

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TENSÕES AXIAIS NA INTEGRIDADE DE  
REVESTIMENTOS DE POÇOS**

Bruno Correia de Araújo Moura

Maceió - AL  
2022

BRUNO CORREIA DE ARAÚJO MOURA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TENSÕES AXIAIS NA INTEGRIDADE DE REVESTIMENTOS DE POÇOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Estruturas.

Orientador: William Wagner Matos Lira  
Coorientador: Eduardo Toledo de Lima Junior

Maceió - AL  
2022

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

M929a Moura, Bruno Correia de Araújo.  
Análise da influência de tensões axiais na integridade de revestimentos de poços / Bruno Correia de Araújo Moura. – 2022.  
121 f. : il. color.

Orientador: William Wagner Matos Lira.  
Coorientador: Eduardo Toledo de Lima Junior.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 88-90.  
Apêndice: f. 91-121.

1. Tensões axiais. 2. Integridade de poços. 3. Revestimento de poços. 4. Modelagem numérica. 5. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDU: 624: 622.25

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus e também aos meus familiares e amigos, em especial meus pais Thais e Sérgio, e minha companheira Lhara.*

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as oportunidades que pude ter na vida.

Agradecimentos especiais também aos meus pais, Thais Cavalcante Correia de Araujo e Sérgio de Barros Prado Moura, por sempre acreditarem em mim e sempre me fornecerem tudo que foi necessário para que pudesse focar na minha vida acadêmica e profissional.

Agradeço:

À minha namorada Lhara Maria Dias Magalhães, por todo companheirismo, apoio e paciência, em todos os momentos da minha carreira acadêmica, desde sempre;

Ao meu orientador William Wagner Matos Lira e meu coorientador Eduardo Toledo de Lima Junior, por todo apoio, sugestões e orientações ao longo do trabalho, sempre de prontidão para conversas e reuniões;

À Petrobras e à Fundepes, estendendo a todos que fazem parte dos mesmos, pelo apoio ao projeto de pesquisa SCORE, que através dele tive todo o amparo necessário para o desenvolvimento da pesquisa realizada neste trabalho;

A todos os colegas de trabalho que me ajudaram ao longo do desenvolvimento das atividades, em especial Gilberto Lucas Leandro dos Santos, João Paulo Nogueira de Araujo e Thiago Barbosa da Silva que me ajudaram diretamente nas atividades desenvolvidas.

Estendo meus agradecimentos a todos que de alguma forma estiveram presentes na minha vida durante o tempo que me dediquei à minha formação, pesquisa e dissertação. Sem a presença dos meus familiares, amigos e colegas, nada teria sido possível. Não se traça uma caminhada vitoriosa sozinho. União e Força.

Moura, B. C. A. **Análise da influência de tensões axiais na integridade de revestimentos de poços**. 2022. 121p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na Área de Estruturas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2022.

## Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da ação de efeitos que provocam tensões axiais sobre os cálculos de verificação de integridade dos tubulares de revestimento. Essa avaliação é relevante, pois, em projetos de poços, alguns cenários submetidos a carregamentos combinados são capazes de penalizar a resistência ao colapso, podendo causar uma falha inesperada no revestimento. Devido à complexidade do problema, simulações numéricas apoiadas no método dos elementos finitos são utilizadas para reprodução dos cenários avaliados. Para alcançar o objetivo proposto, a metodologia de desenvolvimento deste trabalho é baseada em quatro etapas principais: i) estudo e determinação dos cenários que os tubulares de revestimento devem ser submetidos; ii) determinação dos carregamentos, incluindo estudos dos efeitos e fenômenos que atuam no revestimento; iii) identificação da modelagem numérica mais adequada para a reprodução dos cenários considerando os tubulares de revestimento modelados integralmente e as diversas possibilidades de carregamentos combinados que atuam nesses tubulares; e iv) realização de análises numéricas contemplando os diversos cenários considerados e avaliação das situações críticas que podem produzir falha na integridade do revestimento. Ao final do trabalho, é analisada a estrutura do revestimento ao longo de todo o seu comprimento a partir dos campos de tensões axiais e esforços de pressão resultantes obtidos nas simulações numéricas, encontrando as seções mais críticas em relação ao carregamento e à resistência e avaliando a integridade do revestimento de forma mais efetiva.

Palavras-chave: Revestimentos de poços; Integridade de poços; Tensões axiais; Método dos elementos finitos; Efeito térmico; Efeito balão; Efeito pistão.

Moura, B. C. A. **Analysis on the influence of axial loads on well casing integrity**. 2022. 121p. Dissertation of Mastery in Civil Engineering in Structures Area. Postgraduate Program in Civil Engineering. Federal University of Alagoas. Maceió. 2022.

## **Abstract**

The objective of this work is to evaluate the influence of the action of effects that cause axial stresses on the integrity verification calculations of casing tubulars. This assessment is relevant because, in well projects, some scenarios subjected to combined loads are capable of penalizing the resistance to collapse, which may cause an unexpected failure in the casing. Due to the complexity of the problem, numerical simulations supported by the finite element method are used to reproduce the evaluated scenarios. To achieve the proposed objective, the development methodology of this work is based on four main steps: i) study and determination of the scenarios that the casing tubes must be submitted; ii) determination of loads, including studies of effects and phenomena that act on the casing; iii) identification of the most appropriate numerical modeling for the reproduction of scenarios considering the integrally modeled casing tubes and the various possibilities of combined loads that act in these tubes; and iv) performing numerical analyzes contemplating the various scenarios considered and evaluating critical situations that may produce failure in the integrity of the casing. At the end of the work, the coating structure has been analyzed along its all length from the axial stress fields and resulting pressure forces obtained in the numerical simulations, finding the most critical sections in relation to loading and resistance and evaluating the integrity of the coating more effectively.

Keywords: Well casings; Well integrity; Axial stresses; Finite element method; Thermal effect; Ballooning effect; Piston effect.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Metodologia Geral.	19
Figura 2.1 – Esquematisação de um poço de produção de petróleo e seus revestimentos.	22
Figura 2.2 – Gráficos Tensão-Deformação de aço com (a) e sem (b) patamar de escoamento definido.	23
Figura 2.3 – Estado de tensão de um elemento tubular genérico.	24
Figura 2.4 – Seção genérica de tubular (a) Geometria da seção e (b) Carregamentos de pressão.	24
Figura 2.5 – Esquematisação de possíveis cenários de pressão interna (a) e colapso (b).	26
Figura 2.6 – Determinação do tipo de falha por colapso a partir da esbeltez.	28
Figura 3.1 – Efeito de dilatação térmica linear.	34
Figura 3.2 – Perfil de variação de temperatura.	35
Figura 3.3 – Efeito balão em revestimentos.	36
Figura 3.4 – Efeito pistão em revestimentos.	37
Figura 4.1 – Esboço do poço utilizado no primeiro cenário.	40
Figura 4.2 – Perfil térmico do poço A01H.	41
Figura 4.3 – Poço utilizado no segundo cenário.	42
Figura 4.4 – Perfil de pressões do segundo cenário.	43
Figura 4.5 – Esquematisação da estrutura de um poço.	44
Figura 4.6 – Esquematisação das fases de um poço genérico.	47
Figura 4.7 – Pressão exercida pelos fluidos nos anulares nas respectivas fases.	47
Figura 4.8 – Metodologia para determinação dos elementos finitos avaliados.	49
Figura 4.9 – Elementos finitos avaliados na modelagem numérica.	49
Figura 4.10 – Graus de liberdade do elemento finito sólido.	50
Figura 4.11 – Graus de liberdade do elemento finito de casca.	51
Figura 4.12 – Graus de liberdade do elemento finito de viga tubular.	51
Figura 4.13 – Geometrias dos modelos dos elementos finitos: (a) Sólido; (b) Casca; (c) Viga Tubular.	53
Figura 4.14 – Regiões cimentada e livre de um tubular de revestimento.	53
Figura 4.15 – Ilustração da simplificação das condições de contorno.	54
Figura 4.16 – Malha de elementos finitos sólidos.	55
Figura 4.17 – Malha de elementos finitos de casca.	55
Figura 4.18 – Malha de elementos finitos de viga tubular.	56
Figura 5.1 – Seção transversal real e modelada.	59
Figura 5.2 – Níveis de refinamento de malha.	60
Figura 5.3 – Resultados de tensão para diferentes malhas modeladas.	61
Figura 5.4 – Tempo de execução em relação à quantidade de graus de elementos finitos.	62
Figura 5.5 – Campo de deslocamentos utilizando o elemento C3D8R.	63
Figura 5.6 – Campo de deslocamentos utilizando o elemento C3D20R.	63
Figura 5.7 – Campo de deslocamentos utilizando o elemento S4R.	64
Figura 5.8 – Diferença percentual do deslocamento no topo dos modelos e na solução analítica.	64
Figura 5.9 – Convergência dos resultados para o efeito balão.	66
Figura 5.10 – Convergência dos resultados em função do comprimento longitudinal.	66
Figura 5.11 – Custo computacional das simulações em relação ao total de elementos.	67
Figura 5.12 – Custo computacional em função do comprimento longitudinal dos elementos.	67
Figura 5.13 – Deslocamentos devido ao efeito balão em cenário de <i>Tubing Leak</i> .	68
Figura 5.14 – Deslocamentos devido ao efeito balão em cenário de <i>Full Evacuation</i> .	69
Figura 5.15 – Deslocamentos devido ao efeito balão variando o topo de cimento – <i>Tubing Leak</i> .	69
Figura 5.16 – Deformações devido ao efeito balão variando o topo de cimento – <i>Tubing Leak</i> .	70
Figura 5.17 – Deslocamentos devido ao efeito balão variando o topo de cimento – <i>Full Evacuation</i> .	71



Figura 5.18 – Deformações devido ao efeito balão variando o topo de cimento – <i>Full Evacuation</i> .	71
Figura 5.19 – Modelo com um quarto da seção.	72
Figura 5.20 – Convergência dos resultados para um quarto da seção.	72
Figura 5.21 – Custo computacional para um quarto da seção.	73
Figura 5.22 – Conexão entre elementos tubulares.	74
Figura 5.23 – Simplificação da conexão de elementos tubulares de seções diferentes.	74
Figura 5.24 – Tensão axial aplicando o efeito pistão.	75
Figura 5.25 – Comportamento da tensão axial devido ao efeito pistão.	76
Figura 5.26 – Tensões axiais nos cenários de <i>Tubing Leak</i> e <i>Full Evacuation</i> .	76
Figura 5.27 – Tensão Axial somada com pressão interna – Poço de Silva [13].	77
Figura 5.28 – Limite de escoamento penalizado para o cenário de <i>Tubing Leak</i> .	78
Figura 5.29 – Resistência ao colapso no cenário de <i>Tubing Leak</i> .	78
Figura 5.30 – Comparação entre a pressão externa e a resistência ao colapso calculada.	79
Figura 5.31 – Resistência ao colapso pelo modelo de Klever-Tamano.	80
Figura 5.32 – Seção modelada com três subdivisões na direção radial.	81
Figura 5.33 – Campo de tensões radiais ao longo da parede do tubular.	81
Figura 5.34 – Campo de tensões circunferenciais ao longo da parede do tubular.	82
Figura 5.35 – Comparação de tensões entre simulação numérica e equações de Lamé.	82
Figura 5.36 – Campos de tensões do cenário de <i>Tubing Leak</i> na parede externa.	83
Figura 5.37 – Campos de tensões do cenário de <i>Tubing Leak</i> na parede interna.	83
Figura 5.38 – Campos de tensões do cenário de <i>Full Evacuation</i> na parede externa.	84
Figura 5.39 – Campos de tensões do cenário de <i>Full Evacuation</i> na parede interna.	84
Figura 5.40 – Verificação da integridade pelo critério de von Mises.	85
Figura A.1 – Modelagem utilizando elementos sólidos.	91
Figura A.2 – Criação do material do revestimento.	91
Figura A.3 – Determinação das características elásticas do material.	92
Figura A.4 – Criação de ‘Section’ (a) e ‘Instance’ (b).	92
Figura A.5 – Atribuição da seção do modelo.	93
Figura A.6 – Criação de um ‘Step’ para o modelo.	93
Figura A.7 – Criação do perfil de pressões.	94
Figura A.8 – Criação do carregamento de peso.	94
Figura A.9 – Criação das condições de contorno.	95
Figura A.10 – Criação de partições para exportar dados.	95
Figura A.11 – Criação de caminhos para exportar dados.	96
Figura A.12 – Determinação do refinamento de malha ao longo da seção transversal.	96
Figura A.13 – Determinação do comprimento longitudinal dos elementos finitos.	97
Figura A.14 – Determinação do tipo de elemento finito sólido e suas características.	97
Figura A.15 – Criação do ‘Job’ para execução da simulação.	98
Figura A.16 – Criação da seleção de nós para exportar resultados.	98
Figura A.17 – Criação dos dados para exportar resultados.	99
Figura A.18 – Exportação dos resultados para arquivo de saída.	99
Figura B.1 – Modelagem utilizando elementos de casca.	100
Figura B.2 – Criação do material do revestimento.	101
Figura B.3 – Determinação das características elásticas do material.	101
Figura B.4 – Criação da seção e determinação da espessura.	102
Figura B.5 – Criação de uma ‘Instance’.	102
Figura B.6 – Atribuição da seção ao modelo.	103
Figura B.7 – Criação do ‘Step’.	103
Figura B.8 – Criação do perfil de pressões.	104
Figura B.9 – Criação do carregamento de peso próprio.	105
Figura B.10 – Criação das condições de contorno.	105

Figura B.11 – Criação de partições para exportar dados.	106
Figura B.12 – Criação de caminhos para exportar dados.	106
Figura B.13 – Determinação do refinamento de malha ao longo da seção transversal.	107
Figura B.14 – Determinação do comprimento longitudinal dos elementos finitos.	107
Figura B.15 – Criação do 'Job' para execução da simulação.	108
Figura B.16 – Criação da seleção de nós para exportar resultados.	108
Figura B.17 – Criação dos dados para exportar resultados.	109
Figura B.18 – Exportação dos resultados para arquivo de saída.	109
Figura C.1 – Modelagem utilizando elementos finitos de viga tubular.	110
Figura C.2 – Criação do material do revestimento.	111
Figura C.3 – Determinação das características elásticas do material.	111
Figura C.4 – Criação da seção transversal a ser atribuída ao modelo.	112
Figura C.5 – Atribuição da seção e material para o modelo.	112
Figura C.6 – Rotação do modelo criado.	113
Figura C.7 – Atribuição da seção ao modelo.	113
Figura C.8 – Criação de um 'Step'.	114
Figura C.9 – Aplicação dos carregamentos.	115
Figura C.10 – Detalhe do efeito da pressão em elementos PIPE.	115
Figura C.11 – Criação das cargas para correção do elemento finito PIPE.	116
Figura C.12 – Criação do carregamento de peso próprio.	117
Figura C.13 – Criação das condições de contorno.	117
Figura C.14 – Criação do caminho para exportar os dados.	118
Figura C.15 – Determinação do refinamento e geração da malha de elementos finitos.	118
Figura C.16 – Determinação do tipo de elemento utilizado.	119
Figura C.17 – Criação do 'Job' para execução da simulação.	119
Figura C.18 – Criação da seleção de nós para exportar resultados.	120
Figura C.19 – Criação dos dados para exportar resultados.	120
Figura C.20 – Exportação dos resultados para arquivo de saída.	121

## Lista de Quadros

Quadro 4.1 – Características geométricas das fases do poço A01H.	40
Quadro 4.2 – Características geométricas do tubular utilizado no segundo cenário.	42
Quadro 4.3 – Cálculo do $F_{end}$ .	45
Quadro 4.4 – Características gerais das fases do poço A01H.	45
Quadro 4.5 – Peso linear dos tubulares de revestimento do primeiro cenário.	46
Quadro 4.6 – Características dos elementos finitos avaliados na modelagem numérica.	49
Quadro 4.7 – Dimensões e carregamentos axiais dos tubulares.	52
Quadro 5.1 – Comparação entre equacionamento analítico e simulação numérica.	59
Quadro 5.2 – Comparação da solução analítica e simulação numérica com área corrigida.	60
Quadro 5.3 – Carregamento de pressão devido ao efeito pistão.	75
Quadro 5.4 – Resistência ao colapso pelo modelo de <i>Klever-Tamano</i> .	79
Quadro 6.1 – Observações sobre elementos finitos.	86

## Lista de Símbolos

- $\sigma_{rup}$ : Tensão de ruptura do material;
- $FS$ : Fator de Segurança;
- $F_a$ : Força axial;
- $A_s$ : Área da seção transversal;
- $\sigma_{adm}$ : Tensão Admissível;
- $f_{ym}$ : Limite de escoamento;
- $\sigma_r$ : Tensão radial;
- $\sigma_z$ : Tensão axial;
- $\sigma_\theta$ : Tensão circunferencial;
- $\sigma_{r\theta}, \sigma_{rz}$  e  $\sigma_{\theta z}$ : Tensões cisalhantes;
- $D$ : Diâmetro externo;
- $t$ : Espessura da parede do tubular;
- $\frac{D}{t}$ : Esbeltez transversal;
- $R_e$ : Raio externo;
- $R_i$ : Raio interno;
- $p_e$ : Pressão externa;
- $p_i$ : Pressão interna;
- $r$ : Coordenada radial no plano da seção transversal;
- $\lambda$ : Índice de esbeltez;
- $L$ : Comprimento efetivo do elemento estudado;
- $D_i$ : Diâmetro interno;
- $P_A$ : Resistência ao esforço axial;
- $P_B$ : Resistência à pressão interna;
- $\left(\frac{D}{t}\right)_{YP}$ : Limite entre colapso por limite de escoamento e colapso plástico;
- $\left(\frac{D}{t}\right)_{PT}$ : Limite entre colapso plástico e colapso na fase de transição;
- $\left(\frac{D}{t}\right)_{TE}$ : Limite entre colapso na fase de transição e colapso elástico;
- $A, B, C, F$  e  $G$ : Constantes para determinação da resistência ao colapso;
- $P_c$ : Resistência ao colapso;
- $P_f$ : Resistência ao colapso por limite de escoamento;
- $P_p$ : Resistência ao colapso plástico;
- $P_t$ : Resistência ao colapso na fase de transição;
- $P_e$ : Resistência ao colapso elástico;
- $P_{KT}$ : Resistência estimada à pressão externa pelo modelo de Klever-Tamano;
- $P_{CEu}$ : Pressão de colapso elástica última;
- $P_{CYu}$ : Pressão de colapso por escoamento última;
- $H_t$ : Fator de redução em função das imperfeições do tubular;
- $k_e$ : Coeficiente de correção da pressão de colapso elástica;

$k_y$ : Coeficiente de correção de pressão de colapso por escoamento;  
 $ov$ : Ovalização medida do tubular;  
 $ec$ : Excentricidade medida do tubular;  
 $rs$ : Tensão residual resultante do processo produtivo do aço;  
 $h_n$ : Fator de forma da curva tensão-deformação do aço;  
 $f_{yc}$ : Limite de escoamento penalizado;  
 $P_{surf}$ : Pressão provenientes de esforços no topo da fase;  
 $\rho$ : Massa específica de um fluido;  
 $p_{eq}$ : Pressão efetiva entre pressão externa e interna;  
 $W_s$ : Peso seco do tubular;  
 $W_L$ : Peso linear do tubular;  
 $\theta$ : Inclinação do tubular em relação à horizontal;  
 $F_{bu}$ : Empuxo resultante da flutuabilidade;  
 $F_{be}$ : Força de dobramento no tubular;  
 $DLS$ : 'Dog Leg Severity', Ângulo de inclinação da direção do poço;  
 $W$ : Peso total do tubular;  
 $\Delta L$ : Variação do comprimento;  
 $\alpha$ : Coeficiente de dilatação térmica;  
 $\Delta T$ : Variação de temperatura;  
 $T_T$ : Tensão axial proveniente do efeito térmico;  
 $E$ : Módulo de elasticidade do material;  
 $\mu$ : Coeficiente de *Poisson*;  
 $\Delta p$ : Perfil de pressões;  
 $T_B$ : Tensão axial proveniente do efeito balão;  
 $T_P$ : Esforço axial proveniente do efeito pistão;  
 $S$ : Somatório dos esforços axiais;  
 $K$ : Rigidez axial do elemento;  
 $K_{sys}$ : Rigidez axial de todas as fases do poço;  
 $u_{WH}$ : Deslocamento no topo do tubular;  
 $F_{end}$ : Carregamento devido ao efeito final da pressão do revestimento e do óleo;  
 $r_{cp}$ : Raio interno da coluna de produção;  
 $P_{cp}$ : Pressão do óleo na coluna de produção;  
 $r_{rp}$ : Raio interno do revestimento de produção;  
 $P_{rp}$ : Pressão do revestimento de produção;  
 $\rho_m$ : Densidade do fluido de perfuração;  
 $L_{cim}$ : Comprimento cimentado da fase;  
 $L_{livre}$ : Comprimento livre da fase;  
 $N$ : Esforço Axial;  
 $\sigma_{ij}$ : Tensor de tensões;  
 $C_{ijkl}$ : Tensor constitutivo do material;  
 $\varepsilon_{kl}$ : Tensor de deformações;

- $p_{corr}$ : Pressão corrigida a ser aplicada no modelo utilizando o elemento *Shell*;
- $A_i$ : Área interna da seção;
- $A_m$ : Área utilizando o diâmetro médio da seção;
- $A_e$ : Área externa da seção;
- $F_{comp}$ : Força para compensar efeito de pressão '*Closed-End*' dos elementos *Pipe*;
- $p_{ex}$ : Pressão interna ou externa atuante na extremidade da fase.

