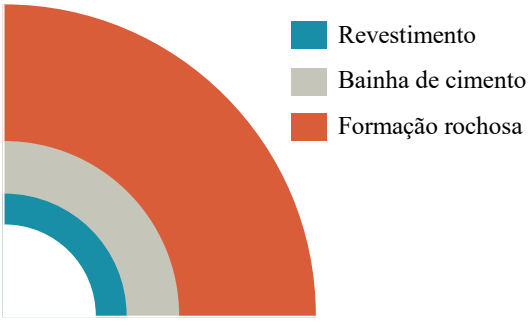
4.1. GEOMETRIA E DOMÍNIOS DO MODELO

O modelo numérico utilizado representa uma seção transversal de um poço de petróleo, composta por três domínios concêntricos: revestimento, bainha de cimento e formação rochosa. A geometria adotada é construída em coordenadas cilíndricas bidimensionais com simetria axial, permitindo a idealização do sistema como uma configuração em estado plano de deformação.

Cada domínio é definido com base nos raios internos e externos das interfaces entre os materiais. Seus valores são os mesmos utilizados na solução analítica.

A análise é restrita ao quadrante superior direito da seção, conforme ilustrado na Figura 4.1, aproveitando a simetria geométrica e de carregamento para reduzir o custo computacional. Essa escolha não compromete a generalidade dos resultados, uma vez que o problema possui simetria axial e as condições de contorno são aplicadas de forma compatível com essa simetria.

Figura 4.1 – Representação da geometria adotada para o modelo numérico



Fonte: Autor (2025).

A geometria é construída no Abaqus/CAE, sendo posteriormente associada aos conjuntos e superfícies de interesse para a aplicação de propriedades materiais, condições de contorno e malha.

4.2. PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

O revestimento é modelado como um material termoelástico, enquanto a bainha de cimento e a formação rochosa são modeladas como materiais termo-poroelásticos. Dessa forma, para as três regiões do domínio são definidas as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) e térmica (coeficiente de expansão térmica). No entanto, para as regiões da bainha de cimento e formação rochosa são especificados também: razão de vazios, permeabilidade, peso específico do fluido nos poros, módulo volumétrico dos grãos sólidos e o módulo volumétrico do fluido nos poros.

Conforme observado nos dois capítulos anteriores, nenhum dos parâmetros porosos citados são explicitamente utilizados na formulação do modelo matemático. No entanto, para a modelagem numérica do problema no Abaqus® eles são necessários. No caso dos parâmetros de razão de vazios, permeabilidade, peso específico do fluido nos poros e módulo volumétrico do fluido nos poros, seus valores não vão interferir nos resultados da modelagem numérica, tendo em vista que a poropressão é prescrita como condição de contorno ao longo dos passos da análise. Assim, o problema de fluxo de fluido nos poros não é resolvido. Já com relação ao módulo volumétrico dos grãos sólidos, ele é utilizado para representar o coeficiente de Biot, que não pode ser especificado diretamente no *software*.

O módulo volumétrico do material (K) se relaciona com o módulo de Young (E) e a razão de Poisson (ν) por:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \tag{4.1}$$

Conforme Altmann (2010), o coeficiente de Biot (α) pode ser expresso como:

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_g}, \tag{4.2}$$

em que K_g é o módulo volumétrico dos grãos sólidos. Assim, K_g pode ser relacionado com o coeficiente de Biot e as demais propriedades mecânicas da seguinte forma:

$$K_g = \frac{K}{1-\alpha} = \frac{E}{3(1-2\nu)(1-\alpha)}. \tag{4.3}$$

4.3. MALHA E TIPO DE ELEMENTOS FINITOS

A discretização do modelo é realizada por meio do método dos elementos finitos, utilizando a malha de elementos definida no Abaqus/CAE. A escolha do tipo de elemento e o refinamento da malha são estabelecidos a partir de um estudo de convergência, descrito na Subseção 6.3.2 do Capítulo 6, visando garantir a estabilidade numérica e a acurácia dos resultados, ao mesmo tempo em que se busca eficiência computacional.

Para a representação do comportamento termoelástico, adotam-se elementos finitos do tipo CPE8R, que correspondem a elementos quadrilaterais de oito nós, formulados para estado plano de deformação, com interpolação biquadrática e integração reduzida. No caso dos materiais termo-poroelásticos, são utilizados elementos do tipo CPE8RP, que mantêm a interpolação biquadrática para os deslocamentos, mas adotam interpolação bilinear para a poropressão, também com integração reduzida. Em ambos os casos, a nomenclatura segue os padrões definidos no Abaqus®. Cabe destacar que, para esses elementos, a temperatura não é tratada como um grau de liberdade do modelo, sendo prescrita como um campo escalar uniforme. Dessa forma, as variações térmicas são consideradas como condições de carregamento externas e não como variáveis internas ao elemento finito.

O refinamento da malha de elementos finitos é mais concentrado nas regiões próximas às interfaces entre os materiais, onde se espera maior variação de gradientes de tensões e deslocamentos. Nas regiões mais afastadas, como o domínio da formação rochosa externa, é

adotado um tamanho de elemento maior, a fim de reduzir o custo computacional sem comprometer a precisão dos resultados.

4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS

As condições de contorno adotadas na modelagem numérica são definidas com base nas hipóteses assumidas na formulação do modelo matemático descritos no Capítulo 2 e respeitam a simetria axial do problema. O objetivo é reproduzir, da forma mais fiel possível, as mesmas condições da solução analítica, permitindo uma comparação direta entre os resultados.

Para aproveitar a simetria geométrica e de carregamento, são aplicadas restrições nos contornos da geometria de 1/4 de seção:

- **No eixo de simetria horizontal (base do modelo)**: restringe-se o deslocamento vertical ($u_y = 0$), permitindo apenas deslocamentos horizontais;
- **No eixo de simetria vertical (lado esquerdo do modelo)**: restringe-se o deslocamento horizontal ($u_x = 0$), permitindo apenas deslocamentos verticais.

Essas condições impõem que os deslocamentos sejam consistentes com a continuidade e simetria esperadas do modelo completo.

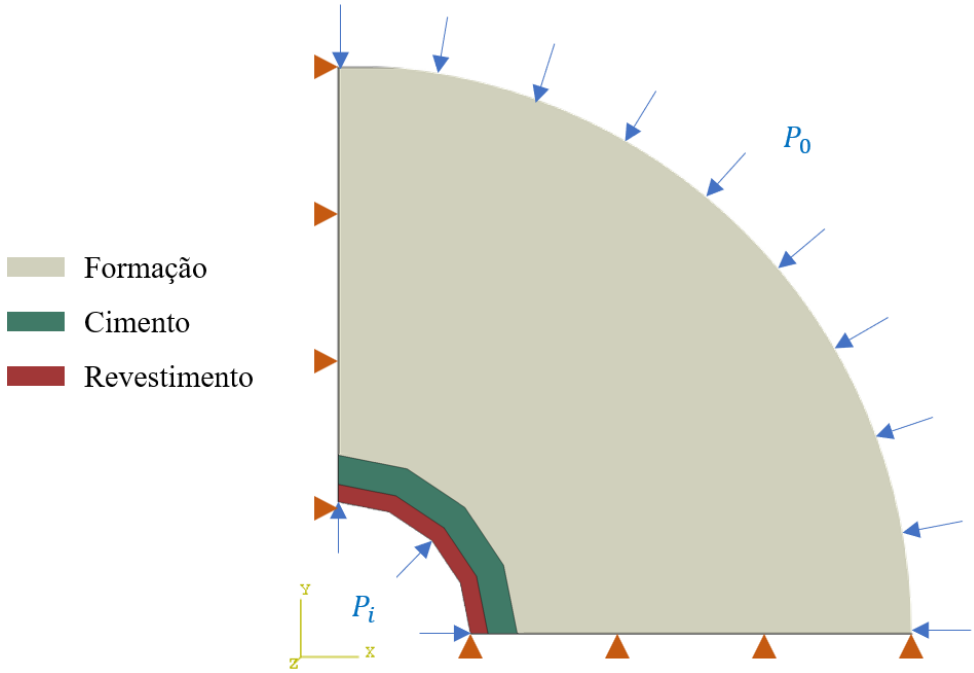
Em relação aos carregamentos aplicados:

- **No interior do revestimento (face interna)**, é aplicada uma pressão interna uniforme P_i, perpendicular à superfície;
- **Na superfície externa da formação**, é aplicada uma pressão externa P_O, também perpendicular à superfície.

Nas interfaces entre os domínios, o contato entre os materiais é considerado perfeitamente aderido, o que implica continuidade dos deslocamentos e transmissão total de esforços entre os domínios.

A Figura 4.2 ilustra as restrições de contorno e carregamentos utilizadas no modelo numérico.

Figura 4.2 – Representação das restrições de contorno e carregamentos utilizadas no modelo numérico



Fonte: Autor (2025).

As condições térmicas são aplicadas por meio da prescrição de campos de temperatura uniformes e estacionários em cada domínio. Cada passo da análise representa um evento operacional distinto, sendo o campo térmico considerado constante ao longo de cada etapa. Assume-se que, para cada evento, o sistema atinge uma condição térmica estacionária antes da avaliação mecânica, a qual é conduzida em regime quase-estático.

As pressões de poros são impostas como condições de contorno, definidas em cada domínio ao longo dos passos da análise, sem resolução do fluxo de fluido, caracterizando uma formulação não drenada. Dessa forma, o modelo representa a resposta estrutural sob o efeito das pressões nos poros prescritas, em conformidade com a formulação teórica previamente apresentada.

No caso específico da bainha de cimento, assume-se que o material se encontra no estado endurecido e estabilizado, sem a presença de tensões residuais decorrentes do processo de transição do estado fluido para o estado sólido. Assim, o estado inicial de tensões é considerado nulo, sendo as tensões desenvolvidas exclusivamente em resposta à aplicação das pressões P_i (na parede interna do revestimento) e P_o (na parede externa da formação), conforme os carregamentos definidos na modelagem. Além disso, impõe-se uma temperatura uniforme, correspondente ao valor da etapa inicial da simulação, e uma pressão de poros constante e prescrita.

5. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DA BAINHA DE CIMENTO

A avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento é um aspecto essencial no projeto e operação de poços de petróleo. A ruptura dessa estrutura pode comprometer o isolamento zonal, ocasionar migração de fluidos entre formações e comprometer a segurança operacional do poço. Para estimar o risco de falha da bainha sob diferentes condições de carregamento, é necessário adotar critérios de resistência que relacionem o estado de tensões atuante à capacidade resistente do material.

Neste trabalho, são considerados dois modos principais de falha estrutural da bainha de cimento: tração e cisalhamento, que são particularmente relevantes para materiais frágeis como o cimento. A ruptura por tração é verificada diretamente a partir da comparação entre as tensões principais efetivas (radial, tangencial ou vertical) e a resistência à tração do cimento. Já o modo cisalhante é avaliado a partir de critérios clássicos que consideram o efeito das tensões desviatórias no material. Neste estudo, são empregados dois critérios amplamente discutidos na literatura para a avaliação da falha estrutural cisalhante da bainha de cimento: o critério de Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776) e o critério de Mogi-Coulomb (Mogi, 1971; Al-Ajmi e Zimmerman, 2005).

5.1. CRITÉRIO DE FALHA POR TRAÇÃO

A falha estrutural por tração é uma das formas mais comuns de ruptura em materiais frágeis, como o cimento endurecido, e ocorre quando a tensão normal em alguma direção principal ultrapassa a resistência à tração do material.

No caso específico de poços de petróleo, a avaliação da falha estrutural por tração na bainha de cimento é de particular relevância. O cimento endurecido é um material com baixa resistência à tração em comparação à compressão, e diversos eventos operacionais podem induzir estados tensionais trativos em regiões localizadas da bainha. Situações como aquecimento súbito durante a produção, acidificação, pressurização durante testes ou até a contração térmica durante o *shut-in* podem levar a rupturas por tração (Goodwin e Crook, 1992).

Neste trabalho, considera-se que a falha estrutural por tração ocorre quando qualquer uma das tensões principais efetivas - radial (σ'_r), tangencial (σ'_θ) ou vertical (σ'_z) - atinge ou

ultrapassa a resistência à tração do cimento, denotada por σ_t. Assim, o critério de ruptura por tração pode ser expresso como:

$$\max(\sigma'_r, \sigma'_\theta, \sigma'_z) \geq \sigma_t \, . \tag{5.1}$$

A verificação é realizada com base nas tensões efetivas porque, conforme discutido por Coussy (2004) e Detournay e Cheng (1993), é a tensão efetiva que representa o estado real de carregamento sobre o esqueleto sólido em materiais porosos. A poropressão contribui apenas com uma componente hidrostática e não deve ser considerada na comparação direta com os parâmetros de resistência do material sólido.

5.2. CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB

Dentre os diversos critérios de falha estrutural por cisalhamento aplicáveis a materiais frágeis, como o cimento, o de Mohr-Coulomb é um dos mais amplamente utilizados na prática (Al-Ajmi, 2006). Esse critério combina a condição de Coulomb (1776), que descreve a resistência ao cisalhamento em função da coesão e ângulo de atrito interno, com a hipótese de Mohr, segundo a qual a ruptura depende exclusivamente das tensões principais máxima e mínima atuantes no ponto material.

Para avaliar se um ponto no cimento está próximo da falha segundo Mohr-Coulomb, verifica-se se o estado de tensão naquele ponto atinge a envoltória linear definida por:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi, \tag{5.2}$$

em que τ é a tensão de cisalhamento na superfície de falha, σ é a tensão normal agindo nessa mesma superfície, c representa a coesão e $\tan(\phi)$ é o coeficiente de atrito (com φ sendo o ângulo de atrito interno do material). Em termos práticos, essa equação define uma envoltória de resistência linear no plano $\tau \times \sigma$, acima da qual ocorre falha.

Com base nisso, é possível definir uma função f_{MC} para determinar a falha de cisalhamento de acordo com o critério de Mohr-Coulomb:

$$f_{MC} = c \cos \phi + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi - \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3), \tag{5.3}$$

em que σ'_1 é a tensão principal máxima efetiva e σ'_3 é a tensão principal mínima efetiva. A falha por cisalhamento ocorrerá quando $f_{MC} \leq 0$.

Para um poço sujeito a condições de contorno invariante na direção tangencial e considerando as condições de deformação plana, as tensões principais máxima e mínima podem ser definidas usando as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \sigma_1' &= \max(\sigma_r', \sigma_\theta', \sigma_z') \\ \sigma_3' &= \min(\sigma_r', \sigma_\theta', \sigma_z'), \end{aligned} \tag{5.4}$$

onde σ_r' é a tensão efetiva radial, σ_θ' é a tensão efetiva tangencial e σ_z' é a tensão efetiva vertical.

5.3. CRITÉRIO DE MOGI-COULOMB

Apesar da ampla aplicação do critério de Mohr-Coulomb, este modelo assume, de forma implícita, que a tensão principal intermediária (σ_2) não exerce influência significativa sobre a resistência do material. No entanto, diversos estudos experimentais, como os de Vernik e Zoback (1992), indicam que critérios que consideram a ação de σ_2 podem representar de forma mais realista o comportamento de materiais frágeis, como rochas e cimentos endurecidos.

Nesse contexto, Al-Ajmi e Zimmerman (2005) propuseram o critério de Mogi-Coulomb, uma extensão do critério de Mogi (1971), que incorpora os conceitos do critério de Mohr-Coulomb. Esse modelo considera a influência da tensão intermediária e oferece uma descrição mais representativa da falha sob estados triaxiais verdadeiros, sendo particularmente adequado para o estudo de materiais frágeis com comportamento mecânico não linear.

O critério de Mogi-Coulomb define a envoltória de ruptura como uma relação linear entre a tensão de cisalhamento octaédrica (τ_{oct}) e a tensão média das tensões principais máxima e mínima ($\sigma_{m,2}$), conforme expressa na seguinte equação:

$$\tau_{\text{oct}} = a + b\sigma_{m,2}, \tag{5.5}$$

em que τ_{oct} representa a tensão de cisalhamento octaédrica limite para que não ocorra falha, e $\sigma_{m,2}$ é definida por:

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}. \tag{5.6}$$

Ressalta-se que, assim como no critério de Mohr-Coulomb, a análise é conduzida com base nas tensões efetivas, por representarem o esforço efetivamente transmitido ao esqueleto sólido do meio poroso.

Segundo Al-Ajmi e Zimmerman (2005), os parâmetros a e b podem ser relacionados à coesão c e ao ângulo de atrito ϕ do critério de Mohr-Coulomb sob a hipótese de que a resistência ao cisalhamento octaédrico segue uma envoltória linear no plano $\tau_{\text{oct}} \times \sigma_{m,2}$. Essa aproximação pressupõe uma distribuição simétrica entre as tensões principais, o que permite a dedução analítica dos parâmetros a e b:

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \cos\phi$$
$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin\phi. \tag{5.7}$$

A tensão de cisalhamento octaédrica para um estado de tensões efetivas é obtida por:

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2}. \tag{5.8}$$

Com base nessa definição, pode-se estabelecer a função de falha do critério de Mogi-Coulomb:

$$f_{MG} = a + b\sigma_{m,2} - \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2}. \tag{5.9}$$

Assim, a falha por cisalhamento ocorrerá quando $f_{MG} \leq 0$.

Neste trabalho, embora a literatura recomende predominantemente a adoção do critério de Mogi-Coulomb, o critério de Mohr-Coulomb também é empregado com o propósito de comparação. A utilização de ambos os critérios visa permitir uma análise mais abrangente da integridade estrutural da bainha de cimento, evidenciando as diferenças nas previsões de falha quando a tensão principal intermediária é ou não considerada.

6. RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação da solução analítica e modelagem numérica apresentadas para a avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento em poços verticais de petróleo.

Inicialmente, são apresentados os dados do cenário de estudo adotado como base para as análises, incluindo as propriedades dos materiais, condições de contorno e carregamentos aplicados. Em seguida, são discutidos os resultados obtidos por meio da solução analítica do modelo matemático proposto, considerando tanto o comportamento termo-poroelástico quanto a condição termoelástica (com o coeficiente de Biot igual a zero), com o intuito de evidenciar os efeitos do comportamento poroso sobre a distribuição de tensões no sistema.

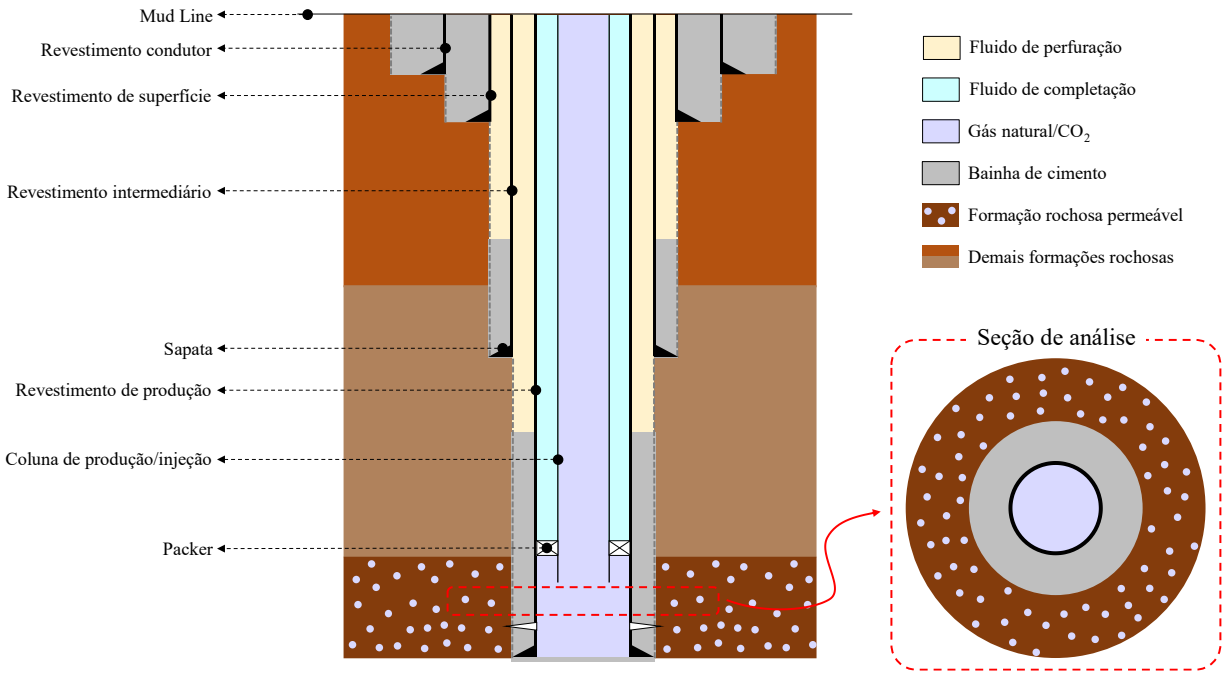
Posteriormente, realiza-se uma avaliação da integridade estrutural da bainha com base nos critérios de falha adotados, considerando os modos de ruptura por tração e cisalhamento, conforme discutido no Capítulo 5. Essa avaliação é conduzida a partir dos resultados da solução analítica, permitindo identificar regiões críticas da bainha de cimento.

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos com a modelagem numérica realizada no *software* Abaqus®, incluindo o estudo de refinamento de malha e a estratégia de simplificação na condição de carregamento inicial aplicado sobre a bainha de cimento. Por fim, realiza-se a comparação entre os resultados analíticos e numéricos, com o objetivo de verificar a modelagem realizada e discutir os resultados encontrados.

6.1. CENÁRIO DE ESTUDO ADOTADO

O cenário de carregamento adotado neste trabalho é inspirado no estudo de Joulin *et al.* (2022), o qual considera eventos operacionais representativos das condições encontradas em poços de produção de gás e com posterior conversão para poço de armazenamento de CO_2. Para contextualizar o cenário fictício, os autores assumem a seleção de uma seção transversal do poço situada em uma profundidade estratégica, onde há apenas um revestimento e a bainha de cimento está em contato direto com uma formação rochosa permeável. A Figura 6.1 apresenta uma representação esquemática do poço e da profundidade de interesse, utilizada para a avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento diante dos carregamentos associados aos diferentes eventos operacionais.

Figura 6.1 – Representação esquemática do poço e da seção transversal selecionada para análise da integridade da bainha de cimento



Fonte: Autor (2025).

Na profundidade selecionada, Joulin *et al.* (2022) consideram uma tensão de sobrecarga atuando na formação rochosa de 83,8 MPa, correspondente à tensão efetiva vertical gerada pelo peso das camadas superiores. Além disso, os autores assumem que essa sobrecarga vertical resulta em uma tensão horizontal média de 58,6 MPa.

As propriedades geométricas do modelo e os parâmetros mecânicos adotados para o revestimento, a bainha de cimento e a formação rochosa na profundidade analisada estão apresentados na Tabela 6.1, conforme especificado por Joulin *et al.* (2022).

Tabela 6.1 – Propriedades dos componentes da seção avaliada do poço

Parâmetro	**Revestimento**	**Cimento**	**Formação**
Tipo	Aço	Classe G	Arenito
Raio Interno (cm)	15,71	17,78	21,27
Raio Externo (cm)	17,78	21,27	157,07
Módulo de Young, E (GPa)	200,00	15,00	8,19
Razão de Poisson, ν (-)	0,27	0,25	0,20
Coeficiente de Biot, α (-)	-	0,75	0,80
Coeficiente de Expansão Térmica, β (°C⁻¹)	1,30E-05	9,00E-06	1,00E-05
Coesão, c (MPa)	-	20,00	-
Ângulo de Atrito, φ (°)	-	15,00	-
Resistência a Tração (MPa)	-	1,00	-

Fonte: Joulin *et al.* (2022).

O estudo considera os principais eventos operacionais aos quais a estrutura do poço foi submetida, desde sua construção até a fase de armazenamento a longo prazo do CO_2 injetado. Esses eventos analisados são: (i) construção do poço, na qual são estabelecidas as condições iniciais de tensões e o estado da bainha de cimento; (ii) início da produção de gás, fase em que ocorre uma redução gradual da pressão do reservatório, impactando a distribuição de tensões no poço e na cimentação; (iii) fim da produção de gás, quando o reservatório atinge seu esgotamento, resultando em uma queda correspondente tanto da pressão interna no revestimento quanto da pressão do reservatório; (iv) início da injeção de CO_2, estágio caracterizado por uma súbita redução térmica; (v) fim da injeção de CO_2, fase em que a pressão do reservatório é restaurada e o efeito de resfriamento cessa; e (vi) armazenamento a longo prazo, condição na qual a temperatura inicial do poço é restabelecida e as pressões interna no revestimento e no reservatório permanecem estabilizadas. As diferentes condições de carregamento associadas a cada evento operacional, para a profundidade de estudo, estão descritas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Condição de carregamento para cada evento de vida útil do poço

Evento operacional	**Pressão no reservatório [MPa]**	**Pressão interna no revestimento [MPa]**	**Temperatura do poço [°C]**
Construção do poço (E1)	44,3	69,6	121,0
Início da produção (E2)	44,3	44,3	121,0
Fim da produção (E3)	2,0	2,0	121,0
Início da injeção (E4)	2,0	2,0	4,0
Fim da injeção (E5)	44,3	44,3	4,0
Armazenamento a longo prazo (E6)	44,3	44,3	121,0

Fonte: Joulin *et al.* (2022).

6.2. SOLUÇÃO ANALÍTICA DO CENÁRIO DE ESTUDO

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos a partir da solução analítica do modelo matemático desenvolvido para representar o sistema revestimento–cimento–formação. A análise é conduzida inicialmente considerando o comportamento termo-poroelástico da bainha de cimento e da formação rochosa, permitindo avaliar os efeitos acoplados da variação de temperatura e da poropressão sobre o estado de tensões do sistema.

A solução analítica foi implementada por meio do desenvolvimento de rotinas computacionais na linguagem de programação Python (Rossum e Drake, 2009), com base nas equações governantes estabelecidas na Subseção 2.3. Essas rotinas permitem calcular a

distribuição de tensões no sistema revestimento-cimento-formação ao longo dos diferentes eventos operacionais considerados, além de gerar visualizações gráficas das tensões efetivas nas direções radial, tangencial e vertical. As rotinas também são utilizadas para aplicar os critérios de resistência e verificar a integridade estrutural da bainha de cimento em diferentes condições de carregamento.

No primeiro evento (construção do poço), o poço encontra-se no final do estágio de assentamento do cimento. Nesse estágio, Joulin *et al.* (2022) assume que o estado inicial de tensão total no cimento é igual à pressão hidrostática P_s, determinada pela soma das colunas de pasta de cimento e lama de perfuração acima do ponto em análise, isto é:

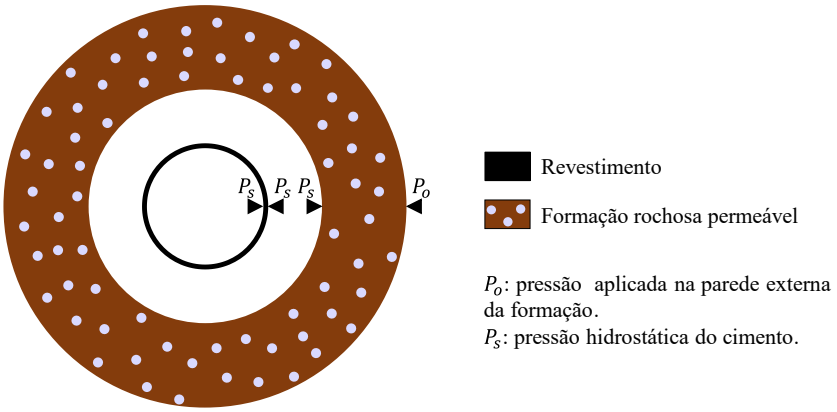
$$P_s = \rho_s g h_c + \rho_m g h_m, \tag{6.1}$$

em que ρ_s é a densidade do cimento fresco, ρ_m é a densidade da lama de perfuração, g é a aceleração da gravidade, h_c é a altura da coluna de cimento e h_m é a altura da coluna da lama de perfuração. Utilizando ρ_s = 1900 kg/m³, ρ_m = 1790 kg/m³, h_c = 1707 m e h_m = 2150 m, a pressão hidrostática do cimento corresponde a P_s = 69,6 MPa.

Além disso, Joulin *et al.* (2022) consideram que, nesse estágio, ainda há cimento fluido no interior do revestimento, o que implica que a pressão interna aplicada sobre sua parede também é igual a P_s. Assim, o revestimento encontra-se submetido simultaneamente a pressões interna e externa de valor P_s. A bainha de cimento assume um estado de carregamento hidrostático de magnitude P_s, e a formação rochosa é submetida a uma pressão interna igual a P_s e a uma pressão externa P_o, correspondente a 58,6 MPa.

A Figura 6.2 ilustra o estado de carregamento aplicado nas superfícies internas e externas do revestimento e da formação durante o Evento 1. Neste evento, não é necessário calcular as tensões nas interfaces, uma vez que são conhecidas e assumem valor P_s.

Figura 6.2 – Estado de carregamento na superfície interna e externa do revestimento e da formação no Evento 1



Fonte: Autor (2025).

Nos eventos subsequentes (Eventos 2 a 6), a pressão na bainha de cimento não é mais equivalente à pressão hidrostática inicial. Para determinar as tensões nas interfaces em cada um desses eventos, utiliza-se a Equação 3.18, considerando os estados de carregamento apresentados na Tabela 6.2. Nesses eventos, o estado de carregamento do sistema corresponde ao ilustrado na Figura 2.1.

A distribuição de tensões ao longo de cada domínio para os Eventos 2 a 6 é determinada somando-se o estado inicial de tensões (Evento 1) às variações de tensão ($\Delta\sigma$) induzidas pelas mudanças nas condições de contorno em relação ao estado inicial, ou seja:

$$\sigma = \sigma_i' + \Delta\sigma. \tag{6.2}$$

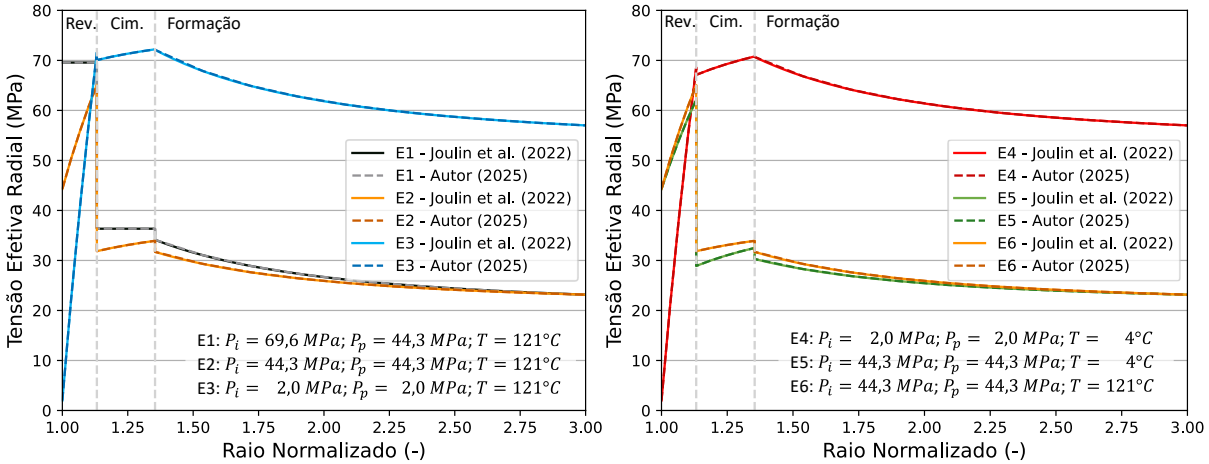
Ressalta-se que em todos os eventos, assume-se que a poropressão (P_p) nos poros do cimento é sempre igual à pressão de poros da formação, correspondendo à pressão medida no reservatório.

6.2.1. Distribuição de tensões para o modelo termo-poroelástico

As Figuras 6.3 a 6.5 apresentam a comparação entre os resultados analíticos reproduzidos e aqueles obtidos por Joulin *et al.* (2022) para a distribuição das tensões radial, tangencial e vertical, respectivamente, ao longo da seção transversal do poço. Como observado nessas figuras, os resultados obtidos reproduzem com precisão os resultados analíticos de Joulin *et al.* (2022), demonstrando a exatidão dos cálculos analíticos realizados. Ressalta-se que, nos gráficos, as pressões de compressão são representadas como positivas, enquanto as de tração aparecem negativas. O raio está normalizado pela razão entre o valor do raio e o raio interno do revestimento.

Na Figura 6.3, observa-se a evolução da tensão efetiva radial ao longo dos eventos operacionais definidos.

Figura 6.3 - Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Durante o Evento 1 (construção do poço), a pressão interna e externa no revestimento é igual à pressão hidrostática do cimento ($P_s = 69{,}6$ MPa). Consequentemente, a tensão radial efetiva no revestimento é constante e equivalente a 69,6 MPa. O cimento neste evento está sujeito a pressão hidrostática P_s, entretanto, a tensão radial efetiva é reduzida devido ao efeito da poropressão, conforme descrito pela expressão:

$$P_s - \alpha_c \cdot P_P = 69{,}60 - 0{,}75 \cdot 44{,}30 = 36{,}35\ MPa, \tag{6.3}$$

em que α_c é o coeficiente de Biot do cimento e P_p é a pressão de poros. Essa redução reflete uma "queda" de 33,25 MPa entre a tensão efetiva do revestimento e a do cimento. Na formação, a tensão radial segue a curva obtida pela Equação 3.8, considerando $P_i = P_s = 69{,}6$ MPa e $P_0 = 58{,}6$ MPa, com a tensão efetiva calculada pela Equação 2.4. Nota-se também uma diferença de tensão efetiva radial entre o cimento e a formação, atribuída à diferença nos coeficientes de Biot dos dois materiais.

Durante o Evento 2 (início da produção), a pressão interna no revestimento reduz-se até alcançar a pressão do reservatório. Como as tensões nas interfaces dos materiais deixam de ser conhecidas, torna-se necessário o uso da Equação 3.18. A diferença entre as tensões interna e externa no revestimento resulta em uma variação mais acentuada da curva de tensão efetiva radial na bainha de cimento. Um comportamento semelhante é observado no cimento, embora a inclinação da curva aumente de forma mais sutil. Na formação, a curvatura da curva já era

mais visível desde o evento anterior. Além disso, verifica-se que a simples redução da pressão interna no revestimento é suficiente para também diminuir as tensões efetivas radiais na bainha de cimento e na formação.

Com o Evento 3 (fim da produção), a pressão interna no revestimento diminui ainda mais, acompanhada pela redução da poropressão. Esse evento possibilita a observação do impacto da queda da poropressão no cimento e na formação, mas também no revestimento. No que se refere ao revestimento, a redução da pressão interna acentua ainda mais a inclinação da curva de tensão radial. Além disso, embora o revestimento não seja um meio poroso, a diminuição da poropressão provoca um aumento na tensão radial efetiva em seu contorno externo, devido à interação com o cimento. Isso demonstra que, mesmo em regiões não porosas, a variação da poropressão pode influenciar os resultados quando há contato com regiões porosas. No caso do cimento e da formação, a redução da poropressão provoca um aumento expressivo na tensão radial efetiva em seus domínios. Além disso, como a poropressão está mais baixa, a diferença entre as curvas de tensão do cimento e da formação torna-se menos perceptível, embora ainda exista, uma vez que os coeficientes de Biot desses materiais são distintos.

No Evento 4 (início da injeção de CO_2) ocorre o resfriamento do poço, sem variações na pressão interna do revestimento ou na poropressão. Observa-se, assim, uma leve redução das tensões radiais efetivas no interior dos domínios, sendo esse efeito mais pronunciado no cimento. No entanto, a tensão na parede interna do revestimento e na borda externa da formação permanece inalterada, uma vez que deve atender as condições de contorno impostas no sistema.

No Evento 5 (fim da injeção), a temperatura do poço permanece baixa, enquanto o reservatório é preenchido até atingir a pressão original, resultando no aumento da pressão interna no revestimento e na poropressão. Dessa forma, observa-se uma recuperação parcial das tensões radiais no revestimento. No entanto, o aumento da poropressão no cimento e na formação reduz novamente a tensão efetiva no sistema.

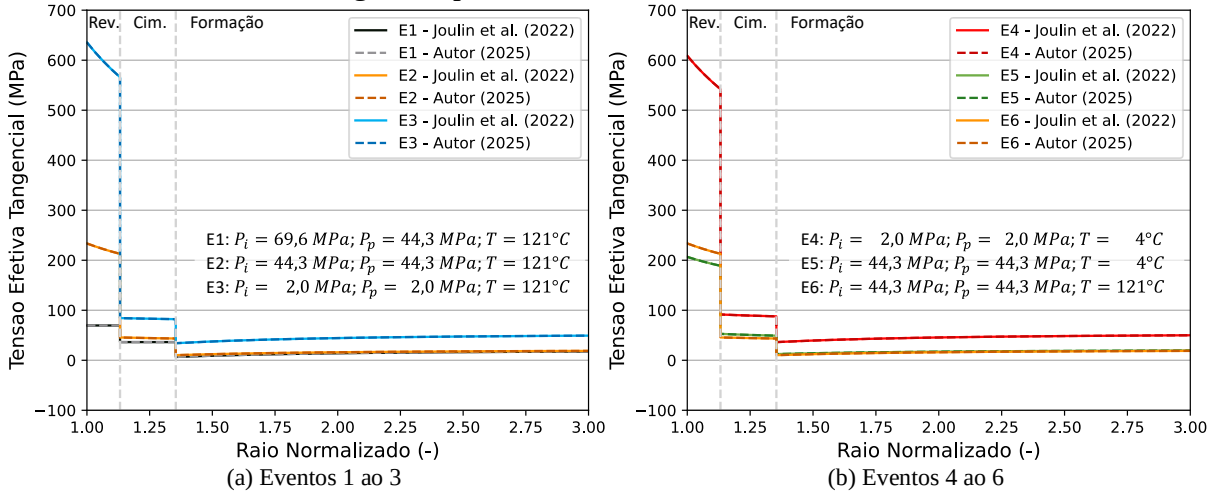
Por fim, no Evento 6 (armazenamento a longo prazo), o aquecimento do poço contribui para um leve aumento das tensões radiais efetivas em todos os componentes. No entanto, essas tensões permanecem abaixo dos valores iniciais (Evento 1 – construção do poço), devido à menor pressão interna no revestimento. Nota-se que este evento apresenta as mesmas condições de carregamento do Evento 2 (início da produção), de modo que as curvas dos Eventos 2 e 6 se sobrepõem.

Em resumo, observa-se que, nas tensões radiais, há descontinuidades nas curvas de tensão efetiva devido ao efeito da poropressão na bainha de cimento e na formação. Além disso, as variações na pressão interna do revestimento influenciam proporcionalmente as tensões em todos os componentes do sistema, com maior impacto no próprio revestimento. O aumento da temperatura eleva as tensões em todos os materiais e a redução da poropressão resulta em um aumento do nível de tensão efetiva não somente na bainha de cimento e na formação, mas também no revestimento, especialmente próximo à interface com a bainha de cimento.

A Figura 6.4 apresenta a tensão efetiva tangencial ao longo do raio normalizado. O gráfico ilustrado nessa figura é particularmente relevante para compreender as diferenças no comportamento circunferencial do sistema em resposta aos eventos.

Durante o Evento 1 (construção do poço), a tensão efetiva tangencial no revestimento e no cimento é uniforme e está de acordo com as condições de contorno iniciais. Para o revestimento, as tensões tangenciais são calculadas utilizando a solução fornecida pela Equação 3.8, considerando $P_i = P_o = P_s = 69{,}6$ MPa. O cimento está sob o efeito da pressão hidrostática, então sua tensão efetiva tangencial também é igual a P_s com a redução da contribuição da poropressão. Na formação, a tensão efetiva tangencial apresenta uma leve variação ao longo do raio, mas segue a curva descrita pela Equação 3.8, porém com $P_i = P_s = 69{,}6$ MPa e $P_o = 58{,}6$ MPa, subtraindo posteriormente o efeito da pressão de poros.