# Sumário

1. Introdução	16
1.1. Motivação	18
1.2. Objetivos	18
1.3. Metodologia geral	19
1.4. Delimitações do trabalho	20
2. Resistência de tubulares de revestimento	21
2.1. Considerações iniciais	21
2.2. Aspectos gerais da mecânica de tubulares	22
2.3. Cálculo das resistências dos tubulares de revestimento	26
2.3.1. Resistência ao esforço axial	27
2.3.2. Resistência à pressão interna	27
2.3.3. Resistência ao colapso	27
2.3.3.1. Equacionamento da API/TR 5C3	27
2.3.3.3. Critério triaxial de von Mises	31
2.3.4. Combinação de tensões axiais e pressões internas e externas	31
3. Esforços atuantes em tubulares de revestimento	32
3.1. Pressão interna	32
3.2. Pressão externa	32
3.3. Pressão efetiva	32
3.4. Tensão axial em tubulares	33
3.4.1. Peso próprio	33
3.4.2. Efeito Térmico	34
3.4.3. Efeito Balão	35
3.4.4. Efeito Pistão	36
3.4.5. Carregamento axial resultante	37
4. Modelagem numérica por elementos finitos	39
4.1. Determinação dos cenários de estudo	39
4.1.1. Cenários de projeto	39
4.1.2. Primeiro cenário de estudo	39
4.1.3. Segundo cenário de estudo	41
4.1.4. Terceiro cenário de estudo	43
4.2. Determinação dos carregamentos	43
4.2.1. Carregamentos associados ao primeiro cenário	43

4.2.2.	Carregamentos associados ao segundo cenário	46
4.2.3.	Carregamentos associados ao terceiro cenário	48
4.3.	Modelagem dos cenários	48
4.3.1.	Tipos de elementos finitos utilizados na modelagem	49
4.3.1.1.	Elemento finito sólido	50
4.3.1.2.	Elemento finito de casca ( <i>Shell</i> )	50
4.3.1.3.	Elemento finito de viga tubular ( <i>pipe</i> )	51
4.3.2.	Geometria do modelo	52
4.3.3.	Condições de contorno	53
4.3.4.	Geração dos modelos numéricos	54
4.4.	Simulação numérica e avaliação da integridade	56
5.	Resultados e Discussões	58
5.1.	Deslocamentos e tensões axiais	58
5.1.1.	Análise preliminar	58
5.1.2.	Efeito Balão	65
5.1.3.	Modelagem com parte da seção transversal	72
5.1.4.	Efeito Pistão	73
5.2.	Verificação da integridade	76
5.2.1.	Equacionamento da API/TR 5C3	76
5.2.1.1.	Cálculo da penalização do limite de escoamento	77
5.2.1.2.	Cálculo da resistência ao colapso	78
5.2.2.	Modelo de resistência de <i>Klever-Tamano</i>	79
5.2.3.	Critério triaxial de <i>von Mises</i>	80
5.2.3.1.	Campos de tensões	80
5.2.3.2.	Verificação da integridade pelo critério triaxial	84
6.	Conclusões e Perspectivas	86
6.1.	Sugestões de trabalhos futuros	87
	Referências	88
	Apêndice A – Modelagem utilizando elementos finitos sólidos: Tutorial do <i>Abaqus</i>	91
	Apêndice B – Modelagem utilizando elementos finitos de casca: Tutorial do <i>Abaqus</i>	100
	Apêndice C – Modelagem utilizando elementos finitos de viga tubulares: Tutorial do <i>Abaqus</i>	110



## 1. Introdução

O projeto de tubulares de revestimento para a indústria de óleo e gás natural, seja formulado por cálculos determinísticos ou probabilísticos, compara as cargas previstas às quais o revestimento pode ser submetido com a resistência estimada do mesmo em cada um dos cenários de carregamento possíveis. A carga e a resistência podem ser, uma delas ou ambas, modificadas por um coeficiente de segurança (API 5C3, [1]).

No projeto de poços de óleo e gás, diversos cenários devem ser avaliados para se verificar a integridade de suas colunas de revestimento. Esses cenários são definidos em documentos normativos internos ou externos às operadoras, e consideram os diversos carregamentos que o revestimento pode experimentar ao longo do ciclo de vida do poço. Segundo a norma NORSOK D-010 [2], em projetos de poços é essencial que seja estudada a integridade do mesmo durante toda sua vida útil. Todas as colunas de revestimento e equipamentos descidos no poço devem resistir às maiores cargas experimentadas, desde o processo de perfuração até o final de sua etapa de produção, onde há o tamponamento do poço para abandoná-lo. Por isso existem diferentes cenários que precisam ser considerados e estudados, para verificar se todos os equipamentos e revestimentos conseguirão resistir aos diversos carregamentos aplicados ao poço ao longo de todo o tempo.

Como exemplo de um cenário analisado em projeto, tem-se a condição de *kick*, o qual ocorre quando a pressão decorrente da formação rochosa ou do reservatório é maior que a pressão no interior do poço, podendo resultar em um influxo do fluido da formação, que pode ser água, óleo ou gás, sendo o de gás o mais perigoso e difícil de se controlar. Uma consequência crítica do *kick* é o *blowout*, quando não se consegue controlar a invasão de fluido e este se encaminha para a superfície ou fundo do mar, representando perigo ambiental e podendo causar grande prejuízo socioeconômico (Galdino, [3]).

Outros cenários experimentados pelos revestimentos são carregamentos provenientes tanto de pressões internas e externas como de carregamentos axiais causados por diversos fatores ao longo do tubular em questão. A pressão interna é resultado da pressão hidrostática exercida pelos fluidos presentes dentro do tubo de revestimento. Já a pressão externa pode ser resultante da formação geológica ou de fluidos externos ao tubular. Por diversas vezes, o revestimento experimenta uma combinação dessas duas pressões, sendo necessário calcular o diferencial de pressão para realizar as verificações de integridade.

Também existe o cenário atuante nos revestimentos associado à tensão axial, o qual é resultante do próprio peso do material utilizado nesses revestimentos e de outros fenômenos que ocorrem ao longo do comprimento da tubulação, por exemplo os efeitos térmico, balão e pistão, sendo estes fenômenos foco de estudo deste trabalho.

Segundo a API/TR 5C3 [1], a resistência ao colapso do revestimento na presença

de uma tensão axial deve sofrer uma penalização, reduzindo o limite de escoamento do material utilizando uma equação que relaciona o valor do limite de escoamento sob condições normais e a tensão axial experimentada naquela seção. Em 2015 foi publicado um termo aditivo que modificou essa relação presente na norma, adicionando também a influência da pressão interna experimentada no mesmo local onde está aplicada a tensão axial em questão.

Por se tratar de um tema relevante na avaliação de integridade de revestimento de poços de petróleo, alguns trabalhos com foco em forças axiais estão disponíveis na literatura. Oliveira [4] cita que a condição inicial da tensão axial é resultado da combinação do peso do revestimento e do efeito de pressões interna e externa aplicado sobre pontos onde há mudança de diâmetro no revestimento ou em válvulas, o chamado efeito pistão. Oliveira [4] também cita que existem outros fatores que geram carregamentos axiais, como o gradiente de temperatura e o efeito balão, sendo este último os deslocamentos axiais em decorrência das pressões atuantes na fase.

Souza *et al* [5] utilizam o estudo do movimento de cabeça de poço para avaliar a influência do gradiente de temperatura na tensão axial, entendendo que existe uma tendência de expansão devido à elevação da temperatura, e que para se manter o equilíbrio estático na cabeça do poço, deve-se utilizar uma força de tração no revestimento. Ainda segundo Souza *et al* [5], existe um carregamento imposto à cabeça do poço devido ao aumento das pressões no revestimento, também sendo esse carregamento uma tensão axial aplicada ao sistema. Os valores de tensão encontrados no estudo citado conseguiram reproduzir bem o comportamento de poços reais avaliados ao longo do trabalho.

Souza [6] avalia três cenários que causam variações de tensões axiais ao longo da vida útil do revestimento de forma analítica. É realizada uma avaliação da condição inicial do poço e utiliza-se as variações de temperatura e pressão dos fluidos presentes no interior e exterior do revestimento para avaliar a influência dos efeitos térmicos, pistão e balão.

O estudo desses cenários exige a realização de simulações numéricas devido à complexidade do problema. Nesse contexto, o método dos elementos finitos (MEF) é amplamente utilizado para realizar estudos em revestimentos de poços, por apresentar resultados precisos e confiáveis. O MEF é utilizado em diversos trabalhos disponíveis na literatura na resolução de diferentes problemas. Silva *et al* [7] modelaram de forma bidimensional parte de uma seção incluindo desgaste para avaliar a mudança na concentração de tensões.

Neves [8] e Silva [9] também modelaram parcialmente uma seção tubular, porém utilizando uma modelagem tridimensional. Ambos realizaram análises de tensões axiais envolvendo estudos de cenários de colapso.

Bai *et al* [10] avaliaram o efeito combinado de tensões axiais, pressão externa e força de dobramento no tubo, comparando os resultados alcançados em testes experimentais realizados em laboratório com modelagens numéricas realizadas em

elementos finitos, utilizando uma modelagem tridimensional de uma seção semi-circular para considerar o tubo. Além de validar a análise com testes reais, também relacionou a influência de cada carregamento em cenários de deformação axial, dobramento lateral e ovalização do tubular.

## 1.1. Motivação

Os trabalhos anteriormente citados abrangem estudos sobre as tensões axiais, seja para determiná-las ou considerá-las. Porém, são escassos os trabalhos que avaliam os efeitos das ações axiais nos campos de tensão atuantes ao longo de todo o revestimento. Em geral, as modelagens apresentadas são realizadas em pequenos trechos do tubular.

A consideração das tensões que atuam ao longo do revestimento é essencial para que as verificações sejam realizadas corretamente, utilizando a combinação entre a tensão axial e as pressões atuantes para identificar seções críticas e avaliar se o revestimento resistirá de maneira satisfatória aos carregamentos a ele aplicados.

Se utilizados critérios arbitrários e, portanto, for determinada uma seção crítica de maneira incorreta, corre-se o risco de um subdimensionamento do revestimento, existindo a possibilidade de ruína de parte da estrutura do poço. Por outro lado, pode-se utilizar fatores de segurança elevados para evitar esse tipo de acontecimento, talvez induzindo um superdimensionamento, onde, apesar de se ter o funcionamento adequado do revestimento, existe também a possibilidade de um aumento considerável no custo final de perfuração do poço.

## 1.2. Objetivos

Com base nos argumentos citados na seção anterior, este trabalho tem o objetivo de avaliar os cenários de tensão axial que possam influenciar na verificação da integridade dos revestimentos de poços. O estudo observa a necessidade de avaliação das fontes de carregamento axial para se encontrar a melhor forma de representação de cada uma delas, aplicando-as na modelagem de uma fase de tubular de revestimento, ao longo de todo o seu comprimento, utilizando o método dos elementos finitos.

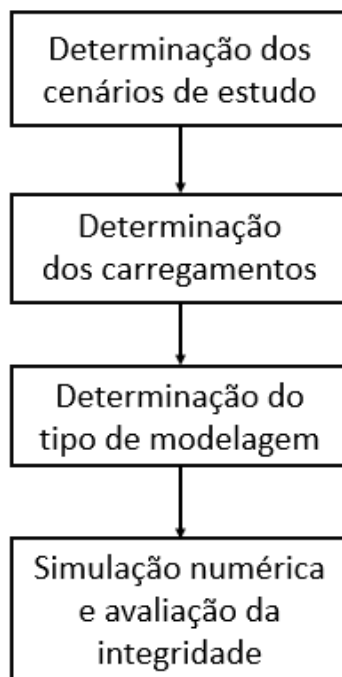
Como objetivo secundário, é determinado qual o melhor tipo de modelagem numérica para realizar a análise estrutural em questão, avaliando tanto a precisão dos resultados quanto o custo computacional necessário para cada modelo e a complexidade de modelagem dos cenários estudados. O estudo engloba diferentes tipos de elementos finitos a serem utilizados nas modelagens para definir qual o mais aplicável para a análise do problema em questão.

O foco principal do trabalho é integrar os esforços axiais e os carregamentos de pressão que atuam sobre todo o comprimento do revestimento, não apenas em um trecho específico, sendo possível avaliar o comportamento das tensões axiais devido a todos os efeitos analisados e identificar possíveis seções críticas que possam comprometer a integridade do poço.

### 1.3. Metodologia geral

Para alcançar os objetivos propostos no trabalho, a metodologia de desenvolvimento é dividida em quatro macroetapas, conforme ilustrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Metodologia geral adotada.



Fonte: Autor.

A primeira etapa refere-se ao estudo e à determinação dos cenários que os tubulares de revestimento devem ser submetidos. Esse estudo é importante pois o revestimento deve ser dimensionado para resistir a todos os carregamentos que está suscetível a receber, o que gera cenários com diferentes condições e que demandam diversas verificações para garantir a integridade do revestimento nas fases de perfuração, completação, produção e abandono do poço.

A segunda etapa relaciona-se à determinação dos carregamentos em cada cenário avaliado, onde são estudados os efeitos e fenômenos que produzem forças que atuam sobre o revestimento. Nessa etapa são identificados e quantificados os carregamentos que influenciam nos cálculos de verificação de integridade do poço.

A terceira etapa refere-se ao estudo e à identificação da modelagem numérica mais adequada para a reprodução dos cenários considerando os tubulares de revestimento modelados integralmente e as diversas possibilidades de carregamentos combinados que atuam nesses tubulares. Essa modelagem é apoiada no método dos elementos finitos, sendo utilizado o software *Abaqus*, o qual é amplamente utilizado pela literatura, pois é uma ferramenta computacional que possui inúmeras funcionalidades de interesse e produz resultados precisos e confiáveis.

A quarta e última etapa se refere à realização de análises numéricas contemplando diversos cenários considerados e avaliação das situações críticas que podem produzir falha na integridade do revestimento. Os resultados de interesse são os campos de tensões atuantes no revestimento, nas direções circunferencial e axial, os quais permitem a identificação de uma seção crítica em que a atuação conjunta de pressão e tensão axial pode representar falha na integridade.

#### 1.4. Delimitações do trabalho

Uma vez que são escassas as aplicações das análises ao longo de todo o comprimento do tubular, é necessária a validação dos modelos utilizados nas simulações numéricas. No entanto, os procedimentos realizados se limitaram a análises elásticas e lineares, além de considerar que o tubular tem conexões perfeitas e não existem imperfeições ou desgaste em suas paredes. Essas considerações são adotadas para facilitar a validação dos modelos utilizados.

Os cenários avaliados neste trabalho contemplam poços verticais, porém, as equações apresentadas podem ser utilizadas para avaliar poços direcionais.

Projetos de poços de óleo e gás envolvem estudos de diversos cenários para dimensionamento dos revestimentos. Este trabalho limita-se a avaliar cenários específicos de revestimentos individualmente, sem ter o objetivo de realizar o dimensionamento dos tubulares.

Os esforços axiais podem ser originados por diversos efeitos. Este trabalho contemplará os efeitos térmico, balão e pistão. Outros efeitos como cargas de impacto, efeito de arraste durante a descida das colunas e esforços provenientes da pressão de injeção de fluidos não serão contemplados para o estudo. A determinação dos carregamentos utiliza equações disponíveis na literatura, sem que sejam elaborados novos equacionamentos. Da mesma forma, os cálculos de resistência dos tubulares são realizados utilizando as equações disponíveis em normativas conhecidas.

Este trabalho estuda a melhor forma de se aplicar os carregamentos existentes em uma modelagem numérica via software *Abaqus*, o qual utiliza o método dos elementos finitos. Além disso, são realizadas avaliações das diferentes possibilidades de modelagens que podem ser realizadas e da qualidade de seus resultados. Não faz parte da metodologia deste trabalho desenvolver novas formulações, e sim utilizar procedimentos já existentes para simulação numérica via *Abaqus*.

## 2. Resistência de tubulares de revestimento

Este capítulo detalha a fase de dimensionamento de tubulares de revestimento para poços de petróleo, abordando desde os aspectos mais gerais das verificações a serem realizadas em peças submetidas aos mais diversos esforços, bem como as equações mais específicas para a verificação de integridade de revestimentos de poços preconizadas pelas normas.

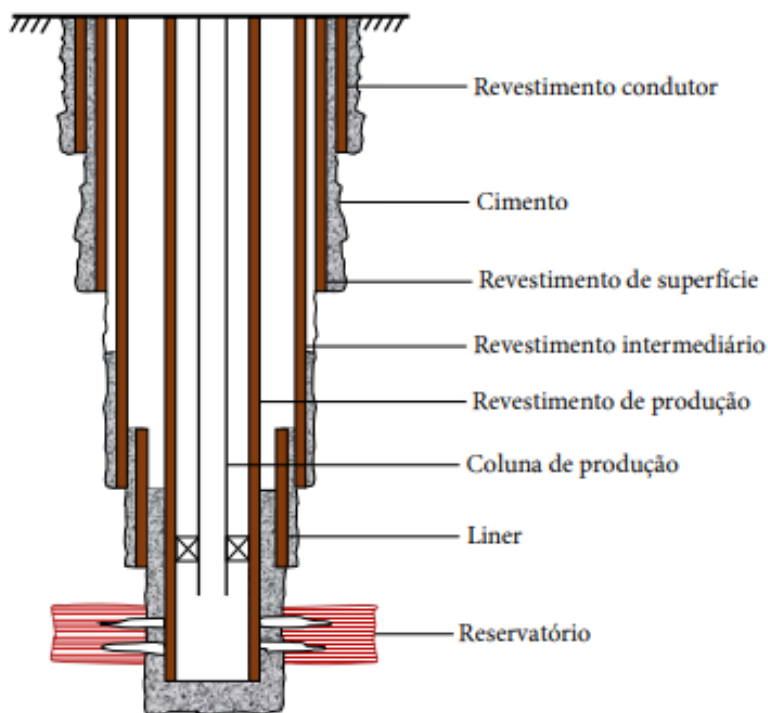
### 2.1. Considerações iniciais

Segundo Abreu [11], as colunas de revestimento têm o objetivo de resistir aos esforços existentes e conduzir fluidos pelo anular do poço. Como descrito por Souza *et al* [5], o revestimento possui um formato telescópico.

Thomas *et al* [12] indicam que o poço deve ser perfurado em fases, sendo a quantidade de fases definida a partir das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade do poço. Em geral, o poço tem três ou quatro fases, porém, em alguns casos, pode chegar até a oito fases. Conforme classificado por Lake (2006 *apud* Abreu [11]) e Byrom (2015 *apud* Abreu [11]), existem seis tipos de fases, tendo eles as funções a seguir, e sendo o poço apresentado de forma esquematizada na Figura 2.1.