Figura 6.4 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

No Evento 2 (início da produção), a pressão na parede interna no revestimento é reduzida de 69,6 MPa para 43,3 MPa. No entanto, ao contrário do que ocorre com a tensão radial, observa-se um aumento da tensão tangencial em todo o sistema, sendo esse efeito mais

significativo no revestimento e mais sutil na formação. Esse comportamento pode ser atribuído à redistribuição das tensões devido à diminuição da pressão interna e às propriedades geométricas e mecânicas dos materiais.

Com o Evento 3 (esgotamento do reservatório), a pressão interna no revestimento diminui ainda mais, amplificando as tensões tangenciais nos domínios. No cimento e na formação, além da tensão tangencial aumentar devido à redução da pressão interna no revestimento, há também a redução da pressão de poros, o que intensifica o efeito das tensões circunferenciais. Vale destacar que o aumento nas tensões tangenciais não ocorre de maneira uniforme no sistema, pois a magnitude das tensões depende das características geométricas de cada região e das diferenças entre as pressões interna e externa atuantes em cada trecho.

No Evento 4 (início da injeção de CO_2), o resfriamento do poço provoca uma redução das tensões tangenciais no revestimento, enquanto no cimento e na formação ocorre um leve aumento dessas tensões.

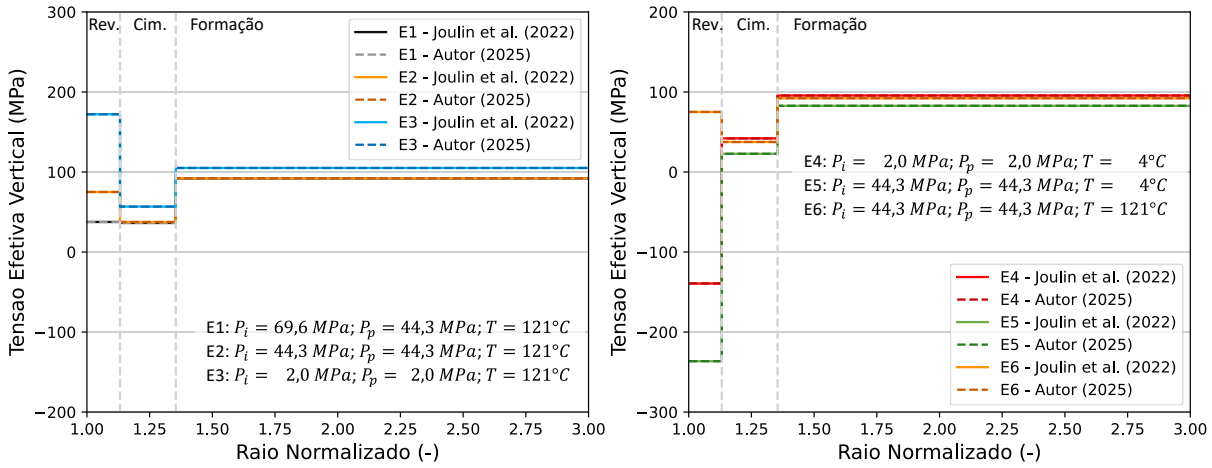
Durante o Evento 5 (fim da injeção), o aumento da pressão interna no revestimento provoca a redução das tensões tangenciais efetivas em todo o sistema. Em particular, no cimento e na formação, o aumento da poropressão intensifica a diminuição da tensão efetiva, evidenciando o impacto das condições de porosidade na redistribuição das tensões.

Finalmente, no Evento 6 (armazenamento a longo prazo), o aquecimento do poço gera um aumento das tensões tangenciais no revestimento e uma redução nas tensões tangenciais do cimento e da formação.

Em resumo, no caso das tensões tangenciais, nota-se que as variações de pressão interna no revestimento, poropressão e temperatura afetam os componentes do poço de forma diferente do que é o observado nas tensões radiais. A variação da pressão interna no revestimento tem impacto significativo apenas sobre as tensões tangenciais no próprio revestimento, com o aumento da pressão interna reduzindo as tensões efetivas tangenciais. A variação de temperatura exerce influência em todos os materiais, sendo que o resfriamento tende a reduzir as tensões tangenciais no revestimento enquanto as aumenta no cimento e, de forma menos significativa, na formação.

A Figura 6.5 apresenta a distribuição da tensão efetiva vertical ao longo do raio normalizado.

Figura 6.5 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Ao contrário das equações de tensão nas outras direções, a equação da tensão vertical é constante e depende das propriedades mecânicas, porosas, térmicas e geométricas dos materiais, além das condições de carregamento nas interfaces, conforme descrito na Equação 3.8. Ressalta-se que, na formação, além da tensão calculada pela Equação 3.8, Joulin *et al.* (2022) também adiciona a sobrecarga atuante, correspondente a 83,8 MPa.

No Evento 1 (construção do poço), no revestimento, tem-se a tensão vertical calculada considerando $P_i = P_o = P_s = 69{,}6$ MPa. Já no cimento, a tensão atuante continua sendo a hidrostática, reduzida do efeito da poropressão. Na formação, a tensão efetiva vertical é determinada pela soma da contribuição do peso próprio com a tensão vertical calculada pela Equação 3.8.

No Evento 2 (início da produção), a redução da pressão na parede interna do revestimento provoca um aumento da tensão efetiva vertical ao longo de sua estrutura. No entanto, a tensão efetiva vertical no cimento e na formação permanece praticamente inalterada.

Durante o Evento 3 (fim da produção), a pressão na parede interna no revestimento reduz ainda mais, elevando novamente a tensão efetiva vertical ao longo de sua estrutura. No cimento e na formação há também o aumento da tensão vertical efetiva, porém motivado pela redução da poropressão.

No Evento 4 (início da injeção de CO_2), o resfriamento do poço provoca a redução da tensão efetiva vertical em todos os componentes, sendo o revestimento o mais afetado.

No Evento 5 (fim da injeção), o aumento da pressão na parede interna do revestimento resulta na redução da tensão efetiva vertical nesse componente. Além disso, a elevação da poropressão reduz a tensão efetiva vertical no cimento e na formação.

Finalmente, no Evento 6 (armazenamento a longo prazo), o aumento da temperatura no poço induz o aumento da tensão efetiva vertical em todo o sistema.

Em resumo, observa-se que, para as tensões verticais, o aumento da temperatura implica no aumento das tensões verticais nos três componentes do sistema. Em contrapartida, a variação na pressão na parede interna do revestimento afeta significativamente apenas a tensão efetiva vertical no próprio revestimento, reduzindo-a à medida que a pressão aumenta. Por outro lado, o aumento da poropressão, como esperado, reduz as tensões efetivas verticais no cimento e na formação.

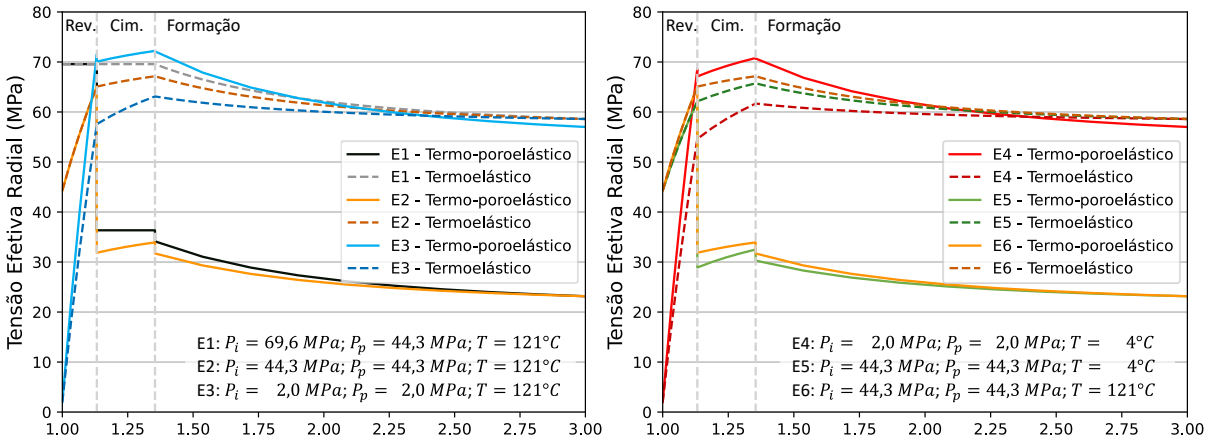
6.2.2. Distribuição de tensões para o modelo termoelástico

Nesta subseção, são apresentados os resultados obtidos a partir da solução analítica do modelo termoelástico, em que o coeficiente de Biot é assumido como nulo ($\alpha = 0$), desconsiderando, portanto, os efeitos associados à poropressão no comportamento do sistema.

Ao observar os resultados das tensões radiais na Figura 6.6, verifica-se que a ausência de poropressão elimina a descontinuidade de tensões efetivas nas interfaces entre o revestimento, o cimento e a formação. Essa eliminação pode ser atribuída à ausência do termo associado à poropressão nas equações de equilíbrio, que, no caso anterior, introduzia um salto proporcional ao coeficiente de Biot de cada material. Isso resulta em uma distribuição contínua da tensão radial efetiva ao longo dos componentes, mesmo em condições de variação geométrica e de propriedades.

No Evento 1 (construção do poço), observa-se que as tensões no cimento e na formação são maiores na análise termoelástica em comparação com a análise termo-poroelástica. Esse comportamento também é verificado nos Eventos 2 (início da produção), 5 (fim da injeção) e 6 (armazenamento a longo prazo). No entanto, nos Eventos 3 (fim da produção) e 4 (início da injeção), as tensões radiais efetivas obtidas na análise termoelástica são menores do que na análise termo-poroelástica.

Figura 6.6 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos e termoelásticos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

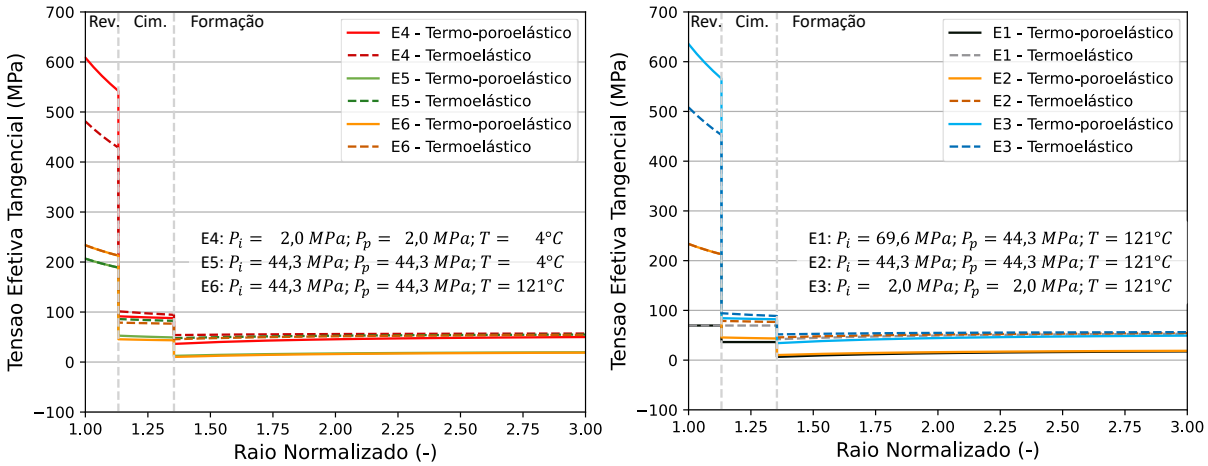
Fonte: Autor (2025).

Essa diferença na resposta dos Eventos 3 e 4 em relação aos demais pode ser explicada pelo fato de que, nesses casos, a poropressão e a pressão interna no revestimento atingem seu menor valor, de 2 MPa. Conforme discutido na subseção anterior, no caso das tensões radiais, a redução da pressão interna no revestimento leva à diminuição das tensões em todos os componentes, enquanto a redução da poropressão aumenta a tensão efetiva no cimento e na formação. Dessa forma, ao desconsiderar o efeito da poropressão, as tensões radiais efetivas nos materiais são influenciadas apenas pela redução da pressão interna no revestimento, resultando em valores menores de tensão efetiva em comparação com os demais eventos. Além disso, vale ressaltar que o valor da poropressão e do coeficiente de Biot também são utilizadas na Equação 3.18 para determinar as tensões nas interfaces entre os domínios (revestimento-cimento e cimento-formação). Dessa forma, ao se adotar um coeficiente de Biot igual a zero para caracterizar essa abordagem, a poropressão é desconsiderada na solução das pressões nas interfaces (ainda que, na prática, ela não seja nula, apenas reduzida), impactando diretamente a distribuição das tensões totais no sistema.

Vale destacar que, na análise termo-poroelástica, as tensões radiais efetivas do Evento 3 (fim da produção) atingem os maiores valores entre todos os eventos, ultrapassando 70 MPa. Por outro lado, na análise termoelástica, a maior tensão radial efetiva no cimento e na formação é de 69,6 MPa, observada no Evento 1 (construção do poço). Ou seja, neste caso, a análise termo-poroelástica conduziu a uma estimativa mais conservadora que a termoelástica.

A Figura 6.7 ilustra a distribuição de tensão efetiva para a análise termoelástica na direção tangencial, enquanto a Figura 6.8 ilustra para a direção vertical.

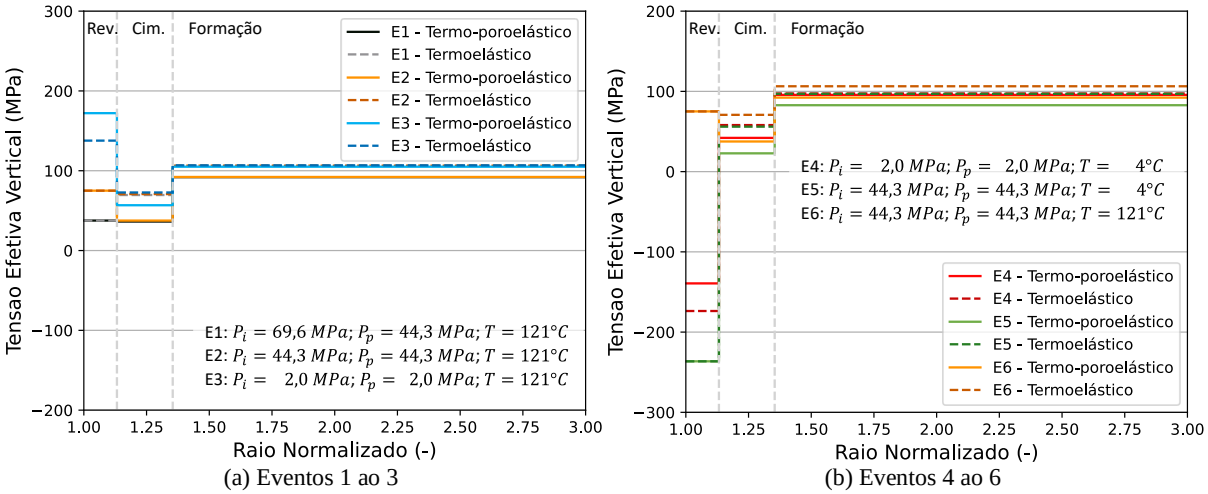
Figura 6.7 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos e termoelásticos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Figura 6.8 – Comparação entre os resultados analíticos termo-poroelásticos e termoelásticos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que, nas direções tangencial e vertical, diferentemente do verificado na direção radial, a descontinuidade das tensões entre os domínios não é eliminada, mesmo com a ausência do efeito da poropressão. Isso indica que, para essas direções, as descontinuidades estão associadas predominantemente às diferenças nas propriedades dos materiais adjacentes, e não apenas à influência da poropressão.

Outro ponto importante é que, para essas direções, também se esperava que não houvesse variações nos resultados dos revestimentos entre as análises termo-poroelástica e termoelástica. No entanto, nos Eventos 3 (fim da produção) e 4 (início da injeção), observa-se uma redução das tensões efetivas tangenciais no revestimento. Tal comportamento pode ser atribuído também ao fato de que as poropressões influenciam diretamente na solução das

pressões nas interfaces. Assim, a desconsideração do comportamento poroso do cimento e da formação altera a distribuição de esforços transmitidos ao revestimento.

Já com relação a distribuição de tensão tangencial e vertical no cimento e na formação, nota-se um leve aumento das tensões efetivas tangenciais em todos os eventos, evidenciando a influência direta da ausência da poropressão sobre esses materiais.

Em síntese, observa-se que, na maioria dos eventos analisados, a desconsideração do comportamento poroso da bainha de cimento e da formação leva a um aumento das tensões efetivas no sistema. Contudo, em dois eventos específicos, as tensões radiais efetivas obtidas com a análise termoelástica foram inferiores às da análise termo-poroelástica. Esse resultado reforça a relevância de considerar o comportamento poroso na avaliação da integridade estrutural, pois sua omissão pode resultar tanto na subestimação quanto na superestimação das tensões atuantes, afetando diretamente a confiabilidade das conclusões sobre a segurança estrutural e a eficiência do projeto.

Dessa forma, embora a exclusão do comportamento poroso possa simplificar a obtenção dos resultados, ela compromete a precisão da análise, podendo induzir a interpretações equivocadas sobre o real estado de tensão do sistema.

6.2.3. Avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento: Análise Termoelástica vs. Termo-Poroelástica

Com base nas distribuições de tensões obtidas a partir das soluções analíticas termo-poroelástica e termoelástica, procede-se à avaliação da integridade estrutural da bainha de cimento. Essa avaliação é realizada por meio da aplicação dos critérios de resistência por tração e cisalhamento, conforme descrito no Capítulo 5.

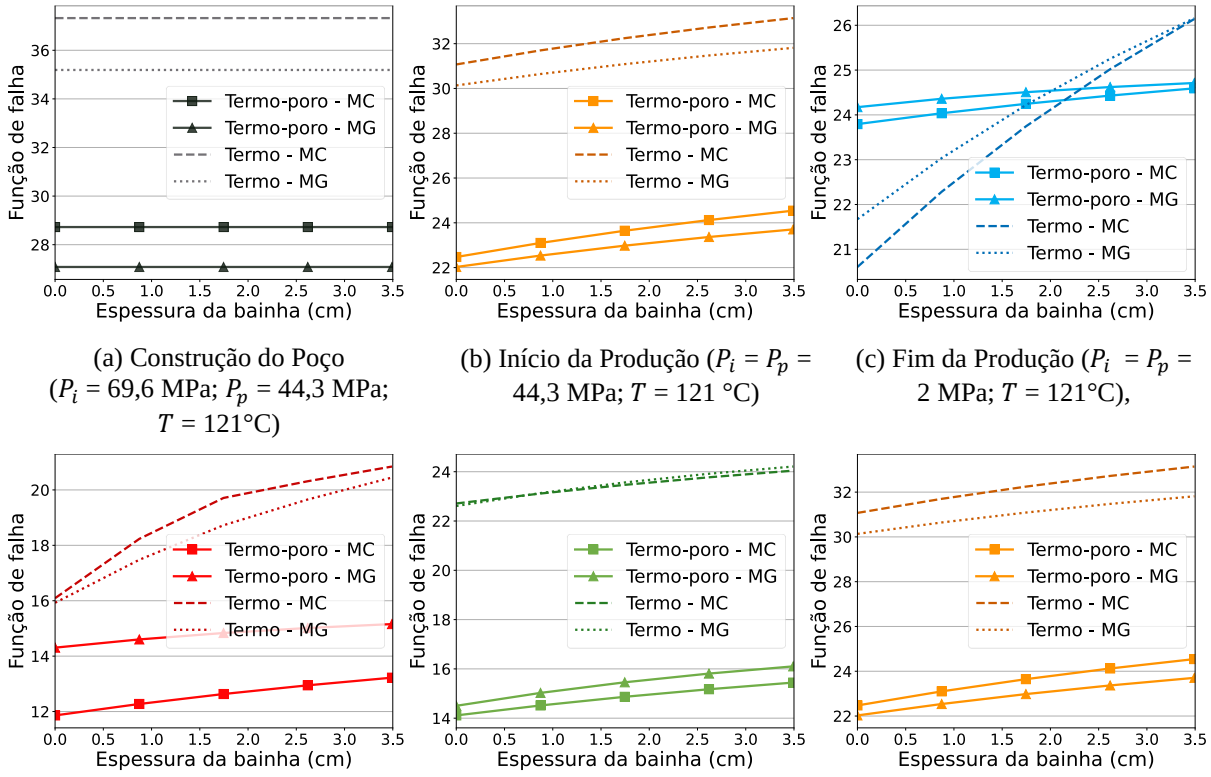
A análise de falha por tração consiste em verificar se a resistência à tração do material é excedida em alguma das três direções principais: radial, tangencial ou vertical. Para a falha por cisalhamento, a integridade estrutural é avaliada com base nos critérios de Mohr-Coulomb e Mogi-Coulomb, considerando as tensões principais atuantes na bainha de cimento.

Conforme apresentado na Tabela 6.1, a resistência à tração do cimento é de 1 MPa, valor adotado por Joulin *et al.* (2022) para cimento classe G, com base nas recomendações de Meng *et al.* (2021). A análise dos gráficos de tensão (Figuras 6.3 a 6.8) indica que, nos eventos analisados, as tensões principais efetivas na bainha de cimento permaneceram predominantemente em regime compressivo, não ultrapassando o limite da resistência à tração.

Dessa forma, do ponto de vista da integridade estrutural frente ao critério de tração, ambas as abordagens, termoelástica e termo-poroelástica, apontam para um desempenho estrutural satisfatório da bainha de cimento nos eventos considerados.

Para a análise de falha por cisalhamento, são utilizadas as funções de falha definidas pelas Equações 5.3 e 5.9, correspondentes aos critérios de Mohr-Coulomb (f_{MC}) e Mogi-Coulomb (f_{MG}), respectivamente. A falha ocorre quando essas funções assumem valores negativos. A Figura 6.9 apresenta a distribuição das funções de falha ao longo da espessura da bainha de cimento, para ambas as abordagens e todos os eventos analisados.

Figura 6.9 – Funções de falha de Mohr-Coulomb e Mogi-Coulomb ao longo da espessura da bainha de cimento para os diferentes eventos operacionais avaliados: comparação entre as abordagens termo-poroelástica e termoelástica



(a) Construção do Poço (P_i = 69,6 MPa; P_p = 44,3 MPa; T = 121°C)

(b) Início da Produção (P_i = P_p = 44,3 MPa; T = 121 °C)

(c) Fim da Produção (P_i = P_p = 2 MPa; T = 121°C),

(d) Início da Injeção (P_i = P_p = 2,0 MPa; T = 4°C)

(e) Fim da Injeção (P_i = P_p = 44,3 MPa; T = 4°C)

(f) Armazenamento a longo prazo (P_i = P_p = 44,3 MPa; T = 121°C),

Fonte: Autor (2025).

Em todos os gráficos, observa-se que as funções de falha permanecem com valores positivos, indicando que não houve falha estrutural. No entanto, há diferenças de resultados entre as abordagens. Na maioria dos eventos, a abordagem termoelástica apresenta valores mais elevados de função de falha, sugerindo maior margem de segurança estrutural. A exceção ocorre no Evento de Fim da Produção, em que a abordagem termoelástica apresenta valores

inferiores de função de falha na interface interna da bainha, mas volta a superar a abordagem termo-poroelástica a partir da metade de sua espessura.

Essas tendências se repetem tanto para o critério de Mohr-Coulomb quanto para o de Mogi-Coulomb. Isso demonstra que, independentemente do critério utilizado, a abordagem termo-poroelástica tende a fornecer resultados mais próximos da condição de ruptura. Portanto, embora não tenha sido observada falha nos eventos simulados, é possível que, sob carregamentos mais severos, a abordagem termo-poroelástica possa indicar falha estrutural, enquanto a termoelástica não.

Esse resultado evidencia que, embora a abordagem termoelástica possa conduzir a maiores valores de tensões efetivas em algumas regiões, isso não implica necessariamente em uma análise mais conservadora em termos de avaliação estrutural.

Em relação ao comportamento das curvas de função de falha, observa-se que no Evento de Construção do Poço, a diferença entre as abordagens corresponde a uma translação vertical da função de falha, proporcional à contribuição da poropressão não considerada na abordagem termoelástica. Nos demais eventos, além da translação, observa-se uma alteração na inclinação das curvas, justificada pela mudança na solução das tensões nas interfaces, provocada pela desconsideração da poropressão, afetando a distribuição de tensões totais no sistema e, consequentemente, o comportamento das funções de falha.

Quanto à comparação entre os critérios de resistência, observa-se que ambos apresentaram comportamento semelhante ao longo da espessura da bainha, diferindo apenas em magnitude. Isso ocorre porque, para os carregamentos avaliados, a tensão principal intermediária (σ_2) aproxima-se da média entre as tensões principais máxima e mínima, condição em que os critérios de Mohr-Coulomb e Mogi-Coulomb tendem a convergir. Entretanto, em cenários onde σ_2 difere significativamente, o critério de Mogi-Coulomb pode fornecer resultados mais precisos, por incorporar o efeito triaxial completo.

Mesmo com comportamentos semelhantes, nota-se que ora a função de falha f_{MC} apresenta valores mais elevados, ora f_{MG} é quem os assume. No caso da abordagem termo-poroelástica, f_{MC} assume valores maiores em três eventos (Construção do Poço, Início da Produção e Armazenamento a longo prazo). Já na abordagem termoelástica, f_{MC} apresenta valores superiores também no evento de Fim da Produção, totalizando quatro casos. Assim, nesses eventos, o critério de Mogi-Coulomb apresenta resultados mais conservadores. Nos demais, a tendência se inverte.

De forma geral, por considerar a tensão intermediária, o critério de Mogi-Coulomb mostra-se mais representativo para condições triaxiais. Assim, é o mais indicado para avaliações mais precisas da integridade estrutural da bainha de cimento.

6.3. MODELAGEM NUMÉRICA DO CENÁRIO DE ESTUDO

Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio da modelagem numérica do sistema revestimento–cimento–formação, correspondente ao cenário de estudo descrito na Seção 6.1, realizada no *software* Abaqus®. O objetivo é dar início aos estudos de modelagem numérica termo-poroelástica voltados à análise das tensões atuantes no sistema revestimento-cimento-formação, utilizando os resultados analíticos previamente obtidos como base de verificação. Embora o modelo numérico adotado neste trabalho seja simplificado, ele constitui um passo inicial relevante para o desenvolvimento de uma metodologia mais abrangente, a ser aperfeiçoada em estudos futuros com a incorporação de fenômenos adicionais, como o fluxo de fluido nos poros, o comportamento não linear dos materiais, a presença de múltiplos revestimentos, bem como variações geométricas como descentralização e ovalização do revestimento.

A modelagem numérica é conduzida em condições equivalentes às utilizadas na formulação analítica, assegurando compatibilidade entre as abordagens. As etapas apresentadas incluem o ajuste na condição de carregamento considerada para o Evento 1 na bainha de cimento, o estudo de refinamento da malha e a comparação direta com os resultados analíticos.

6.3.1. Ajuste do estado de tensões inicial da bainha de cimento

No exemplo de estudo utilizado para a caracterização do problema, Joulin *et al.* (2022) considera que, no Evento 1 (construção do poço), a bainha de cimento acaba de passar do estado fluido para o estado endurecido poroso. Como hipótese para definir o estado inicial de tensões nesse momento, Joulin *et al.* (2022) assumem que o cimento endurecido retém o estado de tensão equivalente à pressão hidrostática presente na pasta ainda fluida.

Essa suposição implica que, no Evento 1, o estado de tensões na bainha de cimento pode ser diretamente prescrito, dispensando o uso da solução analítica desenvolvida na Seção 3.2 para esse evento. Nos eventos subsequentes (Eventos 2 a 6), a distribuição de tensões é determinada pela soma do estado inicial de tensões (referente ao Evento 1) com as variações de tensão induzidas pelas alterações nas condições de contorno. Essa abordagem está descrita na

Equação 6.2 e foi reproduzida com exatidão na solução analítica deste trabalho, conforme discutido na Seção 6.2.

Para replicar essa condição na modelagem numérica no *software* Abaqus®, seria necessário prescrever, no *step* correspondente ao Evento 1, um campo de tensões na bainha de cimento equivalente à pressão hidrostática. Isso exigiria impor que as tensões nas direções radial, tangencial e vertical na bainha de cimento fossem equivalentes à pressão hidrostática. No entanto, o módulo de carregamento do Abaqus/CAE permite apenas a definição de um campo predefinido de tensões em relação as coordenadas cartesianas.

Diante dessa limitação do Abaqus/CAE, opta-se por adaptar a condição inicial de carregamento da bainha de cimento. Em vez de aplicar a hipótese do estado hidrostático, adota-se, no Evento 1, o mesmo tipo de carregamento utilizado nos demais eventos: uma pressão interna na parede do revestimento e uma pressão externa na borda da formação, conforme ilustrado na Figura 2.1 e já aplicado nos Eventos 2 a 6.

Com isso, toda a modelagem numérica - termoelástica e termo-poroelástica - é realizada com base nessa adaptação. Além disso, para assegurar a consistência entre as abordagens analítica e numérica, os resultados analíticos também são recalculados com a nova configuração de carregamento, permitindo uma comparação direta com os resultados numéricos obtidos.

6.3.2. Estudo de convergência da malha de elementos finitos

Nesta subseção, realiza-se um estudo de convergência da malha de elementos finitos, com o objetivo de identificar a discretização mais adequada para a análise numérica, assegurando a acurácia dos resultados sem comprometer a eficiência computacional.

O estudo compreende a avaliação de diferentes níveis de refinamento aplicados a elementos quadrilaterais bilineares e biquadráticos, com integração completa e reduzida, sob a condição de estado plano de deformação. No *software* Abaqus®, esses elementos são identificados pelas nomenclaturas específicas CPE4 (quadrilaterais bilineares) e CPE8 (quadrilaterais biquadráticos), ambos em estado plano de deformação, sendo acrescentado o sufixo "R" quando realizada a integração reduzida.

A investigação baseia-se na análise da influência da densidade de elementos sobre a convergência da resposta de interesse - especificamente, o deslocamento radial - avaliadas em um ponto de referência localizado na interface revestimento-cimento, situado no raio de 17,78 cm. Essa análise considera os carregamentos correspondentes ao Evento 1 (construção do poço)

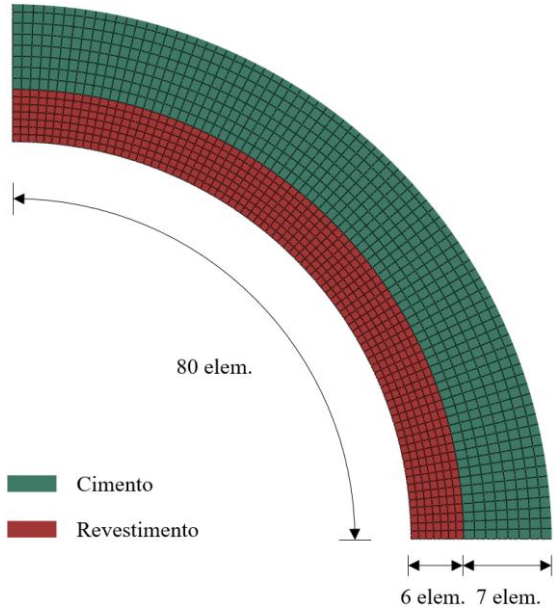
para a abordagem termoelástica, e a convergência é avaliada a partir da estabilização da grandeza monitoradas à medida que a malha é progressivamente refinada.

O tempo total de simulação é também monitorado, sendo o refinamento final selecionado com base na diferença relativa entre os resultados das grandezas de interesse obtidos em malhas consecutivas e no custo computacional associado.

O refinamento da malha é realizado por meio do aumento da quantidade de elementos nas direções radial e tangencial. Para garantir a qualidade da malha, busca-se manter aproximadamente iguais os comprimentos dos elementos em ambas as direções, evitando distorções que possam comprometer a precisão dos resultados.

Na direção tangencial, a quantidade de elementos é constante ao longo do raio e, para o mesmo valor de raio, todos os elementos possuem o mesmo comprimento. Na direção radial, o número de elementos varia entre as regiões de revestimento, cimento e formação. A Figura 6.10 ilustra um exemplo de refinamento da malha nas regiões do revestimento e do cimento, com 80 elementos na direção tangencial, seis elementos na direção radial no revestimento e sete no cimento.

Figura 6.10 – Exemplo de refinamento da malha de elementos finitos nas regiões do revestimento e do cimento, com discretização nas direções tangencial e radial



Fonte: Autor (2025).

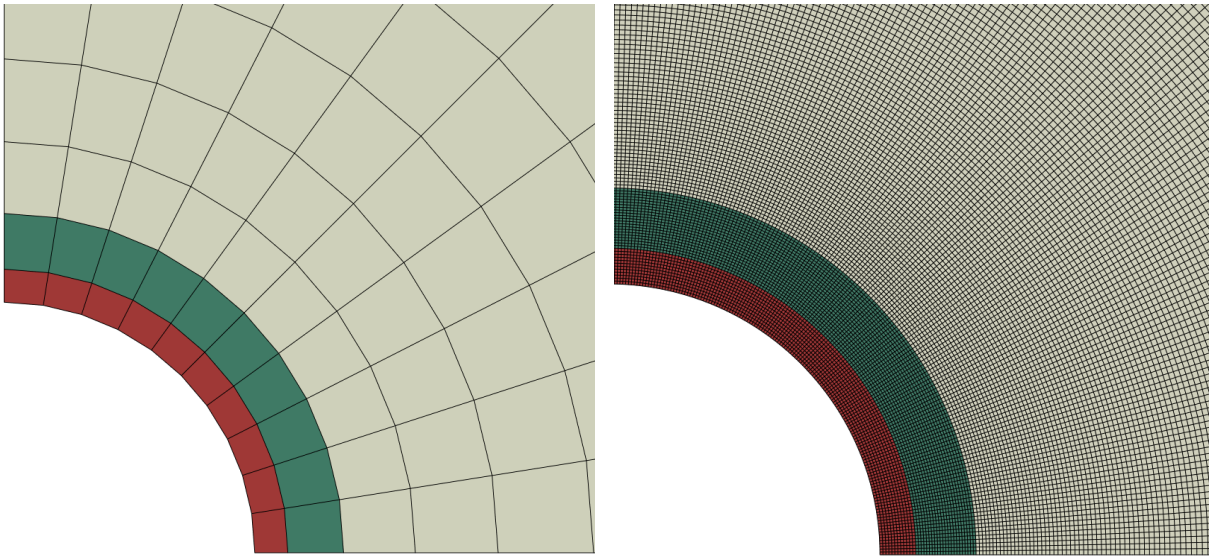
Adicionalmente, na formação rochosa, é aplicado um fator de *bias* na direção radial, a fim de aumentar gradualmente o tamanho dos elementos à medida que o raio cresce. Esse procedimento visa concentrar uma maior densidade de elementos nas proximidades do poço,

onde os gradientes de tensão e deformação são mais acentuados, e reduzi-lo em regiões onde as variações desses campos são menos acentuadas.

O estudo inicia-se com uma configuração de malha de elementos finitos composta por 10 elementos na direção tangencial, um elemento nas regiões radial do revestimento e do cimento, e 20 elementos na formação, utilizando fator de *bias* igual a 15. A partir dessa configuração base, realiza-se seis refinamentos sucessivos, totalizando sete configurações. A malha final apresenta 150 elementos na direção tangencial e, na direção radial, 12 elementos no revestimento, 22 no cimento e 330 na formação, com fator de bias de 25. A Figura 6.11 apresenta a configuração inicial e final da malha.

No Apêndice A, a Tabela A.1 apresenta o histórico das configurações de malha de elementos finitos adotadas no estudo de convergência. No mesmo apêndice, as Tabelas A.2 a A.5 reúnem os resultados de deslocamento radial, tensão efetiva radial, diferenças relativas entre refinamentos consecutivos e tempos de simulação para cada tipo de elemento utilizado.

Figura 6.11 – Configurações inicial e final da malha de elementos finitos utilizadas no estudo de convergência

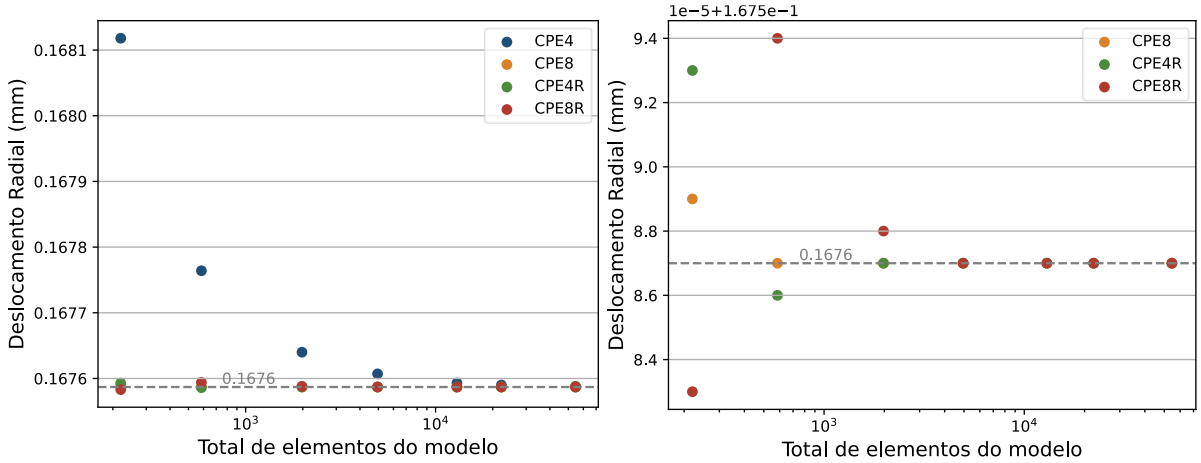


(a) Configuração inicial (b) Configuração final

Fonte: Autor (2025).

A Figura 6.12a apresenta os resultados de deslocamento radial obtidos para o ponto de estudo. Valores positivos indicam deslocamento em direção ao centro do poço. Observa-se convergência para 0,1676 mm, independentemente do tipo de elemento, com variações na velocidade de convergência.

Figura 6.12 – Deslocamento radial na interface revestimento-cimento (raio de 17,78 cm) para o Evento 1 ao longo dos refinamentos realizados – abordagem termoelástica



(a) Elementos finitos do tipo CPE4, CPE4R, CPE8 e CPE8R (b) Elementos finitos do tipo CPE4R, CPE8 e CPE8R

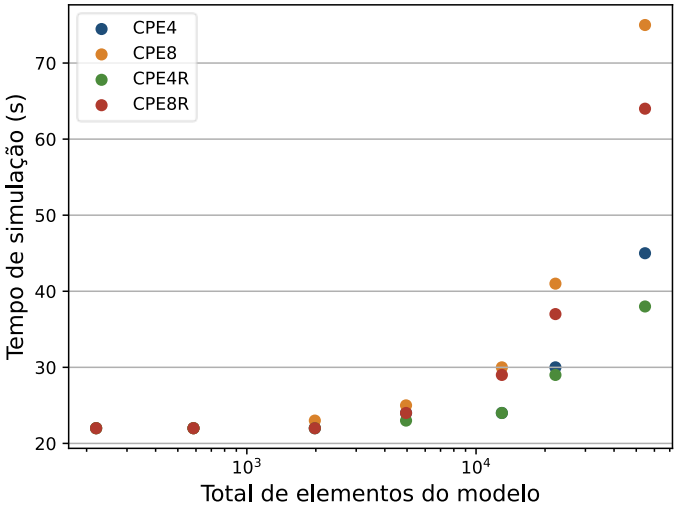
Fonte: Autor (2025).