- Condutor: É a primeira coluna de revestimento do poço. Sua principal função é isolar formações não consolidadas, formações de gás e aquíferos, todos próximos ao solo marinho, assim como ser a base para a cabeça do poço e sustentação das colunas seguintes;
- Superfície: Logo após o Condutor, assenta-se o revestimento de superfície. Ele tem o objetivo de proteger o poço contra *Blowouts*, prevenir perdas de circulação e isolar aquíferos;
- Intermediário: Utilizado para isolar seções instáveis do poço, em geral, são zonas com pressões anormais abaixo do revestimento de superfície. A depender da geologia no local do poço, sua utilização pode ser dispensável;
- Produção: Revestimento utilizado para isolar zonas que produzam hidrocarbonetos;
- *Liner*: Esse tipo de revestimento não é fixado na cabeça do poço, mas assentado na sapata do revestimento anterior. Apresenta a vantagem de não ter o comprimento total do poço, portanto economiza-se material, e também é mais leve, por ter menor diâmetro. Em casos específicos, para aumentar a resistência interna, o *Liner* é estendido até a cabeça do poço, essa extensão recebe o nome de *Tieback*.

Figura 2.1 – Esquemática de um poço de produção de petróleo e seus revestimentos.



Fonte: Silva [13].

O material mais utilizado em tubulares de revestimento é o aço, sob a forma de diferentes ligas, com propriedades mecânicas variadas, em relação a tensão de escoamento, resistência à corrosão, dentre outros. Essa classificação, os chamados graus de aço, é essencial para as verificações de cada revestimento, pois determina o quanto de pressão ou tensão aquele revestimento é capaz de suportar. Essas ligas têm suas composições químicas de acordo com os fabricantes, porém, existem graus de aço padronizados pela API Bull 5C2 [14].

A seção transversal é outro fator que determina a resistência do revestimento para os diversos cenários experimentados. Fatores como o diâmetro externo e a espessura da parede do tubo determinam a esbeltez da seção transversal e com isso pode-se calcular as resistências do tubo para cada cenário. Esses valores são pré-estabelecidos e exemplificados na API 5CT [15].

## 2.2. Aspectos gerais da mecânica de tubulares

Sabendo que as estruturas de revestimento são corpos cilíndricos de material bem definido, sendo manufaturado por várias ligas de aço, pode-se utilizar as técnicas de verificação e dimensionamento de peças conhecidas da resistência dos materiais.

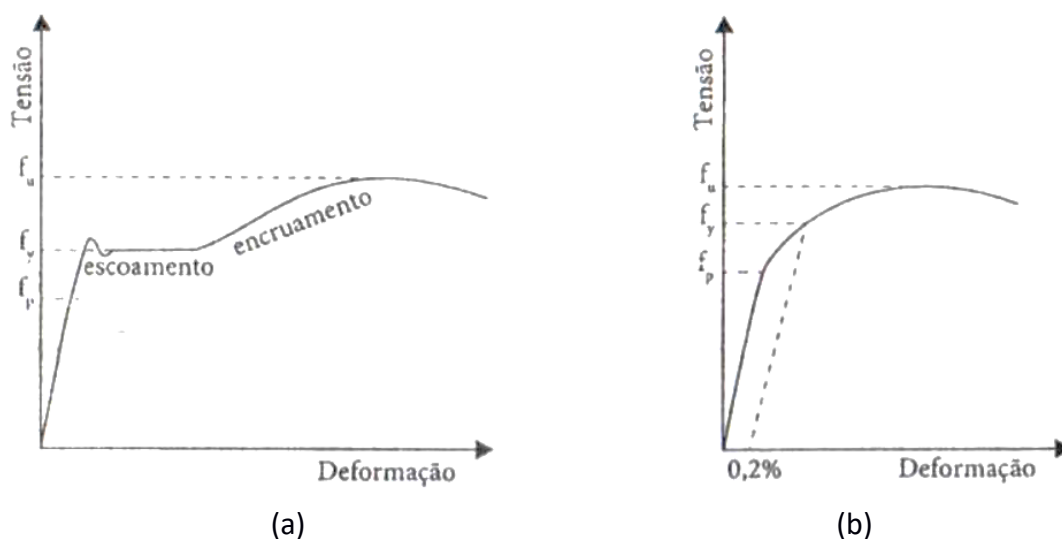
No cálculo de verificação para carregamentos axiais, Hibbeler [16] destaca que é necessário utilizar a tensão atuante na seção, e compará-la com a tensão admissível  $\sigma_{adm}$  do material, tornando o cálculo para esse tipo de verificação bastante simples. O valor da tensão admissível é calculado a partir da tensão de ruptura do material  $\sigma_{rup}$

dividida por um fator de segurança  $FS$ , que depende do tipo de material. O valor da tensão admissível deve ser maior do que tensão axial experimentada  $\sigma_z$ , que é calculada fazendo a divisão entre a força axial  $F_a$  e a área da seção  $A_s$ . Assim,

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{FS} \geq \sigma_z = \frac{F_a}{A_s}. \quad (2.1)$$

Para o aço, que é o material utilizado para fabricação dos tubulares de revestimento, o comportamento ao ser tracionado segue, em geral, o padrão explicitado no gráfico apresentado na Figura 2.2. Observa-se que o aço tem vários limites de resistência, podendo haver diversos tipos de falha desse material, sendo necessário avaliar o cenário ao qual mais se adequa ao carregamento em questão. Para uma avaliação elástica, o valor a ser utilizado como limite de resistência do material é o limite de escoamento  $f_{ym}$ . A partir desse valor, admite-se que o aço passa a ter deformações plásticas.

Figura 2.2 – Gráficos Tensão-Deformação de aço com (a) e sem (b) patamar de escoamento definido.



Fonte: Souza [17].

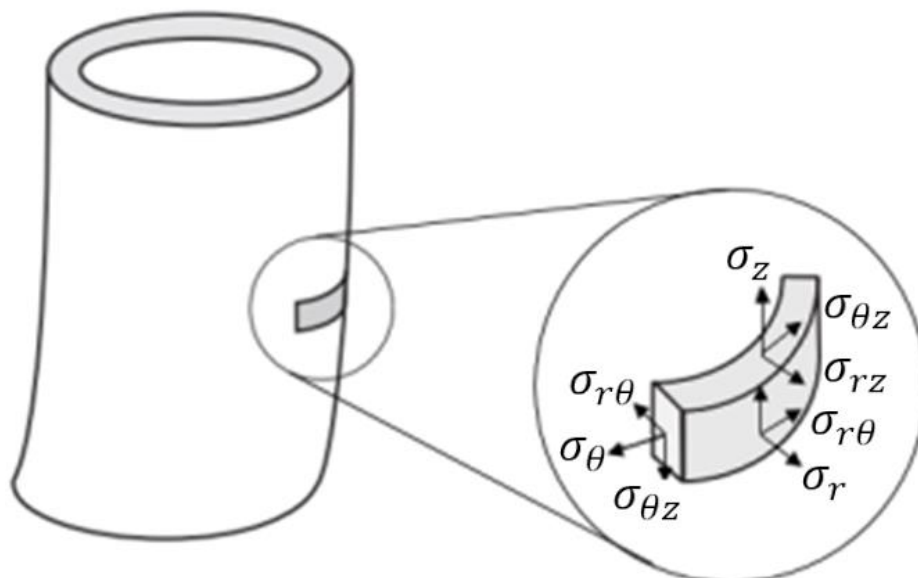
Para os casos de tensões que atuam no plano da seção transversal do elemento estrutural estudado, existem normas como a NBR 8800 [18] que determinam os critérios de cálculo para verificação estrutural. Apesar disso, uma vez que os elementos tubulares são submetidos a cargas radiais de pressão, tanto externa como interna, os carregamentos são de natureza diferente do usual para estruturas metálicas em geral. Assim, devem ser realizadas verificações diferentes das usuais disponíveis em normas como a supracitada.

Segundo Silva [19], elementos tubulares em geral podem estar sujeitos a esforços e deformações devido aos carregamentos aos quais estão submetidos, o que depende do ambiente onde estão instalados e a utilização de cada um deles. Um estado de tensão genérico que o tubular pode experimentar, é ilustrado na Figura 2.3, onde  $\sigma_r$  é a tensão radial,  $\sigma_z$  é a tensão axial (na direção longitudinal), e  $\sigma_\theta$  é a tensão circunferencial,



estando presentes também as componentes de tensão cisalhante,  $\sigma_{r\theta}$ ,  $\sigma_{rz}$  e  $\sigma_{\theta z}$ .

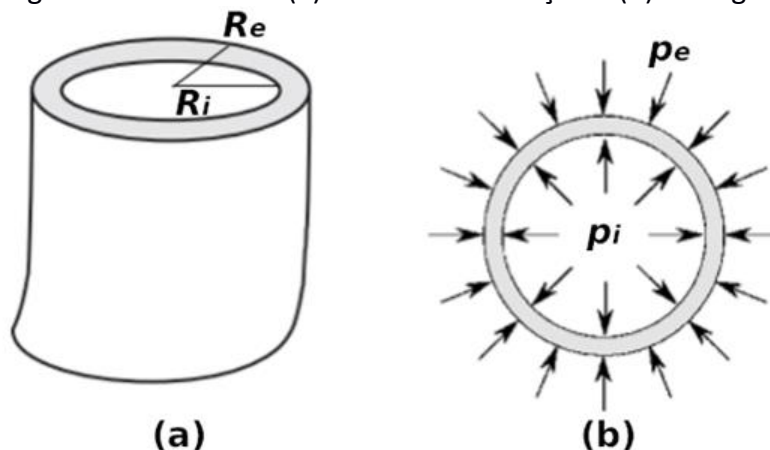
Figura 2.3 – Estado de tensão de um elemento tubular genérico.



Fonte: Silva [19].

Para se realizar o cálculo de cada uma dessas tensões para cenários de carregamentos de pressão interna e externa, deve-se primeiramente delimitar o tipo de tubo que se está avaliando, em relação à sua esbelteza transversal  $\frac{D}{t}$ , onde  $D$  é o diâmetro externo e  $t$  é a espessura da parede do tubular. Groehs [20] delimitou, que para tubos com a relação  $\frac{D}{t} > 10$ , deve ser considerado um tubo de parede fina ou delgada, utilizando as equações de *Barlow* para se determinar as tensões atuantes. Já para o caso oposto, onde  $\frac{D}{t} < 10$ , utilizam-se as equações de *Lamé*, dedicadas a tubos de paredes espessas. Para ambos os casos, consideram-se os aspectos geométricos da seção, sendo eles os raios externo ( $R_e$ ) e interno ( $R_i$ ) e os carregamentos de pressão externa ( $p_e$ ) e interna ( $p_i$ ) apresentados na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Seção genérica de tubular (a) Geometria da seção e (b) Carregamentos de pressão.



Fonte: Adaptado de Silva [19].

Para o caso de tubos de parede espessa, ou seja, para  $\frac{D}{t} < 10$ , as equações de *Lamé* foram desenvolvidas para realizar o cálculo das tensões atuantes no tubular em função dos raios externo e interno, e das pressões externa e interna, além de as tensões  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  também dependerem de uma coordenada de raio  $r$  ao longo da parede do tubo. As equações são definidas a seguir:

$$\sigma_r(r) = -\frac{p_e * R_e^2 - p_i * R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + \frac{(p_e - p_i) * R_e^2 * R_i^2}{r^2 * (R_e^2 - R_i^2)}, \quad (2.2)$$

$$\sigma_\theta(r) = -\frac{p_e * R_e^2 - p_i * R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} - \frac{(p_e - p_i) * R_e^2 * R_i^2}{r^2 * (R_e^2 - R_i^2)}, \quad (2.3)$$

$$\sigma_z = 2\mu \frac{p_e * R_e^2 - p_i * R_i^2}{R_e^2 - R_i^2} + E * \varepsilon_z. \quad (2.4)$$

Para o caso de tubulares de parede delgada, Groehs [20] definiu que devem ser utilizadas as equações de *Barlow*, e a partir do equilíbrio de forças, Silva [19] definiu as tensões representadas pelas equações a seguir:

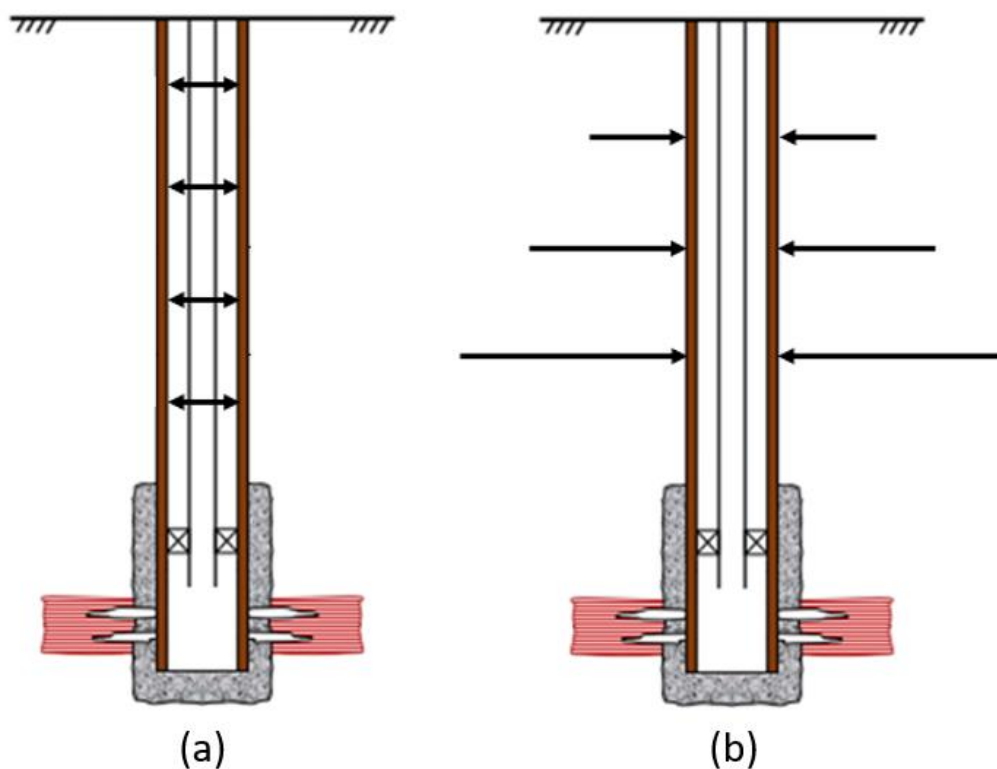
$$\sigma_r = 0, \quad (2.5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(p_e - p_i) * R_e}{2t}, \quad (2.6)$$

$$\sigma_z = \frac{(p_e - p_i) * R_e}{4t}. \quad (2.7)$$

Para verificar a integridade dos tubulares submetidos a essas pressões externa e interna, é necessária a utilização de métodos específicos que permitam essa checagem. Desse modo, a API/TR 5C3 [1] apresenta equações de cálculo de resistência, onde pode-se determinar qual o carregamento máximo que o revestimento pode ser submetido em cada cenário sem perder a sua integridade. Esses cenários são de colapso, onde a pressão externa é maior que a interna, e de pressão interna (ou *burst*) onde a pressão interna se sobressai em relação à externa. A Figura 2.5 esquematiza os dois casos, ilustrando para cada um deles um tubular seccionado sob efeito de pressões.

Figura 2.5 – Esquematisação de possíveis cenários de pressão interna (a) e colapso (b).



Fonte: Adaptado de Silva [13].

No caso de elementos submetidos a carregamentos transversais e axiais, geralmente de compressão, a NBR 8800 [18] utiliza a relação da esbeltez do elemento analisado para delimitar sua resistência. O cálculo da esbeltez  $\lambda$ , para estruturas convencionais, é realizado utilizando a equação:

$$\lambda = \frac{L}{r}, \quad (2.8)$$

onde  $L$  é o comprimento efetivo do elemento estudado e  $r$  é o raio de giração do mesmo.

Para o cálculo de tubulares de revestimento, a relação de esbeltez  $\lambda$  é substituída pela esbeltez transversal  $\frac{D}{t}$ . As equações para cálculo das resistências do tubular desenvolvidas pela API/TR 5C3 [1] são baseadas na relação  $\frac{D}{t}$  da seção, nos diâmetros externo e interno,  $D$  e  $D_i$  respectivamente, e no limite de escoamento do material  $f_{ym}$ . As equações são detalhadas na seção a seguir.

### 2.3. Cálculo das resistências dos tubulares de revestimento

Conhecendo os aspectos gerais de materiais metálicos e de tubulares, deve-se determinar as resistências as quais o revestimento deve suportar, afim de verificar se este resistirá aos carregamentos impostos.

De acordo com a geometria da seção transversal do tubo e do tipo de liga metálica utilizada, a API/TR 5C3 [1] apresentou as equações de cálculo das resistências do revestimento para cada cenário experimentado pelo mesmo. Os métodos de cálculo das resistências do revestimento são listados nas subseções a seguir.

### 2.3.1. Resistência ao esforço axial

Para o cálculo da resistência à tensão axial, Hibbeler [16] detalha uma equação genérica, conforme especificado na Seção 2.2. Uma vez conhecida a seção transversal utilizada, assim como a liga de aço adotada, calcula-se a resistência ao esforço axial  $P_A$  substituindo os valores da equação da tensão admissível pelos valores específicos de área da seção transversal  $A_S$  e limite de escoamento do material  $f_{ym}$ . A adoção deste último como parâmetro de resistência, restringe a atuação do elemento ao regime elástico. Assim,

$$P_A = f_{ym} * A_S = f_{ym} * \frac{\pi}{4} (D^2 - D_i^2). \quad (2.9)$$

### 2.3.2. Resistência à pressão interna

Quando existe um cenário em que a pressão interna é superior à pressão externa, como o caso exemplificado na Figura 2.5 (a), a equação utilizada para se calcular a resistência do revestimento é

$$P_B = 0,875 * \left( \frac{2f_{ym}t}{D} \right). \quad (2.10)$$

Essa equação é baseada na fórmula de Barlow para tubos de parede fina, modificada pelo fator 0,875, que indica uma penalização de 12,5% no valor da espessura do tubular, uma tolerância especificada pela API para contemplar incertezas no processo de manufatura.

### 2.3.3. Resistência ao colapso

A API/TR 5C3 [1] apresenta as equações utilizadas para calcular a resistência de tubulares em cenários de pressão externa. Apesar de ser possível realizar o cálculo a partir das equações explicitadas na norma, a utilização do equacionamento de *Klever-Tamano* já é uma realidade em projetos de poços. As subseções a seguir apresentam as duas formas de cálculo de resistência ao colapso.

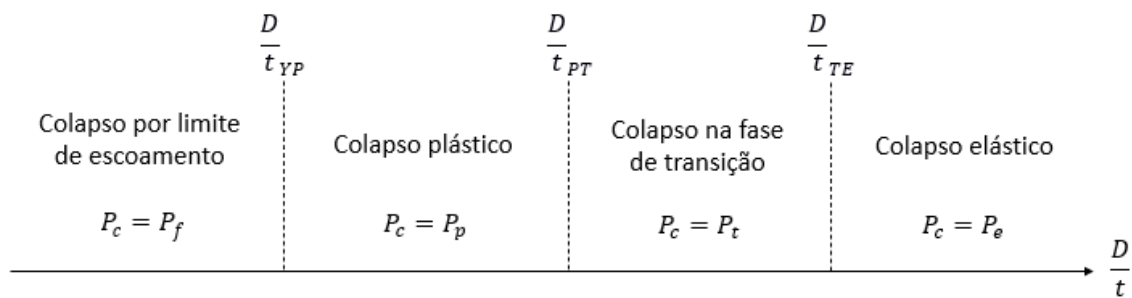
#### 2.3.3.1. Equacionamento da API/TR 5C3

Como citado na Seção 2.2, a esbeltez influencia na determinação da resistência ao colapso. A seguir, são listadas as equações para se encontrar os limites da relação  $\frac{D}{t}$

onde, a partir deles, determina-se qual a equação deve ser utilizada para se encontrar a estimativa da resistência ao colapso da seção transversal em questão.

Primeiramente, o cálculo da resistência do tubular em cenários de colapso requer a identificação do intervalo em que se encontra a relação  $\frac{D}{t}$ . Esses intervalos determinarão o tipo de falha que ocorrerá na seção e a equação a ser utilizada para se calcular a resistência ao colapso do tubular. Os intervalos são apresentados na Figura 2.6, assim como seus limites  $\left(\frac{D}{t}\right)_{YP}$ ,  $\left(\frac{D}{t}\right)_{PT}$  e  $\left(\frac{D}{t}\right)_{TE}$ , e os valores da resistência de colapso para cada intervalo.

Figura 2.6 – Determinação do tipo de falha por colapso a partir da esbeltez.



Fonte: Autor.