Nota-se que os elementos CPE4R, CPE8 e CPE8R alcançam a convergência já nas primeiras configurações, com diferenças relativas inferiores a 0,01% entre malhas consecutivas. O elemento CPE4, por sua vez, converge mais lentamente, aproximando-se apenas a partir da quinta configuração.

Dada a proximidade dos resultados de deslocamento obtidos com os elementos CPE4R, CPE8 e CPE8R, a Figura 6.12b destaca apenas esses elementos, a fim de permitir uma visualização mais clara de seus comportamentos. A partir dessa figura, observa-se com maior nitidez o padrão de convergência de cada elemento. O elemento CPE8 se destaca pela rápida estabilização dos resultados, já na segunda configuração de malha. O elemento CPE4R apresenta estabilização no terceiro refinamento, enquanto o CPE8R alcança essa condição a partir do quarto refinamento.

A Figura 6.13 apresenta os tempos de simulação para cada tipo de elemento ao longo dos refinamentos. Destaca-se que os tempos de simulação apresentados referem-se a execuções realizadas em um computador com processador Intel® Core™ i5-10500H (2.50GHz) e 24 GB de memória RAM.

Figura 6.13 - Tempo de simulação para cada tipo de elemento finito utilizado ao longo dos refinamentos realizados



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, o tempo médio é de, aproximadamente, 22 segundos. No final, o tempo de simulação chega a, no máximo, 75 segundos, considerando o tipo de elemento CPE8. Nota-se que os elementos finitos com interpolação linear e integração reduzida apresentam os menores tempos de simulação.

Assim, considerando os resultados obtidos, define-se como malha de referência para as análises seguintes a configuração com elementos finitos do tipo CPE8R, com 100 elementos na direção tangencial e, na direção radial, 8 elementos no revestimento, 14 no cimento e 200 na formação, com fator de *bias* de 25. Essa configuração corresponde à sexta malha avaliada.

Destaca-se ainda que, embora a quarta configuração da malha de elementos finitos já apresente uma boa convergência de resultados de deslocamento radial para o ponto avaliado, opta-se por um maior refinamento para garantir robustez na comparação com soluções analíticas, haja vista que, em virtude da simplicidade do modelo, não há comprometimento significativo do tempo computacional.

Para a análise termo-poroelástica, emprega-se o elemento CPE8RP, que possui grau de liberdade adicional para a poropressão, essencial para representar adequadamente o comportamento poroso do cimento e da formação rochosa.

6.3.3. Comparação com os resultados da solução analítica

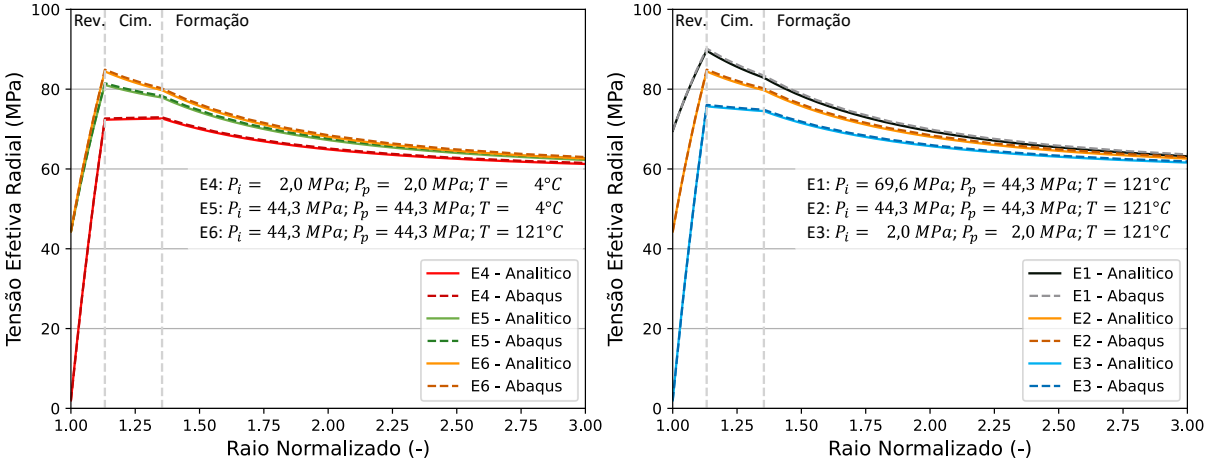
Esta subseção apresenta a comparação entre os resultados obtidos por meio da modelagem numérica no Abaqus® e aqueles calculados com base na solução analítica, tanto para a análise termoelástica quanto para a termo-poroelástica. O objetivo dessa comparação é

verificar a modelagem numérica realizada, avaliando sua capacidade de reproduzir, com fidelidade, os campos de tensões no sistema revestimento–cimento–formação.

O Apêndice B apresenta um tutorial detalhado para a modelagem do cenário de estudo, descrito na Subseção 6.1, no Abaqus®, utilizando a abordagem termo-poroelástica. Para conduzir a análise sem o efeito poroso, são utilizados os elementos finitos do tipo CPE8R em substituição aos CPE8RP, sem a necessidade de atribuir propriedades porosas aos materiais.

As Figuras 6.14 a 6.16 apresentam a comparação entre os resultados analíticos e numéricos para a análise termoelástica, enquanto as Figuras 6.17 a 6.19 ilustram a comparação correspondente à modelagem termo-poroelástica. Em todos os gráficos, os resultados obtidos com a solução analítica são representados por linhas contínuas, e os valores extraídos da modelagem numérica são indicados por marcadores circulares.

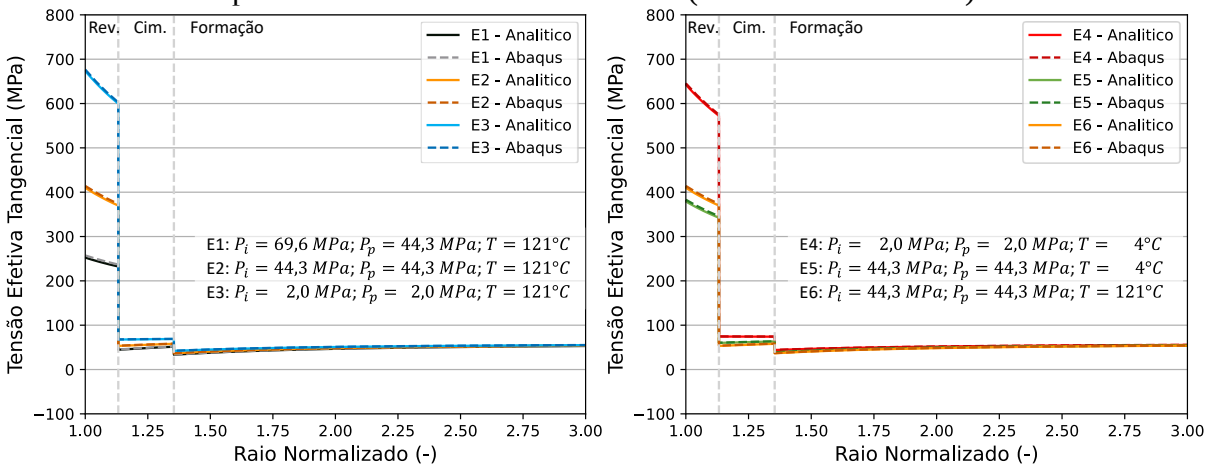
Figura 6.14 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil (análise termoelástica)



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

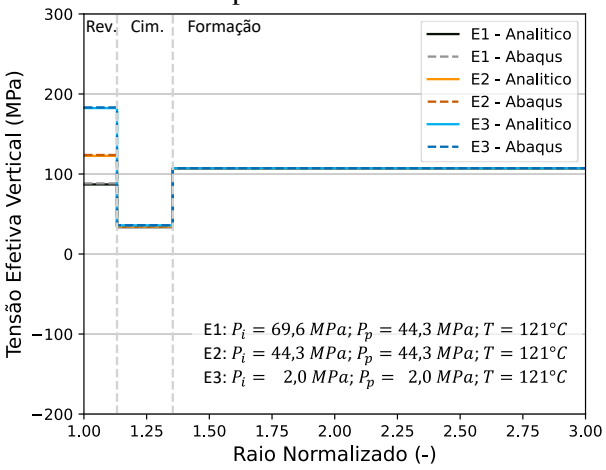
Figura 6.15 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil (análise termoelástica)



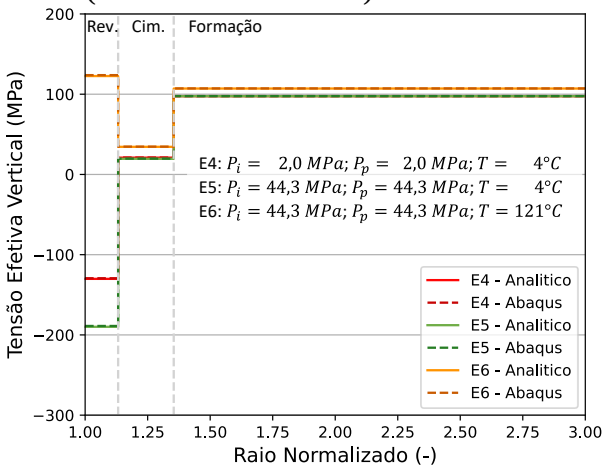
(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Figura 6.16 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil (análise termoelástica)



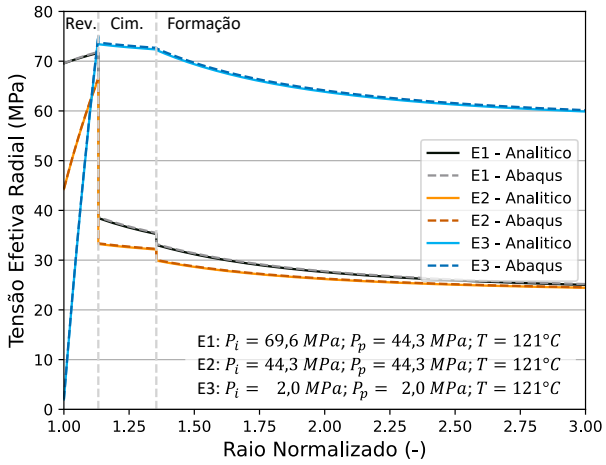
(a) Eventos 1 ao 3



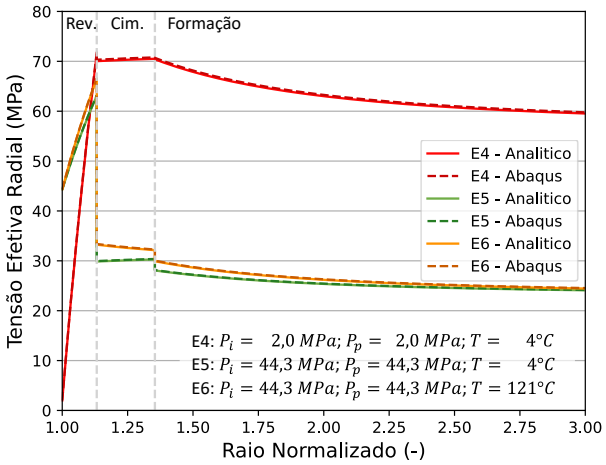
(b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Figura 6.17 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva radial para diferentes eventos de vida útil (análise termo-poroelástica)



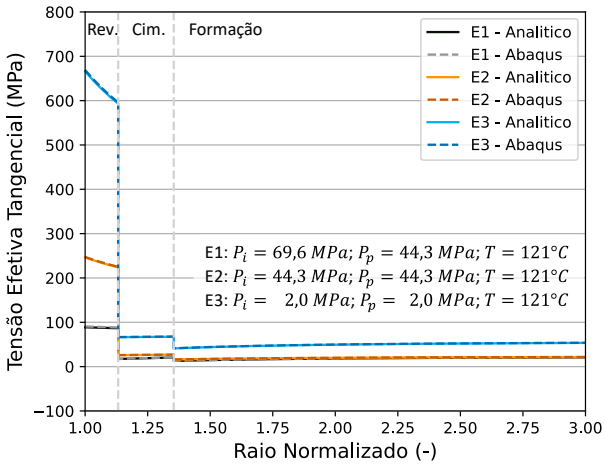
(a) Eventos 1 ao 3



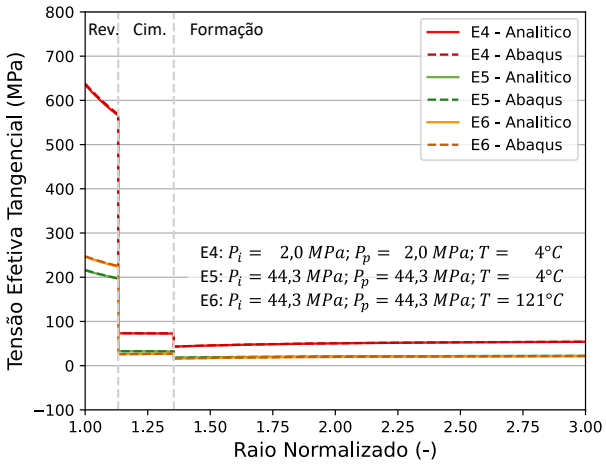
(b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Figura 6.18 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva tangencial para diferentes eventos de vida útil (análise termo-poroelástica)



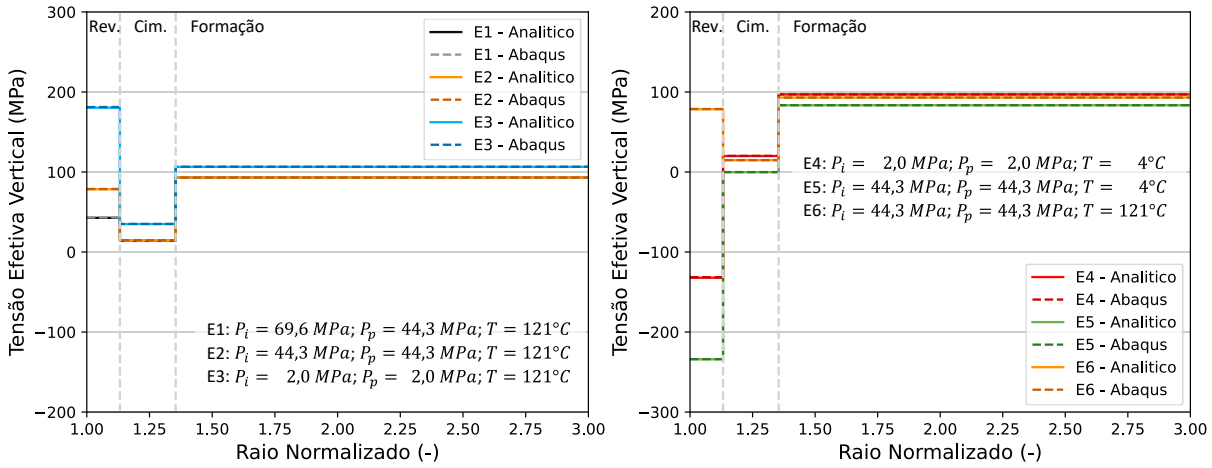
(a) Eventos 1 ao 3



(b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

Figura 6.19 - Comparação entre os resultados analíticos e numéricos: tensão efetiva vertical para diferentes eventos de vida útil (análise termo-poroelástica)



(a) Eventos 1 ao 3 (b) Eventos 4 ao 6

Fonte: Autor (2025).

De modo geral, observa-se excelente concordância entre as abordagens analítica e numérica em ambas as análises, termoelástica e termo-poroelástica. As curvas apresentam sobreposição significativa, indicando que a modelagem numérica realizada é eficaz em capturar os efeitos térmicos, mecânicos e, no caso termo-poroelástico, também a influência da poropressão sobre o comportamento do sistema.

Para complementar a avaliação gráfica, são apresentadas tabelas com as diferenças entre os resultados numéricos e analíticos em pontos localizados nas extremidades e nas interfaces do sistema avaliado. As Tabelas 6.3 e 6.4 reúnem, respectivamente, para as abordagens termoelástica e termo-poroelástica, os erros relativos obtidos nas seguintes regiões: parede interna do revestimento, interface revestimento–cimento, interface cimento–formação e parede externa da formação. Os erros são apresentados para cada uma das componentes de tensão efetiva, ao longo dos seis eventos operacionais simulados. As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam a mesma análise, porém expressando as diferenças absolutas (em MPa) entre os resultados numéricos e analíticos.

Tabela 6.3 – Erro relativo (%) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σ_r), tangencial (σ_θ) e vertical (σ_z), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termoelástica

Ponto analisado	Domínio	Evento 1			Evento 2			Evento 3			Evento 4			Evento 5			Evento 6		
		σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z
Parede interna do Rev.	Revestimento	0,00	1,91	1,49	0,01	1,02	0,92	0,45	0,47	0,47	0,43	0,43	0,58	0,01	1,01	0,54	0,01	1,02	0,92
Interface Rev.–Cim.	Revestimento	0,58	1,85	1,49	0,53	1,01	0,92	0,43	0,47	0,47	0,39	0,44	0,58	0,50	1,00	0,54	0,53	1,01	0,92
Interface Rev.–Cim.	Cimento	0,56	1,12	0,75	0,53	0,81	0,64	0,45	0,47	0,46	0,42	0,37	0,70	0,50	0,65	1,03	0,53	0,81	0,64
Interface Cim.–Form.	Cimento	0,61	0,97	0,75	0,56	0,74	0,64	0,43	0,47	0,46	0,42	0,38	0,70	0,52	0,62	1,03	0,56	0,74	0,64
Interface Cim.–Form.	Formação	0,59	0,98	0,15	0,54	0,78	0,13	0,43	0,51	0,10	0,39	0,43	0,10	0,50	0,67	0,13	0,54	0,78	0,13
Parede externa da form.	Formação	0,00	1,42	0,15	0,00	1,23	0,13	0,00	0,92	0,10	0,00	0,82	0,10	0,00	1,12	0,13	0,00	1,23	0,13

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6.4 – Erro relativo (%) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σ_r), tangencial (σ_θ) e vertical (σ_z), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termo-poroelástica

Ponto analisado	Domínio	Evento 1			Evento 2			Evento 3			Evento 4			Evento 5			Evento 6		
		σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z
Parede interna do Rev.	Revestimento	0,00	2,11	1,18	0,01	0,51	0,43	0,44	0,45	0,45	0,42	0,42	0,54	0,01	0,41	0,10	0,01	0,51	0,43
Interface Rev.–Cim.	Revestimento	0,29	1,93	1,18	0,20	0,50	0,43	0,41	0,46	0,45	0,38	0,42	0,54	0,14	0,40	0,10	0,20	0,50	0,43
Interface Rev.–Cim.	Cimento	0,51	1,14	0,70	0,40	0,50	0,44	0,45	0,46	0,45	0,42	0,36	0,69	0,33	0,27	27,72	0,40	0,50	0,44
Interface Cim.–Form.	Cimento	0,56	0,95	0,70	0,42	0,48	0,44	0,45	0,45	0,45	0,41	0,37	0,69	0,32	0,28	27,72	0,42	0,48	0,44
Interface Cim.–Form.	Formação	0,52	0,95	0,06	0,36	0,50	0,04	0,42	0,50	0,10	0,38	0,42	0,09	0,25	0,31	0,03	0,36	0,50	0,04
Parede externa da form.	Formação	0,09	1,38	0,06	0,08	0,91	0,04	0,00	0,91	0,10	0,00	0,80	0,09	0,08	0,63	0,03	0,08	0,91	0,04

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6.5 – Diferença absoluta (MPa) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σ_r), tangencial (σ_θ) e vertical (σ_z), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termoelástica

Ponto analisado	Domínio	Evento 1			Evento 2			Evento 3			Evento 4			Evento 5			Evento 6		
		σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z
Parede interna do Rev.	Revest.	0,003	4,812	1,299	0,005	4,191	1,130	0,009	3,158	0,851	0,009	2,792	0,751	0,005	3,826	1,032	0,005	4,191	1,130
Interface Rev.–Cim.	Revest.	0,521	4,288	1,299	0,447	3,740	1,130	0,322	2,828	0,851	0,283	2,501	0,751	0,408	3,413	1,032	0,447	3,740	1,130
Interface Rev.–Cim.	Cimento	0,505	0,502	0,252	0,444	0,433	0,219	0,342	0,318	0,165	0,307	0,276	0,146	0,409	0,391	0,200	0,444	0,433	0,219
Interface Cim.–Form.	Cimento	0,509	0,498	0,252	0,445	0,431	0,219	0,321	0,320	0,165	0,302	0,281	0,146	0,409	0,392	0,200	0,445	0,431	0,219
Interface Cim.–Form.	Formação	0,490	0,327	0,163	0,427	0,285	0,142	0,321	0,214	0,107	0,284	0,189	0,095	0,390	0,260	0,130	0,427	0,285	0,142
Parede externa da form.	Formação	0,001	0,818	0,163	0,001	0,712	0,142	0,000	0,536	0,107	0,000	0,474	0,095	0,001	0,650	0,130	0,001	0,712	0,142

Fonte: Autor (2025).

Tabela 6.6 – Diferença absoluta (MPa) dos resultados numéricos em relação aos analíticos para as tensões efetivas nas direções radial (σ_r), tangencial (σ_θ) e vertical (σ_z), ao longo dos seus eventos, para a abordagem termo-poroelástica

Ponto analisado	Domínio	Evento 1			Evento 2			Evento 3			Evento 4			Evento 5			Evento 6		
		σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z	σ_r	σ_θ	σ_z
Parede interna do Rev.	Revest.	0,001	1,875	0,506	0,003	1,254	0,338	0,009	3,025	0,814	0,008	2,659	0,715	0,002	0,888	0,239	0,003	1,254	0,338
Interface Rev.–Cim.	Revest.	0,205	1,670	0,506	0,130	1,122	0,338	0,308	2,709	0,815	0,268	2,383	0,715	0,091	0,795	0,239	0,130	1,122	0,338
Interface Rev.–Cim.	Cimento	0,195	0,197	0,098	0,134	0,128	0,066	0,328	0,304	0,158	0,293	0,262	0,139	0,099	0,087	0,046	0,134	0,128	0,066
Interface Cim.–Form.	Cimento	0,197	0,195	0,098	0,134	0,128	0,066	0,325	0,307	0,158	0,288	0,267	0,139	0,097	0,089	0,046	0,134	0,128	0,066
Interface Cim.–Form.	Formação	0,171	0,123	0,059	0,108	0,081	0,038	0,307	0,205	0,102	0,269	0,180	0,090	0,070	0,056	0,025	0,108	0,081	0,038
Parede externa da form.	Formação	0,020	0,314	0,059	0,020	0,208	0,038	0,001	0,513	0,102	0,001	0,451	0,090	0,020	0,146	0,025	0,020	0,208	0,038

Fonte: Autor (2025).

Os dados reunidos indicam que, na maioria dos pontos avaliados, os erros relativos permanecem inferiores a 2%, evidenciando a elevada acurácia da modelagem numérica desenvolvida. A principal exceção ocorre na abordagem termo-poroelástica, especificamente na componente de tensão vertical durante o Evento 5, nas interfaces entre o cimento e os domínios adjacentes (revestimento e formação), onde o erro relativo atinge 27,7% (Tabela 6.4). No entanto, ao se analisar a diferença absoluta de tensão nesses pontos, observa-se um desvio de apenas 0,046 MPa (Tabela 6.6) , valor da mesma ordem de grandeza, e até inferior, aos desvios observados nas demais direções de tensão e nos demais eventos. Esse fato justifica a ausência de discrepância visual perceptível nos gráficos. Ressalta-se, ainda, que, para esses mesmos pontos no Evento 5, embora a direção vertical apresente erro relativo elevado, as direções radial e tangencial apresentam erros inferiores a 0,5%.

Para uma análise mais detalhada deste erro obtido, a Tabela 6.7 apresenta os valores das tensões verticais efetivas obtidas pelas soluções analítica e numérica para a abordagem termo-poroelástica. Observa-se que tais regiões, onde foram registrados os maiores erros relativos, coincidem com zonas de baixo nível de tensão, com valores próximos de zero. Nestes casos, mesmo pequenas variações absolutas podem representar grandes variações percentuais, o que acentua artificialmente o erro relativo.

Complementarmente, com o intuito de compreender as divergências observadas na bainha de cimento para o Evento 5, a Tabela 6.8 apresenta a comparação entre os deslocamentos radiais obtidos pelas abordagens analítica e numérica nas interfaces revestimento–cimento e cimento–formação para a abordagem termo-poroelástica neste evento. Verifica-se que, apesar das diferenças na tensão efetiva vertical, os erros relativos para o deslocamento radial permanecem em torno de 2,3%, sendo considerados pouco significativos.

Cabe destacar que os resultados de tensão obtidos numericamente foram extraídos nos nós do modelo. No Abaqus®, esses valores são calculados inicialmente nos pontos de integração (pontos de Gauss) dos elementos e posteriormente extrapolados para os nós. Esse processo de extrapolação pode introduzir discrepâncias em relação aos valores analíticos, que são calculados diretamente nas coordenadas nodais. Por outro lado, os deslocamentos são variáveis primárias do método dos elementos finitos e, portanto, são diretamente determinados nos nós do modelo, sem a necessidade de extrapolação. Isso tende a conferir maior confiabilidade aos resultados de deslocamento, justificando a boa concordância observada com as soluções analíticas.

Tabela 6.7 – Comparação entre os resultados numéricos e analíticos para a tensão efetiva vertical ao longo dos eventos, para a abordagem termo-poroelástica

Ponto analisado	Domínio	Evento 1		Evento 2		Evento 3		Evento 4		Evento 5		Evento 6	
		Analítico	Numérico	Analítico	Numérico	Analítico	Numérico	Analítico	Numérico	Analítico	Numérico	Analítico	Numérico
Parede interna do Rev.	Revest.	42,74	43,25	78,43	78,76	180,38	181,19	-132,13	-131,42	-234,08	-233,85	78,43	78,76
Interface Rev.–Cim.	Revest.	42,74	43,25	78,43	78,76	180,38	181,19	-132,13	-131,42	-234,08	-233,85	78,43	78,76
Interface Rev.–Cim.	Cimento	13,93	14,03	14,78	14,84	34,95	35,11	20,01	20,15	-0,17	-0,12	14,78	14,84
Interface Cim.–Form.	Cimento	13,93	14,03	14,78	14,84	34,95	35,11	20,01	20,15	-0,17	-0,12	14,78	14,84
Interface Cim.–Form.	Formação	92,99	93,05	93,01	93,05	106,49	106,59	96,92	97,01	83,45	83,47	93,01	93,05
Parede externa da form.	Formação	92,99	93,05	93,01	93,05	106,49	106,59	96,92	97,01	83,45	83,47	93,01	93,05

Fonte: Joulin *et al.* (2022).

Tabela 6.8 – Comparação entre os resultados numéricos e analíticos para o deslocamento radial para o Evento 5 para a abordagem termo-poroelástica

Localização	Analítico [mm]s	Numérico [mm]	Erro absoluto [mm]	Erro relativo
Interface revestimento-cimento	0,498	0,487	0,011	2,31%
Interface cimento-formação	0,589	0,575	0,014	2,33%

Fonte: Joulin *et al.* (2022).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do comportamento poroso da bainha de cimento na distribuição de tensões no sistema revestimento-cimento-formação, bem como em sua integridade estrutural, por meio de uma formulação termo-poroelástica. A relevância dessa consideração foi investigada a partir da comparação entre os resultados obtidos com abordagens termoelásticas e termo-poroelásticas, tanto sob o ponto de vista da magnitude das tensões efetivas quanto da avaliação da integridade estrutural.

A metodologia empregada baseou-se na formulação de um modelo matemático com hipóteses simplificadoras, como estado plano de deformação, materiais homogêneos e isotrópicos, interfaces perfeitamente aderidas e ausência de fluxo de fluido. As soluções foram obtidas de forma analítica e numérica, esta última realizada no *software* Abaqus®, o que permitiu uma análise de consistência entre ambas as abordagens. Para a avaliação da integridade estrutural da bainha, foram adotados critérios de falha por tração e cisalhamento.

Os resultados analíticos demonstraram que a desconsideração do comportamento poroso da bainha de cimento pode levar tanto à superestimação quanto à subestimação das tensões efetivas, a depender do tipo de carregamento aplicado. Observou-se que, embora a abordagem termoelástica tenda a gerar tensões efetivas mais elevadas, isso não implica necessariamente em avaliações mais conservadoras. Em diversas situações, a função de falha calculada pela abordagem termoelástica indicou fatores de segurança artificialmente maiores do que os obtidos na análise termo-poroelástica, sugerindo, de forma equivocada, uma maior margem de integridade estrutural. Nesse contexto, a formulação termo-poroelástica mostrou-se mais realista, ao incorporar de maneira mais fiel os efeitos da poropressão na resposta do sistema.

A modelagem numérica adotada apresentou excelente concordância com os resultados analíticos, tanto para a abordagem termoelástica quanto para a termo-poroelástica. Os erros relativos obtidos nas comparações foram, na maioria dos casos, inferiores a 2%, o que reforça a confiabilidade da metodologia numérica empregada. A principal exceção ocorreu na componente vertical da tensão efetiva, durante um dos eventos operacionais analisados, onde foi registrado um erro relativo mais elevado. Uma possível justificativa para essa discrepância se deu pelo fato de os níveis de tensão nessa direção estarem próximos de zero, o que amplifica os erros relativos mesmo diante de diferenças absolutas pequenas. Ainda assim, os resultados

numéricos demonstraram-se adequados para representar a distribuição de tensões e o comportamento estrutural da bainha de cimento sob diferentes condições de carregamento.

Como contribuição prática, este trabalho estabelece uma base metodológica sólida para a modelagem termo-poroelástica da bainha de cimento, sendo aplicável a análises de integridade estrutural em projetos de poços de petróleo. Os resultados aqui obtidos fornecem subsídios relevantes para engenheiros e projetistas de poços, especialmente no dimensionamento de bainhas de cimento em condições de alta complexidade térmica e hidráulica, como em poços de injeção de CO_2 e de alta pressão e temperatura (HPHT).

Embora o modelo numérico adotado neste trabalho represente uma configuração simplificada, com solução analítica conhecida, ele se constitui como um passo inicial fundamental para o desenvolvimento de investigações mais complexas. A partir da metodologia verificada, torna-se possível avançar para análises mais sofisticadas, cuja representação por meio de soluções analíticas torna-se inviável.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se, para trabalhos futuros, o aprimoramento da modelagem numérica por meio dos seguintes estudos:

- Aplicação da metodologia desenvolvida a sistemas com múltiplos revestimentos e bainhas de cimento, incluindo casos com revestimentos descentralizados e geometrias ovalizadas, que refletem condições mais realistas de campo;
- Análise de falhas por cimentação deficiente, considerando regiões não cimentadas ou mal preenchidas, a fim de reproduzir cenários operacionais com falha de cimentação primária;
- Avaliação da influência das variações nas propriedades mecânicas e porosas da bainha de cimento sobre a resposta estrutural do sistema;
- Investigação dos efeitos da variação individual e combinada da poropressão e da temperatura;
- Incorporação da análise de fluxo de fluido para considerar o acoplamento hidro-mecânico e avaliar a influência dos parâmetros poroelásticos em regimes transientes;
- Modelagem de comportamentos não lineares dos materiais; e

- Simulação do descolamento na interface cimento–formação e cimento–revestimento, por meio da utilização de elementos coesivos e leis constitutivas específicas para a adesão.

Em síntese, este estudo destaca a importância da consideração da porosidade no comportamento estrutural da bainha de cimento e demonstra que, mesmo em modelagens simplificadas, é possível obter análises representativas iniciais para uma verificação preliminar das tensões do sistema e da integridade estrutural da bainha de cimento. A proposta aqui apresentada contribui para o aprimoramento das práticas de engenharia de poços, com impacto direto na segurança e na eficiência da cimentação em projetos de petróleo e gás.

REFERÊNCIAS

AL-AJMI, A. **Wellbore stability analysis based on a newtrue-triaxial failure criterion** (PhD thesis). KTH, Land Water Resour. Eng, 2006.

AL-AJMI, A. M.; ZIMMERMAN, R. W. Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 42, n. 3, p. 431-439, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.11.004.

ALTMANN, J. B. **Poroelastic effects in reservoir modelling**. 2010. Tese de Doutorado. Karlsruher Inst. für Technologie, Diss., 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Standard 65–2: Isolating Potential Flow Zones During Well Construction**. 2. ed. Washington, DC: API, 2010. 60 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API TR 5C3: Calculating performance properties of pipe used as casing or tubing.** Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2018.

ARAÚJO, J. P. N. et al. Automated oil well casing design on a collaborative web environment. **Rio Oil & Gas Expo and Conference**, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2020. DOI: https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2020.139

AUSTRALIA. Montara Commission of Inquiry. **Report of the Montara Commission of Inquiry**. 2010. Disponível em: https://catalogue.nla.gov.au/catalog/5738983 . Acesso em: 26 jan. 2025.

COULOMB, C. A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. **Mémoires de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences**, Paris, v. 7, p. 343–382, 1776.

COUSSY, O. **Poromechanics**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.

DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus 2019: Analysis User's Manual. **Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.**, 2019.

DETOURNAY, E.; CHENG, A. H. Fundamentals of poroelasticity. **Analysis and design methods. pergamon**, 1993. p. 113-171.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional 2024: relatório síntese – ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024. Acesso em: 26 mar. 2025.

FIRME, P. A. L. P. **Modelagem constitutiva e análise probabilística aplicadas a poços em zonas de sal**. 2013. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. DOI: https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.23909.

GHOLAMI, R.; AADNOY, B.; FAKHARI, N. A thermo-poroelastic analytical approach to evaluate cement sheath integrity in deep vertical wells. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 147, p. 536-546, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.09.024.

GRAY, K. E.; PODNOS, E.; BECKER, E. Finite element studies of near-wellbore region during cementing operations: Part I. **SPE drilling & completion**, v. 24, n. 01, p. 127-136, 2009. DOI: https://doi.org/10.2118/106998-PA.

HEATHMAN, J.; BECK, F. E. Finite element analysis couples casing and cement designs for HP/HT wells in East Texas. **SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition**. SPE, 2006. p. SPE-98869-MS. DOI: https://doi.org/10.2118/98869-MS.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS - IBP. **Diretrizes para projeto e construção de poços marítimos**. Rio de Janeiro: IBP, 2022. 127 p. (Caderno de boas práticas de E&P). e-book em PDF. Disponível em: https://www.ibp.org.br/biblioteca.

JOULIN, C.; LAGARDE, F.; LE GOFF, T.-H. An Open-Access Well Integrity Tool to Study Legacy Wells Re-Purposed for CO2 Injection. **ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium**. ARMA, 2022. p. ARMA-2022-0980. DOI: https://doi.org/10.56952/ARMA-2022-0980.

LIU, G. (ed.). **Applied Well Cementing Engineering**. Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2021.

MENG, M. et al. Predicting Cement-Sheath Integrity with Consideration of Initial State of Stress and Thermoporoelastic Effects. **SPE Journal**, v. 26, p. 3505−3528, 2021. DOI: https://doi.org/10.2118/205344-PA.

MOGI, K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 5, p. 1255-1269, 1971. DOI: https://doi.org/10.1029/JB076i005p01255.

MORAIS, J. M.; OLIVEIRA, J M. **O setor de petróleo no Brasil e os impactos do Projeto de Lei nº 3.178/2019 no pré-sal**. Brasília: Ipea, 2022. (Nota Técnica, n. 98). DOI: http://dx.doi.org/10.38116/ntdiset98.

NELSON, E. B.; GUILLOT, D. (Ed.). **Well Cementing**. 2nd ed. Sugar Land, Texas: Schlumberger, 2006. ISBN 978-0978853006.

NOWACKI, W. **Thermoelasticity**. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1986.

NUNES, J. H. C. et al. Reliability-based analysis of collapse strength of casing tubes: the influence of correlation between design variables. **Rio Oil & Gas Expo and Conference**, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2020. DOI: https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2020.146

ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. **Python 3 Reference Manual**. CreateSpace, Scotts Valley, CA. 2009.

SILVA, T. B. et al. Uma abordagem probabilística na avaliação da integridade estrutural de poços de petróleo. **Rio Oil & Gas Expo and Conference**, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2020.

SIMONE, M.; PEREIRA, F. L.; ROEHL, D. M. Analytical methodology for wellbore integrity assessment considering casing-cement-formation interaction. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 94, p. 112-122, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.12.002.

THIERCELIN, M. J. et al. Cement design based on cement mechanical response. **SPE Drilling & Completion**, v. 13, n. 4, p. 266-273, 1998. DOI: https://doi.org/10.2118/52890-PA.

THOMAS, J. E (org.). **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 272 p. ISBN 978-8571930995.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1970.

VERNIK, L.; ZOBACK, M. D. Estimation of maximum horizontal principal stress magnitude from stress-induced well bore breakouts in the Cajon Pass scientific research borehole. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 97, n. B4, p. 5109-5119, 1992. DOI: https://doi.org/10.1029/91JB01673.

WANG, H. F. **Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology**. Princeton: Princeton University Press, 2000.

WANG, Z. et al. Effect of poroelasticity on the integrity of cement sheath in heavy oil wells. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, New York, v. 58, n. 5, p. 851-861, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10553-022-01460-x.

APÊNDICES

APÊNDICE A – HISTÓRICO DO ESTUDO DE CONVERGÊNCIA REALIZADO

A Tabela A.1 apresenta o histórico de configurações de malha de elementos finitos utilizadas para o estudo de convergência realizado no trabalho.

Tabela A.1 – Configurações de malha de elementos finitos utilizadas para o estudo de convergência realizado no trabalho

Malha de Elementos Finitos	Total de Elementos no Modelo	Ref. Tangencial (n° de elem.)	Refinamento Radial (n° de elementos)			Fator de *bias* (Formação)
			Revestimento	Cimento	Formação	
M1	220	10	1	1	20	15
M2	585	15	2	2	35	20
M3	1980	30	3	3	60	20
M4	4950	50	4	5	90	20
M5	12960	80	5	7	150	20
M6	22200	100	8	14	200	25
M7	54600	150	12	22	330	25

Fonte: Autor (2025).

As Tabelas A.2 a A.5 apresentam os resultados de deslocamento radial, tensão efetiva radial, diferenças relativas entre refinamentos consecutivos e tempos de simulação para cada tipo de elemento finito utilizado no estudo de convergência da malha.

Tabela A.2 – Parâmetros avaliados no estudo de convergência utilizando elemento CPE4: comparação entre refinamentos sucessivos

Malha de Elementos Finitos	Deslocamento Radial [mm]	Dif. Relativa	Tempo de simulação [s]
M1	0,16913	-	22
M2	0,16878	0,208%	22
M3	0,16866	0,072%	22
M4	0,16863	0,020%	24
M5	0,16861	0,008%	24
M6	0,16861	0,002%	30
M7	0,16861	0,001%	45

Fonte: Autor (2025).

Tabela A.3 – Parâmetros avaliados no estudo de convergência utilizando elemento CPE8: comparação entre refinamentos sucessivos

Malha de Elementos Finitos	Deslocamento Radial [mm]	Dif. Relativa	Tempo de simulação [s]
M1	0,16759	-	22
M2	0,16759	0,001%	22
M3	0,16759	0,000%	23
M4	0,16759	0,000%	25
M5	0,16759	0,000%	30
M6	0,16759	0,000%	41
M7	0,16759	0,000%	75

Fonte: Autor (2025).