Para se identificar em qual intervalo a esbeltez da seção se encontra, a normativa ISO 10400 [21] especifica, utilizando as Equações 2.11 a 2.13, o cálculo dos limites de cada intervalo:

$$\left(\frac{D}{t}\right)_{YP} = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8\left(B + \frac{C}{f_{ym}}\right) + (A-2)}}{2\left(B + \frac{C}{f_{ym}}\right)}, \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{D}{t}\right)_{PT} = \frac{f_{ym}(A-F)}{C + f_{ym}(B-G)}, \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{D}{t}\right)_{TE} = \frac{2 + \frac{B}{A}}{3\left(\frac{B}{A}\right)}. \quad (2.13)$$

Para se calcular os limites supracitados, são utilizadas as constantes A, B, C, F e G, que também são necessárias para calcular o valor de resistência ao colapso da seção. A seguir, são detalhadas como calcular o valor de cada uma dessas constantes, conforme as Equações 2.14 a 2.18.

$$A = 2,8762 + 0,10679 * 10^{-5} f_{ym} + 0,21301 * 10^{-10} f_{ym}^2 - 0,53132 * 10^{-16} f_{ym}^3, \quad (2.14)$$

$$B = 0,026233 + 0,50609 * 10^{-6} f_{ym} , \quad (2.15)$$

$$C = -465,93 + 0,030867 f_{ym} - 0,10483 * 10^{-7} f_{ym}^2 + 0,36989 * 10^{-13} f_{ym}^3 , \quad (2.16)$$

$$F = \frac{46,95 * 10^6 \left( \frac{3 \left( \frac{B}{A} \right)}{2 + \left( \frac{B}{A} \right)} \right)^3}{f_{ym} \left( \frac{3 \left( \frac{B}{A} \right)}{2 + \left( \frac{B}{A} \right)} - \left( \frac{B}{A} \right) \right) \left( 1 - \frac{3 \left( \frac{B}{A} \right)}{2 + \left( \frac{B}{A} \right)} \right)^2} , \quad (2.17)$$

$$G = F \left( \frac{B}{A} \right). \quad (2.18)$$

Com os limites de esbeltez devidamente calculados, utiliza-se a relação  $\frac{D}{t}$  da seção para identificar o tipo de falha por colapso que o tubular está suscetível, relacionando a esbeltez da seção e os limites calculados pelas Equações 2.19 a 2.21, como ilustra a Figura 2.6.

As seções mais robustas falham pelo limite de elasticidade, quando a esbeltez é menor que o limite inferior, ou seja,  $\frac{D}{t} < \left( \frac{D}{t} \right)_{YP}$ . Desse modo, calcula-se a resistência ao colapso por:

$$P_c = P_f = 2f_{ym} \left[ \frac{\left( \frac{D}{t} \right) - 1}{\left( \frac{D}{t} \right)^2} \right]. \quad (2.19)$$

Ao se identificar que a esbeltez da seção se encaixa entre  $\left( \frac{D}{t} \right)_{YP}$  e  $\left( \frac{D}{t} \right)_{PT}$ , o colapso ocorre na fase plástica, portanto utiliza-se a equação:

$$P_c = P_p = f_{ym} \left[ \frac{A}{\left( \frac{D}{t} \right)} - B \right] - C. \quad (2.20)$$

A norma API/TR 5C3 [1] ainda estabelece um intervalo de transição para a esbeltez da seção, entre  $\left( \frac{D}{t} \right)_{PT}$  e  $\left( \frac{D}{t} \right)_{TE}$ , sendo ele um intervalo entre o colapso plástico e o elástico, definindo uma nova equação de resistência nessa fase, calculada utilizando a equação:

$$P_c = P_t = f_{ym} \left[ \frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right]. \quad (2.21)$$

O último intervalo estabelecido engloba as seções mais esbeltas, com esbelteza acima de  $\left(\frac{D}{t}\right)_{TE}$ , onde se caracteriza o colapso elástico. Portanto, para  $\frac{D}{t} > \left(\frac{D}{t}\right)_{TE}$ , utiliza-se a equação:

$$P_c = P_e = \frac{46,95 * 10^6}{\left(\frac{D}{t}\right) \left[\left(\frac{D}{t}\right) - 1\right]^2}. \quad (2.22)$$

### 2.3.3.2. Modelo de pressão externa de Klever-Tamano

O modelo de *Klever-Tamano* apresenta bons resultados para estimar os valores de resistências de tubulares de revestimento, e já é utilizado em projetos de poços de óleo e gás. A equação apresentada pelo modelo é:

$$P_c = P_{KT} = \frac{(P_{CEu} + P_{CYu}) \sqrt{(P_{CEu} - P_{CYu})^2 + 4P_{CEu}P_{CYu}H_t}}{2(1 - H_t)}, \quad (2.23)$$

onde  $P_{KT}$  é a resistência estimada à pressão externa pelo modelo de Klever-Tamano,  $P_{CEu}$  é a pressão de colapso elástica última,  $P_{CYu}$  é a pressão de colapso por escoamento última e  $H_t$  é um fator de redução que leva em conta as imperfeições do tubular, dadas respectivamente por:

$$P_{CEu} = k_e \frac{2E}{1 - \mu^2} * \frac{1}{\frac{D}{t} * \left(\frac{D}{t} - 1\right)^2}, \quad (2.24)$$

$$P_{CYu} = k_y 2f_{ym} \frac{t}{D} * \left(1 + \frac{t}{2D}\right), \quad (2.25)$$

$$H_t = 0,127 ov + 0,0039 ec - 0,44 \left(\frac{rs}{f_{ym}}\right) + h_n, \quad (2.26)$$

em que  $k_e$  e  $k_y$  são coeficientes calibrados empiricamente, e sugeridos pela API/TR 5C3 [1] como  $k_e = 1,089$  e  $k_y = 0,9911$ ,  $ov$  é a ovalização,  $ec$  é a excentricidade,  $rs$  é a tensão residual do processo produtivo do aço do revestimento e  $h_n$  é um fator de forma para a curva tensão-deformação do aço, estabelecido como  $h_n = 0,017$  para produtos CRS (*cold rotary straightened*) e  $h_n = 0$  para produtos HRS (*hot rotary straightened*). A API recomenda o uso da metodologia dos quatro regimes de colapso, detalhadas na subseção anterior, mas apresenta as equações do modelo de Klever-Tamano em seu texto, utilizando fatores de segurança baseados em análises de confiabilidade.

### 2.3.3.3. Critério triaxial de von Mises

Silva [13] afirma que considerar individualmente os carregamentos em um tubular de revestimento não condiz com a realidade. Os esforços atuantes nos tubulares agem simultaneamente, sendo de esforços axiais e pressões internas e externas. A combinação desses carregamentos tende a intensificar seus efeitos.

A teoria de von Mises relaciona as tensões apresentadas na Figura 2.3 e detalhadas nas equações de Lamé, apresentadas nas Equações 2.2 a 2.4. A relação entre as tensões triaxiais e a tensão de escoamento do material, ainda se encontrando no regime elástico, é determinada pela equação:

$$f_{ym}^2 > \sigma_r^2 + \sigma_z^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r\sigma_z - \sigma_z\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_r. \quad (2.27)$$

### 2.3.4. Combinação de tensões axiais e pressões internas e externas

Os tubulares de revestimento sofrem ações simultaneamente de tensões axiais e pressões externas e internas, portanto, deve-se haver uma análise conjunta dessas ações, e não apenas uma avaliação individual sobre cada efeito. De acordo com a API/TR 5C3 [1], quando existe uma combinação entre uma tensão axial e pressão interna sobre o revestimento, o limite de escoamento do tubular sofre uma penalização, sendo importante observar como se comportam esses carregamentos atuando simultaneamente.

A Equação 2.28, estabelecida pela API/TR 5C3 [1], quantifica o valor do limite de escoamento equivalente  $f_{yc}$  do material, sofrendo a penalização a partir de seu valor original de limite de escoamento  $f_{ym}$ , tensão axial atuante  $\sigma_a$  e pressão interna  $p_i$ . A Equação 2.28 é válida para  $\sigma_a + p_i > 0$ , caso contrário, o valor do limite de escoamento segue inalterado. Assim,

$$f_{yc} = \left\{ \sqrt{1 - 0,75 \left( \frac{\sigma_a + p_i}{f_{ym}} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_a + p_i}{f_{ym}} \right\} f_{ym}. \quad (2.28)$$

Por consequência da penalização do limite de escoamento, a resistência do tubular diminuirá. Desse modo, é importante considerar esse equacionamento para corrigir as resistências do tubular para os cenários de pressão interna e colapso. O Capítulo 3 deste trabalho detalha o cálculo das tensões axiais e pressões atuantes nos tubulares.



### 3. Esforços atuantes em tubulares de revestimento

Este capítulo tem o intuito de apresentar as equações para cálculo dos esforços atuantes nos revestimentos. As subseções 3.1 a 3.3 tratam dos esforços de pressão, e são detalhados pela REPSOL [22]. A subseção 3.4 detalha as tensões axiais que atuam sobre o revestimento e equaciona cada uma delas.

#### 3.1. Pressão interna

As cargas de pressão interna são calculadas a partir da quantidade de fluido que existe no interior do tubular, assim como da densidade do mesmo, existindo diversos cenários onde o tubular pode estar totalmente preenchido por um único fluido, preenchido por fluidos de densidades diferentes (lama de perfuração e cimento, por exemplo), parcialmente preenchido por um fluido ou completamente vazio. Para se calcular a pressão na altura desejada utiliza-se a equação:

$$p_i = P_{surf} + \sum \rho_j * L_j, \quad (3.1)$$

onde  $p_i$  é a pressão interna,  $P_{surf}$  é uma pressão originada na superfície que varia de acordo com o cenário avaliado,  $\rho_j$  é a densidade de cada fluido que preenche o tubular internamente e  $L_j$  é a altura da coluna de cada fluido.

#### 3.2. Pressão externa

O valor de pressão externa é calculado de forma semelhante à carga de pressão interna, estando associada à presença de fluidos nos anulares, que compreendem o volume externo ao revestimento, delimitado pela formação ou por uma coluna de revestimento de fase anterior. De forma análoga, tem-se  $p_e$  como a pressão externa,  $\rho_k$  é a densidade de cada fluido externo ao revestimento e  $L_k$  é a altura da coluna de cada fluido, dessa maneira utiliza-se a equação

$$p_e = \sum \rho_k * L_k. \quad (3.2)$$

#### 3.3. Pressão efetiva

Quando o revestimento suporta carregamentos combinados de pressão interna e externa, pode-se utilizá-las simultaneamente ou calcular a pressão equivalente  $p_{eq}$  no mesmo, que é dada pela equação

$$p_{eq} = p_e - \left( 1 - \frac{2}{\left(\frac{D}{t}\right)} \right) p_i. \quad (3.3)$$

Caso o resultado encontrado na Equação 3.3 seja positivo, o cenário estudado é um cenário de pressão externa. Se o resultado obtido for negativo, a seção está experimentando um cenário de pressão interna.

### 3.4. Tensão axial em tubulares

Além de receber os carregamentos hidrostáticos, em função das pressões internas e externas, existem carregamentos axiais atuando nos tubulares. Esses carregamentos são provenientes de diversas condições, conforme detalhamento apresentado nesta seção.

Os principais efeitos a serem estudados e equacionados para se avaliar a influência da tensão axial são o peso próprio, e efeitos provenientes da ação da temperatura, do efeito balão e do efeito pistão. Existem outros efeitos que geram carregamentos axiais, como efeito de arraste, cargas de impacto durante a descida das colunas de revestimento e esforços a partir da pressão de injeção de fluidos na fase de perfuração. Porém, esses efeitos não serão contemplados para o equacionamento numérico adotado neste trabalho.

#### 3.4.1. Peso próprio

O peso próprio é o carregamento mais conhecido e natural a ser considerado, pois atua em todas as estruturas. Para se considerar o peso dos tubulares de revestimentos, se utiliza o peso linear já especificado pelos fabricantes. Considera-se também que o tubo por diversas vezes está imerso em fluido, portanto aplica-se o efeito de flutuabilidade, o que diminui o peso do revestimento em função da densidade dos fluidos em que está inserido.

Outro efeito que influencia no cálculo do peso próprio é a força de dobramento, que é calculada a partir da inclinação do revestimento. Ainda que em trechos verticais do poço, adota-se, uma inclinação mínima para cálculo da força de dobramento.

As Equações 3.4 a 3.7 detalham o cálculo do peso próprio  $W$ , a partir da soma das parcelas de peso total do tubular  $W_s$ , o efeito da flutuabilidade  $F_{bu}$  e a força de dobramento  $F_{be}$ . Para se calcular as parcelas supracitadas, utiliza-se o peso linear da seção  $W_L$ , a inclinação do tubular em relação à horizontal  $\theta$ , o comprimento total da fase em questão  $L$ , a densidade de fluido a qual o tubular está imerso  $\rho_m$ , o diâmetro externo  $D$ , a área da seção transversal  $A_S$  e a variação de inclinação do tubular  $DLS$ , lembrando que, ainda que o tubular esteja totalmente na vertical, utiliza-se uma variação de inclinação mínima de  $2^\circ$ , para se prevenir que tortuosidades no momento de perfuração do poço venham a resultar em esforços indesejados e dessa forma causar perigo à integridade do revestimento. Assim,

$$W_s = L * W_L * \sin \theta , \quad (3.4)$$

$$F_{bu} = \rho_m * L * A_s , \quad (3.5)$$

$$F_{be} = DLS * D * W_L , \quad (3.6)$$

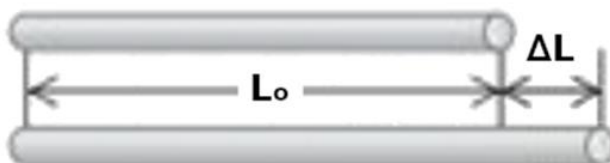
$$W = W_s - F_{bu} + F_{be} . \quad (3.7)$$

### 3.4.2. Efeito Térmico

A passagem de fluido em tubulares de revestimento, principalmente durante a fase de produção, gera uma diferença de temperatura entre a cabeça e o fundo do poço. Essa diferença gera um gradiente, o qual provoca uma tendência de alongamento do tubular devido ao seu coeficiente de dilatação térmica. Uma vez que o revestimento está ancorado em suas extremidades e, portanto, a sua movimentação está restrita, essa tendência de alongamento se transforma em esforços axiais que atuam ao longo do corpo do tubular.

O efeito de dilatação pode ser considerado como linear, superficial ou volumétrica. No caso em questão, como a tubulação tem um comprimento muito maior do que as demais dimensões, considera-se o caso da dilatação térmica linear. Na Figura 3.1, mostra-se uma esquematização entre um corpo de comprimento inicial  $L_o$ , e que sofre uma dilatação com aumento  $\Delta L$ , até atingir o comprimento final  $L_d$ .

Figura 3.1 - Efeito de dilatação térmica linear.



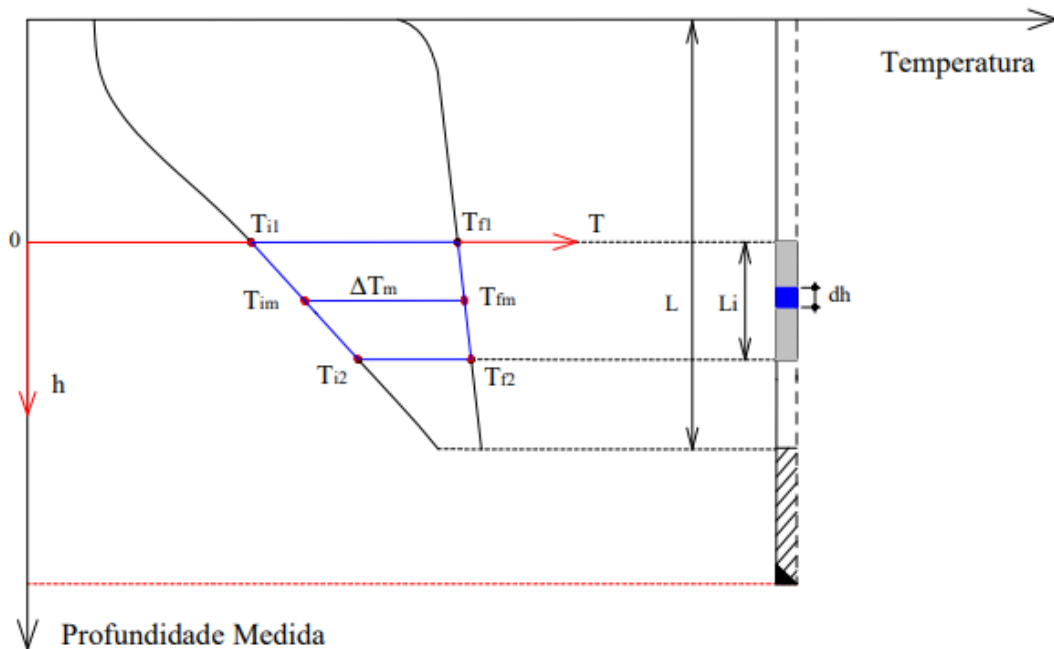
Fonte: Adaptado de Young e Freedman [23].

O cálculo da dilatação segue a relação explicitada na Equação 3.8. O valor de  $\Delta L$  é igual ao produto entre o comprimento inicial  $L_o$ , o coeficiente de dilatação térmica  $\alpha$  e a variação de temperatura  $\Delta T$  experimentada pelo material. Assim,

$$\Delta L_T = L_o \alpha \Delta T . \quad (3.8)$$

A Equação 3.8 considera que a variação de temperatura é constante ao longo de todo o corpo. Porém, em um tubular de revestimento, o valor de  $\Delta T$  varia ao longo de seu comprimento, como ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Perfil de variação de temperatura.



Fonte: Souza [6].

A Figura 3.2 mostra um trecho de um revestimento com um gradiente de variação de temperatura, cujo valor altera de acordo com a profundidade medida. Uma vez que o  $\Delta T$  depende da profundidade  $z$ , a Equação 3.9 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta L_T = \int_L \alpha \Delta T(z) dz . \quad (3.9)$$

Levando em consideração que a variação de temperatura gera deslocamentos em um material, pode-se considerar a rigidez axial  $\frac{EA}{L}$  do revestimento e calcular uma carga axial  $T_T$  equivalente a ser aplicada no revestimento, como descrito na Equação 3.10 dada por:

$$T_T = \frac{EA}{L} * \Delta L_T = \frac{EA}{L} * \int^L \alpha \Delta T(z) dz , \quad (3.10)$$

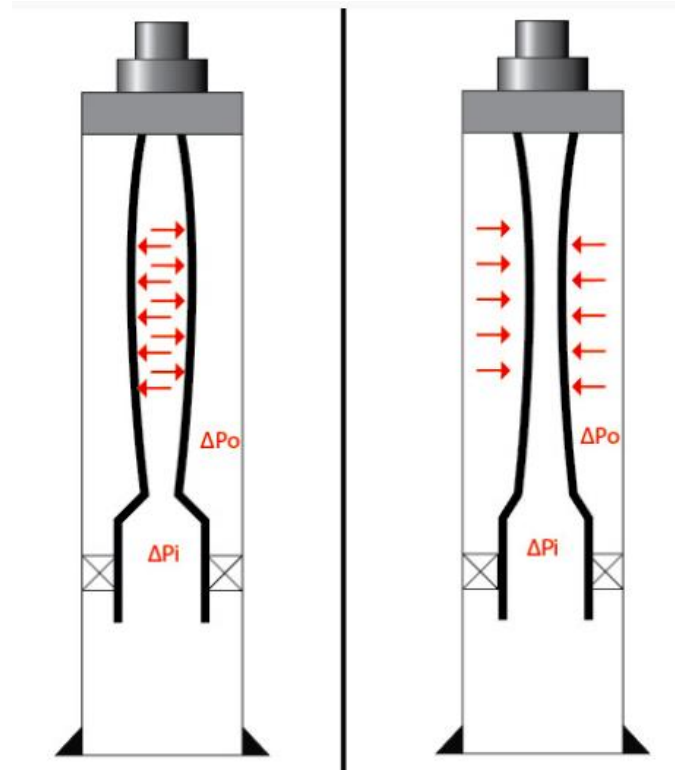
onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $A$  é a seção transversal do tubular e  $L$  é o comprimento total da fase estudada,

### 3.4.3. Efeito Balão

O efeito balão ocorre na estrutura de tubulares de revestimento a partir dos carregamentos hidrostáticos, levando em consideração o coeficiente de *Poisson*  $\mu$  do material. A ser submetida a uma pressão externa superior à pressão interna, a estrutura tende a diminuir sua seção transversal, e por sua vez alongar na direção axial. Caso a pressão interna seja superior à pressão externa, produz-se uma tendência de aumento

da seção transversal, causando um encurtamento no comprimento da estrutura. O fenômeno é ilustrado na Figura 3.3, tanto para casos de pressão interna como externa.