Tabela A.4 – Parâmetros avaliados no estudo de convergência utilizando elemento CPE4R: comparação entre refinamentos sucessivos

Malha de Elementos Finitos	Deslocamento Radial [mm]	Dif. Relativa	Tempo de simulação [s]
M1	0,16759	-	22
M2	0,16759	0,004%	22
M3	0,16759	0,001%	22
M4	0,16759	0,000%	23
M5	0,16759	0,000%	24
M6	0,16759	0,000%	29
M7	0,16759	0,000%	38

Fonte: Autor (2025).

Tabela A.5 – Parâmetros avaliados no estudo de convergência utilizando elemento CPE8R: comparação entre refinamentos sucessivos

Malha de Elementos Finitos	Deslocamento Radial [mm]	Dif. Relativa	Tempo de simulação [s]
M1	0,16758	-	22
M2	0,16759	0,007%	22
M3	0,16759	0,004%	22
M4	0,16759	0,001%	24
M5	0,16759	0,000%	29
M6	0,16759	0,000%	37
M7	0,16759	0,000%	64

Fonte: Autor (2025).

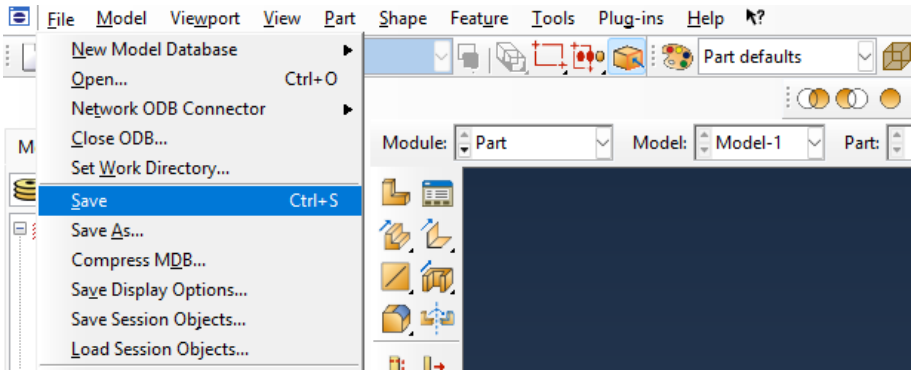
APÊNDICE B – TUTORIAL PARA MODELAGEM TERMO-POROELÁSTICA DO CENÁRIO DE ESTUDO NO ABAQUS®

Este apêndice apresenta um tutorial do procedimento utilizado para reproduzir a modelagem numérica termo-poroelástica no *software* Abaqus®, para o cenário de estudo descrito na Seção 6.1 deste trabalho.

B.1 Salvamento e criação do arquivo .cae

1. Inicie uma nova seção no Abaqus/CAE.
2. No menu superior, selecione **File → Save** para salvar o arquivo .cae.

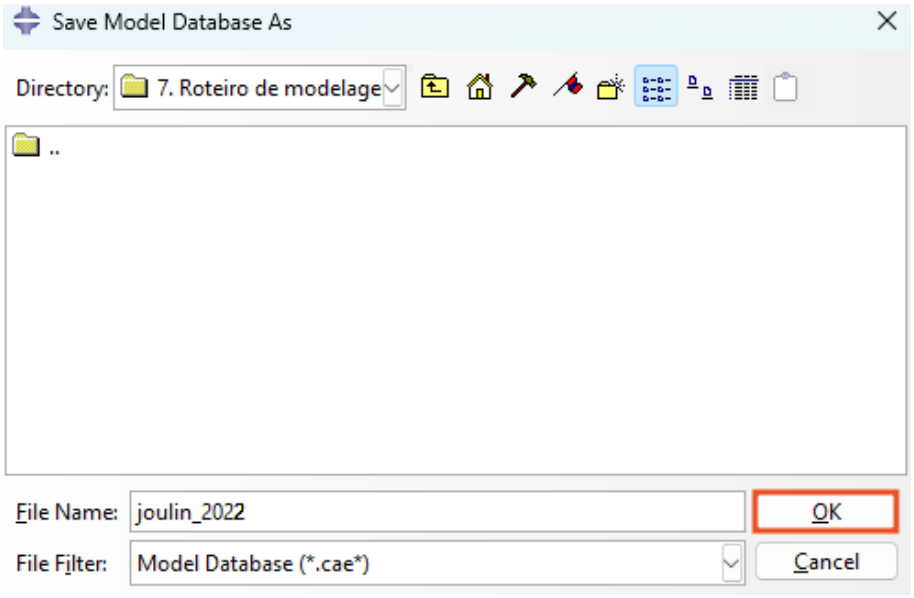
Figura B.1 – Menu para salvamento do modelo



Fonte: Autor (2025).

3. Escolha um diretório adequado no computador, defina o nome do arquivo e clique em **OK**. A extensão .cae é acrescentada automaticamente.

Figura B.2 – Janela para a definição do local e o nome do arquivo .cae



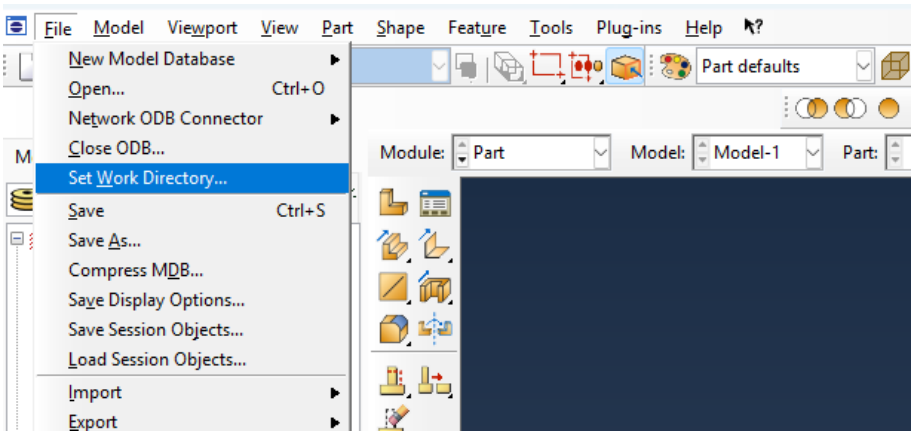
Fonte: Autor (2025).

Durante todo o processo de criação do modelo no Abaqus/CAE, utilize periodicamente o atalho **Ctrl+S** para salvar as alterações, reduzindo o risco de perda de informações em caso de problemas no computador.

B.2 Definição do diretório de trabalho (Work Directory)

1. Ainda no menu superior, selecione **File → Set Work Directory**.

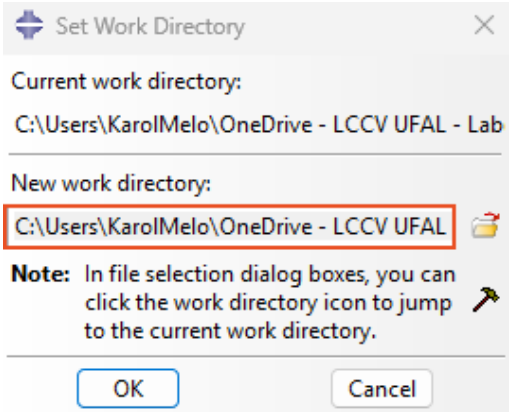
Figura B.3 – Menu para definir o diretório de trabalho



Fonte: Autor (2025).

2. Na janela exibida, defina o diretório que será utilizado para armazenamento de arquivos gerados pelo Abaqus (como arquivos .inp, .odb, .dat, etc.). Recomenda-se utilizar o mesmo diretório escolhido para o arquivo .CAE para facilitar a organização e localização dos arquivos.

Figura B.4 – Janela para definir o local do diretório de trabalho



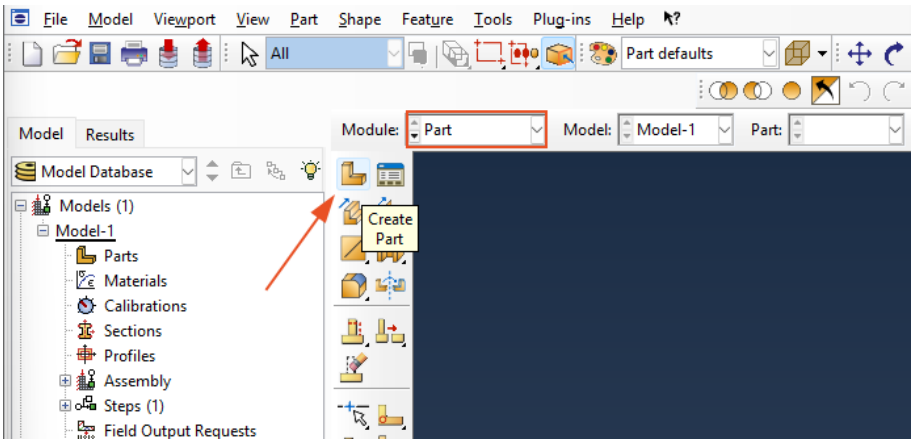
Fonte: Autor (2025).

B.3 Criação da part

O primeiro passo para a modelagem de um problema no Abaqus/CAE envolve o esboço da geometria. Neste caso, para análise do problema estudado, é necessário definir um corpo sólido deformável bidimensional e plano.

1. No módulo **Part**, clique em **Create Part**.

Figura B.5 – Local da opção Create Part no módulo Part



Fonte: Autor (2025).

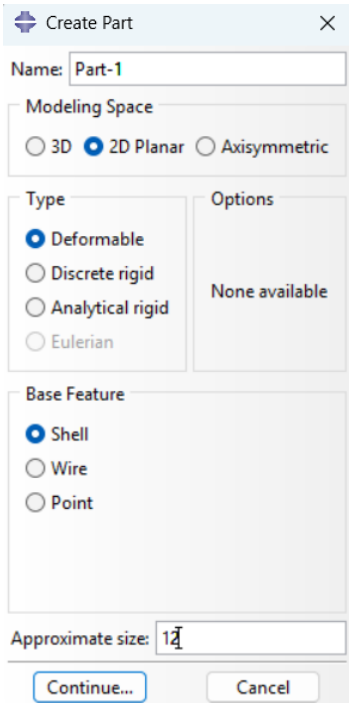
2. Na janela exibida:

a. Nomeie a parte.

b. Escolha o espaço de modelagem **2D Planar**, o tipo **Deformable** e o recurso base (**Base Feature**) do tipo **Shell**.

c. Defina a dimensão aproximada do modelo para facilitar o dimensionamento automático do espaço de trabalho pelo Abaqus (para este estudo, com diâmetro externo da formação de aproximadamente 10 m, selecione um valor ligeiramente maior, como 12).

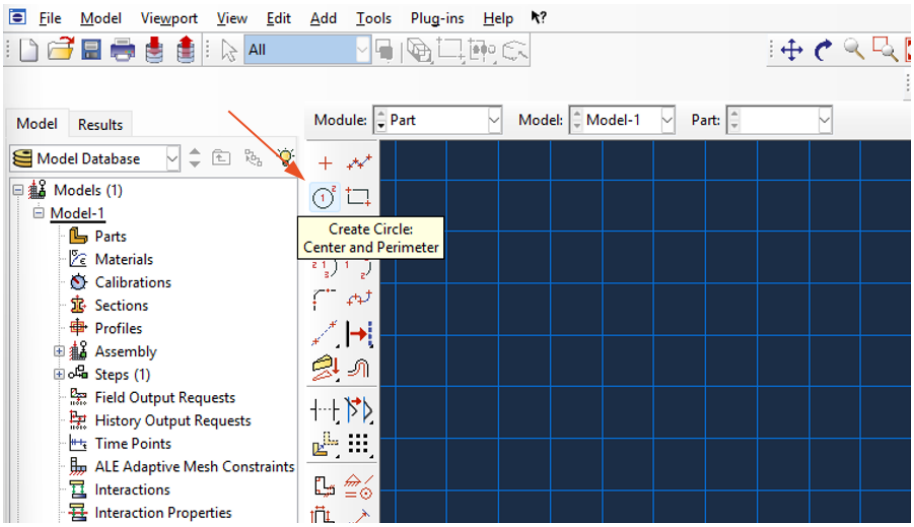
Figura B.6 – Janela para definir as configurações do objeto



Fonte: Autor (2025).

3. Utilize a ferramenta **Create Circle: Center and Perimeter** para definir a circunferência inicial, em que definirá o tamanho total da região da seção transversal do poço:

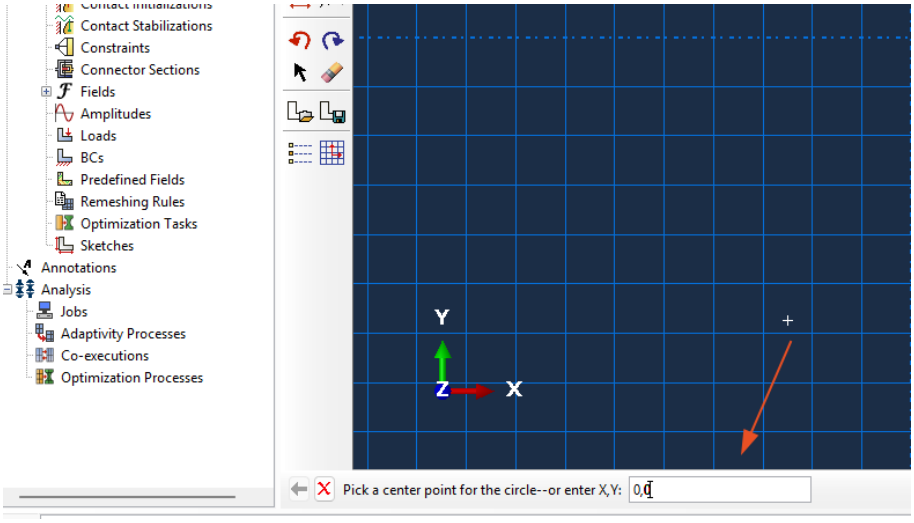
Figura B.7 – Local da ferramenta Create Circle: Center and Perimeter



Fonte: Autor (2025).

a. Defina o ponto do centro da circunferência (coordenada 0,0) e e pressione **Enter**.

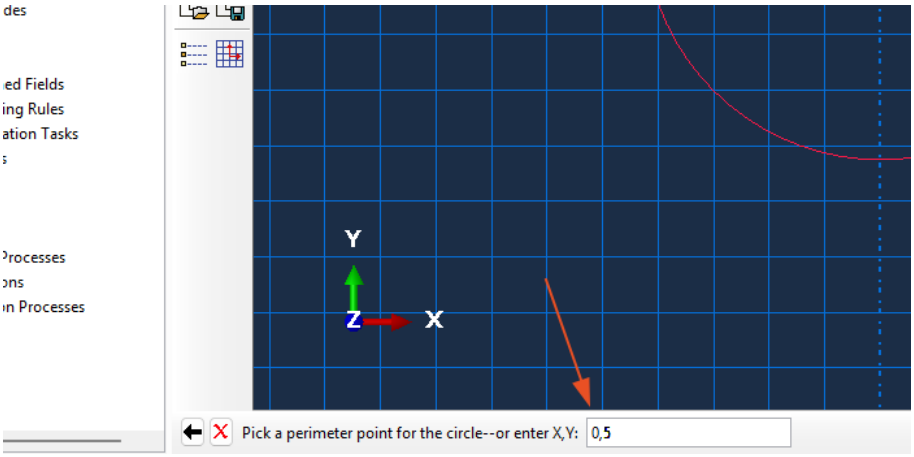
Figura B.8 – Definição das coordenadas do centro da circunferência



Fonte: Autor (2025).

b. Defina um ponto na periferia para dimensionar a circunferência, considerando o raio desejado (coordenada 0,5 neste caso), e pressione novamente **Enter**.

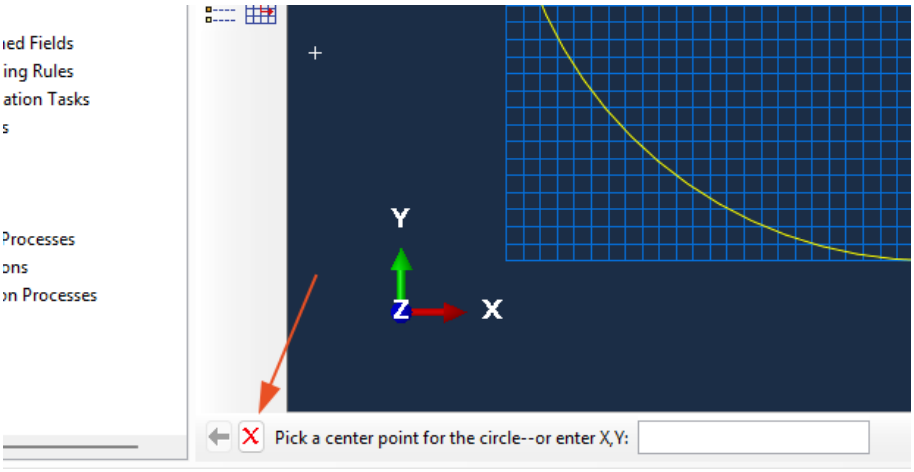
Figura B.9 – Definição da coordenada de um ponto localizado no perímetro da circunferência



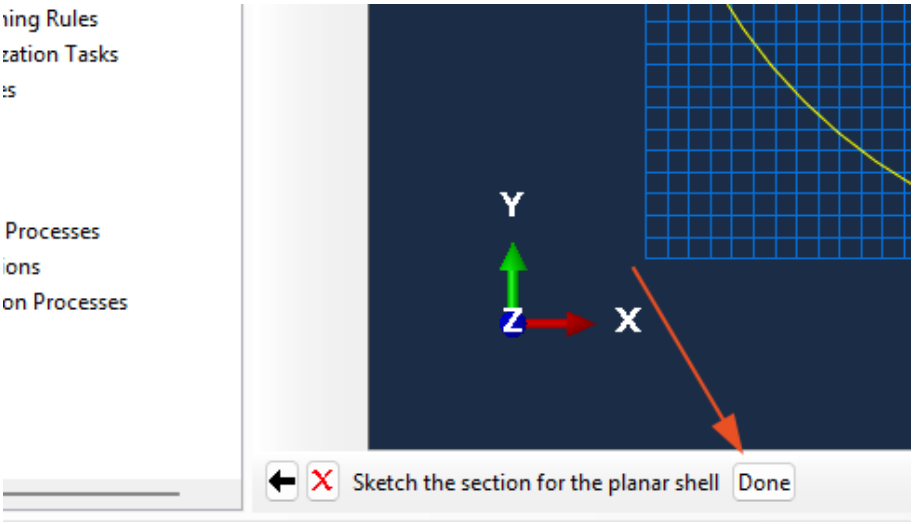
Fonte: Autor (2025).

c. Para sair do menu, selecione o ícone com um "**X" em vermelho** e depois em **Done**.

Figura B.10 – Procedimento para sair da seção de esboço



a) Localização do ícone com um "X" em vermelho

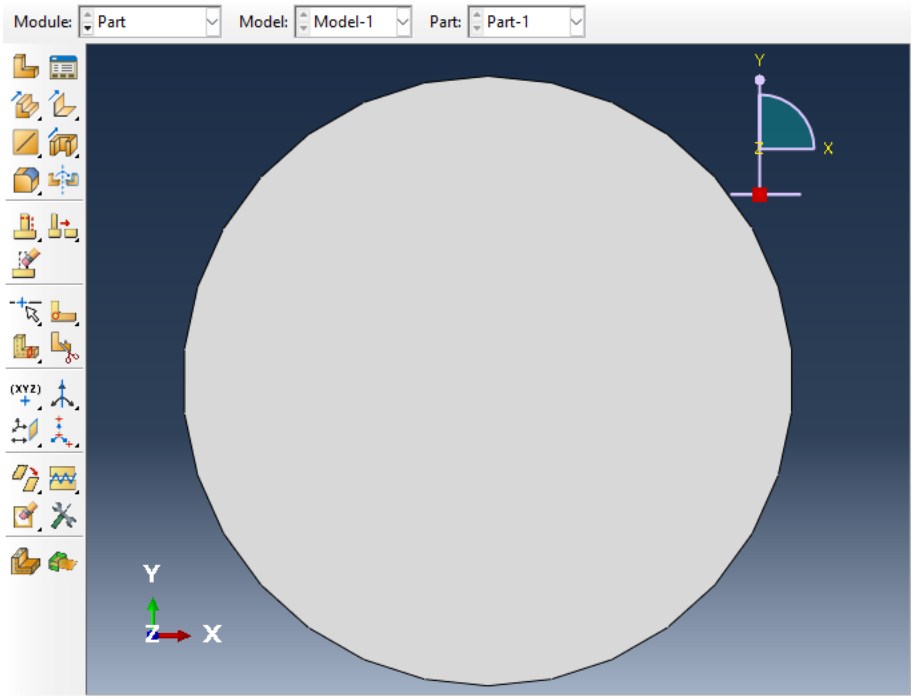


b) Localização do ícone "Done"

Fonte: Autor (2025).

Após a finalização dos procedimentos, a geometria inicial criada será semelhante àquela apresentada na Figura B.11.

Figura B.11 – Geometria após a criação da Part do modelo

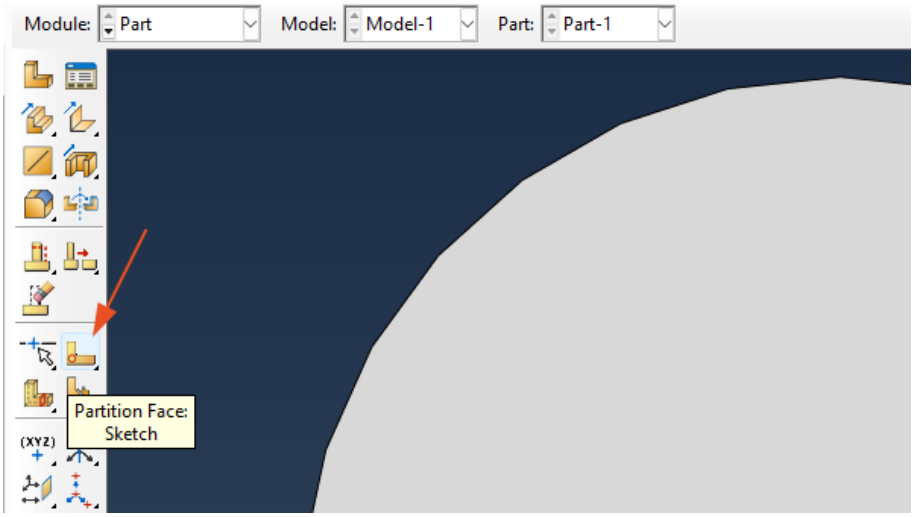


Fonte: Autor (2025).

A demarcação das regiões referentes ao revestimento, bainha de cimento e formação é feita a partir da realização de cortes na geometria do modelo.

4. No módulo Part, selecione **Partition Face: Sketch**.

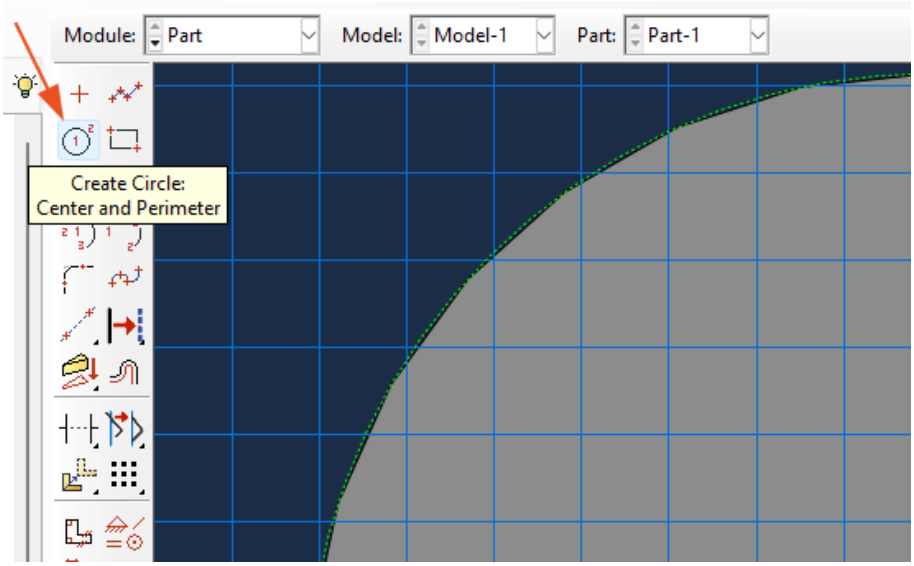
Figura B.12 – Local da opção Partition Face: Sketch no módulo Part



Fonte: Autor (2025).

5. Utilize a ferramenta **Create Circle: Center and Perimeter** (Figura B.13) para delimitar as regiões concêntricas correspondentes ao revestimento, à bainha de cimento e à formação rochosa adjacente.

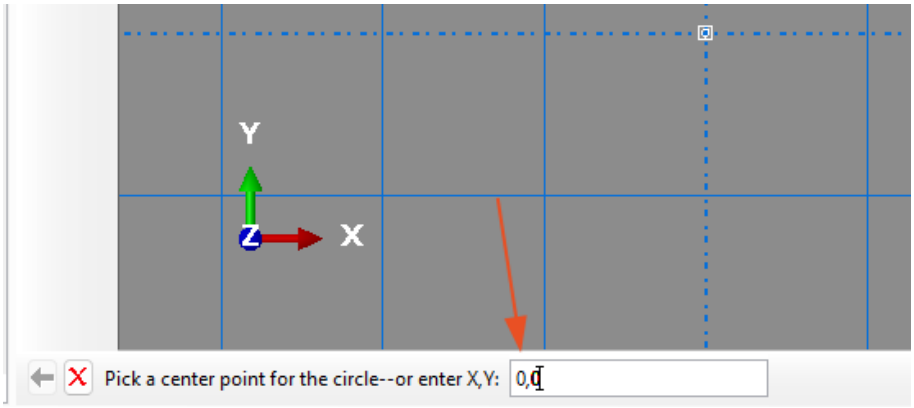
Figura B.13 – Local da ferramenta **Create Circle: Center and Perimeter**



Fonte: Autor (2025).

a. Clique no ponto central (origem do sistema de coordenadas, ponto (0,0)) para definir o centro da circunferência, conforme ilustrado na Figura B.14.

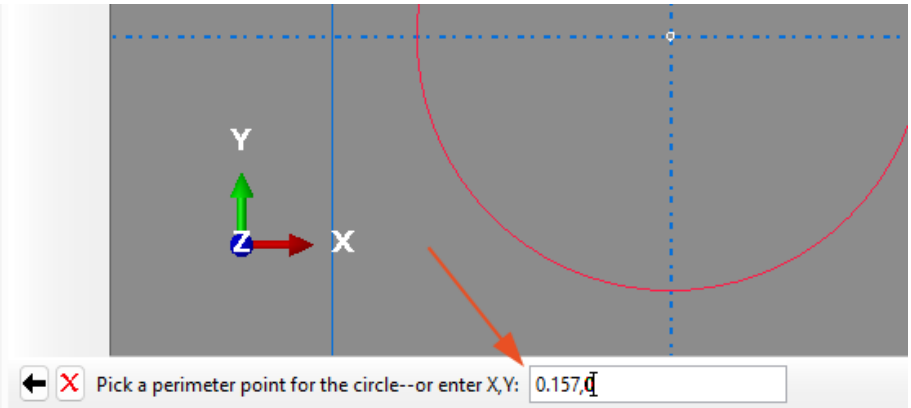
Figura B.14 – Definição do ponto no centro da circunferência



Fonte: Autor (2025).

b. Clique em um ponto sobre o perímetro que corresponda ao raio desejado para cada região específica (por exemplo, ponto (0.157,0) para o revestimento), conforme ilustrado na Figura B.15.

Figura B.15 – Definição de um ponto sobre o perímetro da circunferência

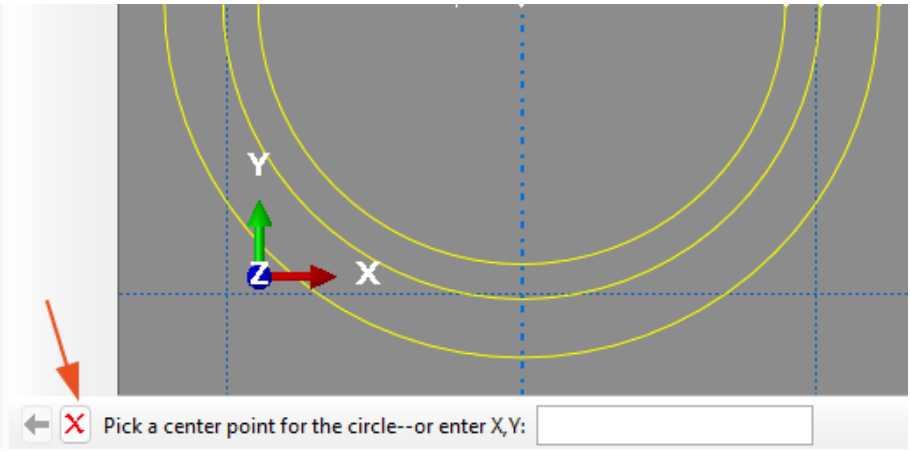


Fonte: Autor (2025).

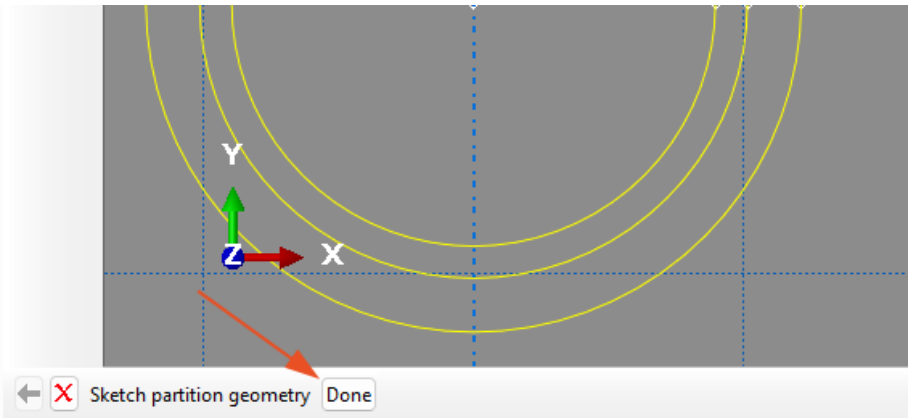
c. Repita esse procedimento para todas as regiões necessárias.

d. Após definir todas as circunferências desejadas, clique no ícone "**X**" vermelho (Figura B.16-a) para sair da ferramenta e em seguida clique em **Done** (Figura B.16-b).

Figura B.16 – Procedimento para sair da seção de recorte da geometria



a) Localização do ícone com um “X” em vermelho

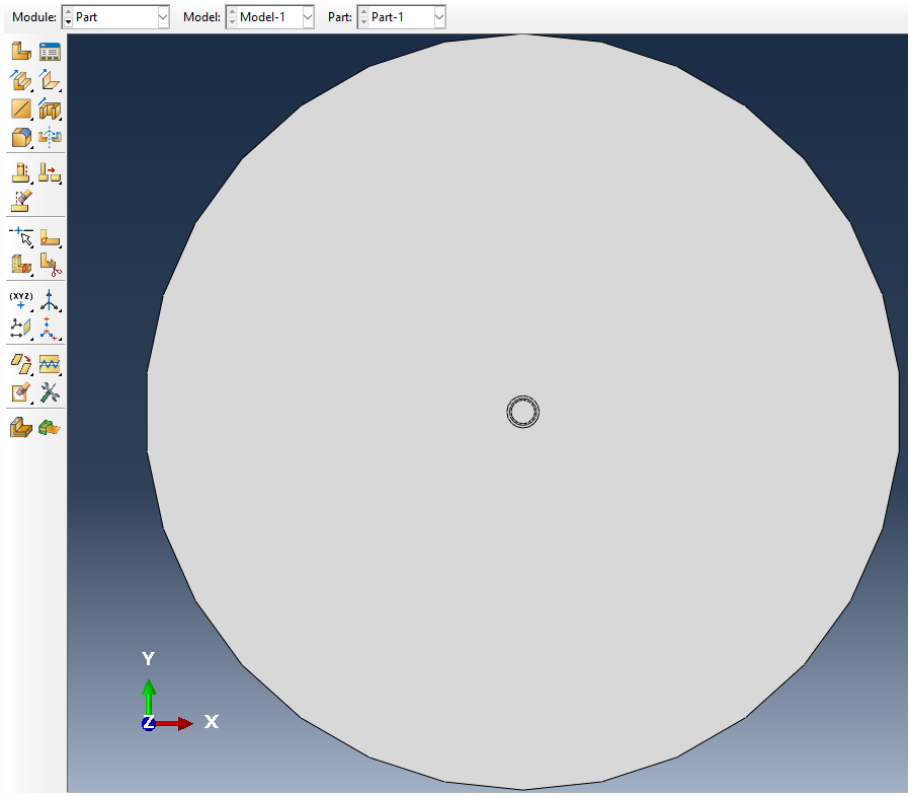


b) Localização do ícone “Done”

Fonte: Autor (2025).

A Figura B.17 apresenta a geometria do modelo após a realização das demarcações das regiões do revestimento, bainha de cimento e formação.

Figura B.17 – Geometria após a demarcações das regiões do revestimento, bainha de cimento e formação no modelo

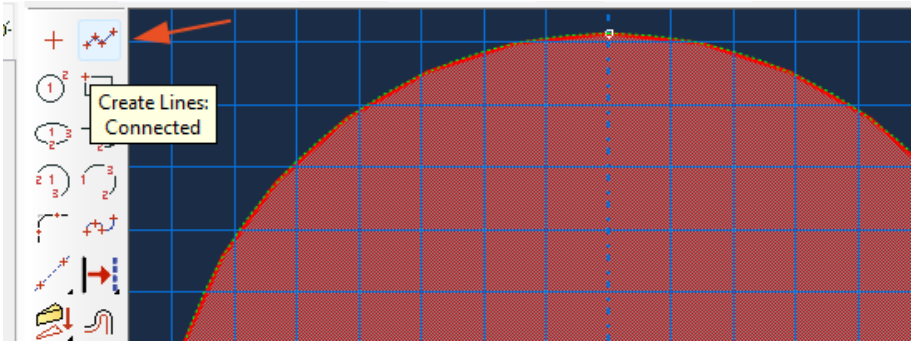


Fonte: Autor (2025).

Devido à simetria geométrica e das cargas aplicadas, a seção será reduzida a 1/4 da circunferência inicial.

6. Permaneça no módulo **Part** e selecione novamente a opção **Partition Face: Sketch**.
7. Selecione toda a geometria da seção transversal e clique em **Done**.
8. Utilize a ferramenta **Create Lines: Connected** para realizar cortes horizontais e verticais (Figura B.18).

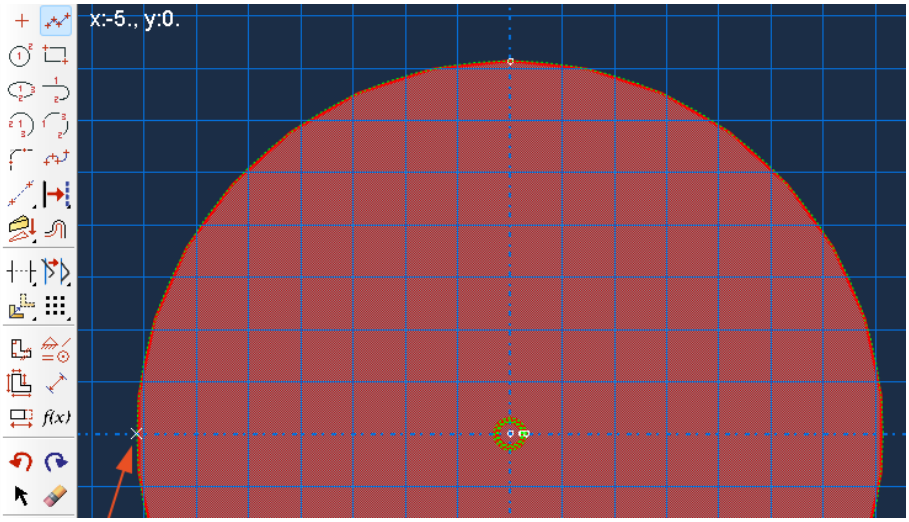
Figura B.18 – Local da ferramenta Create Lines: Connected



Fonte: Autor (2025).

a. Para o corte horizontal, defina o primeiro ponto, por exemplo, na borda esquerda da circunferência (Figura B.19);

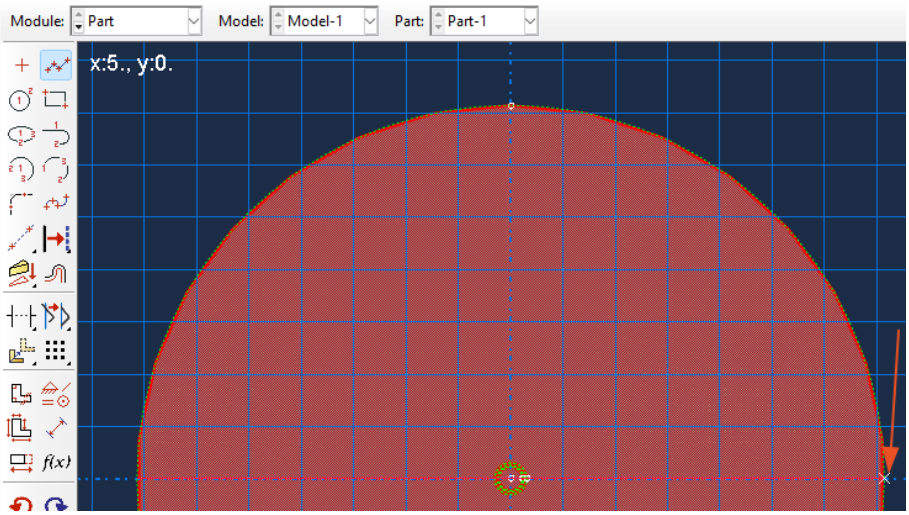
Figura B.19 – Definição do ponto inicial no corte horizontal



Fonte: Autor (2025).

b. Em seguida, selecione o segundo ponto, por exemplo, na borda direita (ponto diametralmente oposto ao anterior). Pressione **Esc** após finalizar a linha.

Figura B.20 – Definição do ponto final no corte horizontal



Fonte: Autor (2025).

c. Pressione **Esc** após finalizar cada linha.

d. Para o corte vertical, repita o processo, iniciando, por exemplo, na borda inferior e finalizando na borda superior. Pressione **Esc** após finalizar cada linha.

e. Após realizar os cortes horizontal e vertical, pressione **Esc** finalize clicando em **Done**.