Figura 3.3 - Efeito balão em revestimentos.



Fonte: Jetjongjit e Coleman [24].

Liu *et al* [25] equacionaram o deslocamento axial experimentada pelo tubular devido ao efeito balão utilizando a Equação 3.11 dada por:

$$\Delta L_B = \int^L 2\mu \frac{D^2 \Delta p_e(z) - D_i^2 \Delta p_i(z)}{E(D^2 - D_i^2)} dz. \quad (3.11)$$

Utilizando o deslocamento axial, encontra-se a força axial equivalente  $T_B$  de maneira análoga ao efeito térmico experimentado pelo material, conforme a Equação 3.12 definida por:

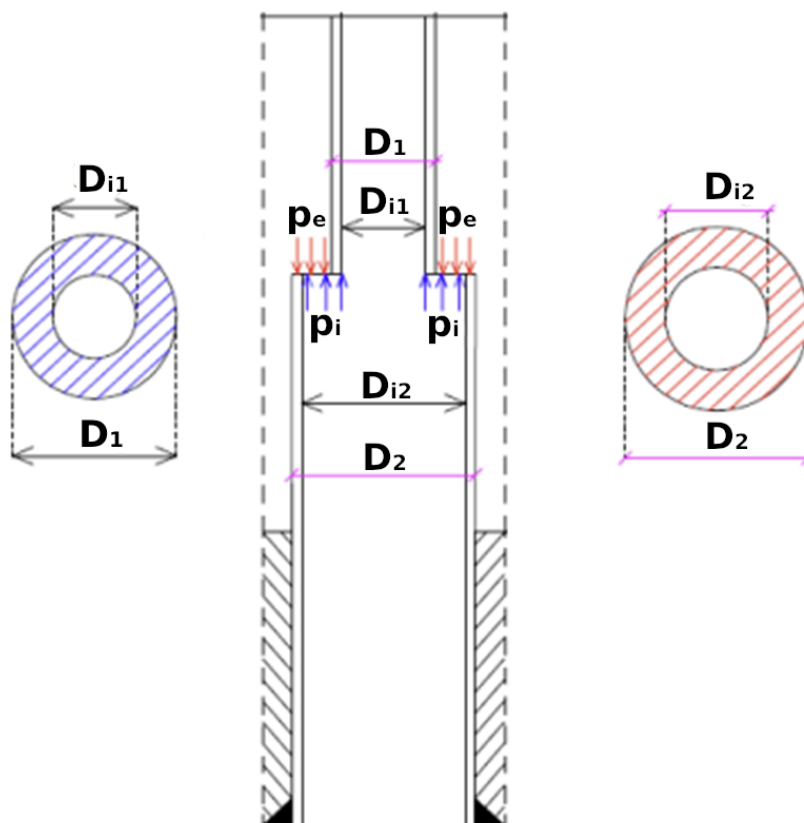
$$T_B = \frac{EA}{L} * \Delta L_B = \frac{EA}{L} * \int^L 2\mu \frac{D^2 \Delta p_e(z) - D_i^2 \Delta p_i(z)}{E(D^2 - D_i^2)} dz. \quad (3.12)$$

#### 3.4.4. Efeito Pistão

O efeito pistão surge devido a mudanças na área da seção transversal ao longo do comprimento dos tubulares de revestimento, onde existe a atuação da pressão interna ou externa aplicada na direção axial, funcionando como uma força pontual. A Figura 3.4 mostra duas diferentes seções em uma mesma fase de revestimento, onde a seção superior apresenta o diâmetro externo  $D_1$  e diâmetro interno  $D_{i1}$ , e a seção

inferior em questão apresenta de forma análoga  $D_2$  e  $D_{i2}$ , respectivamente. Essas diferenças na seção transversal fazem com que as pressões externa e interna atuem na direção axial do tubular.

Figura 3.4 - Efeito pistão em revestimentos.



Fonte: Adaptado de Oliveira [4].

Essa Figura 3.4 demonstra a atuação das pressões interna e externa, aplicadas nas seções do tubular que estão expostas em suas regiões interna e externa respectivamente. O carregamento resultante  $T_p$  desse efeito pode ser equacionado de maneira simples, utilizando a Equação 3.13. Assim,

$$T_p = p_i A_i - p_e A_e = \frac{\pi}{4} [p_i (D_1^2 - D_{i1}^2) - p_e (D_2^2 - D_{i2}^2)]. \quad (3.13)$$

Ressalta-se para a Equação 3.13, que a orientação positiva de  $T_p$  segue o mesmo sentido da pressão interna, portanto, para o caso ilustrado na Figura 3.4, um resultado positivo de  $T_p$  significa que a força equivalente atuante devido ao efeito pistão tem o sentido para cima.

### 3.4.5. Carregamento axial resultante

O cálculo do esforço axial resultante é realizado somando-se todos os efeitos descritos anteriormente e que atuam no tubular de revestimento em estudo. A Equação 3.14 define matematicamente esse cálculo, onde  $S$  é carregamento axial resultante,  $W$

é o peso próprio do tubular,  $T_T$  é o carregamento axial resultante do efeito térmico,  $T_B$  é o carregamento axial resultante do efeito balão e  $T_P$  é o carregamento axial resultante do efeito pistão. Assim,

$$S = W + T_T + T_B + T_P . \quad (3.14)$$

Uma das propostas deste trabalho é entender como as diversas possibilidades de combinação desses carregamentos podem ser aplicadas nas simulações numéricas e como eles afetam o campo de tensões resultante, buscando a melhor combinação que se aproxima da realidade a qual o revestimento está submetido.

## 4. Modelagem numérica por elementos finitos

Este capítulo detalha como é realizada a modelagem numérica utilizando a metodologia indicada na Seção 1.3. As subseções a seguir descrevem cada uma das macroetapas as quais este trabalho é dividido, detalhando o desenvolvimento de cada uma delas.

Os cenários escolhidos para se realizar os estudos deste trabalho são detalhados na subseção 4.1. Para realizar a simulação numérica e obter os resultados, é necessário determinar os carregamentos e criar os modelos numéricos para cada cenário, sendo essas etapas detalhadas nas subseções 4.2 e 4.3 respectivamente.

### 4.1. Determinação dos cenários de estudo

A escolha dos cenários de interesse é realizada a partir da revisão bibliográfica, buscando trabalhos que apresentem poços estudados e detalhem as características de cada uma das fases do poço. Esta subseção destina-se a apresentar cada cenário estudado e suas características.

#### 4.1.1. Cenários de projeto

Os projetos de poços envolvem uma grande quantidade de cenários previstos para os revestimentos suportarem ao longo de toda sua vida útil. A consideração correta dos cenários engloba diversas condições iniciais e específicas, desde a perfuração até o abandono do poço, portanto, submetendo o revestimento a diferentes carregamentos e vinculações, de acordo com o cenário avaliado. Foram idealizados cenários específicos para este trabalho, sendo o objetivo final observar o comportamento das tensões em cenários de esforços axiais, e não realizar o dimensionamento de um revestimento específico.

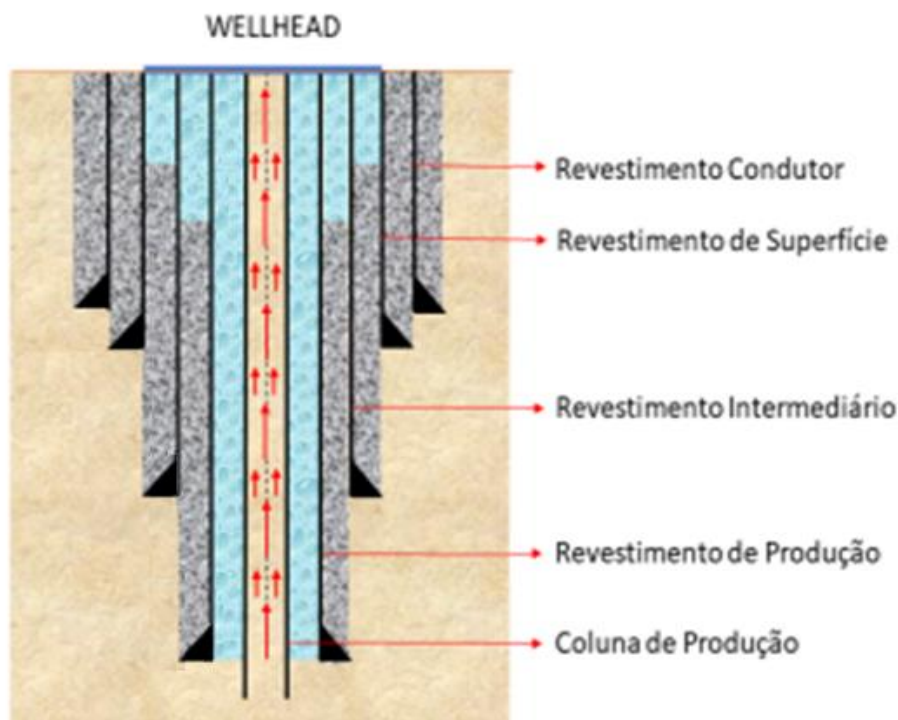
#### 4.1.2. Primeiro cenário de estudo

Uma análise preliminar é necessária para se determinar o refinamento da malha de elementos finitos dos modelos para se obter resultados satisfatórios. Para isso, é avaliado o primeiro cenário, que é o cenário de produção analisado por Souza [26], que utilizou os dados disponibilizados por Liu *et al* [25] e determinou o perfil térmico e de pressão do poço A01H analisado. A Figura 4.1 apresenta um esboço do poço estudado por Souza [26].

Como observado na Figura 4.1, o poço apresenta quatro fases, sendo algumas delas totalmente cimentadas, como o revestimento condutor e o revestimento de superfície, e outras parcialmente cimentadas, como os revestimentos intermediário e de produção. O Quadro 4.1 apresenta as características das fases do poço A01H.



Figura 4.1 – Esboço do poço utilizado no primeiro cenário.



Fonte: Adaptado de Souza [26].

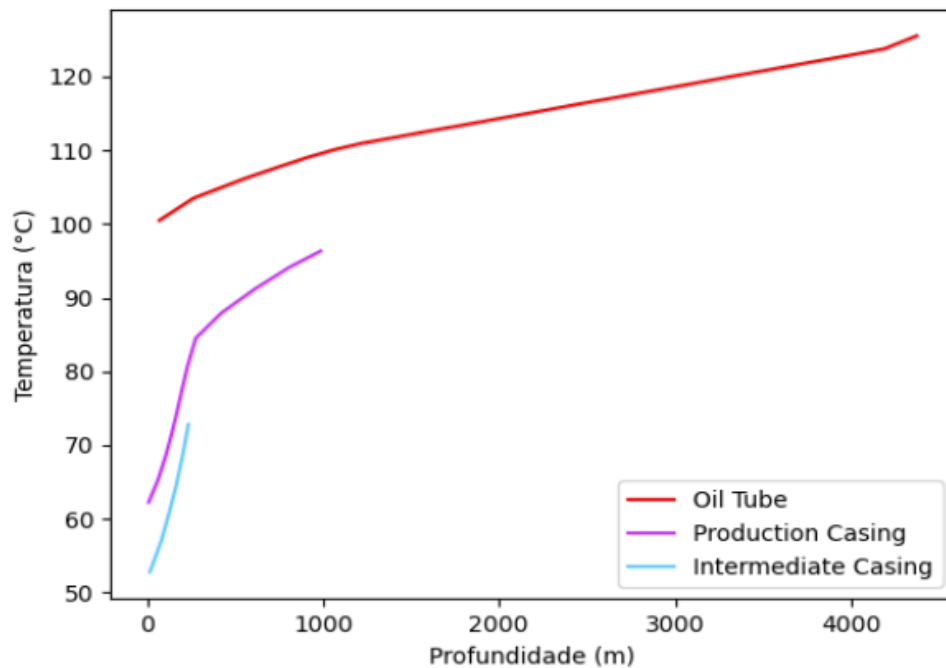
Quadro 4.1 – Características geométricas das fases do poço A01H.

Fase	$D$ (m)	$D_i$ (m)	Peso Linear (kg/m)	$L$ (m)	$L_{cim}$ (m)	$L_{livre}$ (m)
Coluna de Produção	0,114	0,1	18,6	4470	0	4470
Revestimento de Produção	0,244	0,22	69,6	3975	3040	935
Revestimento Intermediário	0,34	0,315	100,6	1120	866,14	253,86
Revestimento de Superfície	0,61	0,546	363,5	383,8	383,8	0

Fonte: Adaptado de Souza [26].

O cenário em questão é utilizado para analisar o comportamento dos modelos sob o efeito de esforços axiais. Além da aplicação do peso próprio, também é aplicado o esforço axial advindo do efeito térmico. Liu *et al* [25] apresentaram o perfil de temperatura utilizado para o poço avaliado. Souza [26] digitalizou o perfil, como mostra a Figura 4.2, e realizou o ajuste de equações para realizar os cálculos necessários.

Figura 4.2 – Perfil térmico do poço A01H.



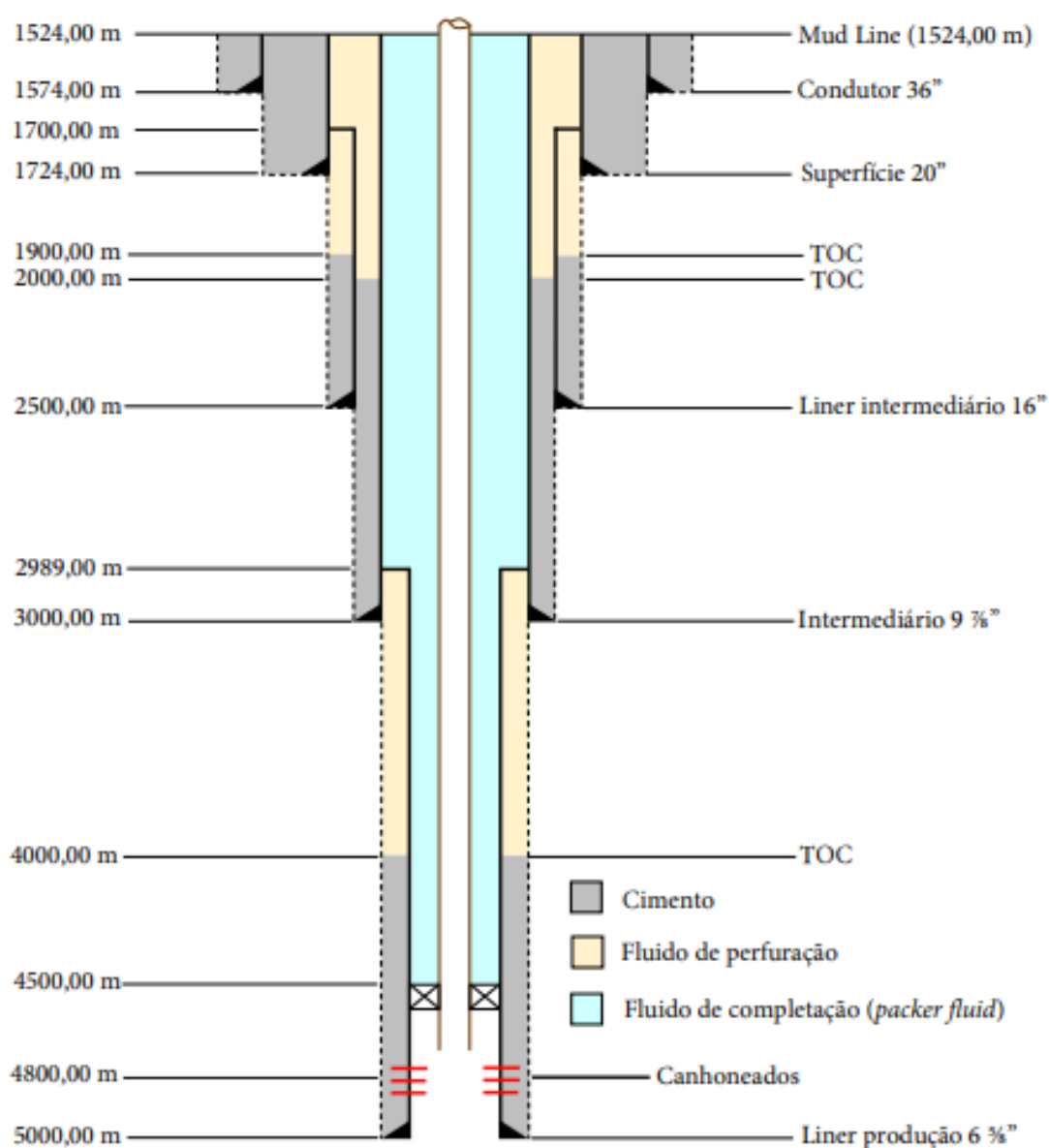
Fonte: Souza [26].

Conhecendo a equação que rege o diferencial de temperatura experimentado pelo poço, pode-se substituir na Equação 3.9 e encontrar o deslocamento na cabeça do poço devido ao efeito térmico. De maneira análoga, ao se aplicar o perfil térmico na Equação 3.10, encontra-se a tensão axial equivalente ao efeito térmico experimentado pelo tubular.

#### 4.1.3. Segundo cenário de estudo

O segundo cenário avaliado é o poço proposto por Silva [13], considerando o tubular intermediário para avaliar o efeito balão. A fase escolhida apresenta perfis de pressões interna e externa em um cenário de *Tubing Leak*, sendo possível aplicar os perfis na modelagem numérica para avaliar a influência do efeito balão. O poço utilizado para este estudo está ilustrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Poço utilizado no segundo cenário.



A fase selecionada para este estudo é o revestimento intermediário de 9 7/8", cujos dados são apresentados no Quadro 4.2.

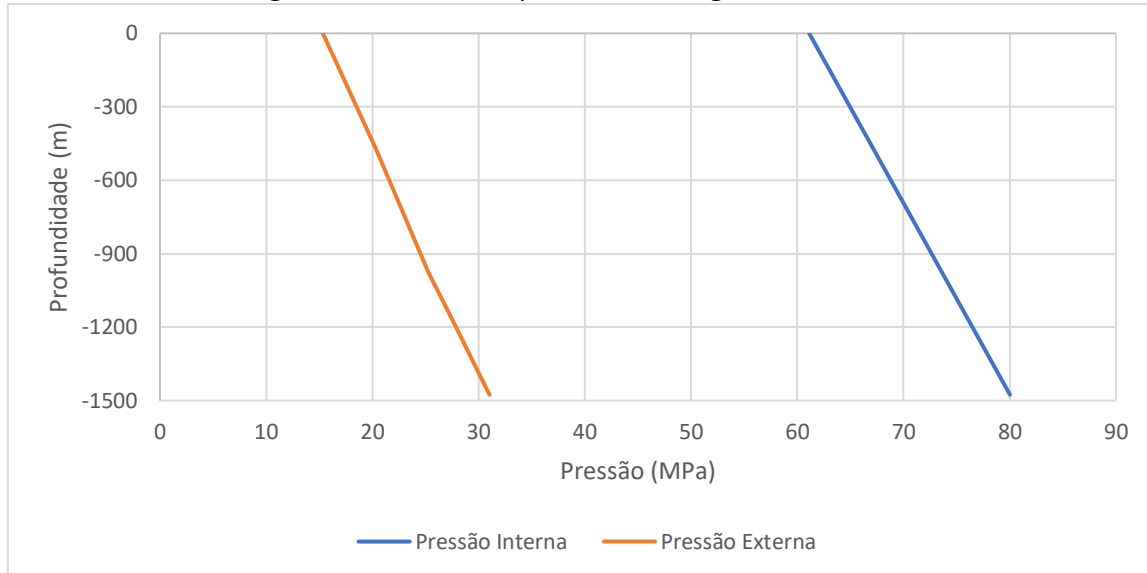
Quadro 4.2 – Características do revestimento utilizado no segundo cenário.

Tubular	$D$ (m)	$D_i$ (m)	Peso Linear (N/m)	$L$ (m)	$L_{cim}$ (m)	$L_{livre}$ (m)
9' 7/8"	0,250825	0,216891	976,3386	1476	1000	476

Fonte: Adaptado de Silva [13].

O cenário em questão abrange a aplicação de pressões como carregamentos. A Figura 4.4 apresenta o perfil de pressões a ser empregado, determinado por Silva [13].

Figura 4.4 – Perfil de pressões do segundo cenário.



Fonte: Adaptado de Silva [13].

O perfil de pressões apresentado pode ser aplicado na modelagem junto com o peso próprio para avaliar o comportamento do efeito balão no tubular.

#### 4.1.4. Terceiro cenário de estudo

No terceiro cenário de estudo, considera-se que há a evacuação total de todos os fluidos internos ao revestimento, sendo um cenário de *Full Evacuation*. Utilizando o mesmo poço da subseção anterior, apresentado na Figura 4.3, e a mesma fase avaliada, detalhada no Quadro 4.2, aplica-se apenas o carregamento de pressão externa detalhado na Figura 4.4, considerando nula a pressão interna ao longo do comprimento da fase.

## 4.2. Determinação dos carregamentos

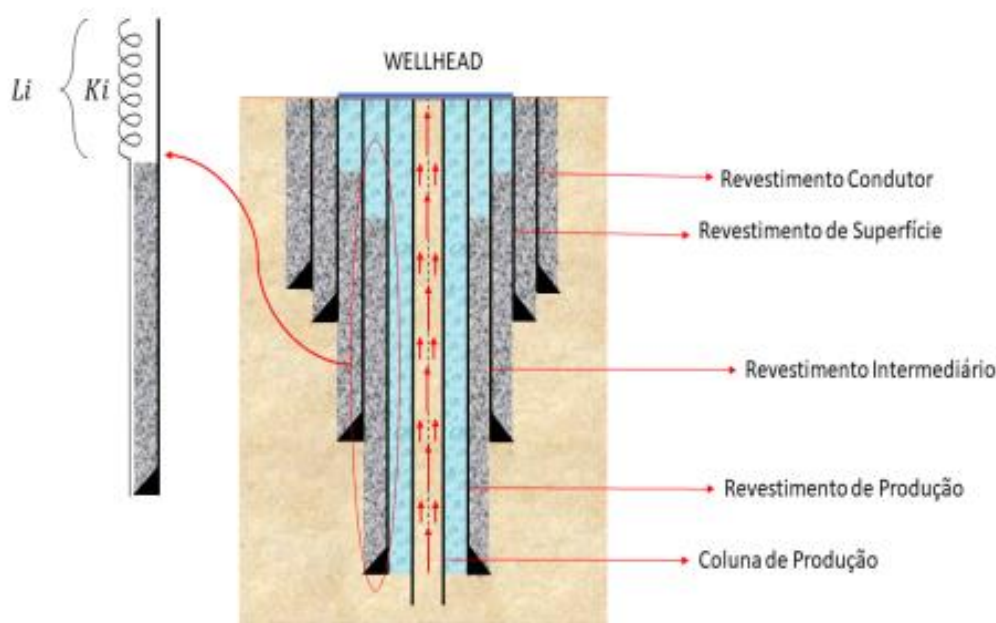
A tensão axial aplicada ao modelo é uma composição dos carregamentos que geram esse tipo de esforço, como explicitado na subseção 3.4.5. Esta subseção detalha a metodologia utilizada para determinar os carregamentos a serem aplicados em cada cenário estudado.

### 4.2.1. Carregamentos associados ao primeiro cenário

Uma das formas de se aplicar o carregamento axial proveniente dos efeitos indicados na Seção 4.1 é utilizando as equações 3.10, 3.12 e 3.13, aplicando-se os resultados como tensões equivalentes, os quais compensam o deslocamento axial que seria gerado pelos efeitos citados. O estudo realizado por Souza *et al* [5] utiliza a atuação do carregamento axial proveniente dos efeitos térmico e balão, realizando esta análise do deslocamento da cabeça do poço devido a esses efeitos durante a fase de produção.

O deslocamento da cabeça do poço e a tensão axial aplicada se relacionam a partir de relações elásticas considerando a rigidez axial do sistema do poço e todos os revestimentos. A Figura 4.5 esquematiza a estrutura do poço e idealiza como deverão ser consideradas as regiões não cimentadas dos revestimentos. Cada tubular que tem um comprimento  $L_i$  não cimentado, terá uma rigidez axial  $K_i$ , que contribuirá para o sistema como um todo.

Figura 4.5 – Esquematização da estrutura de um poço.



Fonte: Souza [26].

O cálculo da rigidez axial de cada tubular é realizado a partir do módulo de elasticidade  $E$  do material, da área da seção transversal  $A_i$ , e do seu comprimento não cimentado  $L_i$ , conforme a equação:

$$K_i = \frac{EA_i}{L_i}. \quad (4.1)$$

A rigidez total do sistema em relação a deslocamentos axiais é representada pela soma das influências de rigidez de cada tubular. Assim,

$$K_{sys} = \sum K_i. \quad (4.2)$$

Conhecendo a rigidez axial total do sistema, pode-se relacionar o deslocamento com o carregamento, sendo determinado por

$$u_{WH} = \frac{F_a + F_{end}}{K_{sys}}, \quad (4.3)$$

onde  $u_{WH}$  é o deslocamento da cabeça do poço,  $F_a$  é o somatório dos carregamentos

axiais advindos dos efeitos térmico, balão e pistão de todos os tubulares, e  $F_{end}$  é o carregamento devido ao efeito final da pressão do revestimento e do óleo (Souza [26]), definido a partir da equação

$$F_{end} = \pi r_{cp}^2 P_{cp} + \pi(r_{rp}^2 - R_{cp}^2)P_{rp} . \quad (4.4)$$

Nesta equação,  $r_{cp}$  é o raio interno da coluna de produção,  $r_{rp}$  é o raio interno do revestimento de produção,  $R_{cp}$  é o raio externo da coluna de produção,  $P_{cp}$  é a pressão que o óleo exerce na coluna de produção e  $P_{rp}$  é a pressão do revestimento de produção. O Quadro 4.3 apresenta os valores utilizados para o cálculo de  $F_{end}$  realizado por Souza [26].

Quadro 4.3 – Cálculo do  $F_{end}$ .

$r_{cp}$ (m)	$r_{rp}$ (m)	$R_{cp}$ (m)	$P_{cp}$ (MPa)	$P_{rp}$ (MPa)	$F_{end}$ (N)
0,05	0,11	0,057	20,4	0	160221,2

Fonte: Adaptado de Souza [26].

Uma vez que cada revestimento tem sua contribuição para o movimento de cabeça de poço, é possível determinar o esforço axial suportado por cada um deles a partir do deslocamento total. Manipulando a Equação 4.3 encontra-se a Equação 4.5, que relaciona o deslocamento com o esforço  $F_i$  em cada tubular que compõe o poço:

$$F_{a,i} = \left( u_{WH} - \frac{F_{end}}{K_{sys}} \right) * K_i . \quad (4.5)$$

O trabalho de Souza [26] apresenta resultados satisfatórios para o movimento de cabeça de poço. Neste contexto, ele é utilizado para calcular o esforço axial resultante dos efeitos balão e térmico em um tubular. O Quadro 4.4 apresenta as características dos tubulares de revestimento utilizados e os resultados obtidos, onde  $L$  representa o comprimento não cimentado do revestimento,  $D_i$ ,  $D$  e  $A_s$  são respectivamente o diâmetro interno, externo e a área da seção do tubular,  $K$  é a rigidez axial e  $F_a$  a força axial calculada a partir da Equação 4.5. Para realização dos cálculos, Souza [26] utiliza  $E = 2,06843 * 10^{11} Pa$ , e o movimento de cabeça de poço calculado é  $u_{WH} = 0,135 m$ .

Quadro 4.4 – Características gerais das fases do poço A01H.

Tubular	$L$ (m)	$D$ (m)	$D_i$ (m)	$A_s$ (m <sup>2</sup> )	$K_i$ (N/m)	$F_{a,i}$ (N)
Coluna de produção	4470	0,114	0,1	0,002353	108884,2	13306,25
Revestimento de produção	935	0,244	0,22	0,008746	1934855	236450
Revestimento intermediário	253,86	0,34	0,315	0,012861	10478949	1280585

Fonte: Adaptado de Souza [26].

Além de se utilizar o carregamento proveniente do efeito térmico, é necessário

também aplicar o peso próprio dos tubulares de revestimento. O valor do peso é aplicado como carregamento distribuído ao longo de todo o comprimento do tubular, e os valores são calculados a partir do peso específico do material e da área da seção transversal. O Quadro 4.5 detalha os valores do peso próprio de cada tubular, considerando as Equações 3.4 a 3.7. Considera-se também a densidade  $\rho_m = 1000 \text{ kg/m}^3$  do fluido de perfuração para o cálculo da flutuabilidade.

Quadro 4.5 – Peso linear dos tubulares de revestimento do primeiro cenário.

Tubular	Peso Linear (kg/m)	Flutuabilidade (kg/m)	Força de dobramento (kg/m)	Peso Linear total (kg/m)
Coluna de produção	18,6	2,35	0,73	16,98
Revestimento de produção	69,6	8,75	27,9	88,78
Revestimento intermediário	100,6	12,86	207,2	294,89

Fonte: Adaptado de Souza [26].

#### 4.2.2. Carregamentos associados ao segundo cenário

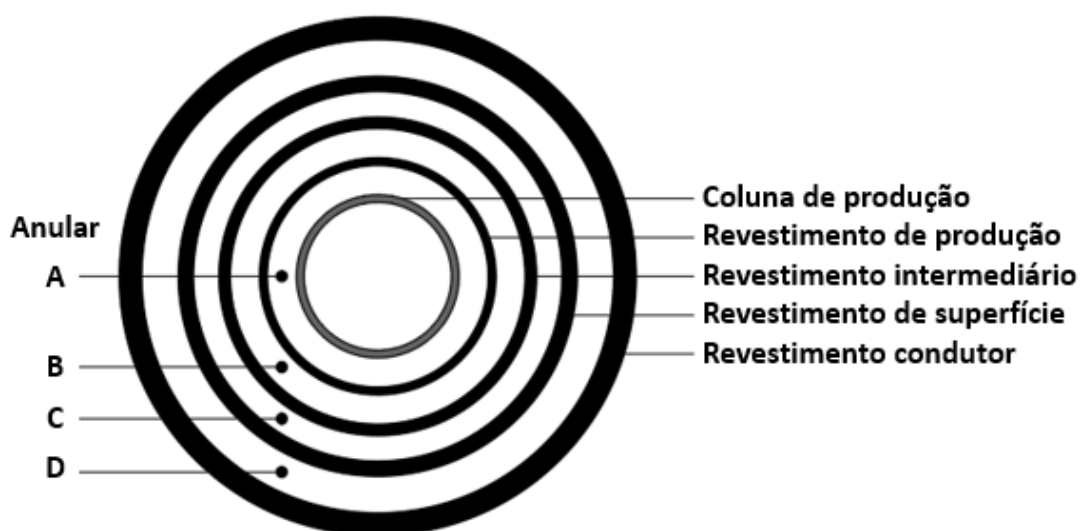
Para considerar do efeito balão de forma mais abrangente, pode-se aplicar o perfil de pressões diretamente na modelagem numérica, adicionando o coeficiente de *Poisson* às características do material. Dessa forma, observa-se o comportamento do deslocamento comparando com as equações analíticas.

Uma vez que o poço é constituído de diversas fases, é necessário determinar as pressões atuantes em cada espaço entre os tubulares, ou seja, em cada anular. A Figura 4.6 ilustra o esquema de revestimentos em uma seção transversal do poço avaliado e denomina cada um dos anulares para que seja possível equacionar as pressões em cada um deles.

O esquema apresentado na Figura 4.6 indica que, dependendo do tubular avaliado, o fluido presente nos anulares exerce uma pressão interna ou externa. A Figura 4.7 detalha o tipo de pressão exercida dos fluidos de cada anular em cada um dos revestimentos que encasulam aquele espaço, apresentando um poço genérico.

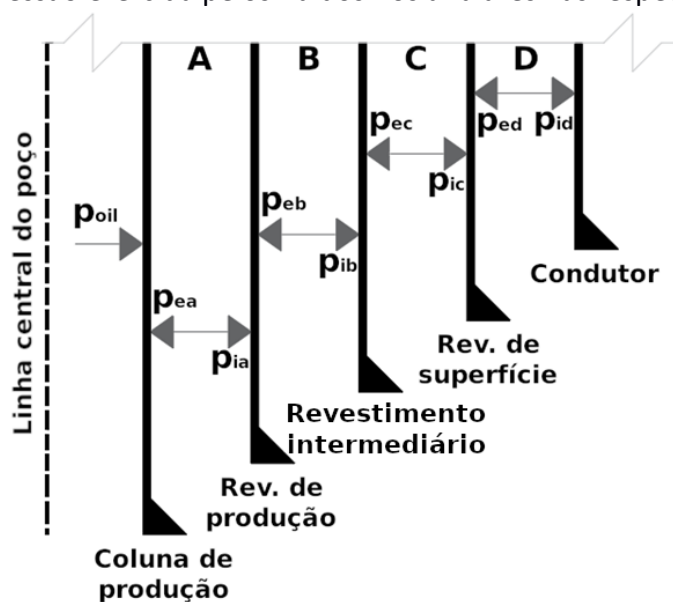
Observa-se pela Figura 4.7, que a pressão exercida pelo anular A, representa uma pressão externa na coluna de produção e uma pressão interna no revestimento de produção. Da mesma forma que o anular B exerce pressão externa no revestimento de produção e pressão interna no revestimento intermediário, e da mesma forma para os anulares C e D, conforme indicado nesta figura.

Figura 4.6 – Esquematisação das fases de um poço genérico.



Fonte: Adaptado de Souza [26].

Figura 4.7 – Pressão exercida pelos fluidos nos anulares nas respectivas fases.



Fonte: Autor.

O poço utilizado para este estudo está ilustrado na Figura 4.3. A fase escolhida para análise é o revestimento intermediário detalhado no Quadro 4.2. Seguindo a orientação das pressões detalhadas na Figura 4.7, o revestimento estudado sofre pressão externa advinda do anular entre o revestimento intermediário e, a depender da profundidade avaliada, o revestimento de superfície ou o *liner* intermediário. Da mesma forma, a pressão interna é advinda dos fluidos no anular entre o revestimento intermediário e a coluna de produção.

Utilizando o perfil de pressões apresentado na Figura 4.4 é possível determinar as equações que regem o comportamento da pressão interna e da pressão externa na fase estudada usando o ajuste de equações. A Equação 4.6 descreve o comportamento



da pressão interna e a Equação 4.7 descreve o comportamento da pressão externa:

$$p_i = -12809 z + 61114919 \quad \therefore 0 \geq z \geq -1476, \quad (4.6)$$

$$p_e = \begin{cases} -10576 z + 15336175 \quad \therefore 0 \geq z > -476 \\ -9789 z + 15710937 \quad \therefore -476 \geq z \geq -976 \\ -11500 z + 14054001 \quad \therefore -976 > z \geq -1476 \end{cases} . \quad (4.7)$$

### 4.2.3. Carregamentos associados ao terceiro cenário

O terceiro cenário de carregamento apresenta os mesmos valores detalhados na subseção 4.2.2, a exceção da pressão interna, que é removida. Dessa forma, mantém-se a Equação 4.7 para descrever as pressões externas, porém, a pressão interna passa a ser:

$$p_i = 0 \quad \therefore 0 \geq z \geq -1476. \quad (4.8)$$

## 4.3. Modelagem dos cenários

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para a determinação da modelagem numérica do cenário em questão, assim como os aspectos associados à geração de cada modelo.

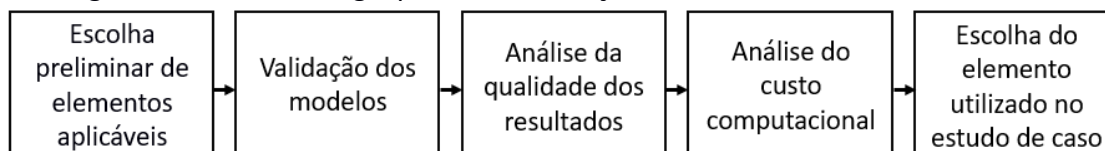
Uma ferramenta frequentemente utilizada para analisar estruturas tubulares é o método dos elementos finitos (MEF), por ser capaz de produzir resultados precisos e confiáveis. O MEF é utilizado nesse trabalho através do software *Abaqus* [27], que é um programa comercial de grande aceitação para análises em elementos finitos e utilizados nas mais diversas áreas das engenharias. O *Abaqus* possui um grande conjunto de ferramentas de análise que permite ao usuário realizar avaliações com grande acurácia de resultados. Essas características possibilitam o seu uso na realização das diversas simulações numéricas necessárias para o andamento deste trabalho, com ampla variação de elementos finitos em seu repertório, modificações no refinamento de malha e a possibilidade de, não apenas avaliar a qualidade dos resultados de cada modelo proposto, mas também analisar o custo computacional de cada modelo.

As etapas a serem seguidas para realizar a modelagem numérica são descritas nas subseções a seguir. Primeiramente determina-se a geometria do modelo, que, para a estratégia de modelagem adotada, depende do tipo de elemento finito utilizado, seguido da definição das condições de contorno do problema, aplicação dos carregamentos determinados na subseção 4.2 e, por fim, a geração do modelo numérico propriamente dito, o que inclui a construção de uma malha de elementos finitos única associada ao problema em questão.

### 4.3.1. Tipos de elementos finitos utilizados na modelagem

Uma vez que são escassos os estudos utilizando a modelagem utilizada neste trabalho, realiza-se uma avaliação de vários tipos de elementos finitos aplicáveis a esse tipo de análise. A determinação do melhor elemento finito para ser utilizado nas análises dos cenários avaliados é realizada a partir da qualidade dos resultados e do custo computacional associado a cada um deles. A Figura 4.8 apresenta a metodologia utilizada para definir o elemento finito mais adequado para este trabalho.

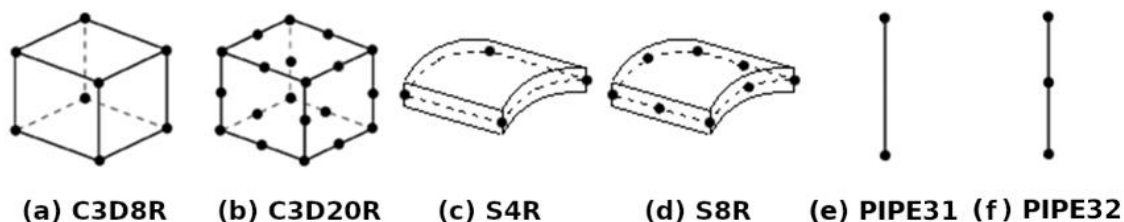
Figura 4.8 – Metodologia para determinação dos elementos finitos avaliados.



Fonte: Autor.

Após identificação dos elementos finitos disponíveis no *Abaqus* e plausíveis para o uso nos estudos de caso deste trabalho, são escolhidos três tipos para avaliação: elementos finitos sólidos, elementos finitos de casca e elementos finitos de viga tubular. Esses elementos finitos são avaliados com base na variação do nível de refinamento de malha e de outras características de cada um deles. A Figura 4.9 ilustra os elementos finitos utilizados, enquanto o Quadro 4.6 apresenta as características de cada um deles. As subseções seguintes detalham cada um dos elementos finitos avaliados. A nomenclatura utilizada é adotada pelo *Abaqus*.

Figura 4.9 – Elementos finitos avaliados na modelagem numérica.



Fonte: Adaptado de *Abaqus* [28].

Quadro 4.6 – Características dos elementos finitos avaliados na modelagem numérica.

Elemento		Nós por elemento	Função de Interpolação	Graus de Liberdade por Nó	Graus de Liberdade por Elemento	Observações
Sólido	C3D8R	8	Linear	3	24	Integração Reduzida
	C3D20R	20	Quadrática	3	60	Integração Reduzida
Casca	S4R	4	Linear	6	24	Integração Reduzida
	S8R	8	Quadrática	6	48	Integração Reduzida
Viga	PIPE31	2	Linear	6	12	Integração Completa
	PIPE32	3	Quadrática	6	18	Integração Completa

Fonte: Autor.