9. No módulo **Part**, utilize a ferramenta **Remove Face** (Figura B.21).

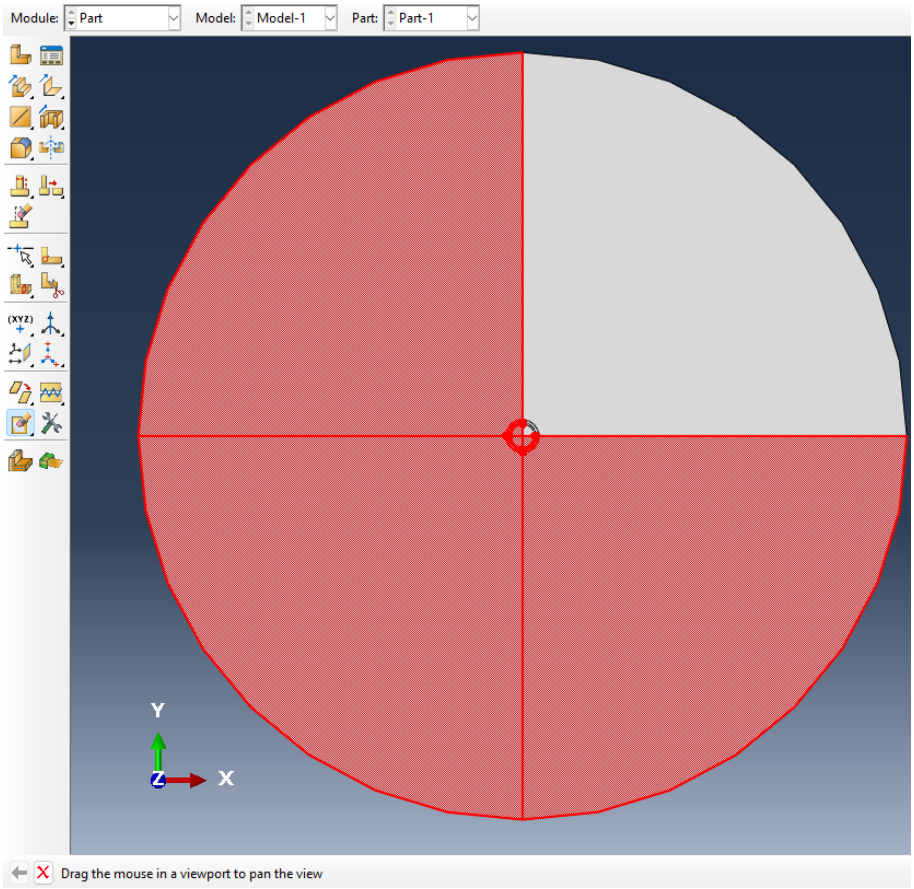
Figura B.21 – Local da ferramenta Remove Face



Fonte: Autor (2025).

10. Selecione todas as regiões excedentes que não farão parte da análise, mantendo apenas a seção correspondente a 1/4 da geometria (Figura B.22).

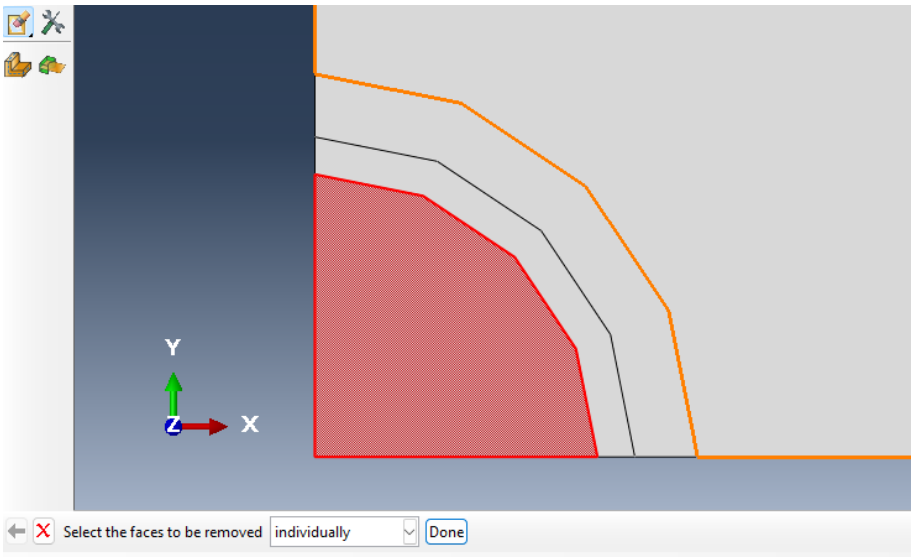
Figura B.22 – Seleção de 3/4 do modelo para remoção



Fonte: Autor (2025).

11. Utilize novamente a ferramenta **Delete Face** e selecione a região correspondente à parte interna do revestimento e clique em **Done** para removê-la.

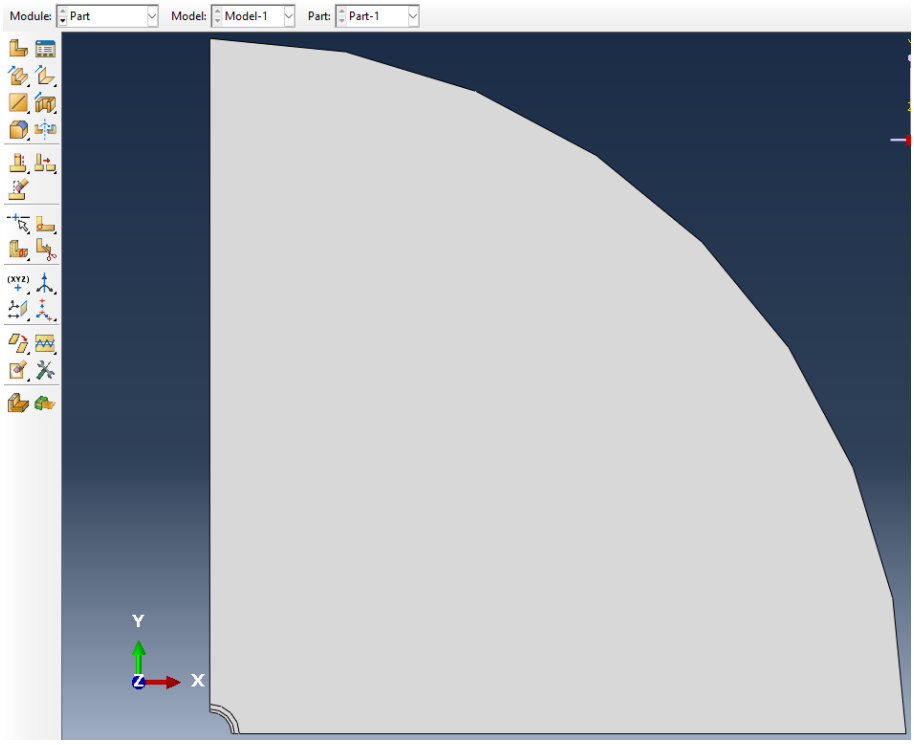
Figura B.23 – Região da parte interna do revestimento



Fonte: Autor (2025).

Ao término destes procedimentos, a geometria deverá estar configurada conforme ilustrado na Figura B.24, pronta para avançar para as etapas seguintes da modelagem.

Figura B.24 – Geometria finalizada

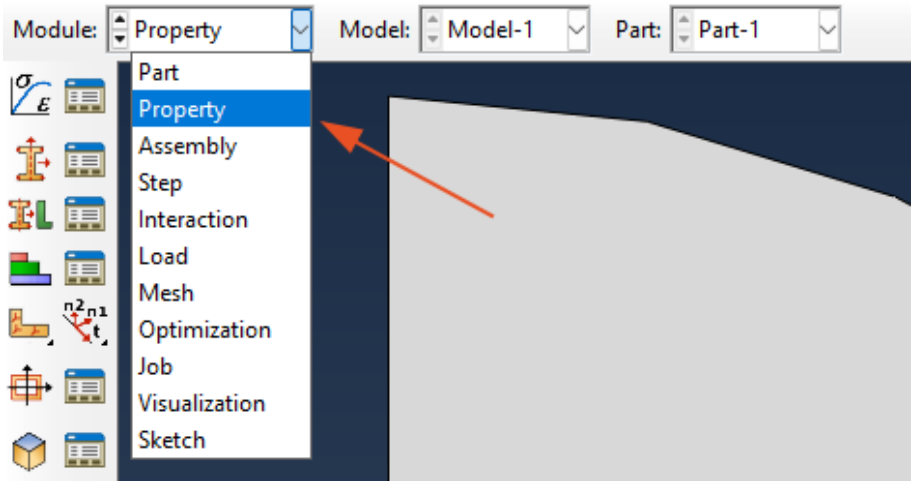


Fonte: Autor (2025).

B.4 Definição e atribuição das propriedades dos materiais às regiões do modelo

1. Acesse o módulo **Property**.

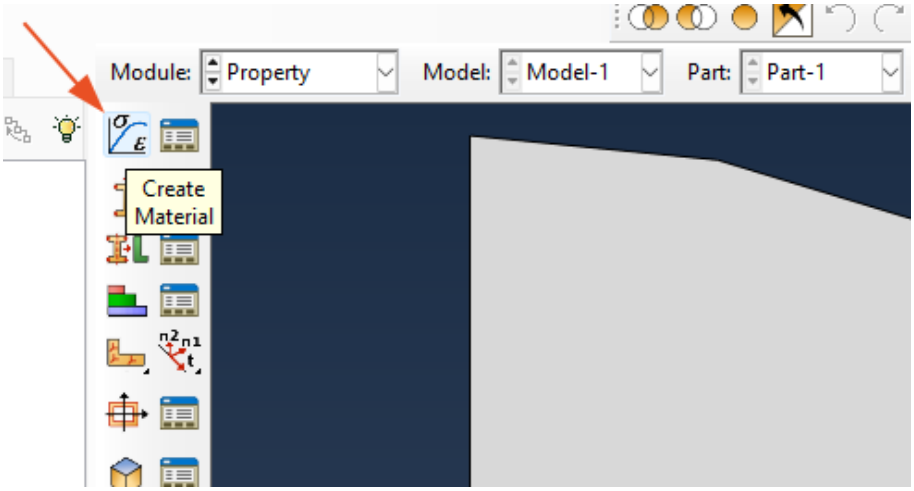
Figura B.25 – Localização do módulo Property



Fonte: Autor (2025).

2. Clique em **Create Material** para definir as propriedades de cada material individualmente.

Figura B.26 – Localização do módulo Property



Fonte: Autor (2025).

O revestimento metálico é modelado utilizando comportamento termoelástico, sendo necessário definir as propriedades mecânicas e térmicas por meio das opções **Elastic** (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) e **Expansion** (coeficiente de expansão térmica).

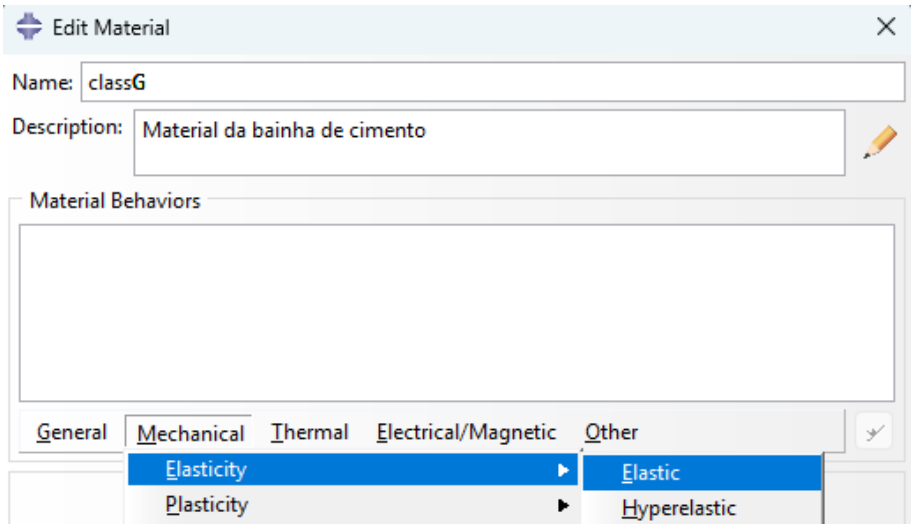
Por outro lado, a bainha de cimento e a formação rochosa são caracterizadas pelo comportamento termo-poroelástico, exigindo, portanto, a definição das opções **Elastic** (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), **Expansion** (coeficiente de expansão térmica), **Permeability** (permeabilidade) e **Porous Bulk Moduli** (módulo volumétrico poroso).

A seguir é descrito o procedimento para definição das propriedades específicas da bainha de cimento. O mesmo procedimento pode ser aplicado analogamente para os demais

materiais, ajustando as propriedades conforme as respectivas características termoelásticas ou termo-poroelásticas de cada região.

3. No painel de criação do material, selecione **Mechanical → Elasticity → Elastic** (Figura B.27).

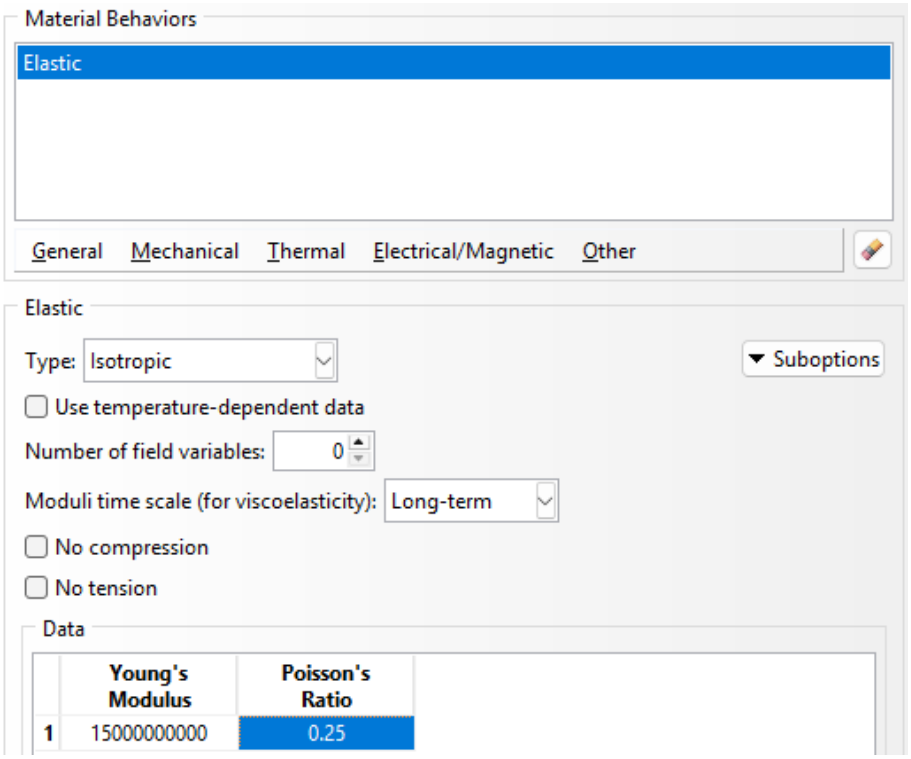
Figura B.27 – Localização da propriedade Elastic



Fonte: Autor (2025).

4. Insira o valor numérico do módulo de elasticidade (Módulo de Young) e do coeficiente de Poisson específicos para a bainha de cimento (Figura B.28).

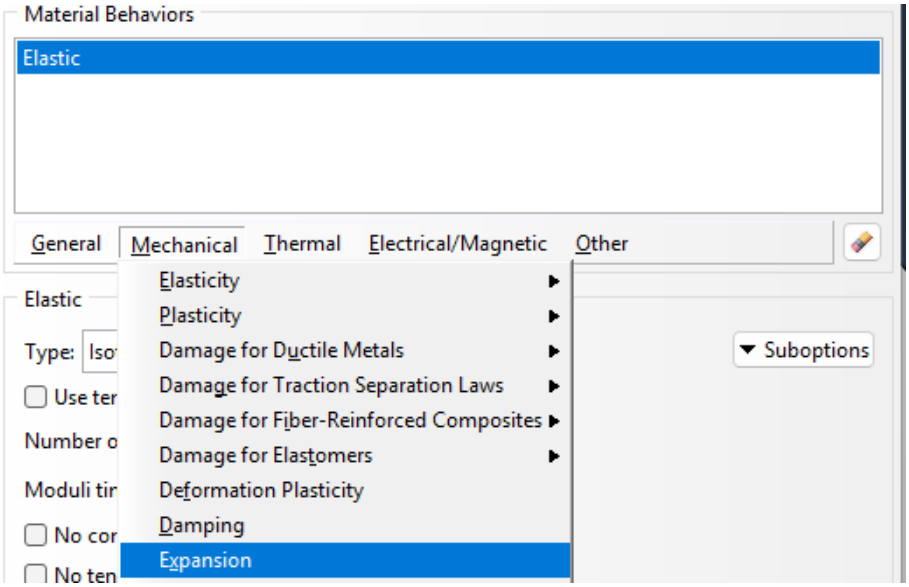
Figura B.28 – Especificação dos valores do Módulo de Young e coeficiente de Poisson



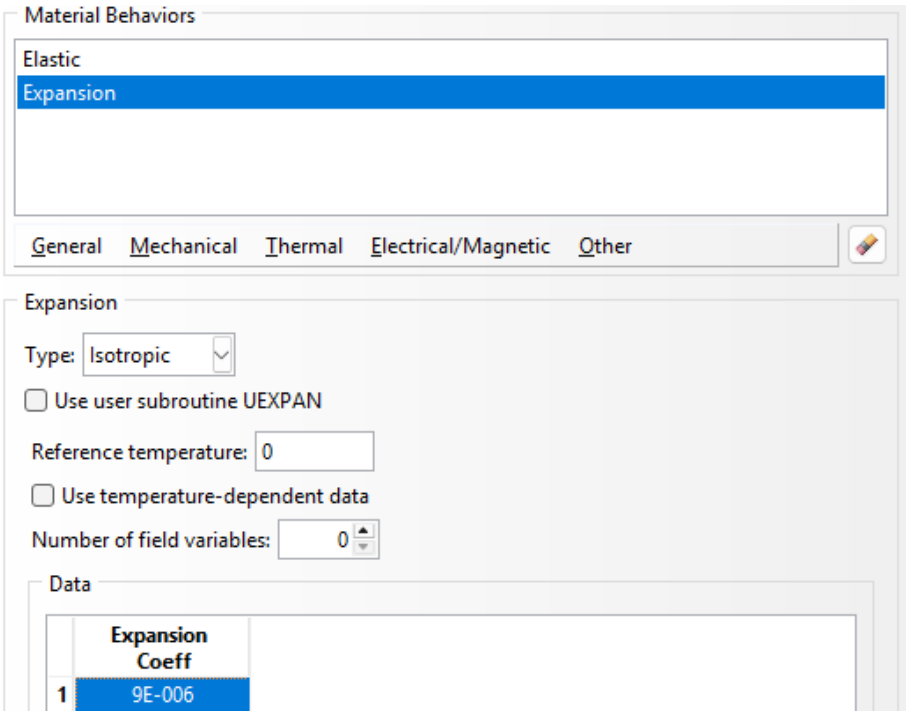
Fonte: Autor (2025).

5. Em seguida, selecione **Mechanical → Expansion** (Figura B.29a) e insira o coeficiente de expansão térmica (Figura B.29b).

Figura B.29 – Definição do Coeficiente de Expansão Térmica



(a) Localização da propriedade Expansion



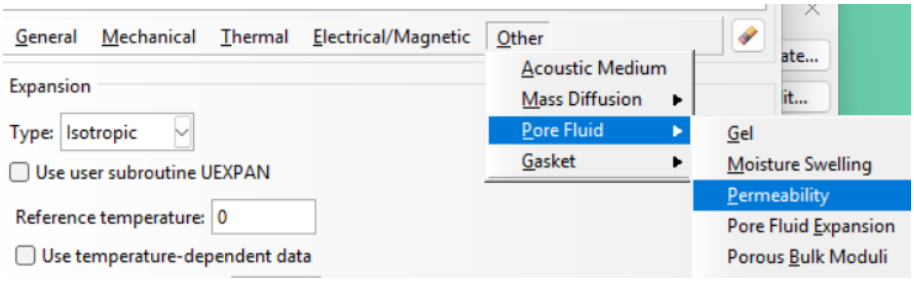
(b) Especificação do valor do Coeficiente de Expansão Térmica

Fonte: Autor (2025).

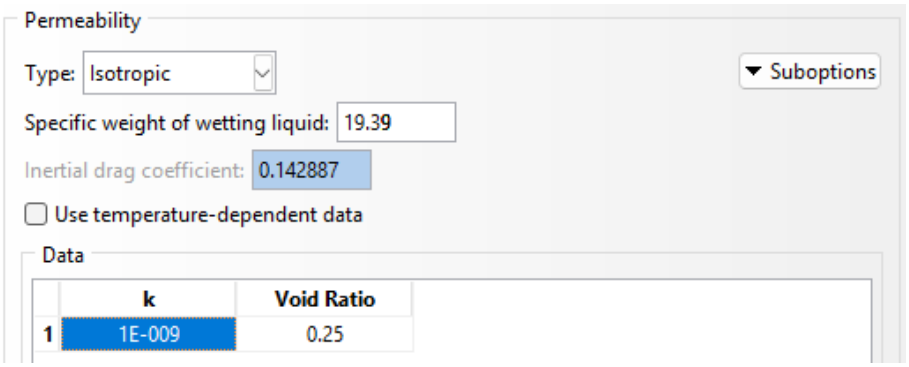
6. Para inserir as propriedades porosas, selecione **Other → Pore Fluid → Permeability** (Figura B.30a). Especifique o peso específico do fluido contido nos poros (Specific Weight), a permeabilidade (Permeability) e a razão de vazios (Void ratio), Figura B.30b.

Ressalta-se que, considerando a ausência de fluxo fluido na análise proposta, esses valores adotados não influenciarão diretamente os resultados.

Figura B.30 – Especificação das propriedades porosas



(a) Local da opção Permeability

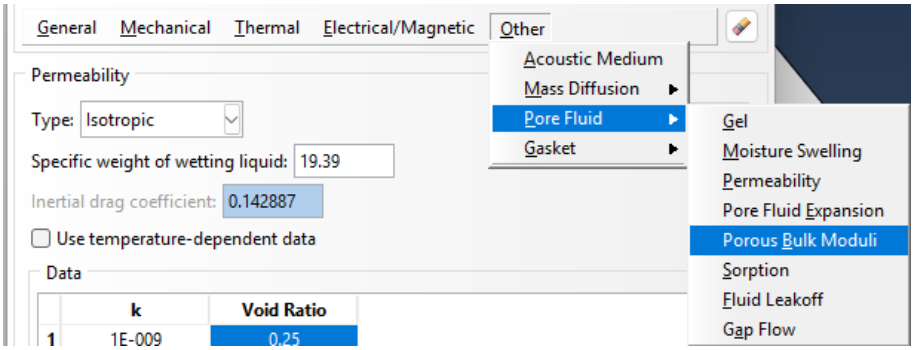


(b) Definição do peso específico do fluido contido nos poros, permeabilidade (Permeability) e razão de vazios

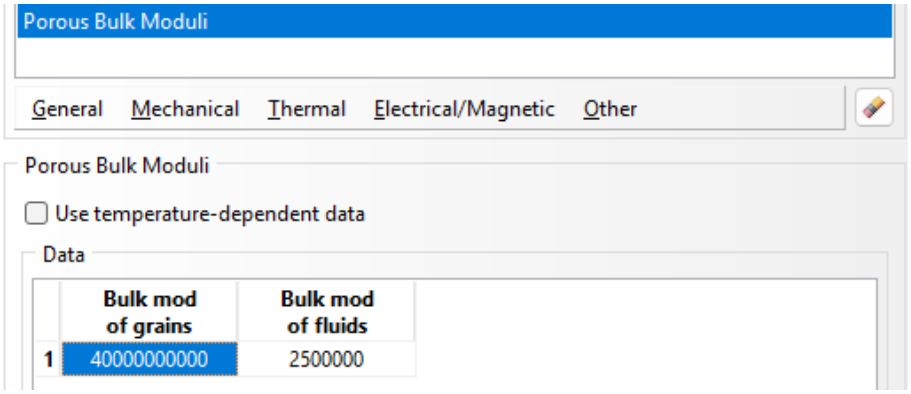
Fonte: Autor (2025).

7. Para definir os módulos volumétricos porosos (Porous Bulk Moduli), selecione **Other → Pore Fluid → Porous Bulk Moduli**. Insira o valor do módulo volumétrico dos grãos (Bulk Modulus of Solid Grains), calculado com base no coeficiente de Biot e nas propriedades mecânicas do material, conforme Equação 4.3. O módulo volumétrico do fluido nos poros (Fluid Bulk Modulus) deverá ser especificado, porém seu valor não influenciará significativamente os resultados devido às considerações da análise proposta.

Figura B.31 – Especificação dos módulos volumétricos porosos



a) Local da opção Porous Bulk Moduli



b) Definição do módulo volumétrico dos grãos e do módulo volumétrico do fluido nos poros

Fonte: Autor (2025).

Após definir os materiais, é necessário associar as propriedades definidas às respectivas regiões da geometria.

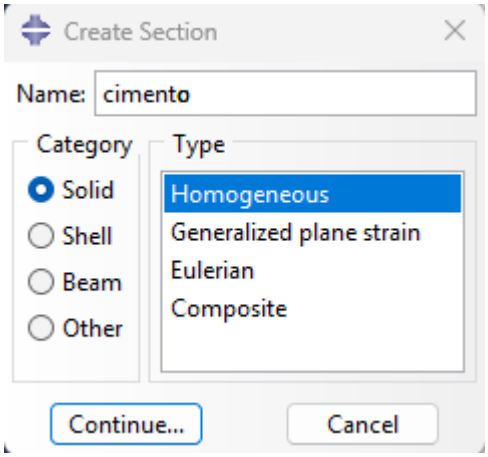
8. Para cada uma das regiões (revestimento, cimento e formação), utilize a ferramenta **Create Section** (Figura B.32), selecione a Categoria **Solid** e o tipo **Homogeneous**, informando um nome para categorizar a região (Figura B.33), e atribua o material correspondente (Figura B.34).

Figura B.32 – Seleção da ferramenta **Create Section**



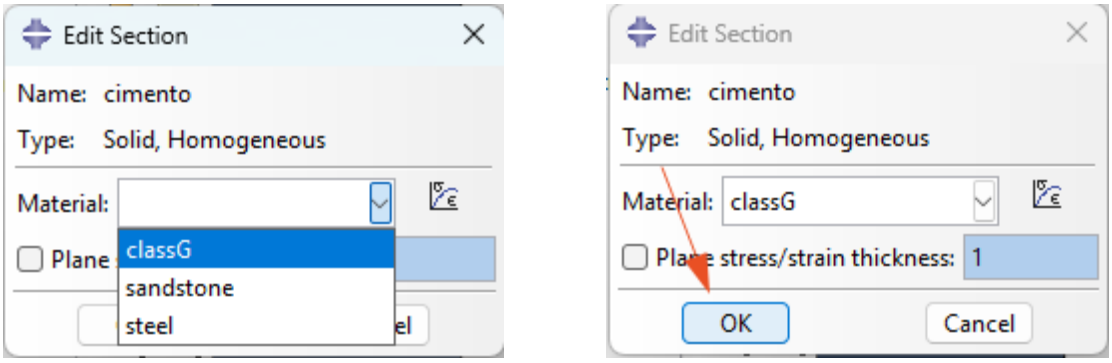
Fonte: Autor (2025).

Figura B.33 – Especificação do nome, categoria e tipo de seção



Fonte: Autor (2025).

Figura B.34 – Atribuição de um material a seção criada



a) Escolha de um dos materiais criados

b) Seleção de "OK" para finalizar a criação da seção

Fonte: Autor (2025).

9. Após criar as seções, utilize a opção **Assign Section** para associá-las às regiões definidas anteriormente na geometria.

    a. Selecione a opção **Assign Section** (Figura B.35).

    b. Para cada uma das regiões (revestimento, cimento, formação), selecione a região que deseja associar uma seção, defina o nome do **set** correspondente a região e clique em **Done** (Figura B.36).

    c. Para a região especificada, defina a seção correspondente e selecione **OK** (Figura B.37).

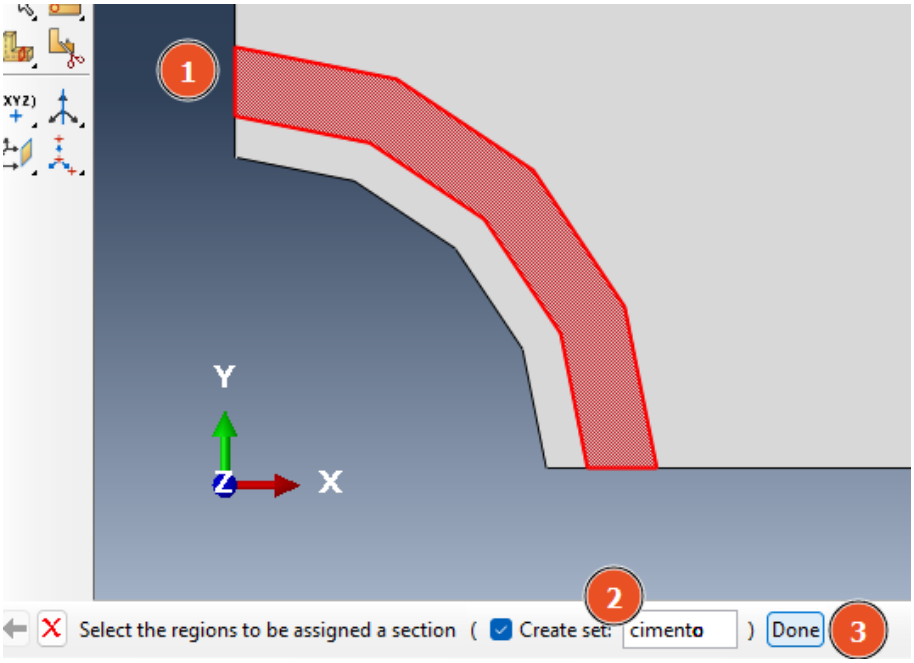
    d. Ao terminar de associar todas as regiões definidas, clique no **"X"** para finalizar a associação de seções (Figura B.38).

Figura B.35 – Seleção da opção **Assign Section**



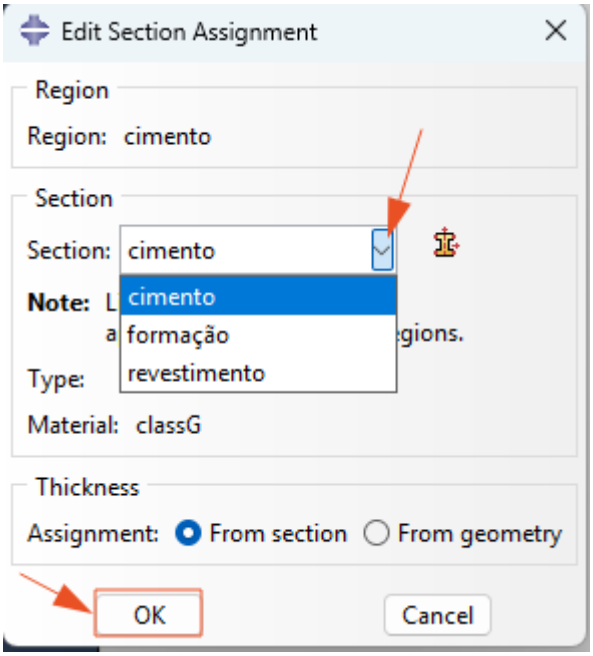
Fonte: Autor (2025).

Figura B.36 – Seleção do material (1), criação do **set** correspondente (2) e seleção de **Done** (3) para continuar



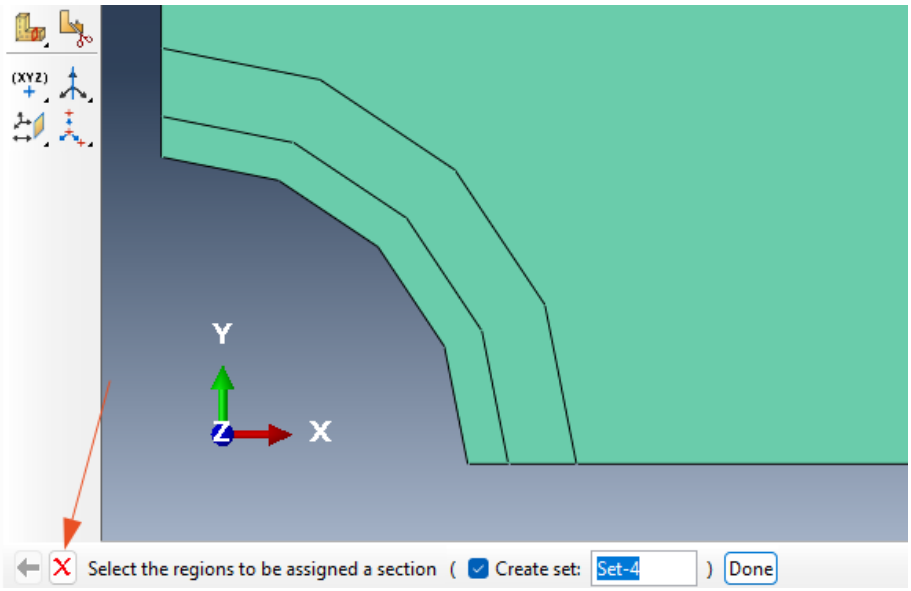
Fonte: Autor (2025).

Figura B.37 – Especificação da seção e finalização da associação da correspondente seção



Fonte: Autor (2025).

Figura B.38 – Seleção de **"X"** para finalizar a associação de seções



Fonte: Autor (2025).

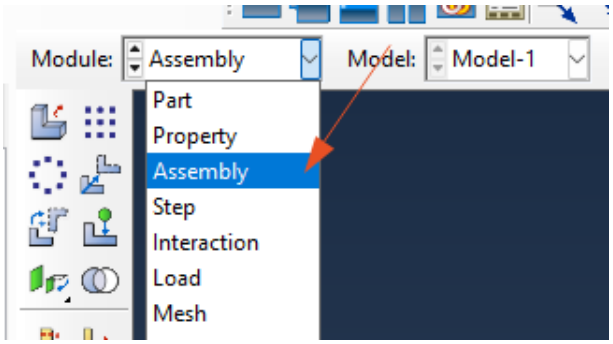
10. Verifique visualmente a correta associação das propriedades às regiões (após a associação correta das regiões, todo o modelo passará a ter a cor verde destacada na Figura B.38).

B.5 Montagem do modelo

O módulo **Assembly** no Abaqus® permite que sejam posicionadas corretamente as partes individuais criadas no modelo em um sistema global, facilitando a definição das interações e condições de contorno. No caso do modelo de estudo, o sistema global é composto por apenas uma parte individual.

1. Acesse o módulo **Assembly** no Abaqus/CAE (Figura B.39).

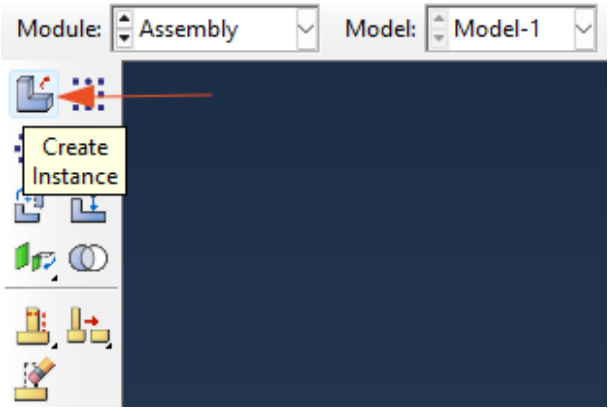
Figura B.39 – Localização do módulo **Assembly**



Fonte: Autor (2025).

2. Clique na opção **Create Instance** (Figura B.40).

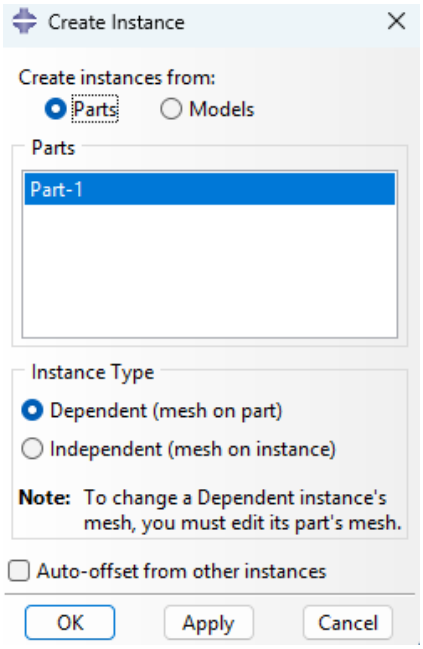
Figura B.40 – Seleção da opção **Create Instance**



Fonte: Autor (2025).

3. Na janela aberta, selecione a opção Dependent para criar uma instância vinculada à geometria original, escolha a parte criada anteriormente e clique em OK para finalizar (Figura B.41).

Figura B.41 – Especificação das informações da instância



Fonte: Autor (2025).

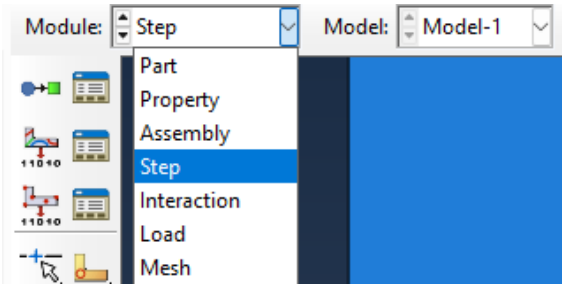
Ao concluir essas etapas, o modelo estará devidamente montado e pronto para prosseguir com a definição de condições de contorno, carregamentos e geração da malha.

B.6 Criação das etapas de análise (step)

As etapas de análise (Steps) no Abaqus® são necessárias para simular sequencialmente os diferentes estados de carregamento e condições operacionais do modelo.

1. Acesse o módulo **Step** no Abaqus/CAE (Figura B.42).

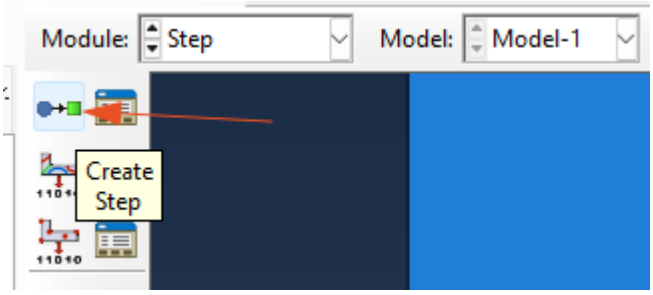
Figura B.42 – Localização do módulo **Step**



Fonte: Autor (2025).

2. Clique em **Create Step** para criar uma nova etapa (Figura B.43).

Figura B.43 – Seleção da opção **Create Step**



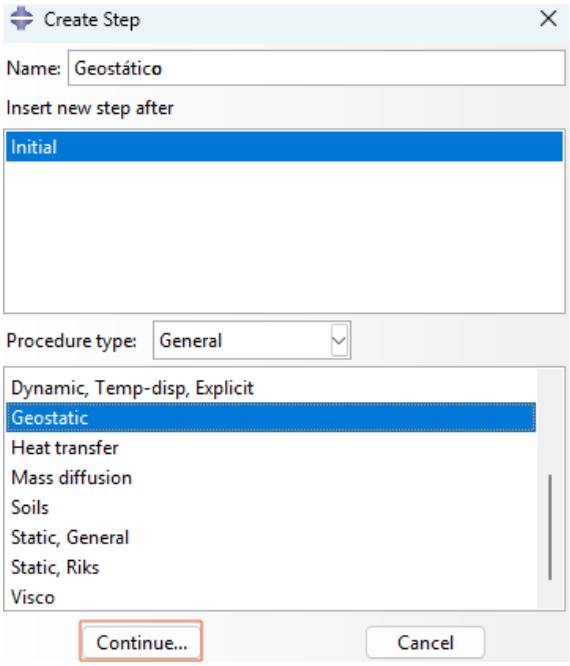
Fonte: Autor (2025).

3. Crie uma etapa de análise para cada um dos eventos operacionais apresentados na Tabela 6.2, acrescentando uma etapa anterior: Geostatic.

    a. Por padrão, o Abaqus/CAE sempre vem com o step “Initial” pré-definido. Assim, as demais etapas são definidas de forma subsequente.

    b. O primeiro **step** a ser criado é o “Geostático”. Para isso, após selecionar **Create Step**, defina o nome do passo e, em **Procedure type** especificado como **General**, selecione o tipo de análise **Geostatic** e selecione **Continue** (Figura B.44).