Os elementos finitos sólidos e de casca são adotados utilizando a integração reduzida, caracterizada pelo R ao final da nomenclatura de cada elemento. Essa regra de

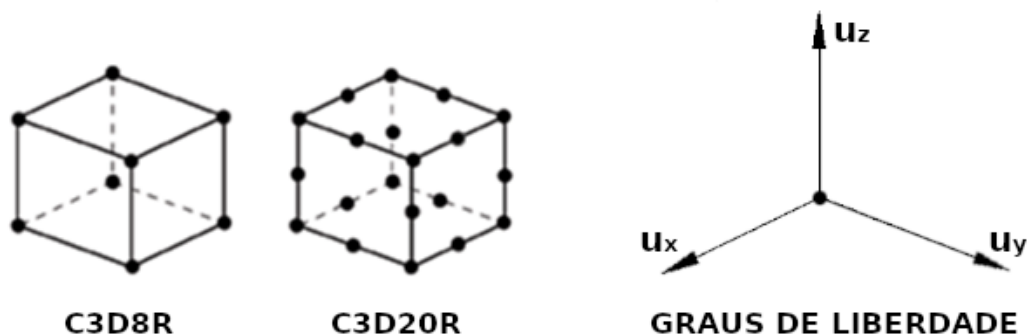
integração numérica é adotada, pois utiliza uma redução nos pontos de integração de cada elemento finito (*Abaqus* [29]), reduzindo o custo computacional para as simulações. Por outro lado, pode-se observar uma divergência entre os resultados reais e os calculados nas simulações. Este fator é avaliado no desenvolvimento deste trabalho.

#### 4.3.1.1. Elemento finito sólido

O elemento finito sólido é um dos elementos mais genéricos para estudos tridimensionais, sendo um octaedro tridimensional que abrange os três graus de liberdade de deslocamento (Neto *et al* [30]). Utiliza-se o elemento com funções de interpolação lineares, sendo denominado C3D8R, e com as funções de interpolação quadráticas, sendo este o elemento C3D20R, ambos ilustrado na Figura 4.10.

Independente se é utilizada funções de interpolação lineares ou quadráticas, o elemento finito sólido apresenta três graus de liberdade de deslocamento em cada um de seus nós, como apresenta a Figura 4.10. Desse modo, observa-se que para os elementos utilizados para o estudo, o elemento sólido com 8 nós (função de interpolação linear) possui 24 graus de liberdade, e o elemento sólido com 20 nós (função de interpolação quadrática) possui 60 graus de liberdade, como descrito no Quadro 4.6.

Figura 4.10 – Graus de liberdade do elemento finito sólido.



Fonte: Adaptado de *Abaqus* [28].

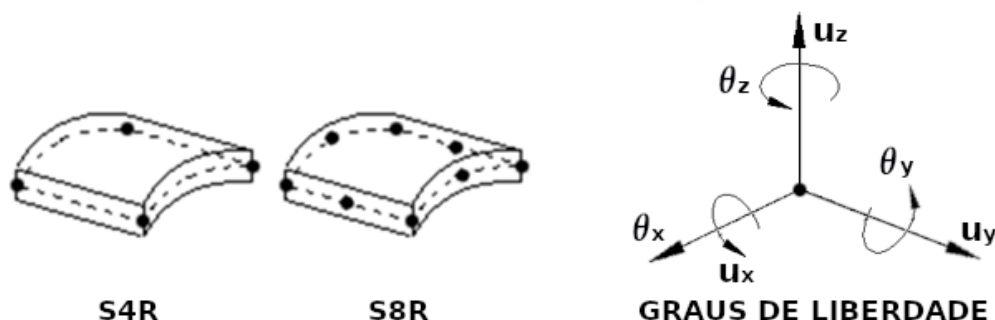
A modelagem de tubulares de revestimento utilizando elementos finitos sólidos no *Abaqus* é descrita detalhadamente no Apêndice A deste trabalho.

#### 4.3.1.2. Elemento finito de casca (*Shell*)

O elemento de casca é utilizado para modelar estruturas que uma de duas dimensões, a espessura, seja significativamente menor do que as demais (*Abaqus* [31]). Os elementos de casca convencionais são modelados como membranas finas e utilizam seis graus de liberdade em cada nó, além dos deslocamentos o elemento de casca possui também três graus de liberdade de rotação, como detalhado na Figura 4.14. São adotados no estudo devido ao seu formato curvo que pode melhor se adequar ao formato circular dos tubulares de revestimento. Na fase da modelagem, especifica-se a espessura da parede do tubular, que é considerada nos cálculos necessários para a execução da simulação numérica. Assim como o elemento sólido, são utilizadas as

funções de interpolação lineares, sendo este elemento denominado S4R e ilustrado na Figura 4.11, e funções de interpolação quadráticas, representado na Figura 4.11 pelo elemento S8R

Figura 4.11 – Graus de liberdade do elemento finito de casca.



Fonte: Adaptado de *Abaqus* [28].

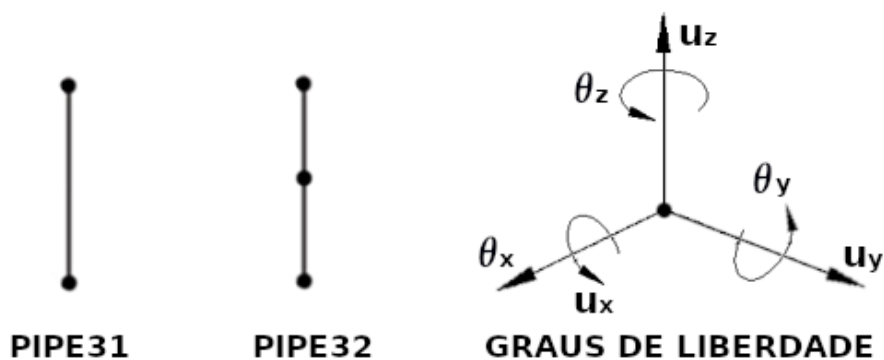
A modelagem de tubulares de revestimento utilizando elementos de casca é descrita detalhadamente no Apêndice B deste trabalho.

#### 4.3.1.3. Elemento finito de viga tubular (*pipe*)

O elemento *pipe* é um elemento finito de viga modelado linearmente, adotando uma seção circular vazada. Por ser um elemento com seção transversal idêntica a um tubular de revestimento, é utilizado neste trabalho para avaliar seu comportamento no estudo em questão. Além disso, por ser um elemento linear, que possui uma quantidade menor de nós por elemento, reduz significativamente o custo computacional para execução da simulação. A exemplo dos demais elementos, são utilizadas funções de interpolação lineares, definindo o elemento PIPE31, e funções de interpolação quadráticas, definindo o elemento PIPE32, ambos ilustrados na Figura 4.12.

Assim como o elemento finito de casca, o elemento *pipe* possui a mesma quantidade de graus de liberdade em seus nós, sendo três de deslocamento e 3 de rotação, como ilustrado na Figura 4.12. O Apêndice C deste trabalho apresenta detalhadamente o processo de modelagem de tubulares utilizando os elementos *pipe*.

Figura 4.12 – Graus de liberdade do elemento finito de viga tubular.



Fonte: Adaptado de *Abaqus* [28].

### 4.3.2. Geometria do modelo

Para análise numérica de tubulares de revestimento, diversos autores utilizam uma modelagem numérica tridimensional para avaliar cenários de pressão. Os modelos implementados em outros trabalhos são reduzidos, utilizando apenas parte da seção transversal e também analisando apenas um recorte do comprimento do tubular. Uma vez que o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da tensão axial ao longo de todo o corpo do revestimento, o modelo a ser implementado deve contemplar todo o comprimento do tubular, avaliando a penalização da resistência de acordo com o que a Seção 2.3.4, além de também ter sido modelado com a seção transversal completa.

Os modelos elaborados para análise são criados a partir dos tubulares do poço A01H detalhados no trabalho de Souza [26] e do tubular intermediário do cenário proposto por Silva [13], com as dimensões e carregamentos conforme especificados na Seção 4.2. O Quadro 4.7 apresenta, de forma resumida, os dados utilizados nas modelagens de cada fase de revestimento do poço A01H, utilizado no primeiro cenário, e do poço proposto por Silva [13], utilizado nos segundo e terceiro cenários.

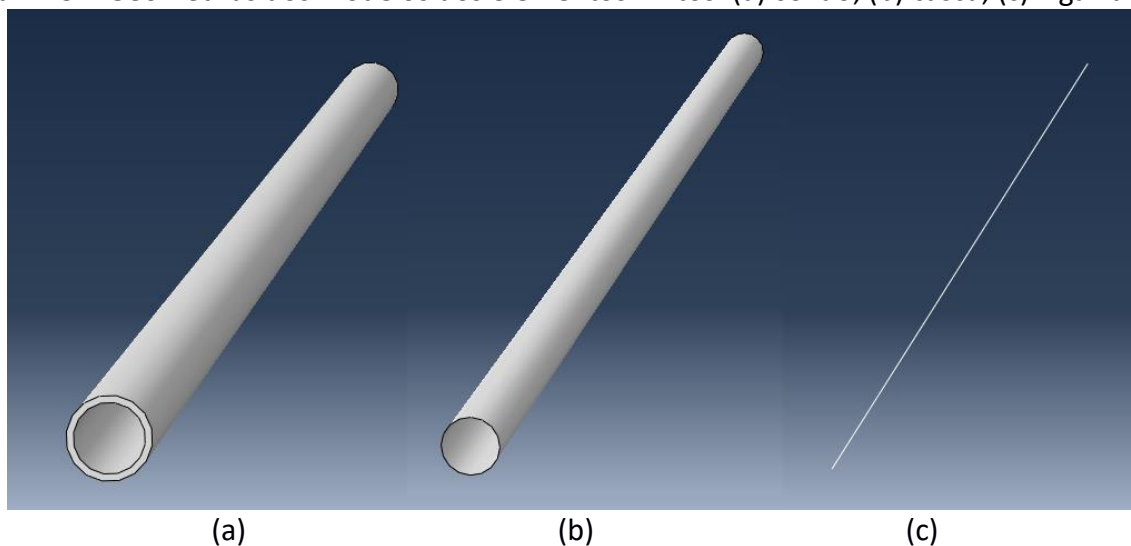
Quadro 4.7 – Dimensões e carregamentos axiais dos tubulares.

Cenário	Tubular	$D_i$ (m)	$D$ (m)	$L_{Livre}$ (m)	Peso Linear (N/m)	$F_a$ (N)
Primeiro	Coluna de produção	0,1	0,114	4470	166,5	13306,25
	Revestimento de produção	0,22	0,244	935	870,9	236450
	Revestimento intermediário	0,315	0,34	253,86	2892,8	1280585
Segundo e Terceiro	Revestimento intermediário	0,217	0,251	476	976,3	Não se aplica

Fonte: Adaptado de Silva [13] e Souza [26].

A Figura 4.13 ilustra a geometria dos modelos de acordo com cada elemento utilizado na modelagem, descritos na subseção 4.3.1. De acordo com os valores apresentados no Quadro 4.5 o comprimento e diâmetro do tubular é determinado na modelagem, assim como os carregamentos aplicados.

Figura 4.13 – Geometrias dos modelos dos elementos finitos: (a) sólido; (b) casca; (c) viga Tubular.

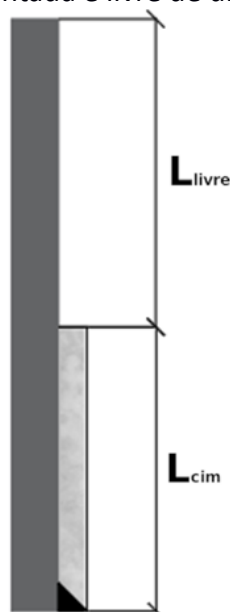


Fonte: Autor.

### 4.3.3. Condições de contorno

Para se satisfazer o equilíbrio estático de estruturas, é necessário que existam vínculos bem definidos. Esses vínculos precisam absorver de forma satisfatória os esforços atuantes, evitando que a estrutura sofra deslocamentos indesejados e transferindo os esforços para o solo. No caso de revestimentos de poços, para se fixar o tubular na formação, utiliza-se a cimentação da parte externa inferior, ao longo de um comprimento previamente definido no projeto do poço. A Figura 4.14 exemplifica um tubular com sua região cimentada, de comprimento  $L_{cim}$ , e seu comprimento não cimentado  $L_{livre}$ .

Figura 4.14 – Regiões cimentada e livre de um tubular de revestimento.

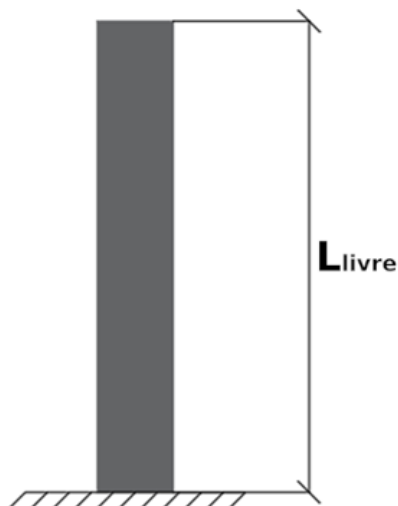


Fonte: Autor.

Sobre a parte cimentada, fica imposta a restrição de deslocamento e rotação,

funcionando como a vinculação necessária para garantir o equilíbrio estático do sistema, podendo ser introduzida no modelo como condição de contorno. Para simplificação do modelo, considera-se que a região cimentada é perfeitamente fixada e não sofre deslocamentos. Assim, a modelagem considera o comprimento livre dos tubulares e uma vinculação em sua base restringindo deslocamento e rotação, como ilustrado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Ilustração da simplificação das condições de contorno.



Fonte: Autor.

Devido à cimentação, as condições de contorno no fundo do tubular são definidas como ilustrado nas Figuras 4.14 e 4.15. Para se realizar a validação dos modelos, considera-se que o tubular está livre para se deslocar em todo seu comprimento, exceto no comprimento cimentado, comparando os resultados obtidos nas simulações numéricas com os valores de deslocamentos calculados utilizando equações analíticas. Apesar da consideração de ter a cabeça do poço livre para validação dos modelos, existem estruturas instaladas no topo do poço que restringem o deslocamento, por isso deve se considerar a cabeça do poço imóvel para se observar o comportamento das tensões.

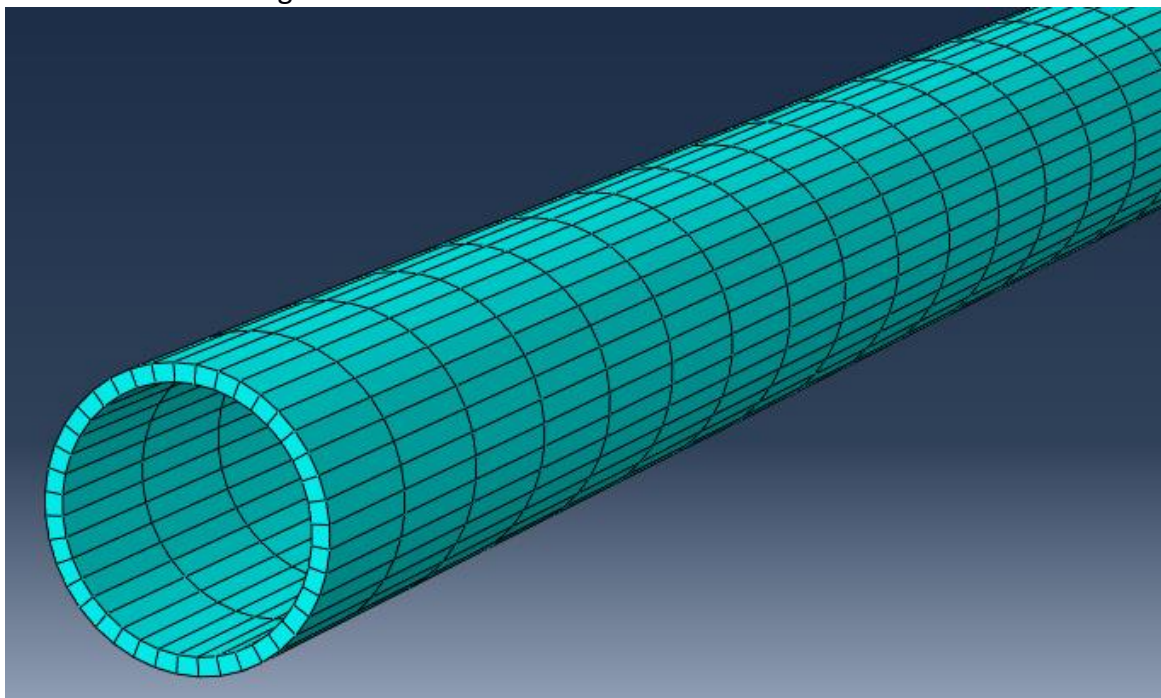
#### 4.3.4. Geração dos modelos numéricos

Utilizando os valores detalhados na subseção 4.3.2 e as condições de contorno definidas na subseção 4.3.3, os modelos numéricos são elaborados no *Abaqus* [32]. A Figura 4.16 apresenta a geometria dos modelos a partir do tipo de elemento finito a ser utilizado para a simulação.

A geração da malha dos elementos finitos utilizada na análise é realizada pelo *Abaqus*, que, a partir das informações de calibração fornecidas pelo usuário, utiliza suas ferramentas direcionadas para alcançar essa geração (*Abaqus*, [33]). O refinamento de malha é um fator essencial a ser observado, pois é definido por Owen [34] como qualquer operação aplicada à malha que reduza o tamanho dos elementos finitos, e é necessária para capturar um fenômeno físico local ou para aumentar a qualidade dos elementos finitos individualmente. A Figura 4.16 apresenta um exemplo de malha de

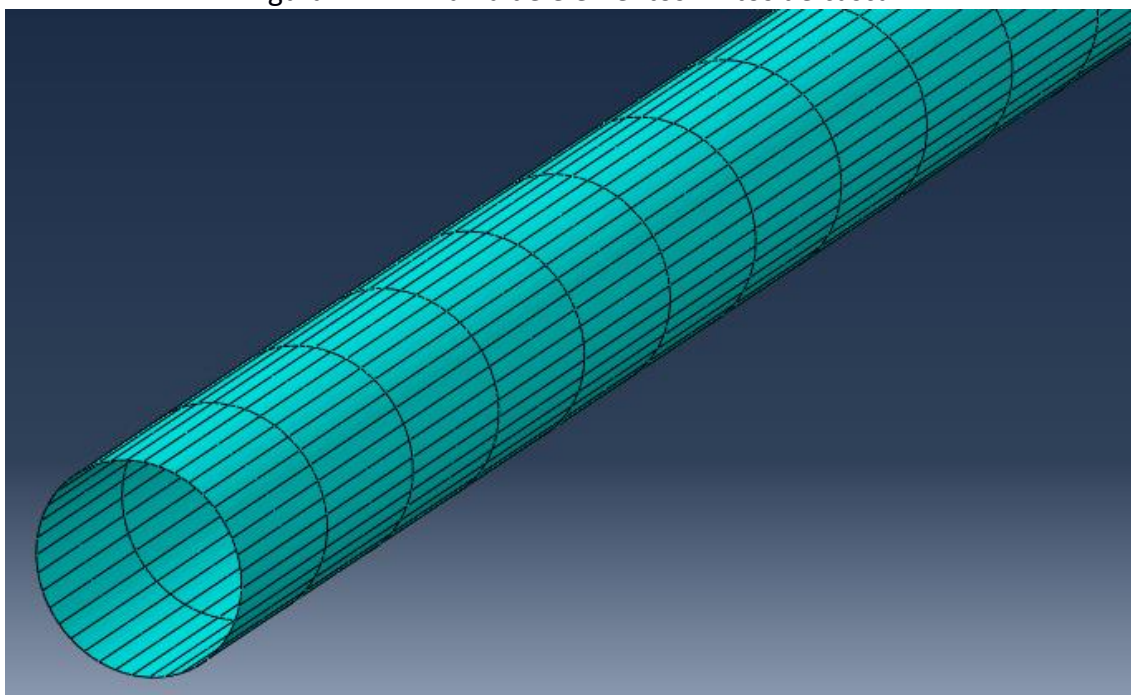
elementos finitos sólidos, apresentando detalhes da malha ao longo da seção transversal e ao longo do comprimento longitudinal do tubular. Da mesma forma, as Figuras 4.17 e 4.18 apresentam exemplos de malhas de elementos finitos de casca e de viga tubular, respectivamente.

Figura 4.16 – Malha de elementos finitos sólidos.



Fonte: Reprodução do *Abaqus/CAE*.