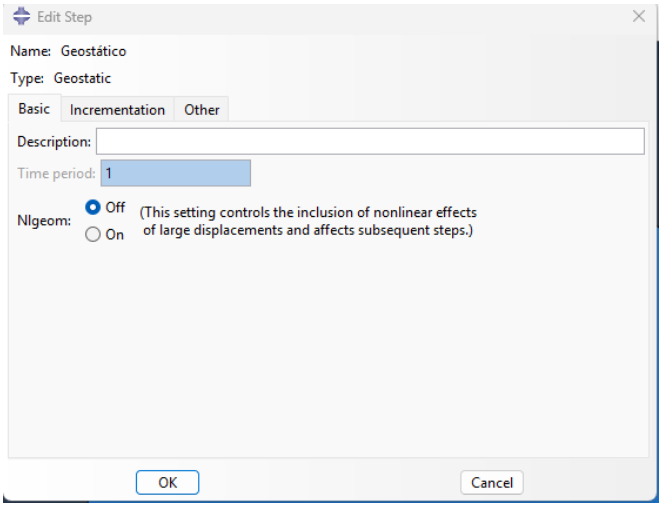
Figura B.44 – Informações especificadas na caixa de diálogo **Create Step** para o passo geostático



Fonte: Autor (2025).

c. Mantenha a opção **Nlgeom** desligada (OFF) e as configurações de Incrementação padrão, depois selecione **OK** (Figura B.45).

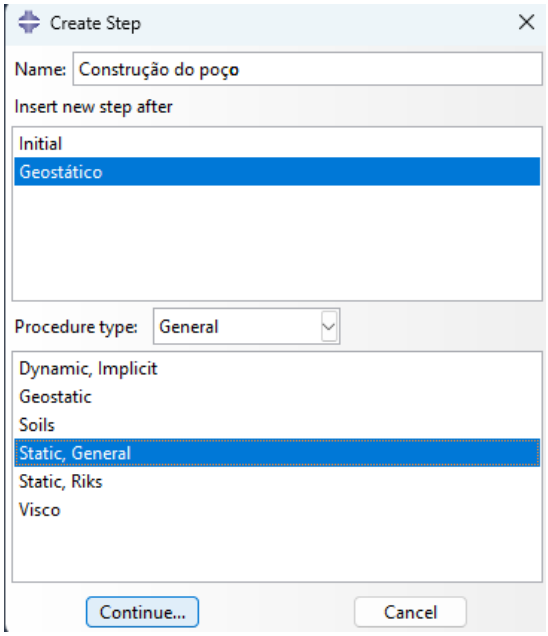
Figura B.45 – Informações especificadas na caixa de diálogo **Edit Step** para o passo geostático



Fonte: Autor (2025).

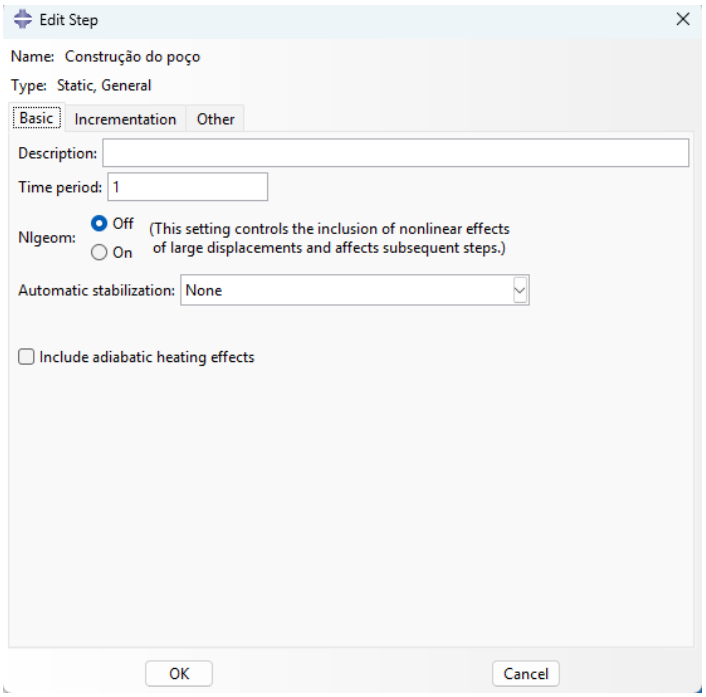
1. Para cada uma das etapas subsequentes, realize o mesmo procedimento, especificando o **Procedure type** como **Static, General** e definindo o tempo total para cada etapa como unitário (Figura B.46). Mantenha a opção **Nlgeom** desligada (OFF) e as configurações de Incrementação padrão. Confirme cada etapa criada clicando em **OK** (Figura B.47).

Figura B.46 – Informações especificadas na caixa de diálogo **Create Step** para os demais passos



Fonte: Autor (2025).

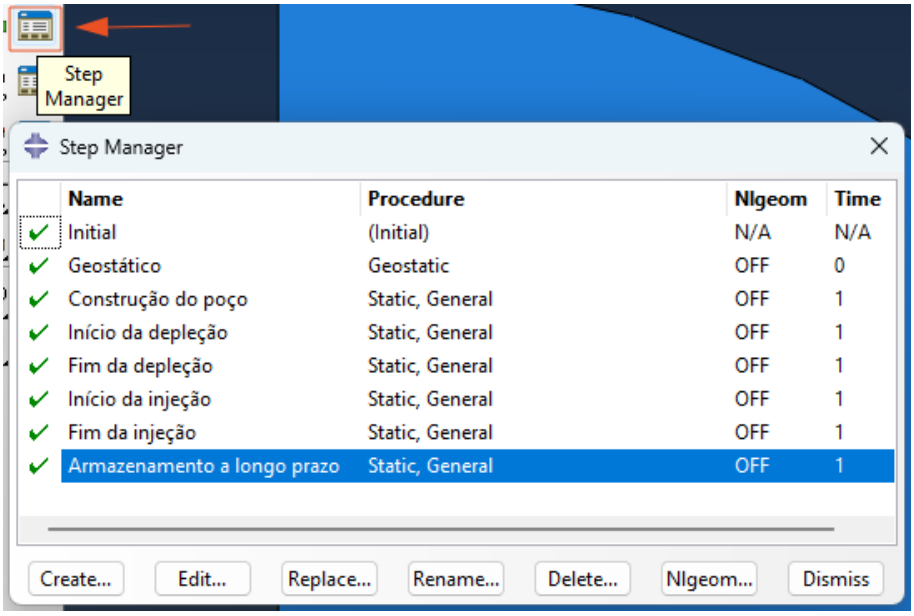
Figura B.47 – Informações especificadas na caixa de diálogo **Edit Step** para os demais passos



Fonte: Autor (2025).

4. Repita os passos anteriores até que todas as etapas necessárias estejam configuradas conforme apresentado na Figura B.48.

Figura B.48 – Todos os passos que devem ser criados descritos na caixa de diálogo do **Step Manager**



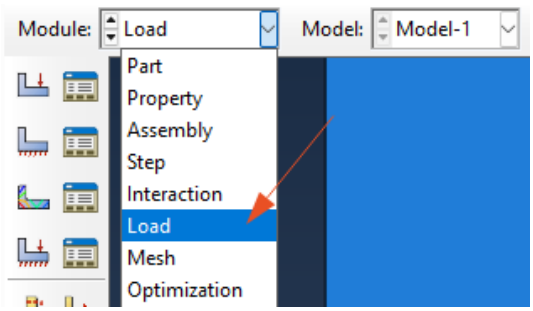
Fonte: Autor (2025).

B.7 Definição das Condições de Contorno e Carregamentos

Nesta etapa, são aplicadas as restrições de contorno e os carregamentos necessários à simulação, conforme as hipóteses de simetria e os esforços representativos das condições reais de operação do poço. As prescrições de contorno e carregamento seguem as definições apresentadas na Subseção 4.4. Os valores utilizados para os carregamentos ao longo dos eventos de análise são apresentados na Tabela 6.2.

1. Acesse o módulo **Load** no Abaqus/CAE (Figura B.49).

Figura B.49 – Localização do módulo **Load**

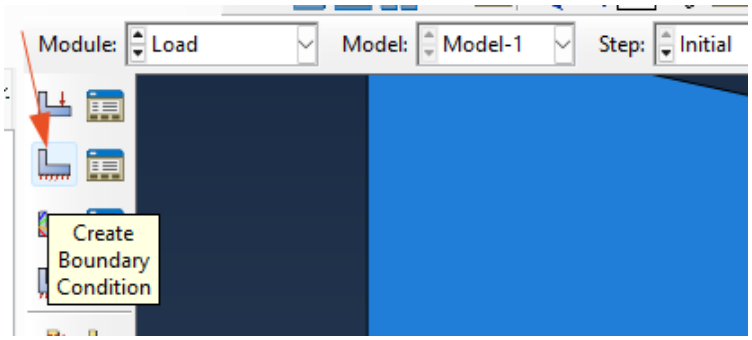


Fonte: Autor (2025).

Condições de Contorno (Boundary Conditions)

2. Para a prescrição das Condições de Contorno, selecione a opção **Create Boundary Condition** (Figura B.50).

Figura B.50 – Seleção da opção **Create Boundary Condition**



Fonte: Autor (2025).

Para o modelo, são prescritas quatro Condições de Contorno (CC):

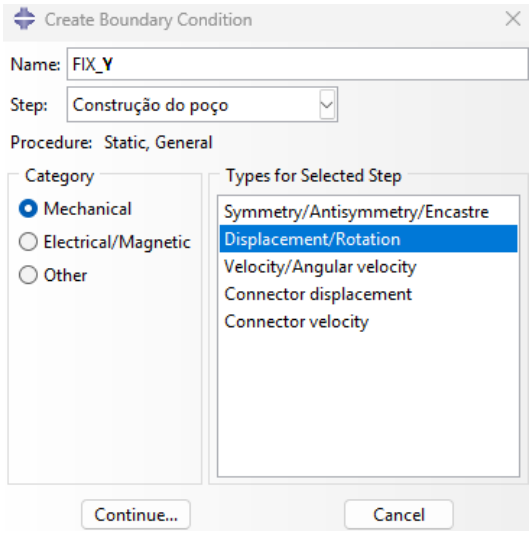
- **FIX_Y**: aplicada na base do modelo (eixo de simetria horizontal), restringindo o deslocamento vertical (**U2 = 0**) e as rotações em torno do eixo perpendicular ao plano de análise (**UR3 = 0**), permitindo deslocamentos horizontais (**U1 ≠ 0**). Esta CC tem origem no passo "Construção do poço" e é propagada nos passos seguintes.
- **FIX_X**: aplicada na lateral esquerda do modelo (eixo de simetria vertical), restringindo o deslocamento horizontal (**U1 = 0**) e as rotações em torno do eixo perpendicular ao plano de análise (**UR3 = 0**), permitindo deslocamentos verticais (**U2 ≠ 0**). Esta CC também tem origem no passo "Construção do poço" e é propagada nos passos seguintes.
- **FIX_WELL_BC**: aplicada em todas as bordas do modelo, restringindo o deslocamento horizontal e vertical, bem como as rotações em torno do eixo perpendicular ao plano de análise (**U1 = U2 = UR3 = 0**). Essa CC é aplicada apenas nos passos "Initial" e "Geostático". Nos passos seguintes, essa CC é desativada.
- **Pore_pressure**: utilizada para definir a pressão de poros nas regiões porosas (cimento e formação). Esta CC é criada no passo "Initial" e modificada ao longo dos passos de análise conforme as prescrições apresentadas na Tabela 6.2.

Nos passos a seguir são apresentados os procedimentos para criar cada uma das quatro CC apresentadas.

3. Condição de Contorno **FIX_Y**

a. Na caixa de diálogo **Create Boundary Condition**, especifique o **Step** "Construção do poço", a categoria **Mechanical** e o tipo **Displacement/Rotation**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.51).

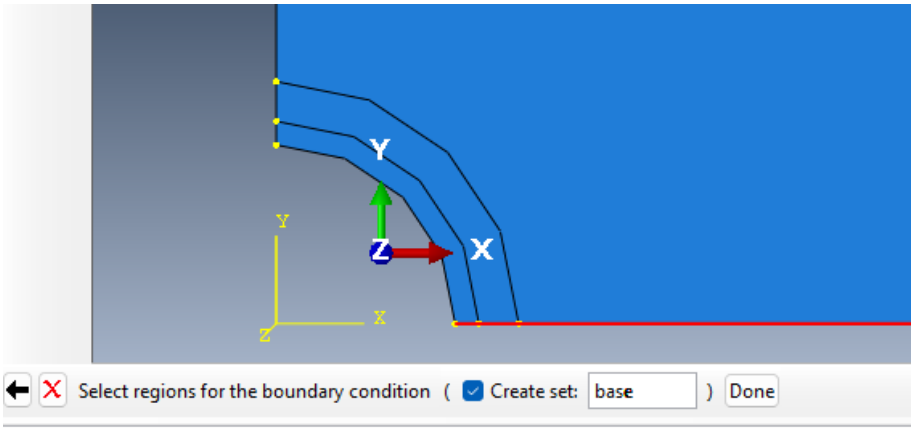
Figura B.51 – Caixa de diálogo **Create Boundary Condition** com especificações da CC **FIX_Y**



Fonte: Autor (2025).

b. Com a tecla **Shift** pressionada, selecione toda as arestas do modelo relacionadas a base, nomeie o **set** correspondente e, na sequência, clique em **Done** (Figura B.52).

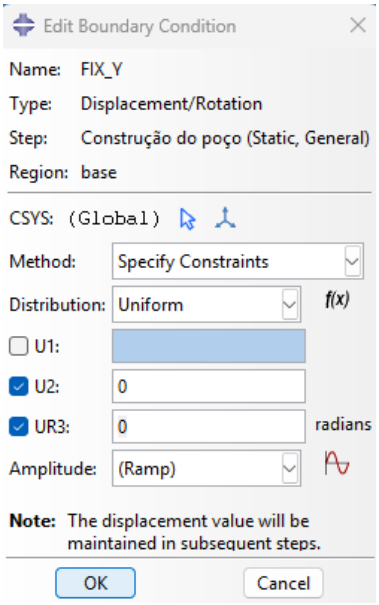
Figura B.52 – Seleção das arestas relacionada a base do modelo e criação da **set** correspondente



Fonte: Autor (2025).

c. Selecione as caixas de seleção das direções U2 e UR3, especificando o valor igual a zero. Para finalizar, clique em **OK** (Figura B.53).

Figura B.53 – Especificação das restrições de deslocamento na CC **FIX_Y**

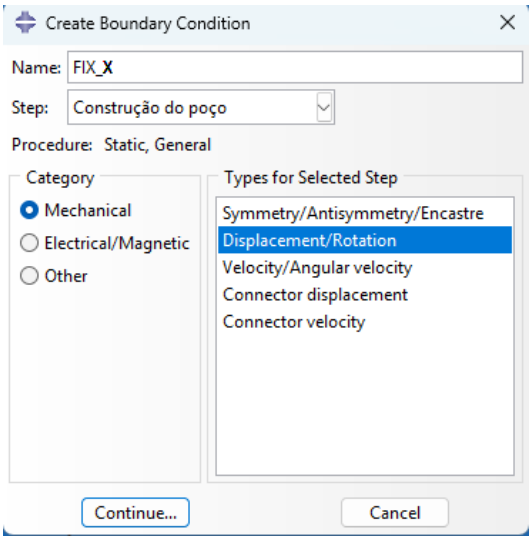


Fonte: Autor (2025).

4. Condição de Contorno **FIX_X**

    a. Na caixa de diálogo **Create Boundary Condition**, especifique o **Step** "Construção do poço", a categoria **Mechanical** e o tipo **Displacement/Rotation**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.54).

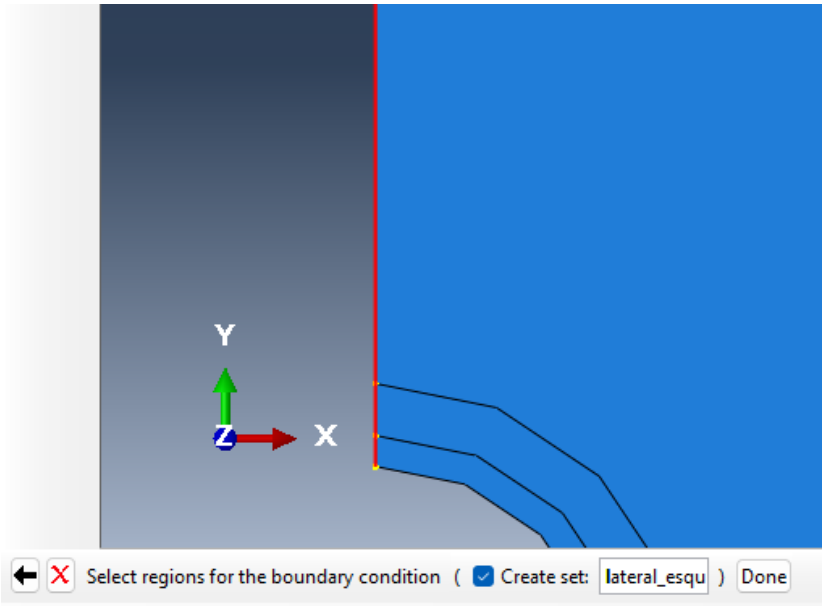
Figura B.54 – Caixa de diálogo **Create Boundary Condition** com especificações da CC **FIX_X**



Fonte: Autor (2025).

    b. Com a tecla **Shift** pressionada, selecione toda as arestas do modelo relacionadas a lateral esquerda, nomeie o **set** correspondente e, na sequência, clique em **Done** (Figura B.55).

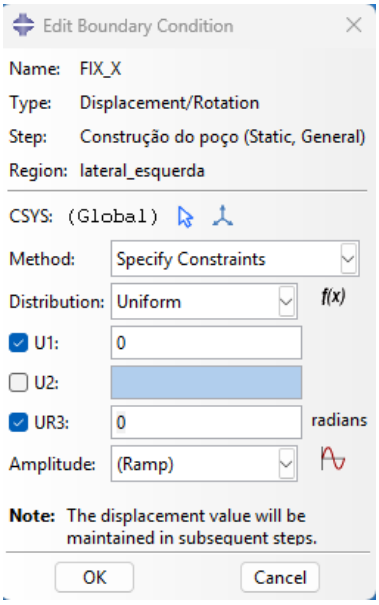
Figura B.55 – Seleção das arestas relacionada a base do modelo e criação da **set** correspondente



Fonte: Autor (2025).

c. Selecione as caixas de seleção das direções U1 e UR3, especificando o valor igual a zero. Para finalizar, clique em **OK** (Figura B.56).

Figura B.56 – Especificação das restrições de deslocamento na CC **FIX_X**

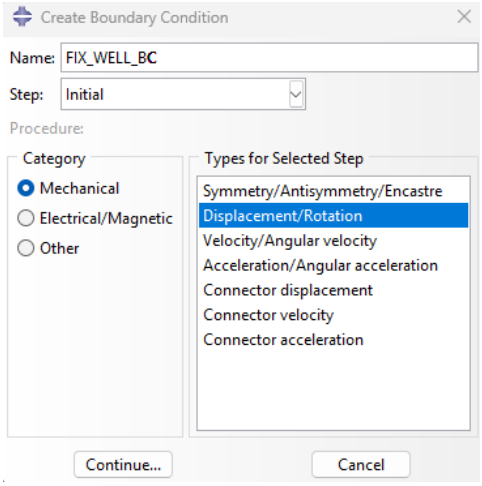


Fonte: Autor (2025).

5. Condição de Contorno **FIX_WELL_BC**

a. Na caixa de diálogo **Create Boundary Condition**, especifique o **Step** “Initial”, a categoria **Mechanical** e o tipo **Displacement/Rotation**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.57).

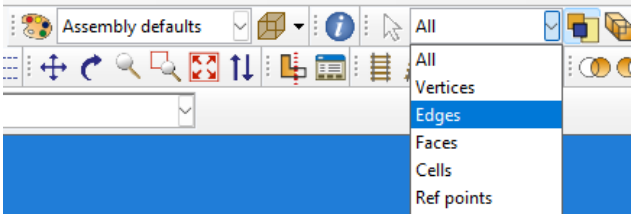
Figura B.57 – Caixa de diálogo **Create Boundary Condition** com especificações da CC **FIX_WELL_BC**



Fonte: Autor (2025).

b. Para facilitar a seleção de todas as arestas do modelo, no canto superior da janela do Abaqus/CAE, defina a opção de seleção como “Edges” (Figura B.58).

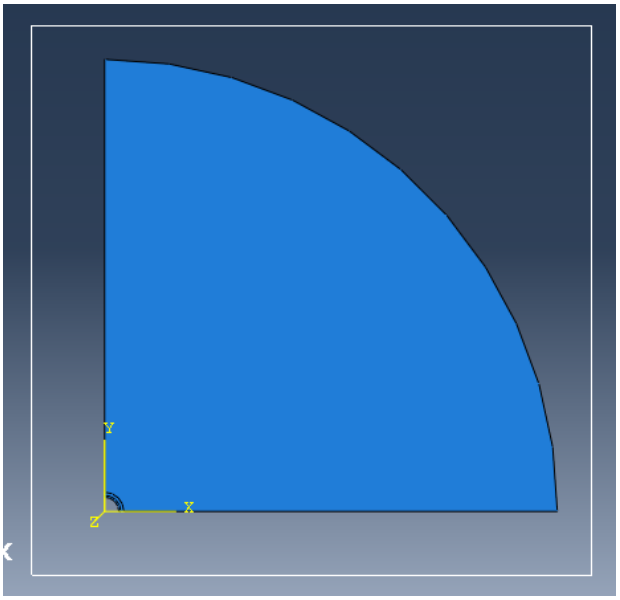
Figura B.58 – Especificação do tipo de seleção apenas para **Edges** (arestas)



Fonte: Autor (2025).

c. Selecione, com uma caixa de seleção única, todo o modelo (Figura B.59).

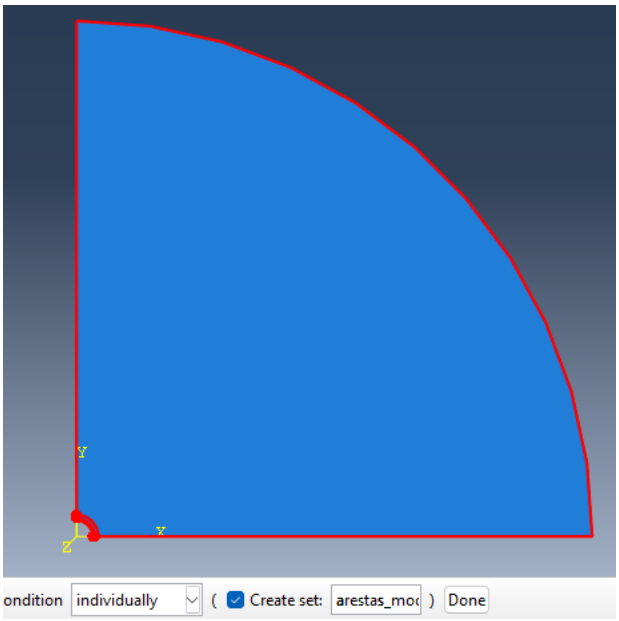
Figura B.59 – Seleção de todas as arestas do modelo com uma única caixa de seleção



Fonte: Autor (2025).

d. Nomeie o **set** correspondente e, na sequência, clique em **Done** (Figura B.60).

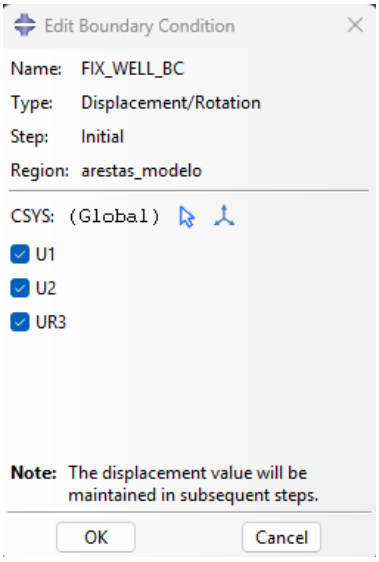
Figura B.60 – Todas as arestas do modelo selecionadas e criação da **set** correspondente



Fonte: Autor (2025).

e. Selecione as caixas de seleção das direções U2 e UR3, especificando o valor igual a zero. Para finalizar, clique em **OK** (Figura B.61).

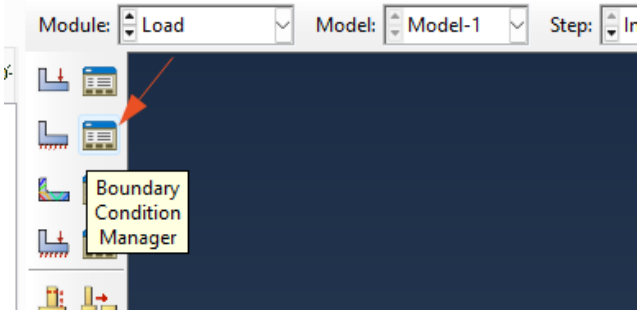
Figura B.61 – Especificação das restrições de deslocamento na CC **FIX_WELL_BC**



Fonte: Autor (2025).

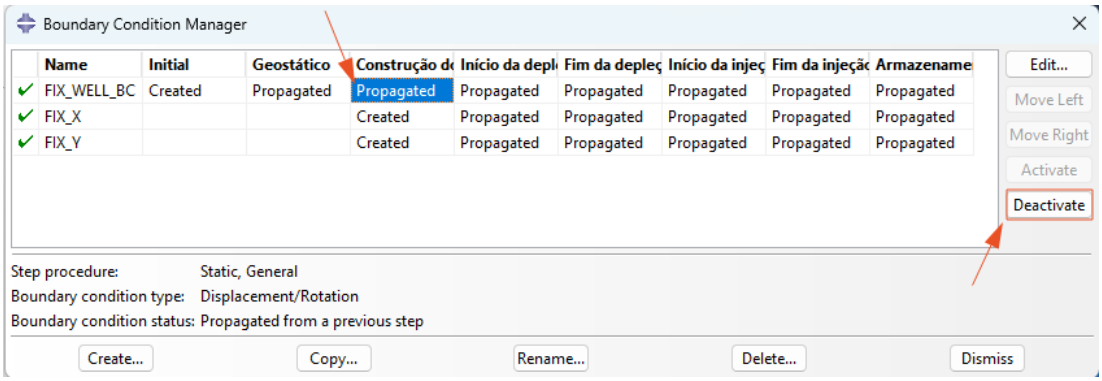
f. Para desativar essa CC dos passos não desejados, selecione a opção **Boundary Condition Manager** (Figura B.62). Quando aparecer a caixa de diálogo, selecione o **step** relacionado a **Construção do Poço** da correspondente CC e clique em **Deactivate** (Figura B.63).

Figura B.62 – Seleção da opção **Boundary Condition Manager**



Fonte: Autor (2025).

Figura B.63 – Desativação da CC **FIX_WELL_BC** dos passos a partir do step **Construção do Poço**

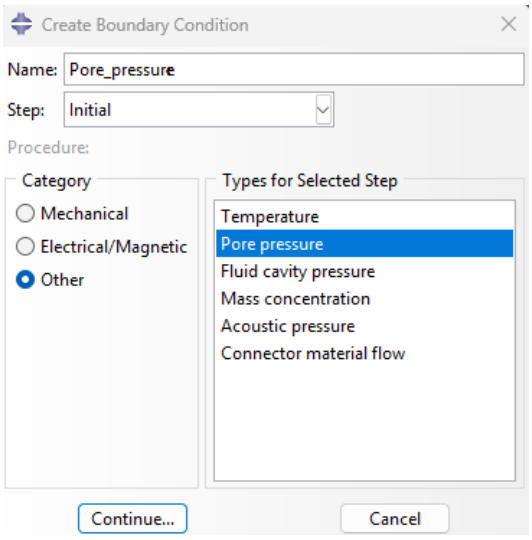


Fonte: Autor (2025).

6. Condição de Contorno **Pore_pressure**

    a. Na caixa de diálogo **Create Boundary Condition**, especifique o **Step** “Initial”, a categoria **Other** e o tipo **Pore pressure**. Siga, clicando em **Continue** Figura B.64).

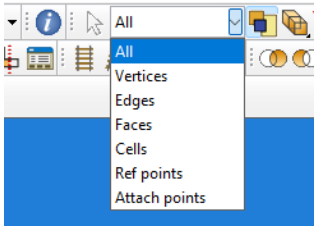
Figura B.64 – Caixa de diálogo **Create Boundary Condition** com especificações da CC **Pore_pressure**



Fonte: Autor (2025).

b. Volte a especificação de seleção para **All** (Figura B.65).

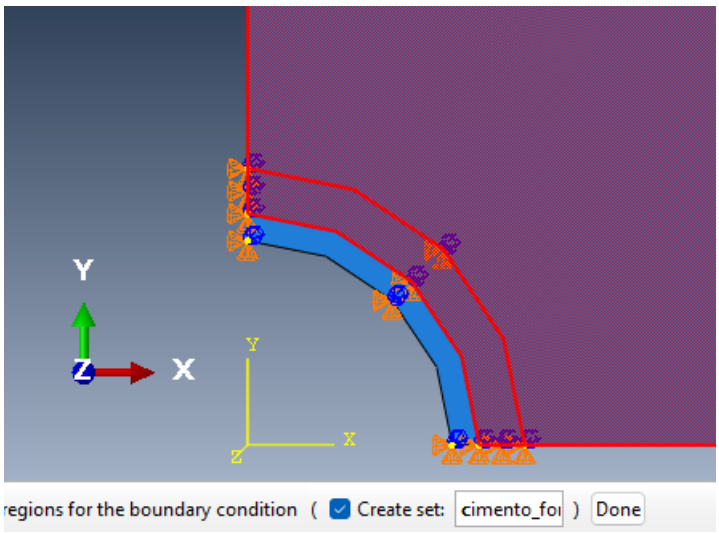
Figura B.65 – Especificação do tipo de seleção para **All.**



Fonte: Autor (2025).

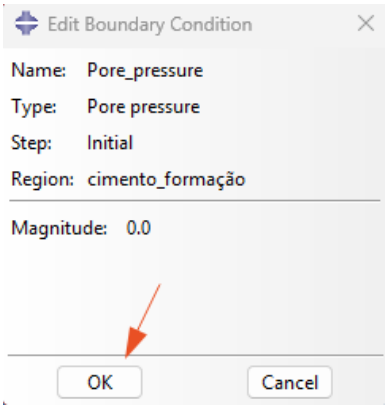
c. Selecione as regiões do cimento e da formação, nomeie o **set** correspondente e, na sequência, clique em **Done** (Figura B.66). Ao aparecer a próxima caixa de diálogo, clique em **OK** (Figura B.67).

Figura B.66 – Seleção das regiões do cimento e da formação e criação da **set** correspondente



Fonte: Autor (2025).

Figura B.67 – Confirmação da CC de poropressão no **step** “Initial”

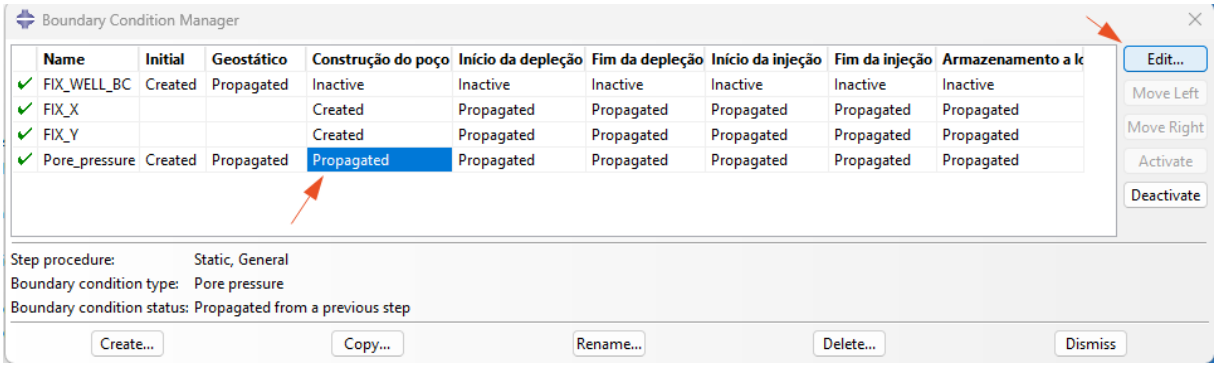


Fonte: Autor (2025).

d. Como as CC de poropressão variam ao longo dos eventos operacionais, é necessário alterar seus valores ao longo dos passos de análise. Para isso, selecione novamente a opção **Boundary Condition Manager** (Figura B.62).

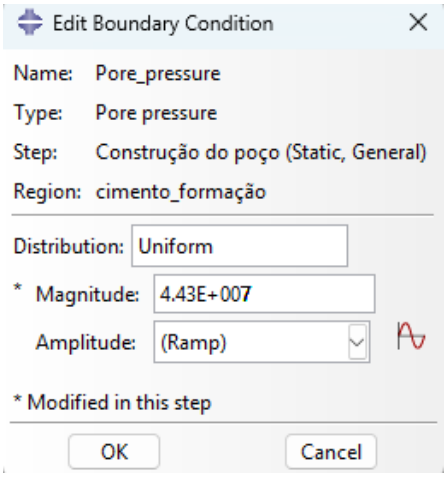
e. Para cada um dos eventos que há alteração do valor da poropressão, conforme Tabela 6.2, selecione o **step** que precisa ser editado (Figura B.68) e clique em **Edit**. Na caixa de diálogo aberta, defina o valor da poropressão correspondente ao evento (Figura B.69). Lembre de tomar cuidado com as unidades de medidas utilizadas. Todas devem estar padronizadas

Figura B.68 – Seleção do **step** para alteração do valor prescrito de poropressão



Fonte: Autor (2025).

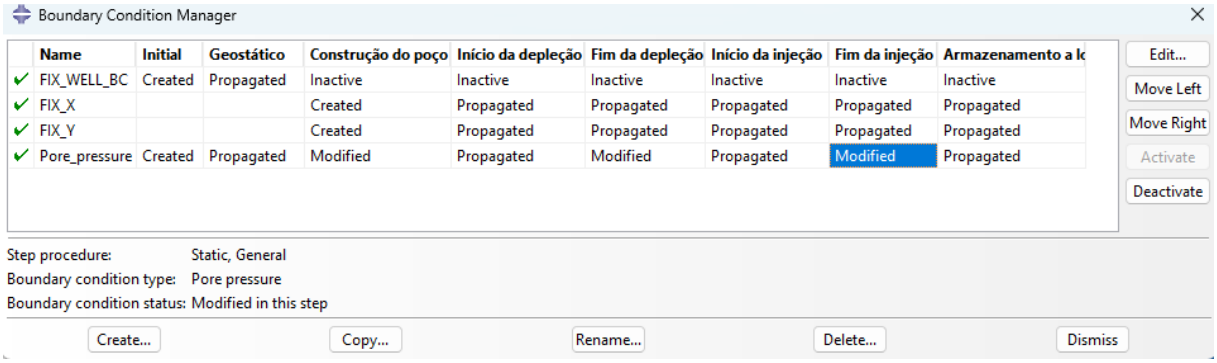
Figura B.69 – Prescrição do valor da poropressão



Fonte: Autor (2025).

f. Ao final das alterações do valor de poropressão em cada passo de análise, a configuração desta CC ficará conforme apresentado na Figura B.70.

Figura B.70 – Configuração final da CC Pore_pressure

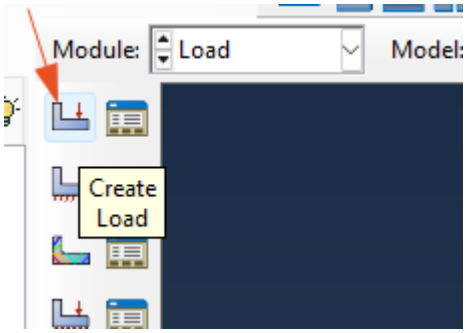


Fonte: Autor (2025).

Carregamentos Aplicados (Loads)

7. Para a prescrição dos carregamentos, selecione a opção **Create Load** (Figura B.71).

Figura B.71 – Seleção da opção **Create Load**



Fonte: Autor (2025).

Para o modelo, são definidos dois tipos de carregamentos:

- **inner_casing_pressure**: pressão interna aplicada na superfície interna do revestimento, perpendicular à superfície. Deve ser definida como uma pressão uniforme do tipo **Pressure**, que varia ao longo de determinados passos de análise.
- **outer_formation_pressure**: pressão externa aplicada na superfície externa da formação, também perpendicular à superfície, definida como **Pressure** e não varia ao longo dos passos de análise.

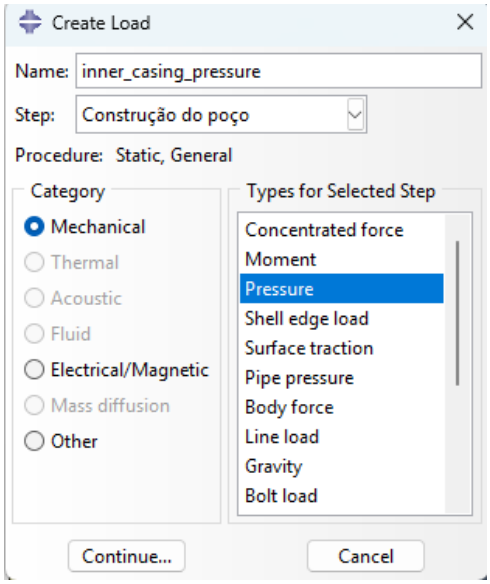
Nas etapas a seguir, são apresentados os procedimentos para criar os dois carregamentos mencionados.

8. Carregamento **inner_casing_pressure**

    a. Na caixa de diálogo **Create Load**, defina o nome do carregamento, o **step** que o carregamento começará atuar (neste caso, Construção do poço), a categoria

Mechanical e o carregamento do tipo **Pressure**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.72).

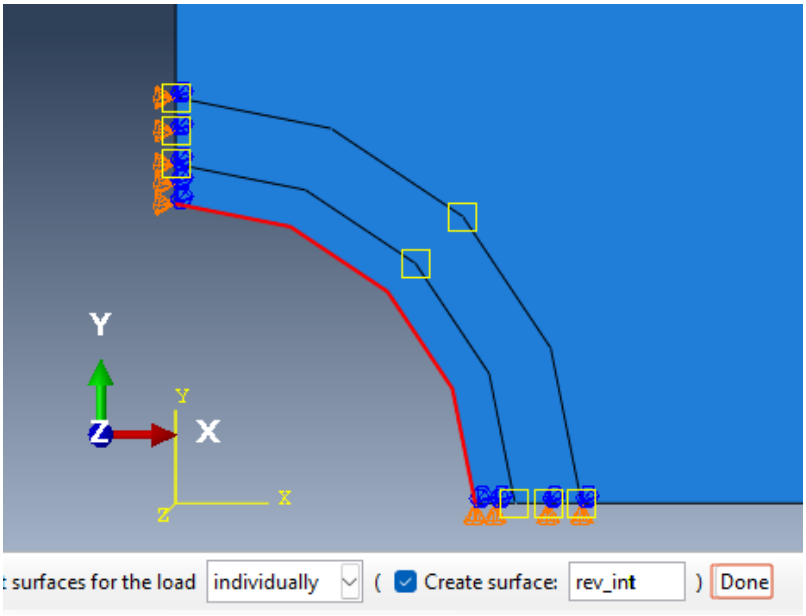
Figura B.72 – Caixa de diálogo **Create Load** com especificações do carregamento **inner_casing_pressure**



Fonte: Autor (2025).

b. Selecione a aresta correspondente a superfície interna do revestimento, especifique um nome para a superfície e selecione **Done** (Figura B.73).

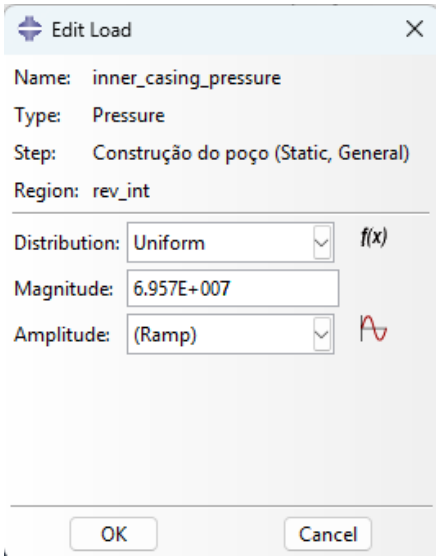
Figura B.73 – Seleção da aresta na superfície interna do revestimento e definição do nome da superfície criada



Fonte: Autor (2025).

c. Na caixa de diálogo aberta, defina a magnitude da pressão interna aplicada no revestimento, conforme valor apresentado na Tabela 6.2 (Figura B.74).

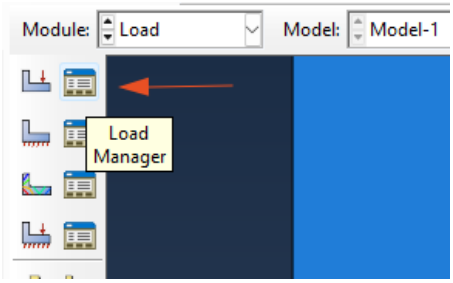
Figura B.74 – Caixa de diálogo **Edit Load** com especificações da magnitude do carregamento **inner_casing_pressure**



Fonte: Autor (2025).

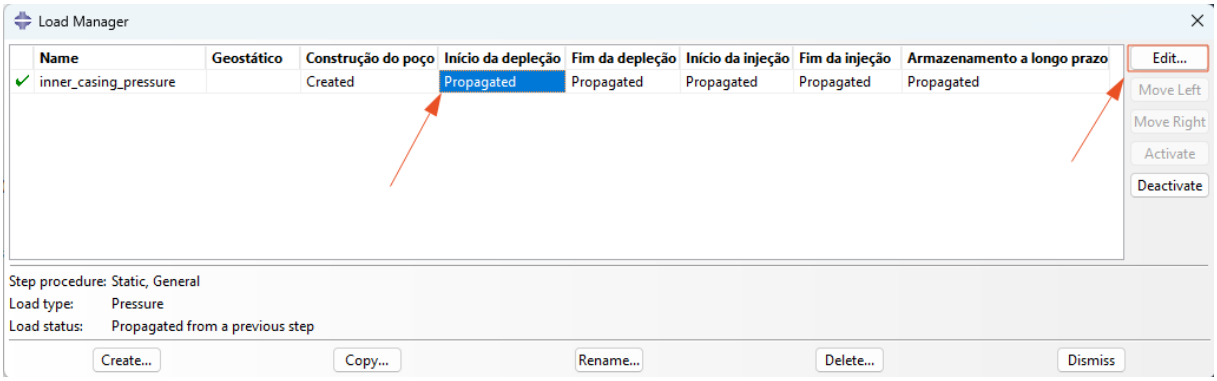
d. Para realizar a alteração ao longo dos passos de análise, selecione a opção **Load Manager** (Figura B.75). Assim que a caixa de diálogo abrir, especifique o **step** de interesse do carregamento e clique em **Edit** (Figura B.76).

Figura B.75 – Seleção da opção **Load Manager**



Fonte: Autor (2025).

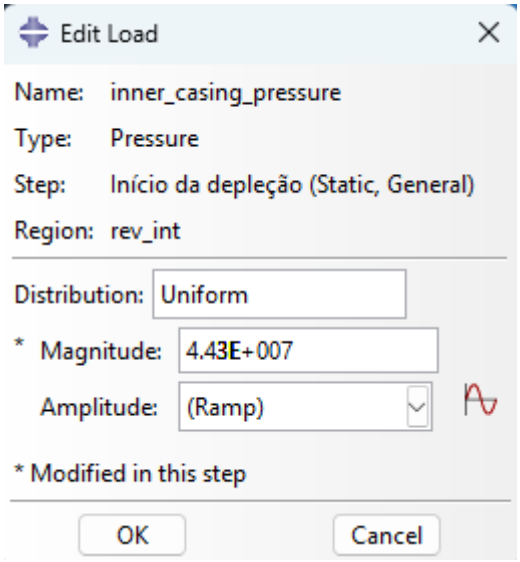
Figura B.76 – Seleção do **step** de interesse para modificação da magnitude de um carregamento



Fonte: Autor (2025).

e. Assim que a caixa de diálogo abrir, defina o novo valor para a magnitude do carregamento e clique em **OK** (Figura B.77).

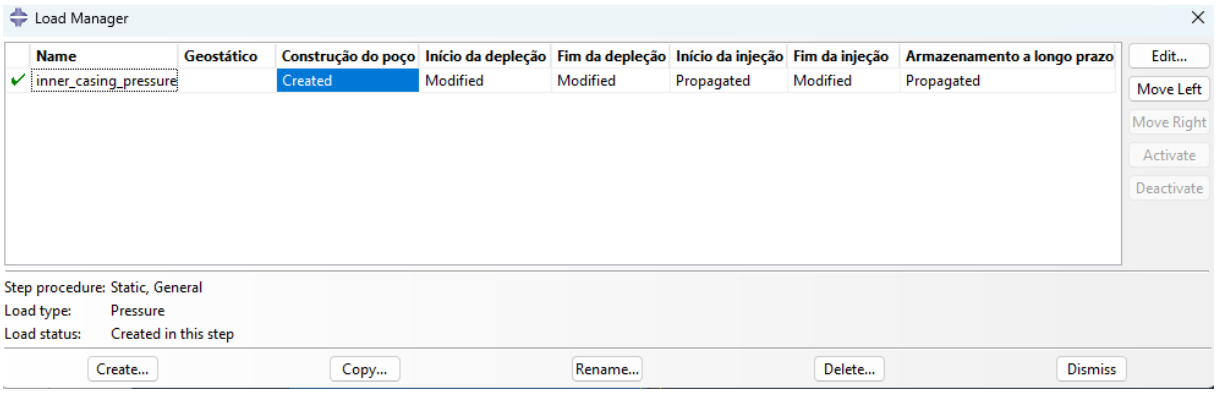
Figura B.77 – Alteração da magnitude do carregamento



Fonte: Autor (2025).

f. Ao final das alterações, a configuração do carregamento **inner_casing_pressure**, ao longo dos passos de análise, estará conforme apresentado na Figura B.78.

Figura B.78 – Configuração do carregamento **inner_casing_pressure** ao longo dos passos de análise

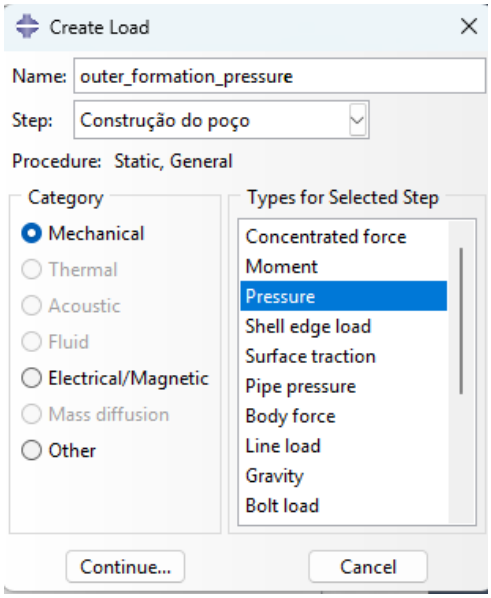


Fonte: Autor (2025).

9. Carregamento **outer_formation_pressure**

a. Na caixa de diálogo **Create Load**, defina o nome do carregamento, o **step** que o carregamento começará atuar (neste caso, Construção do poço), a categoria **Mechanical** e o carregamento do tipo **Pressure**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.79).

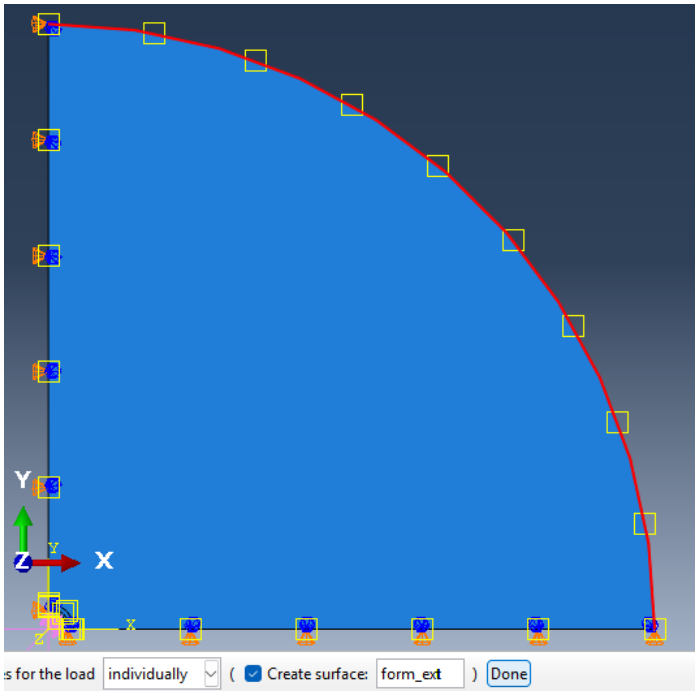
Figura B.79 – Caixa de diálogo **Create Load** com especificações do carregamento **outer_formation_pressure**



Fonte: Autor (2025).

b. Selecione a aresta correspondente a superfície externa da formação, especifique um nome para a superfície e selecione **Done** (Figura B.80).

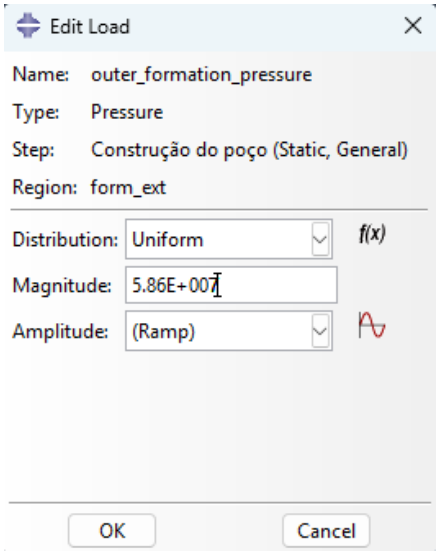
Figura B.80 – Seleção da aresta na superfície externa da formação e definição do nome da superfície criada



Fonte: Autor (2025).

c. Na caixa de diálogo aberta, defina a magnitude da pressão externa aplicada na formação, conforme descrito na Subseção 6.1 e depois finalize clicando em **OK** (Figura B.81).

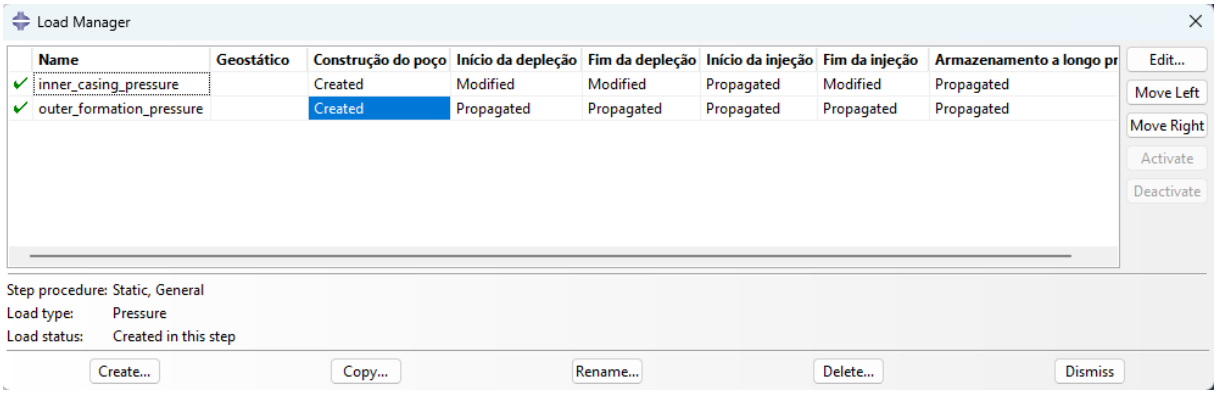
Figura B.81 – Caixa de diálogo **Edit Load** com especificações da magnitude do carregamento **outer_formation_pressure**



Fonte: Autor (2025).

d. Ao final das definições de carregamento, a caixa de diálogo **Load Manger** estará conforme apresentado na Figura B.82

Figura B.82 – Configuração final dos carregamentos ao longo dos passos de análise

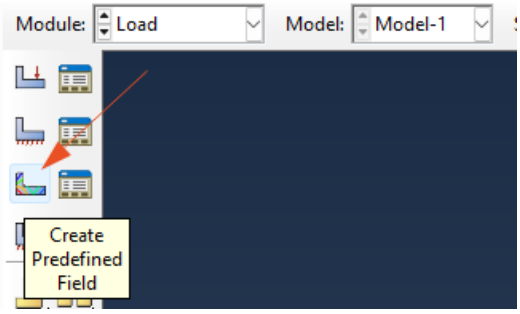


Fonte: Autor (2025).

Campos Predefinidos (Predefined Fields)

10. Para a definição dos campos predefinidos, selecione a opção **Create Predefined Fields** (Figura B.83).

Figura B.83 – Seleção da opção **Create Predefined Fields**



Fonte: Autor (2025).

Para o modelo, são criados três campos predefinidos:

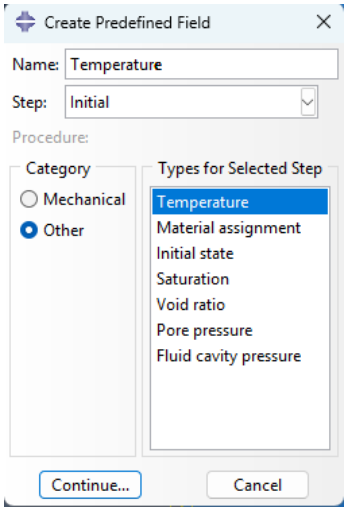
- **Temperature:** campo de temperatura uniforme em todo o domínio. É criado no **step Initial** e seu valor é modificado em determinados **steps**.
- **Void_ratio:** razão de vazios definida para as regiões porosas (cimento e formação). Precisa ser definido no **step Initial** e é computada nos demais **steps**. É utilizado como referência para que a modelagem numérica termo-poroelástica possa ser realizada.
- **Formation_pressure:** pressão vertical prescrita na região da formação para que seu peso próprio na profundidade de estudo possa ser considerado na conta das tensões verticais ao longo dos passos de análise. É prescrito e criado no **step Initial** e computado nos **steps** seguintes.

Nos passos a seguir são apresentados os procedimentos para criar cada um dos três campos predefinidos apresentados.

11. Campo predefinido **Temperature**

    a. Na caixa de diálogo **Create Predefined Fields**, especifique o **Step** “Initial”, a categoria **Other** e o tipo **Temperature**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.84).

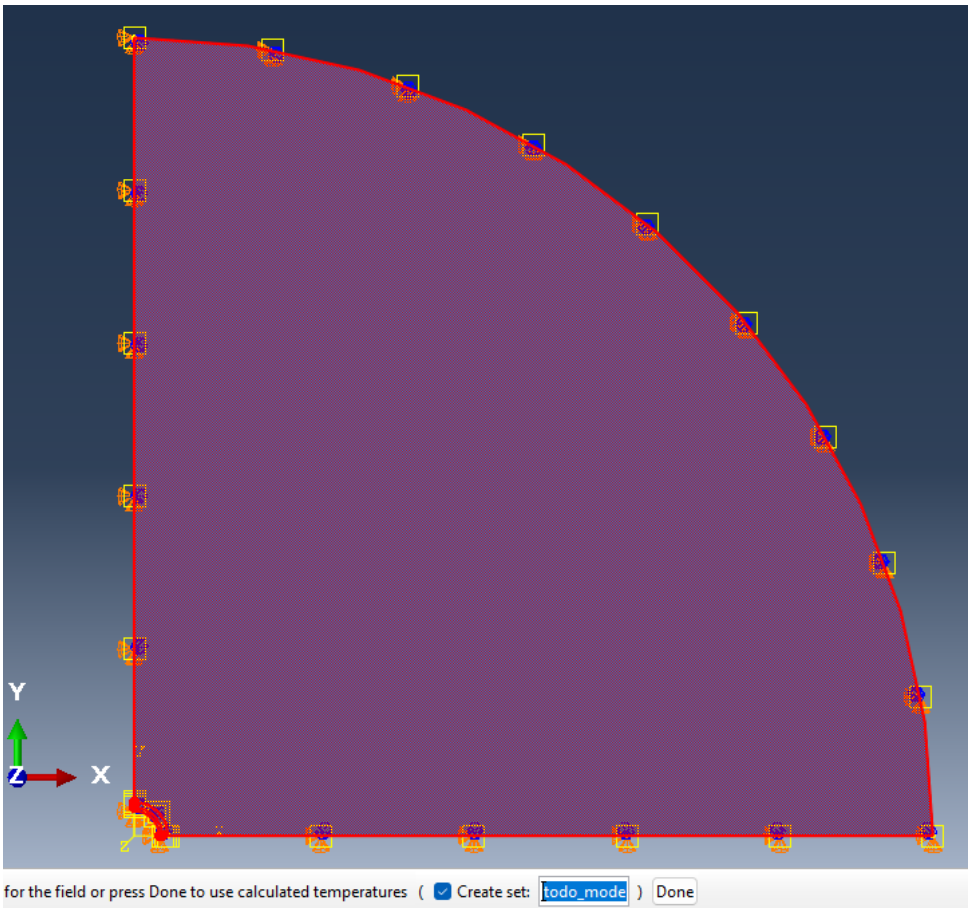
Figura B.84 – Caixa de diálogo **Create Predefined Field** com especificações do campo **Temperature**



Fonte: Autor (2025).

a. Selecione todo o modelo, defina o nome do **set** correspondente a região e clique em **Done** (Figura B.85).

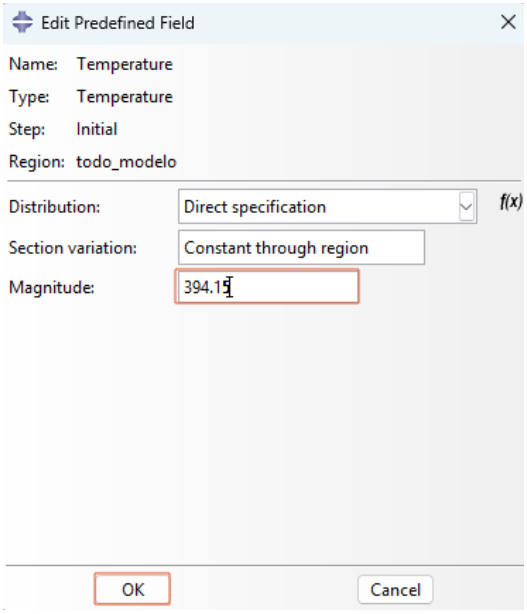
Figura B.85 – Seleção de todo o modelo para especificação do campo de temperatura e definição do nome do **set** criado



Fonte: Autor (2025).

b. Na caixa de diálogo aberta, defina a magnitude da temperatura (em Kelvin), conforme valor apresentado na Tabela 6.2 e depois clique em **OK** (Figura B.86).

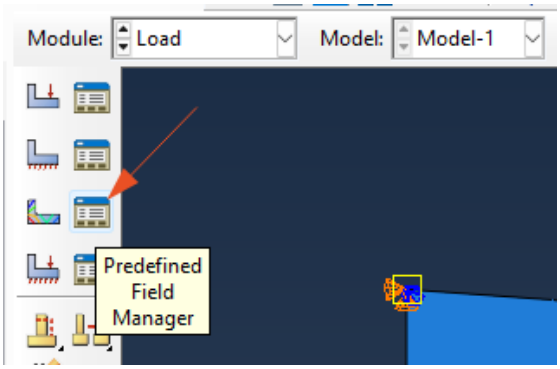
Figura B.86 – Caixa de diálogo **Edit Predefined Field** com especificação da magnitude da temperatura



Fonte: Autor (2025).

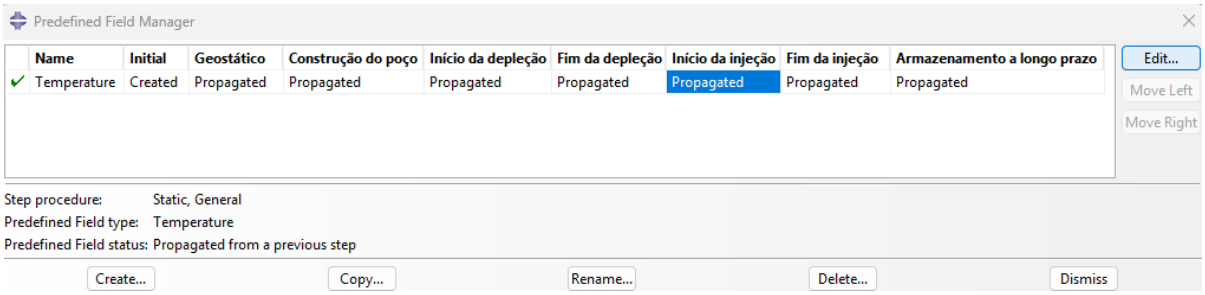
c. Para realizar a alteração ao longo dos passos de análise, selecione a opção **Predefined Field Manager** (Figura B.87). Assim que a caixa de diálogo abrir, especifique o **step** que deseja modificar o campo de temperatura e depois clique em **Edit** (Figura B.88).

Figura B.87 – Seleção da opção **Predefined Field Manager**



Fonte: Autor (2025).

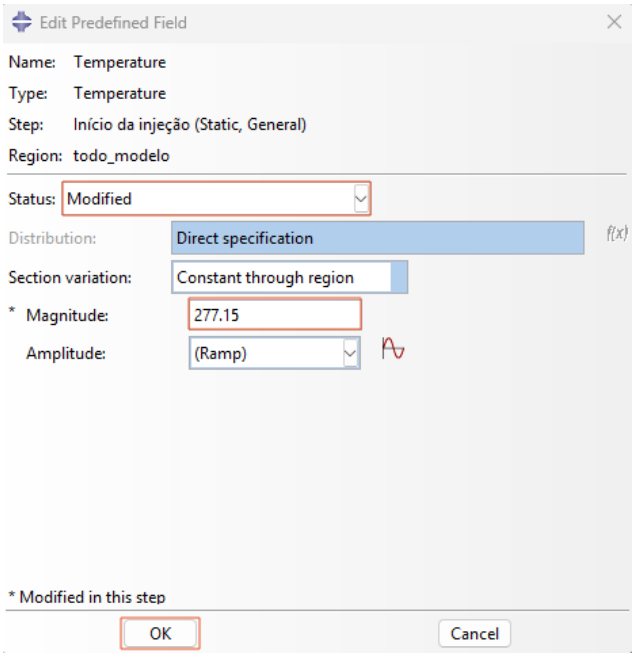
Figura B.88 – Seleção do **step** de interesse para modificação da magnitude do campo de temperatura



Fonte: Autor (2025).

a. Na nova caixa de diálogo, selecione o **Status** como **Modified**, defina o novo valor para a magnitude da temperatura e clique em **OK** (Figura B.89).

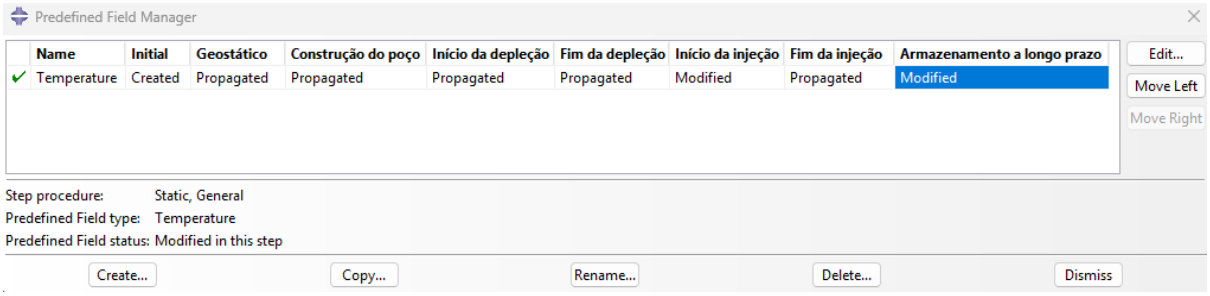
Figura B.89 – Alteração da magnitude do carregamento



Fonte: Autor (2025).

b. Ao final das alterações, a configuração do campo **Temperature**, ao longo dos passos de análise, estará conforme apresentado na Figura B.90.

Figura B.90 – Configuração do campo **Temperature** ao longo dos passos de análise

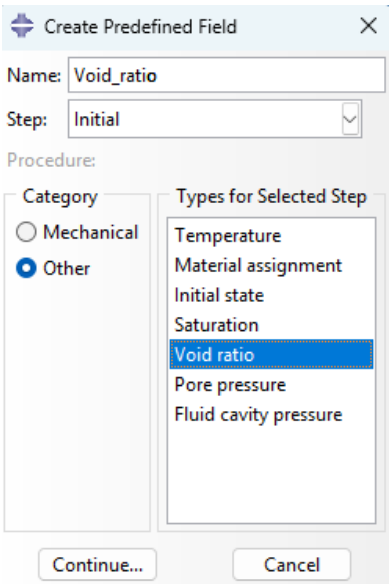


Fonte: Autor (2025).

12. Campo predefinido **Void_ratio**

a. Na caixa de diálogo **Create Predefined Fields**, especifique o **Step** “Initial”, a categoria **Other** e o tipo **Void ratio**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.91).

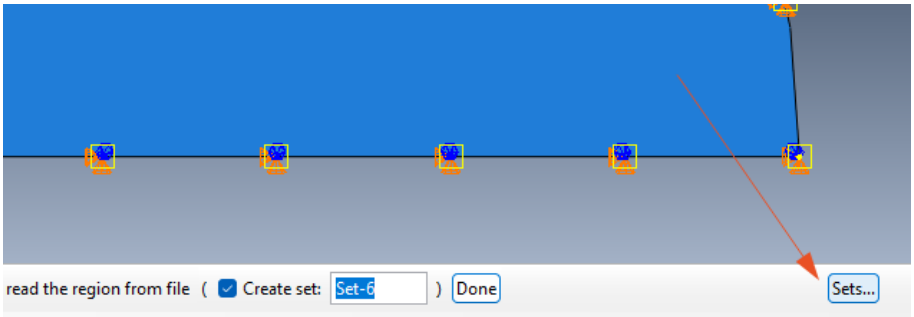
Figura B.91 – Caixa de diálogo **Create Predefined Field** com especificações do campo **Void_ratio**



Fonte: Autor (2025).

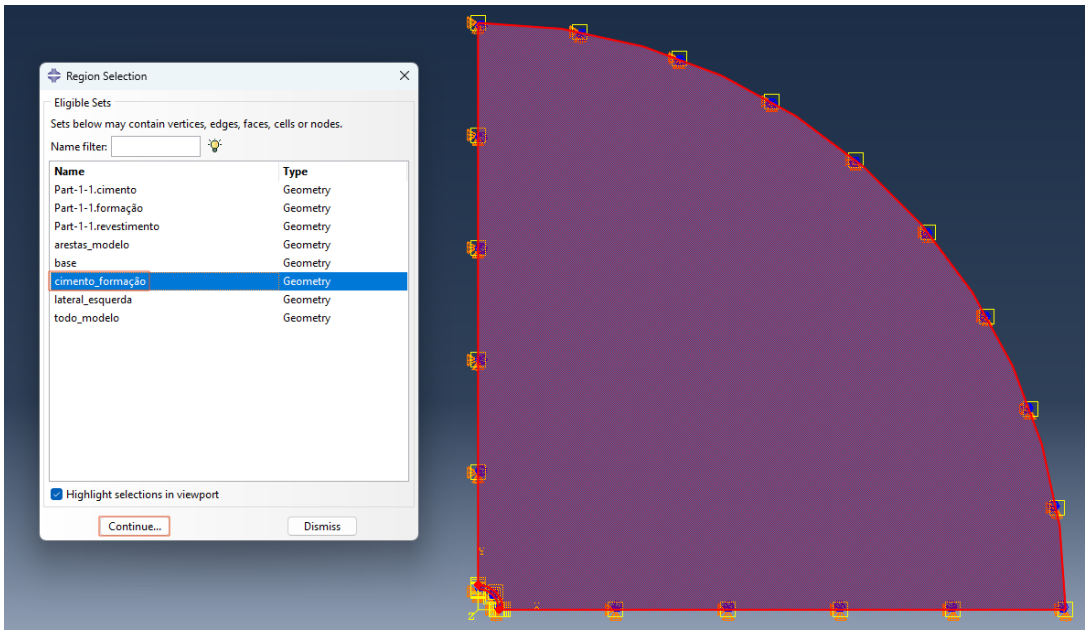
c. O campo de razão de vazios é especificado na região do cimento e da formação. Como já foi definido um **set** para essas regiões (Figura B.66), não é necessário criar um novo. Dessa forma, para especificar o **set** relacionado a essas regiões, clique **Sets** (Figura B.92). Depois selecione o **set** correspondente as regiões do cimento e da formação. Por fim, clique em **Continue** (Figura B.93).

Figura B.92 – Localização da opção **Sets**



Fonte: Autor (2025).

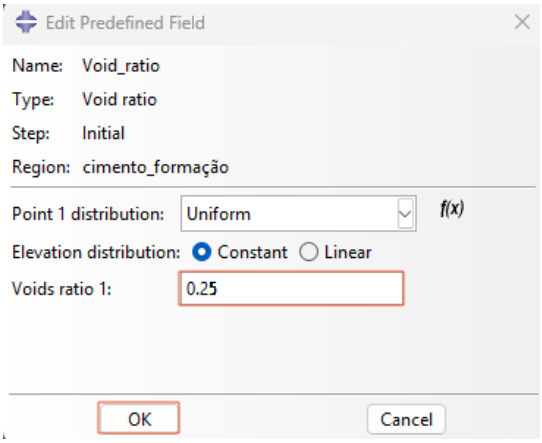
Figura B.93 – Seleção do **set** correspondente as regiões do cimento e da formação



Fonte: Autor (2025).

d. Na sequência, aparecerá a caixa de diálogo **Edit Predefined Field**. Nela, especifique um valor para a razão de vazios inicial (sugere-se adotar o mesmo valor utilizado na caracterização dos materiais porosos), conforme apresentado na Figura B.94. Em seguida, clique em **OK**.

Figura B.94 – Caixa de diálogo **Create Predefined Field** com especificações do campo **Void_ratio**

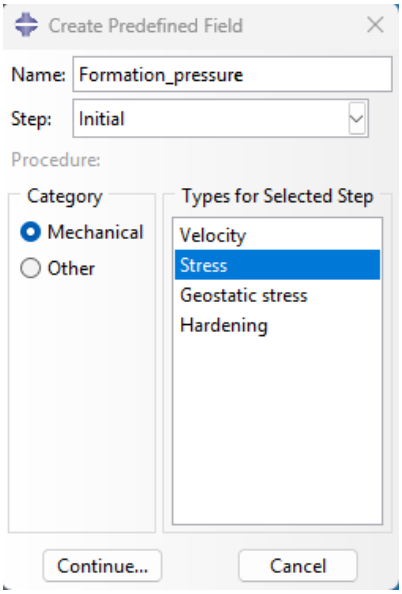


Fonte: Autor (2025).

13. Campo predefinido **Formation_pressure**

a. Na caixa de diálogo **Create Predefined Fields**, especifique o **Step** “Initial”, a categoria **Mechanical** e o tipo **Stress**. Siga, clicando em **Continue** (Figura B.95).

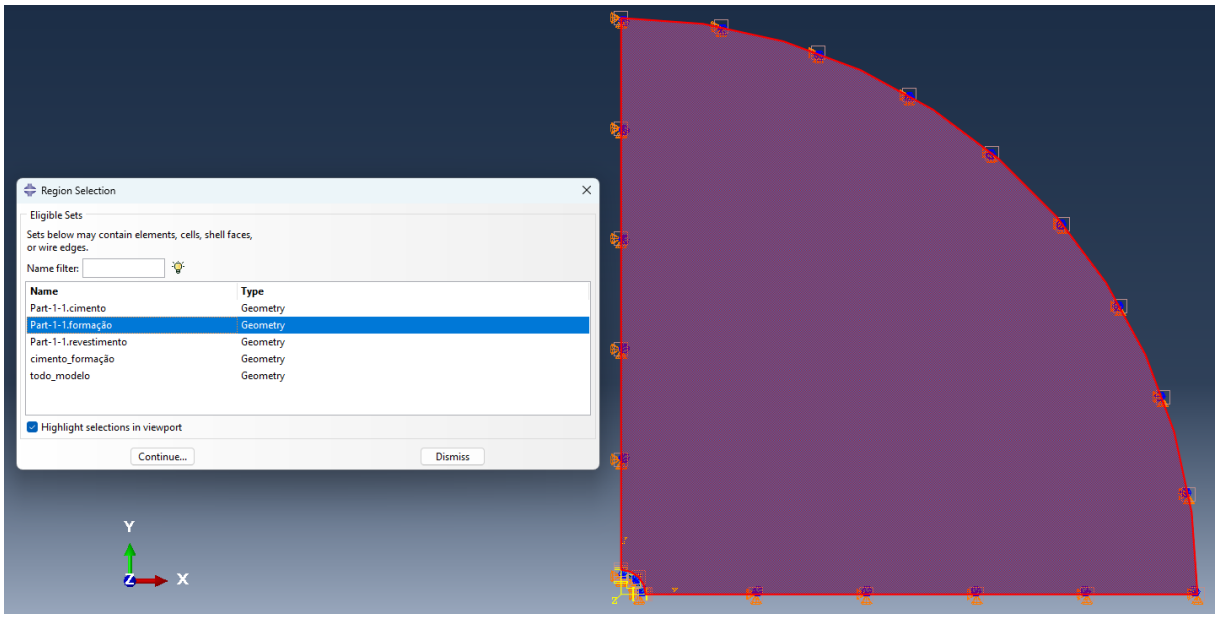
Figura B.95 – Caixa de diálogo **Create Predefined Field** com especificações do campo **Formation_pressure**



Fonte: Autor (2025).

d. Ao ser solicitada a seleção de uma região, selecione o **set** correspondente a região da formação (Figura B.96). Depois clique em **Continue**.

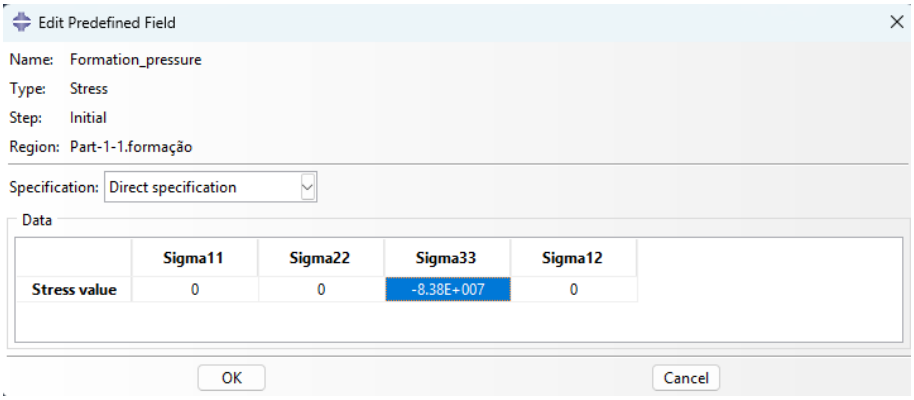
Figura B.96 – Seleção do **set** correspondente a região da formação



Fonte: Autor (2025).

e. Quando abrir a caixa de diálogo **Edit Predefined Field**, especifique o valor da sobrecarga da formação na componente vertical de tensão (**Sigma33**) e defina os valores das demais direções como zero (Figura B.97). Finalize clicando em **OK**.

Figura B.97 – Definição do valor da componente vertical na região da formação

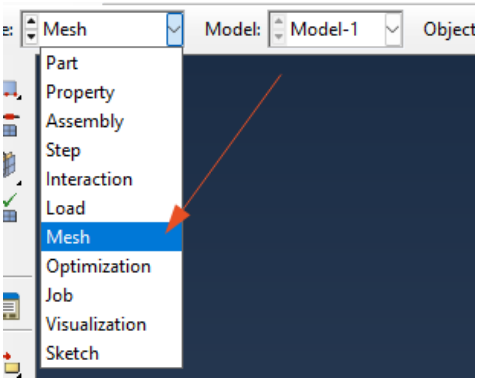


Fonte: Autor (2025).

B.8 Geração da malha de elementos finitos

1. Acesse o módulo **Mesh** no Abaqus/CAE (Figura B.98).

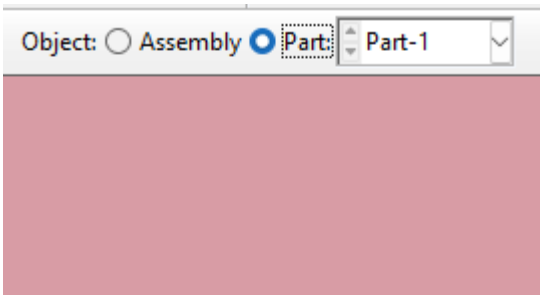
Figura B.98 – Localização do módulo **Mesh**



Fonte: Autor (2025).

2. Defina o **Object** como **Part** (Figura B.99).

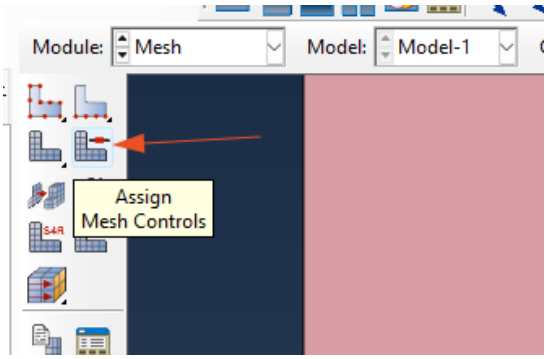
Figura B.99 – Definição de **Object** como **Part**



Fonte: Autor (2025).

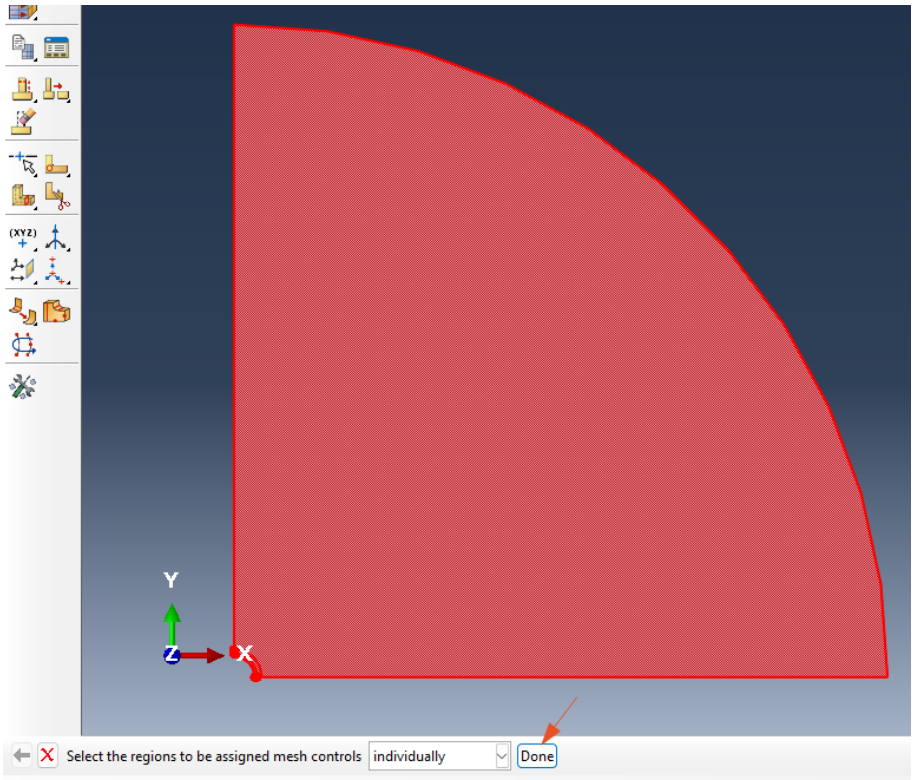
3. Acesse a opção **Assign Mesh Controls** (Figura B.100). Selecione toda a região do modelo e depois clique em **Done** (Figura B.101). Em seguida, selecione o tipo do elemento como **Quad** (quadrilateral) e a técnica como **Structured** (estruturada). Finalize clicando em **OK** (Figura B.102).

Figura B.100 – Localização da opção **Assign Mesh Controls**



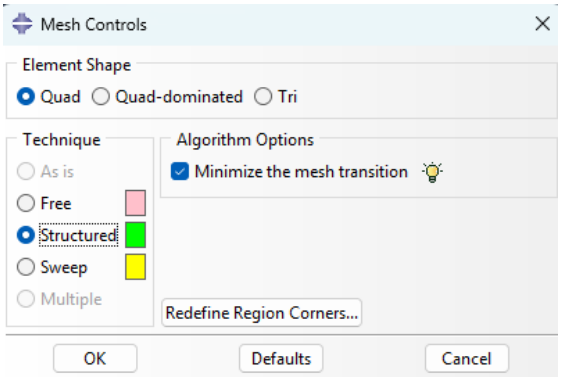
Fonte: Autor (2025).

Figura B.101 – Seleção de todo o modelo para a definição do controle da malha



Fonte: Autor (2025).

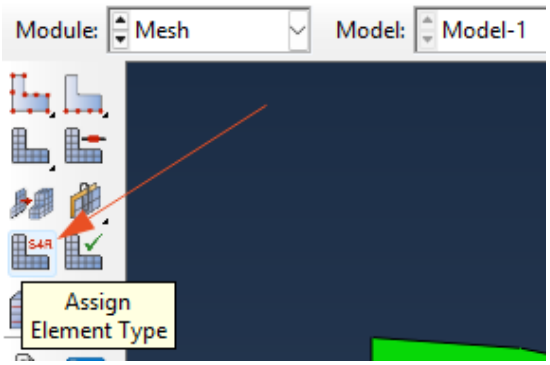
Figura B.102 – Definição do tipo de elemento como **Quad** (quadrilateral) e a técnica como **Structured** (estruturada)



Fonte: Autor (2025).

4. Para a especificação do tipo de elemento de cada região, selecione a opção **Assign Element Type** (Figura B.103).

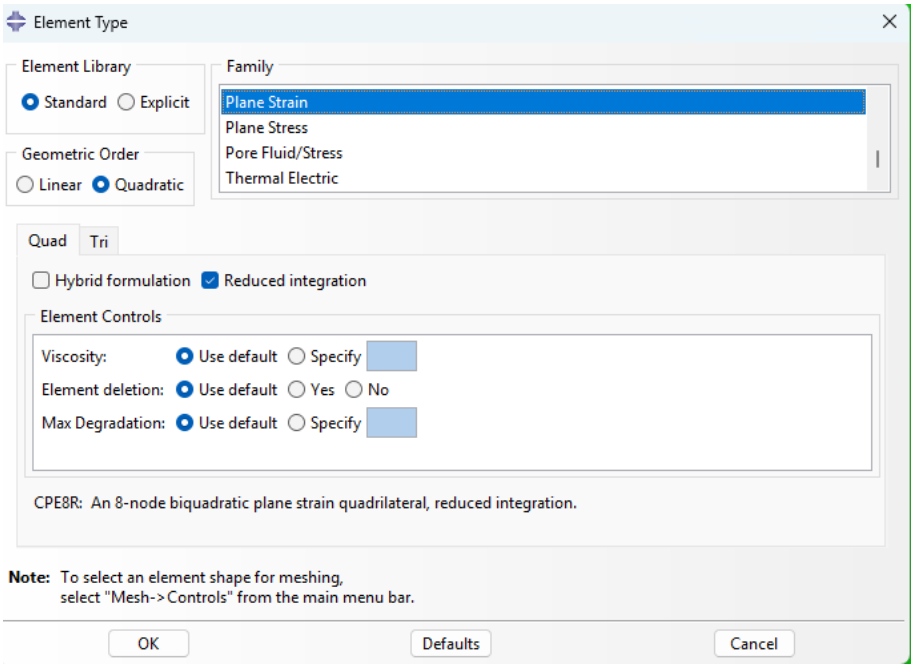
Figura B.103 – Seleção da opção **Assign Element Type**



Fonte: Autor (2025).

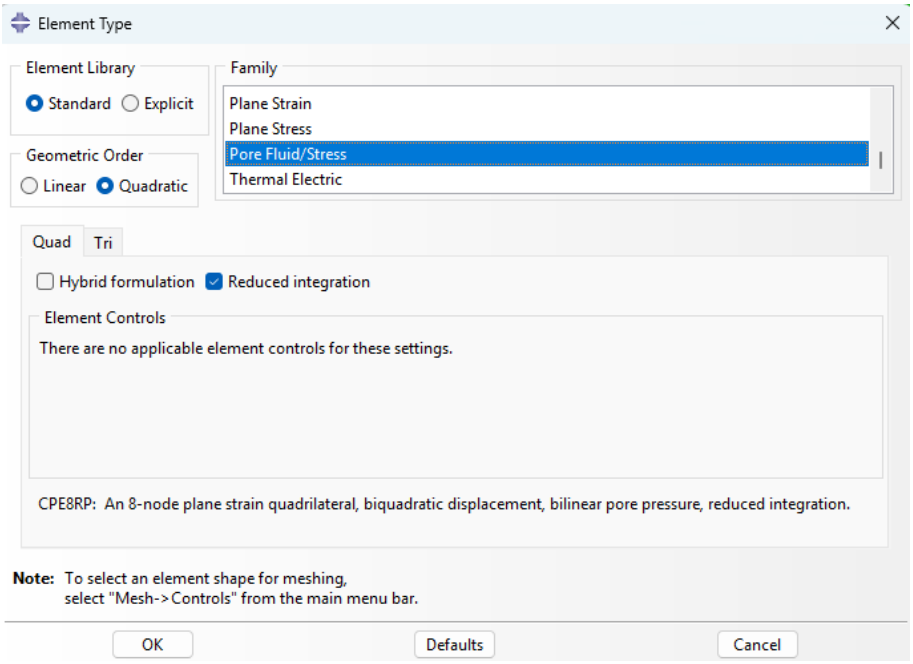
5. Para cada uma das regiões do modelo (revestimento, cimento e formação), selecione a região e clique em **Done**. Quando aparecer a caixa de diálogo **Element Type**, especifique a família do elemento – **Plane Strain** para o revestimento (Figura B.104) e **Pore Fluid/Stress** para o cimento e para a formação (Figura B.105). Especifique a ordem do elemento como **Quadratic** e o tipo de integração como reduzida (**Reduced integration**). Para finalizar, clique em **OK**.

Figura B.104 – Configuração do elemento para a região do revestimento



Fonte: Autor (2025).

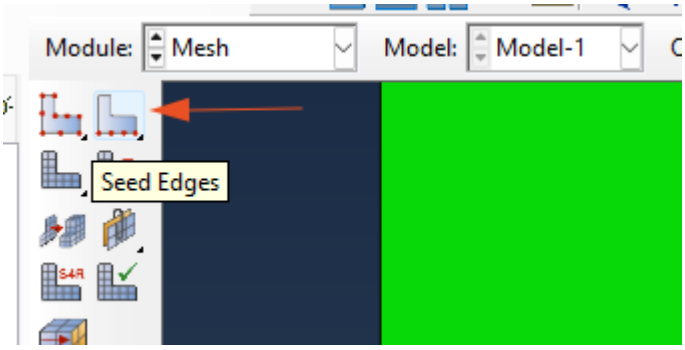
Figura B.105 – Configuração do elemento para a região do cimento e da formação



Fonte: Autor (2025).

6. A configuração da quantidade de elementos em cada direção e região é feita por meio da ferramenta **Seed Edges** (Figura B.106).

Figura B.106 – Seleção da opção **Seed Edges**



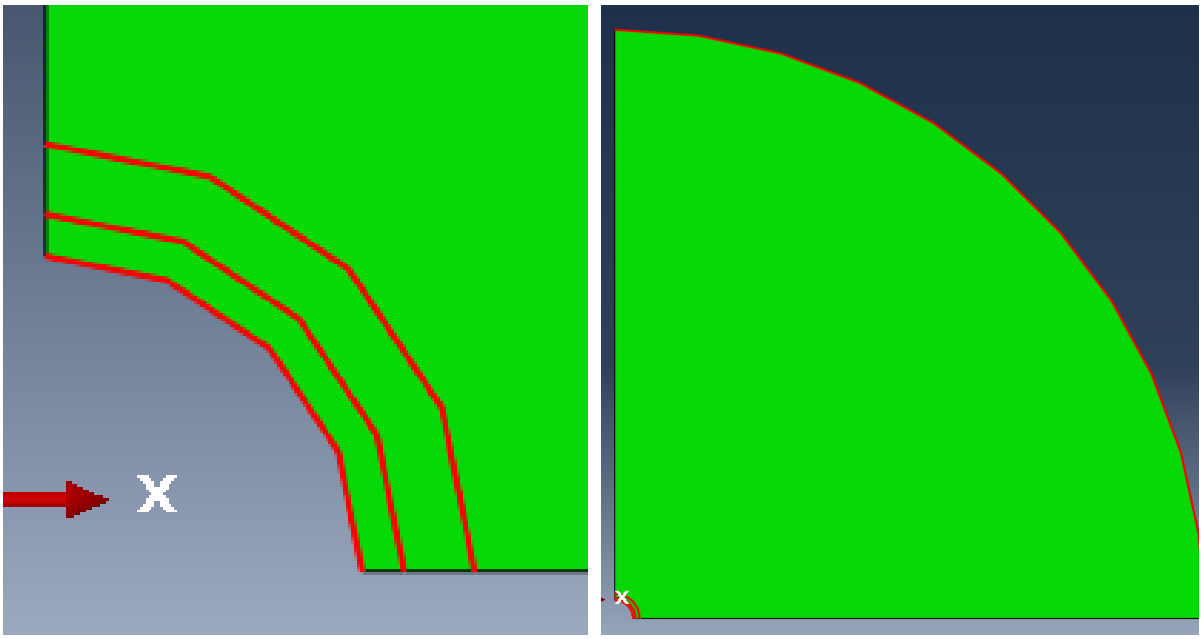
Fonte: Autor (2025).

O refinamento da falha é realizado considerando 50 elementos na direção tangencial. Na direção radial, são utilizados 4 elementos na região do revestimento, 5 na região do cimento e 90 elementos na região da formação, utilizando um fator de *bias* de 20.

7. Para a definição da quantidade de elementos na direção tangencial, selecione as arestas correspondentes a parede interna do revestimento, interfaces revestimento-cimento e cimento-formação (Figura B.107a) e a borda externa da formação (Figura B.107b). Na sequência, clique em **Done**. Quando a caixa de diálogo **Load Seeds**

aparecer, especifique o método **By number**, a **Bias** como **Single** e o número de elementos como **50** (Figura B.108).

Figura B.107 – Seleção das arestas para refinamento tangencial

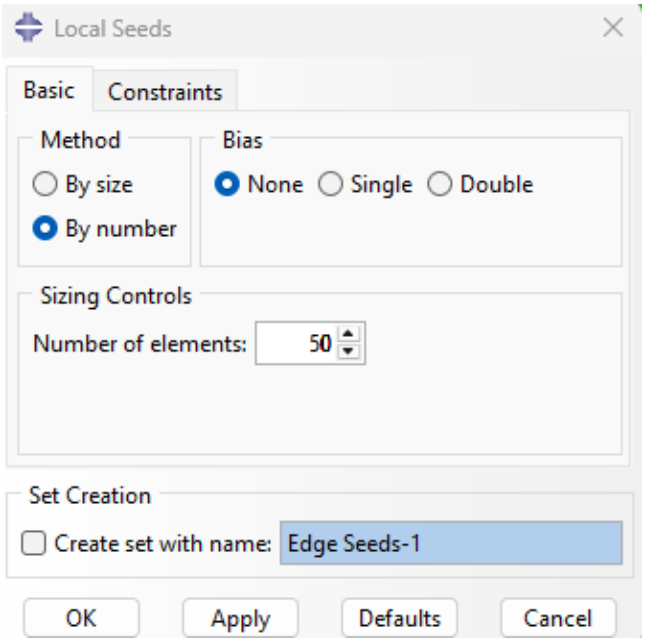


(a) Arestas correspondentes a parede interna do revestimento e interfaces revestimento-cimento e cimento-formação

(b) Interface correspondente a parede externa da formação

Fonte: Autor (2025).

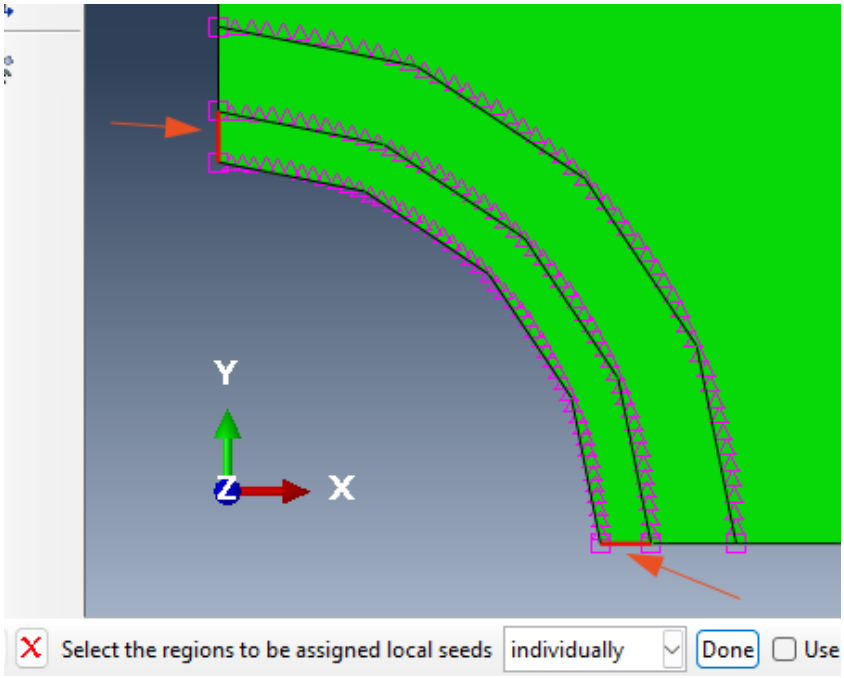
Figura B.108 – Configuração da quantidade de elementos para a direção tangencial



Fonte: Autor (2025).

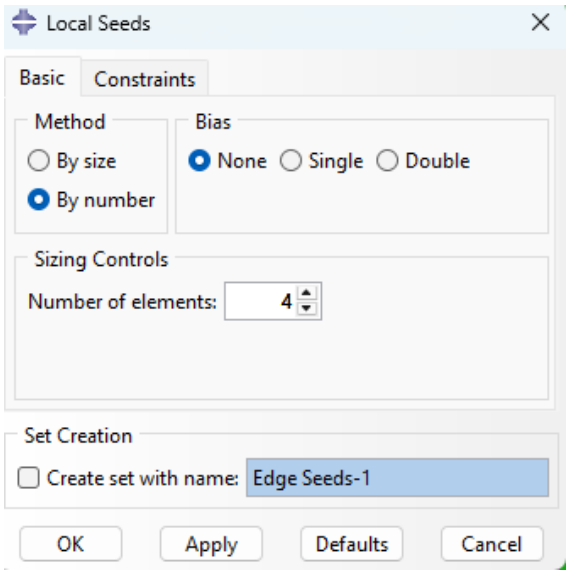
8. Para especificar a quantidade de elementos na direção radial, para a região do revestimento, selecione as duas arestas destacadas na Figura B.109 e clique em **Done**. Quando aparecer a caixa de diálogo **Load Seeds**, especifique o método **By number**, a **Bias** como **None** e o número de elementos como **4** (Figura B.110). Para finalizar clique em **OK**.

Figura B.109 – Seleção das arestas para refinamento na direção radial na região do revestimento



Fonte: Autor (2025).

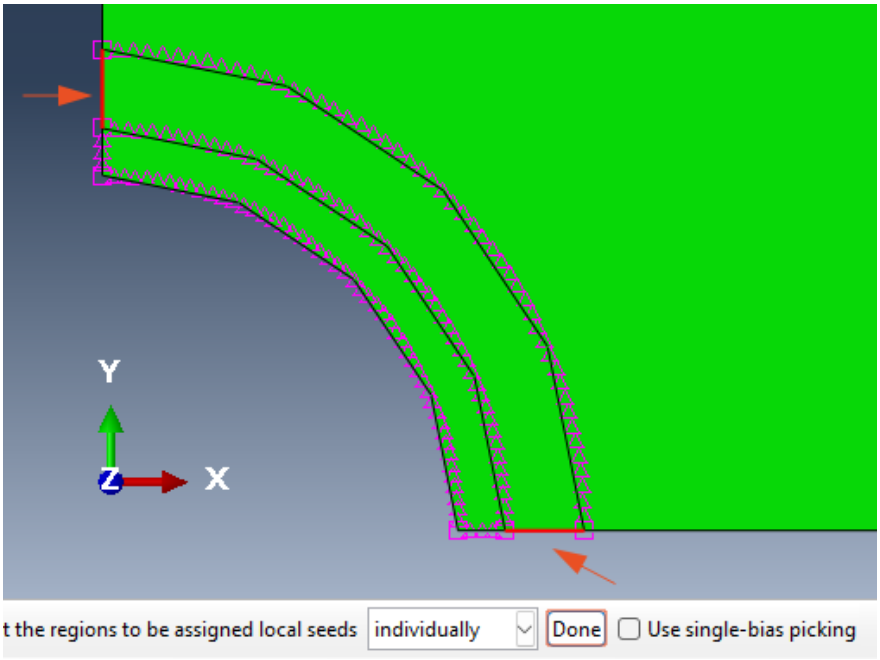
Figura B.110 – Configuração da quantidade de elementos na direção radial na região do revestimento



Fonte: Autor (2025).

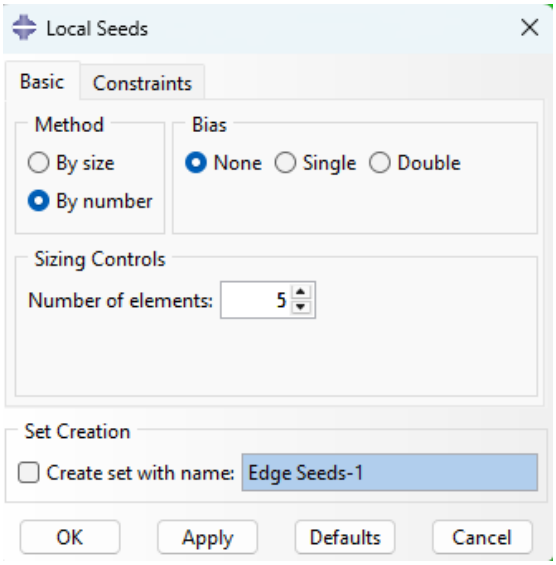
9. Para especificar a quantidade de elementos na direção radial para a região do cimento, selecione as duas arestas destacadas na Figura B.111 e clique em **Done**. Quando aparecer a caixa de diálogo **Load Seeds**, especifique o método **By number**, a **Bias** como **None** e o número de elementos como **5** (Figura B.112). Para finalizar clique em **OK**.

Figura B.111 – Seleção das arestas para refinamento na direção radial na região do cimento



Fonte: Autor (2025).

Figura B.112 – Configuração da quantidade de elementos na direção radial na região do cimento

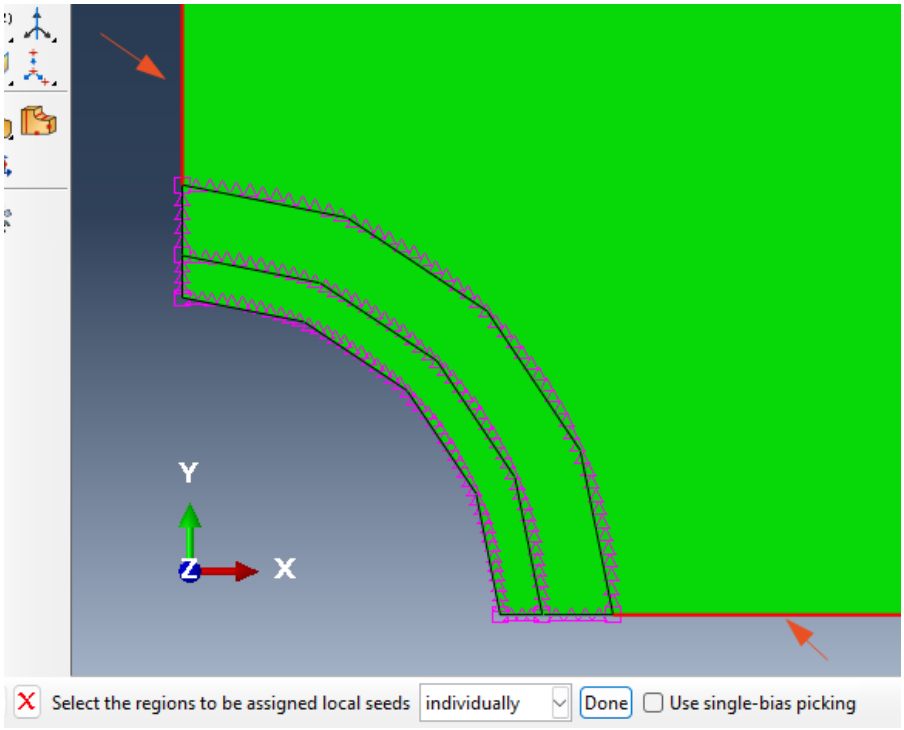


Fonte: Autor (2025).

10. Para especificar a quantidade de elementos na direção radial para a região da formação, selecione as duas arestas destacadas na Figura B.113 e clique em **Done**. Quando aparecer a caixa de diálogo **Load Seeds**, especifique o método **By number**, a **Bias** como

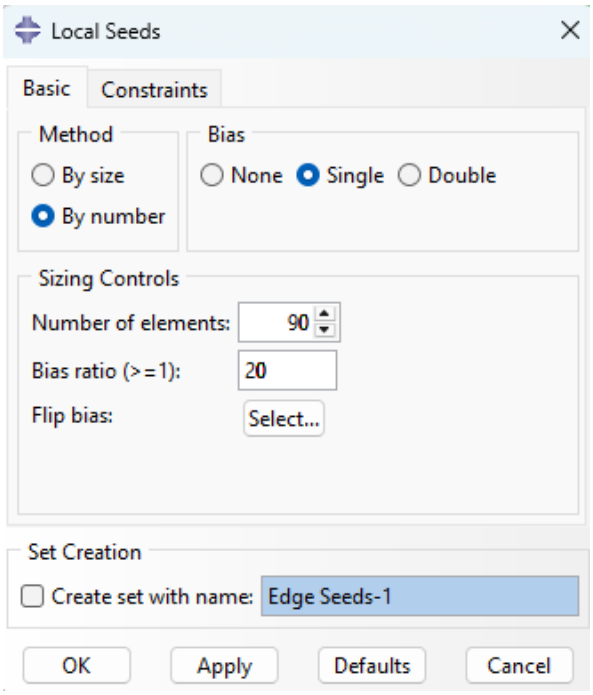
Single, o número de elementos como **90** e o fator de bias como **20** (Figura B.114). Para finalizar clique em **OK**.

Figura B.113 – Seleção das arestas para refinamento na direção radial na região da formação



Fonte: Autor (2025).

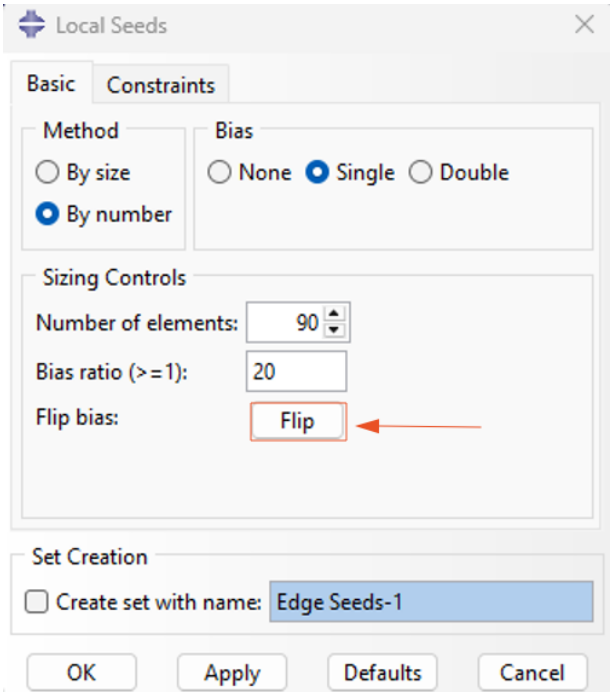
Figura B.114 – Configuração da quantidade de elementos na direção radial na região da formação



Fonte: Autor (2025).

Observação: Caso a direção de refinamento fique invertida (com os elementos menores posicionados mais afastados do poço), selecione a aresta correspondente e clique em **Flip** na caixa de diálogo **Local Seeds** (Figura B.115), garantindo que o refinamento ocorra corretamente no sentido desejado (maior densidade de elementos próximos ao poço).

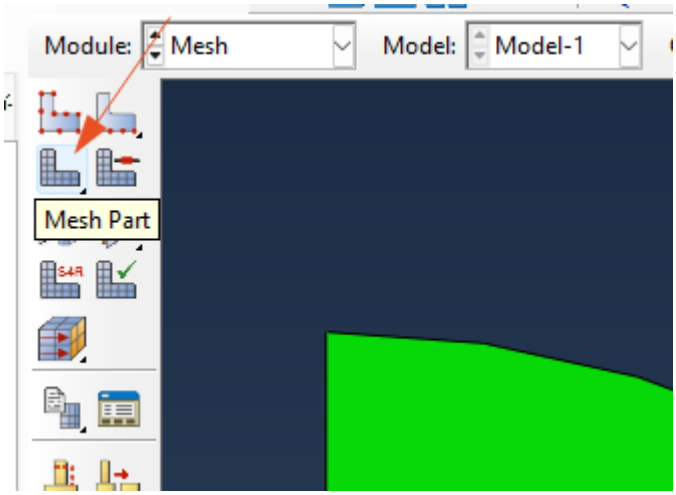
Figura B.115 – Modificação da direção de refinamento na região da formação



Fonte: Autor (2025).

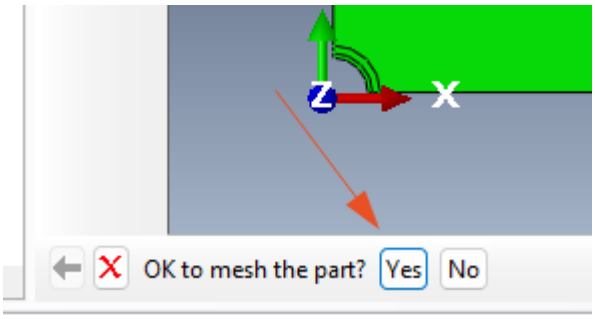
11. Após a definição do seeding (divisão dos elementos nas bordas), clique em **Mesh Part** para gerar a malha do modelo (Figura B.116). Clique em **Yes** na sequência (Figura B.117).

Figura B.116 – Seleção da opção **Mesh Part**



Fonte: Autor (2025).

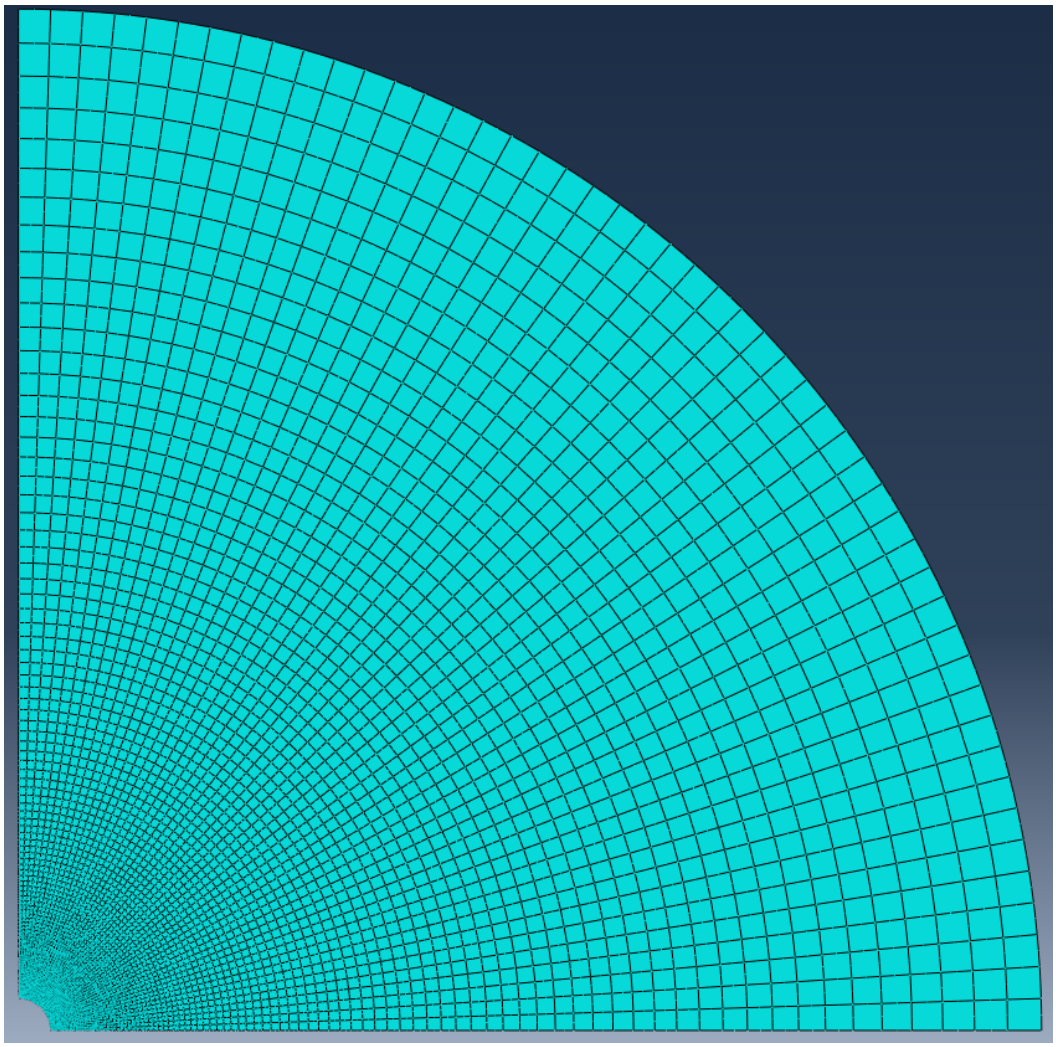
Figura B.117 – Confirmação para geração da malha de elementos finitos



Fonte: Autor (2025).

12. Após a finalização das configurações da malha, a discretização do modelo ficará conforme apresentado na Figura B.118.

Figura B.118 – Configuração final da malha de elementos finitos do modelo

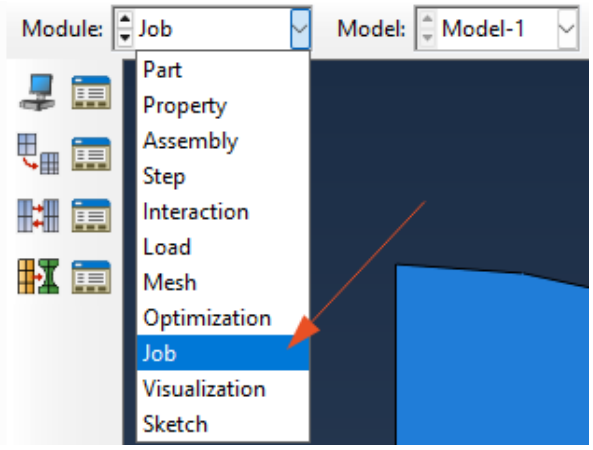


Fonte: Autor (2025).

B.9 Criando e submetendo um trabalho para análise

1. Acesse o módulo **Job** no Abaqus/CAE (Figura B.119).

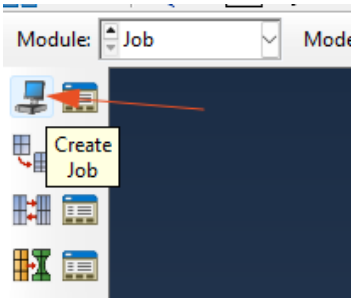
Figura B.119 – Localização do módulo **Job**



Fonte: Autor (2025).

2. Selecione a opção **Create Job** (Figura B.120).

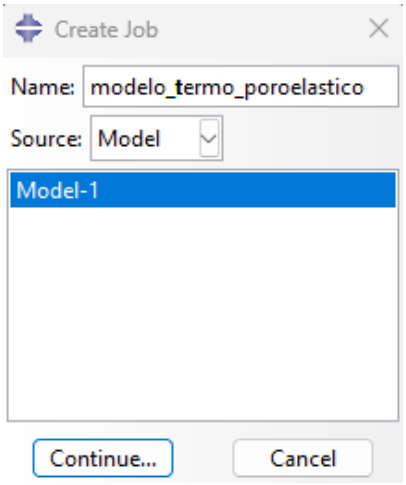
Figura B.120 – Seleção da opção **Create Job**



Fonte: Autor (2025).

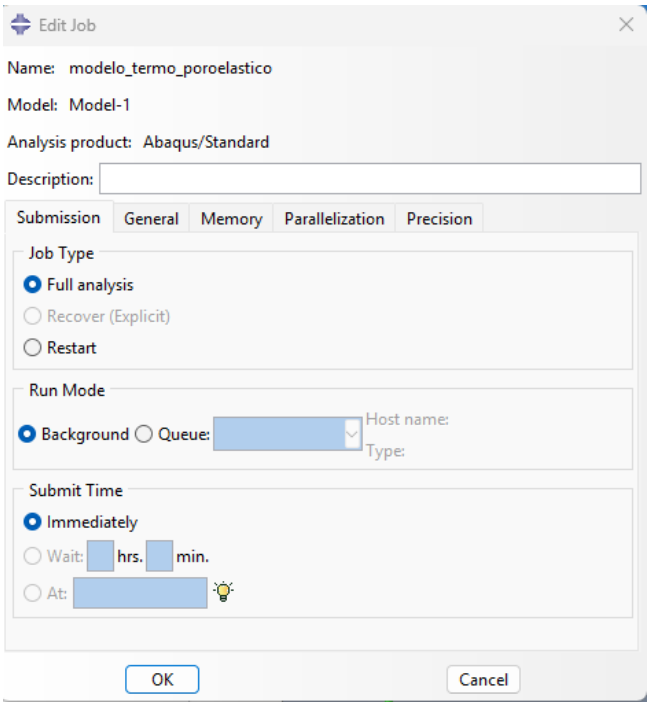
3. Na janela exibida, defina um nome para o **job**, selecione o modelo atual como base, e clique em **Continue** (Figura B.121). Quando aparecer a janela subsequente, clique em **OK** (Figura B.122).

Figura B.121 – Nomeação do job e seleção do modelo base



Fonte: Autor (2025).

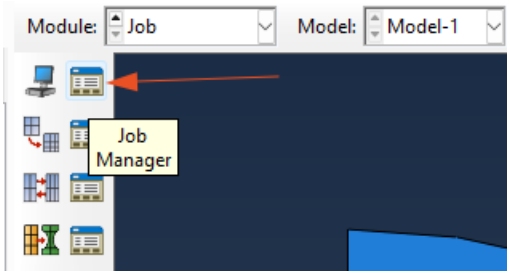
Figura B.122 – Configuração de análise do job



Fonte: Autor (2025).

4. Com o job criado, selecione a opção **Job Manager** (Figura B.123).

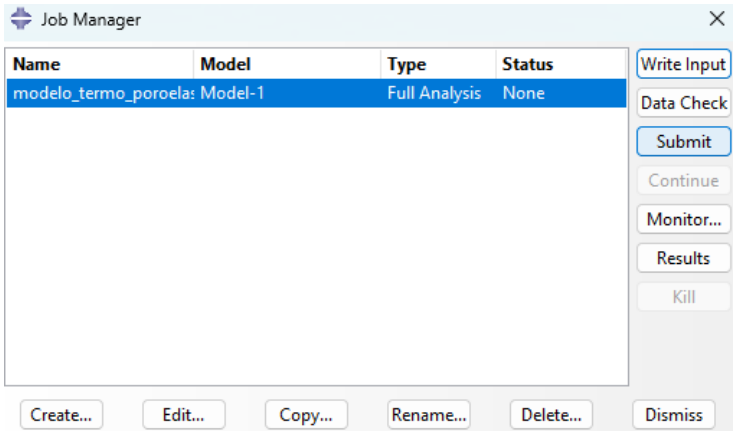
Figura B.123 – Seleção da opção **Job Manager**



Fonte: Autor (2025).

5. Na janela exibida, selecione o job criado e clique em **Submit** (Figura B.124).

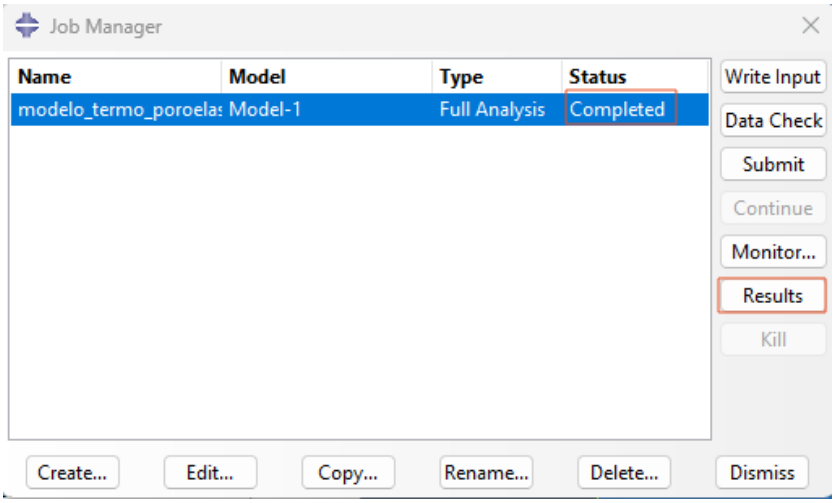
Figura B.124 – Submissão do job criado



Fonte: Autor (2025).

6. Quando o **Status** da análise modificar para **Completed**, clique em **Results** para visualizar os resultados (Figura B.125).

Figura B.125 – Finalização da análise e opção de visualização dos resultados



Fonte: Autor (2025).

Ao término dessas etapas, o modelo estará completamente analisado, permitindo a interpretação física e quantitativa dos fenômenos termo-poroelásticos simulados.