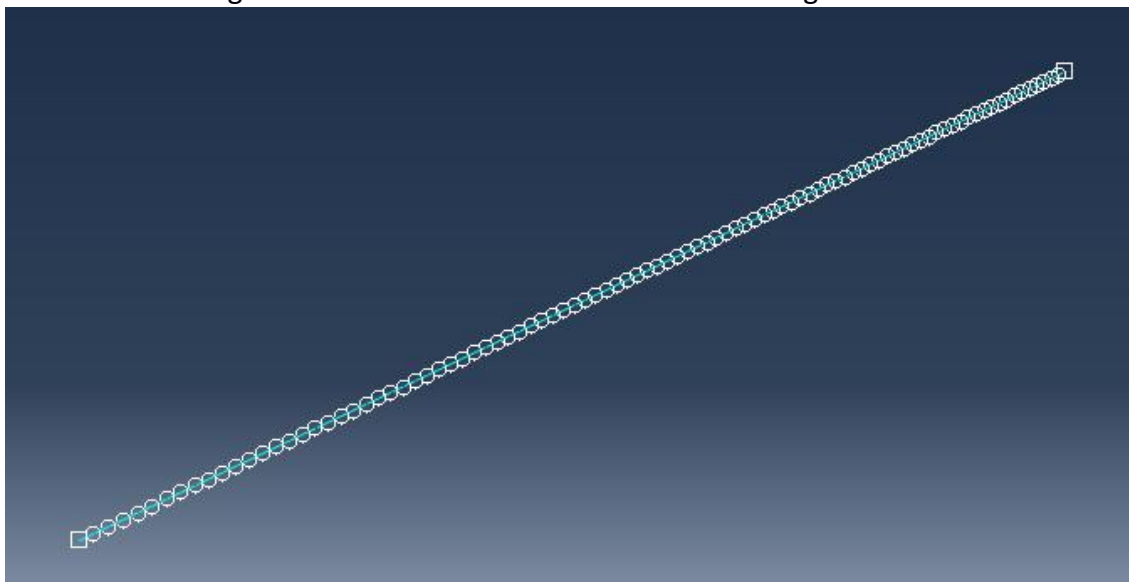
Figura 4.17 – Malha de elementos finitos de casca.



Fonte: Autor.



Figura 4.18 – Malha de elementos finitos de viga tubular.



Fonte: Autor.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 pode-se observar a malha de elementos finitos ao longo da seção transversal. Os elementos finitos sólidos detalham toda a parede do tubular, enquanto os elementos finitos de casca são modelados apenas pelo diâmetro médio da seção. Os elementos finitos de viga tubular são modelados unidimensionalmente, portanto não discretizam a seção transversal. O refinamento da malha é realizado com base no controle do comprimento longitudinal de cada elemento do modelo. A Figura 4.18 apresenta o comprimento do tubular avaliado no segundo e terceiro cenário, com os nós da malha destacados pelos círculos brancos na imagem.

Os Apêndices A, B e C deste trabalho apresentam um tutorial com as metodologias detalhadas da geração dos modelos numéricos pelo *Abaqus*, utilizando os três tipos de elementos finitos detalhado na subseção 4.3.1.

#### 4.4. Simulação numérica e avaliação da integridade

Após a geração dos modelos, aplicando os carregamentos e condições de contorno adequados a cada um deles, realiza-se a simulação numérica utilizando o *Abaqus* e os resultados obtidos são exportados para se avaliar o campo de deslocamentos em função da profundidade da fase.

Considerando as características constitutivas do material, pode-se obter diretamente das simulações numéricas o campo de tensões axiais atuantes no revestimento. A partir disso, é possível realizar a verificação da integridade do tubular, utilizando os métodos apresentados no Capítulo 2. Realiza-se o cálculo do limite de escoamento corrigido pela Equação 2.28, podendo, dessa forma, calcular a resistência penalizada de cada tubular a partir das Equações 2.19 a 2.22, avaliando a influência da tensão axial na verificação da integridade dos revestimentos a partir das equações da API/TR 5C3. Da mesma forma, utiliza-se as equações 2.23 a 2.26 para avaliar a resistência pelo modelo elaborado por *Klever-Tamano*, assim como pode-se considerar o critério

triaxial de *von Mises*, que além do campo de tensões axiais, também considera as tensões radiais e circunferenciais, aplicando-as na equação 2.27.

São realizadas análises considerando cenários de pressão interna e externa para observar o comportamento das fases analisadas. Além disso, verifica-se a influência da altura do topo de cimento em cada um dos cenários, variando o comprimento livre dos tubulares e avaliando o comportamento dos deslocamentos.

## 5. Resultados e Discussões

Após a definição dos detalhes dos modelos, foram realizadas as análises numéricas e os resultados foram exportados para arquivos de saída onde a interpretação dos mesmos pôde ser feita. Os valores são apresentados e discutidos neste capítulo.

### 5.1. Deslocamentos e tensões axiais

Utilizando as informações apresentadas no Capítulo 4, são modelados os tubulares de revestimento e obtidos os resultados apresentados neste capítulo. Para garantir que os resultados sejam coerentes, é realizada a validação dos mesmos, utilizando os procedimentos apresentados nesta seção.

O primeiro cenário a ser modelado é uma análise preliminar, onde se estuda a qualidade dos resultados obtidos a partir do refinamento de malha. Com os resultados dessa análise é possível encontrar a quantidade de subdivisões necessárias ao longo da seção transversal para se obter resultados acurados. No segundo e terceiro cenário, é avaliado o efeito balão, utilizando o refinamento de malha determinado a partir da análise preliminar.

#### 5.1.1. Análise preliminar

Em uma análise preliminar, é avaliada a tensão axial a partir do esforço normal do revestimento. Considerando que o tubular possui seção transversal constante ao longo de todo seu corpo, tendo, portanto, um carregamento linear constante igual ao peso específico multiplicado pela área da seção transversal e que a força axial devido aos efeitos balão e pistão atua na cabeça do poço, utiliza-se a Equação 5.1 para calcular o esforço na direção axial:

$$N(z) = F_a + P_L * z , \quad (5.1)$$

onde  $N(z)$  é o esforço normal ao longo da profundidade  $z$ ,  $F_a$  é a força axial calculada na Equação 4.5 e  $P_L$  é o peso linear detalhado nos Quadros 4.4 e 4.5.

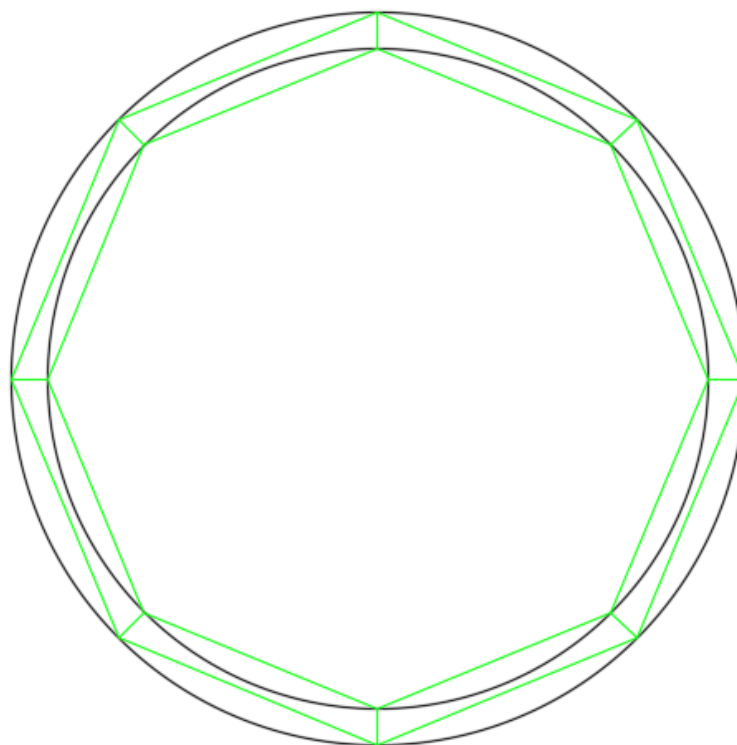
Para o cálculo da tensão axial, visto que a seção transversal é conhecida, utiliza-se a equação:

$$\sigma_z = \frac{N(z)}{A_S} . \quad (5.2)$$

O primeiro modelo avaliado utiliza elementos finitos sólidos tridimensionais C3D8R, com integração reduzida, 3 graus de liberdade por nó e 8 nós por elemento, representado através de funções de interpolação lineares. A malha de elementos finitos inicialmente avaliada utiliza um refinamento de 8 subdivisões ao longo da seção transversal, conforme visto na Figura 5.1. Aplicando os dados do revestimento

intermediário nas Equações 5.1 e 5.2 e comparando os resultados obtidos com a simulação numérica, observa-se pelo Quadro 5.1 que há uma divergência considerável dos valores obtidos.

Figura 5.1 – Seção transversal real e modelada.



Fonte: Autor.

Quadro 5.1 – Comparação entre equacionamento analítico e simulação numérica.

	Tensão axial no topo (MPa)	Tensão axial no fundo (MPa)
Equacionamento Analítico	99,575	42,472
Simulação Numérica	110,552	53,517
Divergência Percentual	11%	26%

Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 5.1 a diferença entre a seção transversal real, destacada em preto, e a seção transversal considerada pelo modelo numérico, destacada em verde. Essa diferença entre as áreas explica essa divergência entre os resultados obtidos e a solução analítica.

Ao se calcular a área efetiva da seção do modelo e utilizar esse valor no equacionamento analítico, obtém-se os resultados apresentados no Quadro 5.2. É visto que há uma grande redução na divergência entre os valores obtidos ao se realizar os cálculos com a área ajustada. Este fato ocorre em função da baixa qualidade da malha de elementos finitos gerada, pois, como definido por Owen [34], uma boa malha representa melhor capacidade de obtenção de resultados. Essa discrepância pode ser corrigida realizando uma modelagem com uma malha de elementos finitos mais refinada, gerando um modelo com uma seção transversal mais próxima da real, ou

utilizando os outros elementos detalhados na Seção 4.3.4.

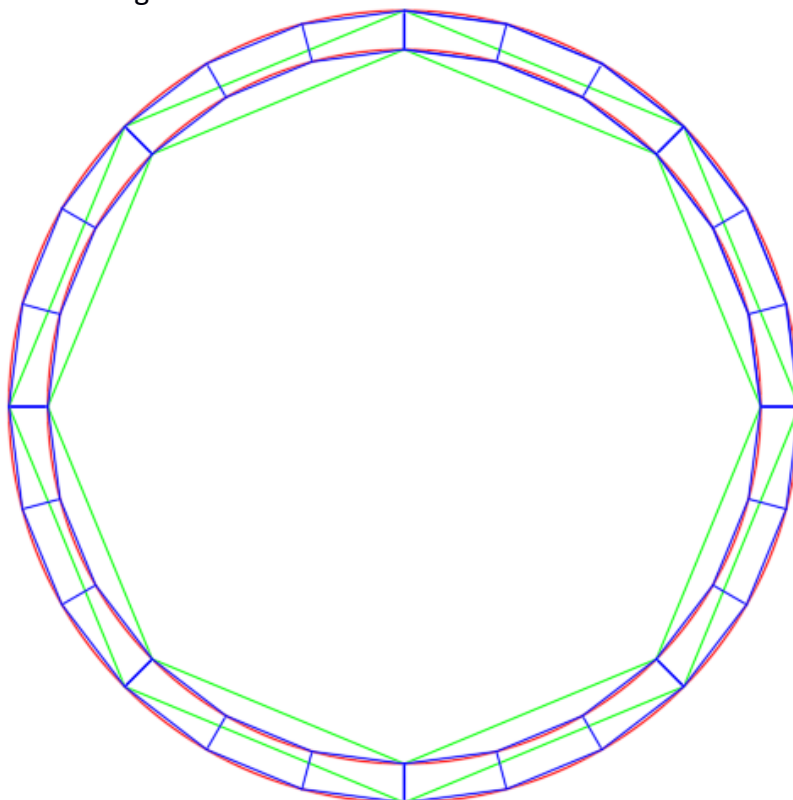
Quadro 5.2 – Comparação da solução analítica e simulação numérica com área corrigida.

	Área da Seção			Tensão Axial	
	Circular (m <sup>2</sup> )	Malha (m <sup>2</sup> )		Topo (MPa)	Fundo (MPa)
Revestimento Intermediário	0,01286	0,0115	Simulação Numérica	110,552	53,5173
			Solução Analítica	111,0886	53,987
			Divergência Percentual	0,48%	0,87%
Revestimento de Produção	0,008746	0,007885	Simulação Numérica	30,0127	-63,0694
			Solução Analítica	29,9856	-63,1185
			Divergência Percentual	0,09%	0,08%
Coluna de Produção	0,002353	0,002129	Simulação Numérica	6,27046	-310,072
			Solução Analítica	6,2488	-310,115
			Divergência Percentual	0,35%	0,01%

Fonte: Autor.

Refinando a malha de elementos finitos, observa-se que a seção transversal modelada se aproxima mais da seção real, como exemplificado na Figura 5.2, onde apresenta em verde uma seção mais pobre, com menos subdivisões ao longo da seção transversal, e em azul uma seção mais detalhada, que contém mais elementos ao longo da seção, dessa forma, se aproximando da seção real em vermelho. A partir deste maior refinamento da malha de elementos finitos gerada, os resultados convergem para a solução analítica.

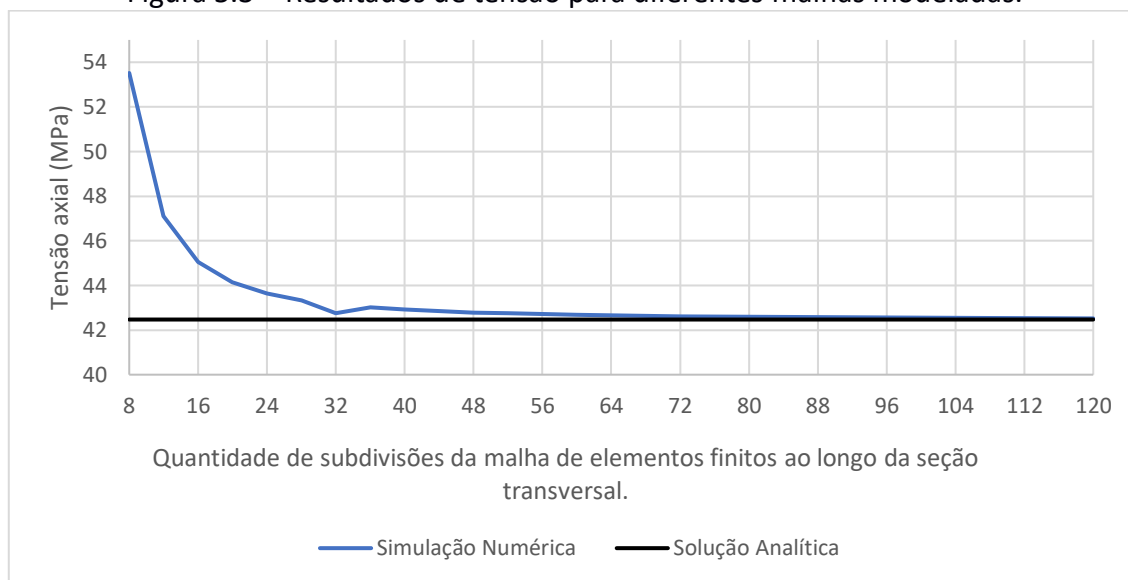
Figura 5.2 – Níveis de refinamento de malha.



Fonte: Autor.

É realizada uma avaliação da convergência dos resultados para se obter a sensibilidade da malha ideal a ser utilizada, uma vez que os resultados do MEF têm comportamento assintótico em relação ao refinamento da malha (Demkowicz, [35]), a tendência é que os resultados se aproximem do resultado analítico, porém, o custo computacional também aumenta. É observado, como ilustra a Figura 5.3, uma boa evolução na convergência dos resultados da tensão axial no fundo do revestimento intermediário, conforme o refinamento da malha.

Figura 5.3 – Resultados de tensão para diferentes malhas modeladas.



Fonte: Autor.

O eixo horizontal do gráfico ilustrado na Figura 5.3 representa a quantidade de elementos finitos discretizados na malha ao longo da seção transversal. A Figura 5.2 apresenta em verde uma subdivisão de 8 elementos e em azul uma subdivisão de 24 elementos. São realizadas diversas simulações, entre 8 e 120 elementos ao longo da seção, e percebe-se que com o aumento do refinamento da malha, o resultado tende a se aproximar da solução analítica, até que em certo limite, o aumento no refinamento da malha gera resultados com melhoria de acurácia muito pequena para um grande aumento de custo computacional. Portanto, entende-se que com o refinamento da malha a tensão axial no fundo do revestimento se aproxima da tensão calculada a partir da solução analítica, confirmando a expectativa de que o resultado se aproxima do real a medida que se aumenta a quantidade de subdivisões da malha de elementos finitos ao longo da seção transversal.

O elemento finito utilizado para a primeira modelagem é o elemento finito sólido C3D8R. Dessa forma, pode-se também avaliar os resultados do elemento finito sólido C3D20R, que se diferencia do anterior por utilizar funções de interpolação quadráticas, e introduzir a análise ao elemento finito de casca S4R, que por sua vez, apresenta mais graus de liberdade em cada um de seus nós, além de possuir os graus de liberdade de deslocamento nas três direções, possui também três graus de liberdade de rotação.

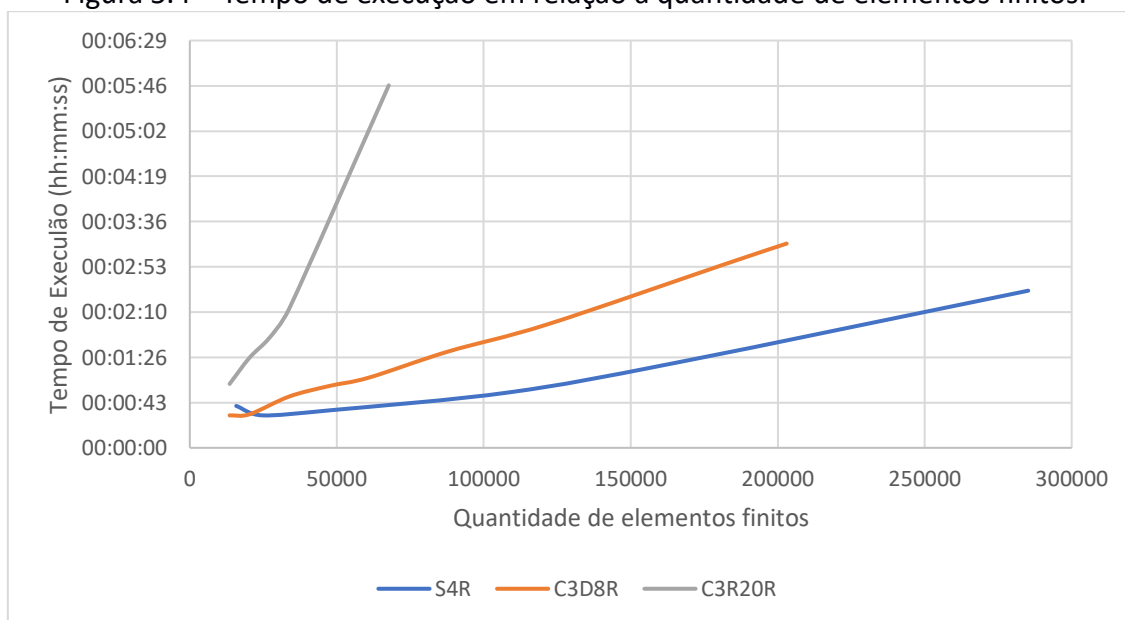
Nessa análise preliminar, o elemento de viga tubular não foi avaliado, pois foi

realizada a análise do refinamento da malha ao longo da seção transversal, o que não é pertinente ao elemento de viga. Como descrito na subseção 4.3.1.3, o elemento de viga é modelado unidimensionalmente, tendo apenas um elemento que descreve toda a geometria da seção transversal.

A comparação da qualidade dos resultados é realizada com base na quantidade total de elementos finitos em cada malha modelada, comparando os resultados obtidos nas simulações com a solução analítica do deslocamento para os carregamentos propostos. O refinamento da malha influencia na quantidade de elementos finitos na modelagem, portanto aumenta o custo computacional das simulações, por isso também é medido o tempo necessário para cada simulação realizada.

A Figura 5.4 apresenta uma comparação entre os custos computacionais de cada tipo de elemento em relação à quantidade de elementos finitos de cada modelo. Pelos resultados avaliados, o elemento finito de casca S4R apresenta um menor custo computacional para ser executado em relação aos elementos finitos sólidos C3D8R e C3D20R.

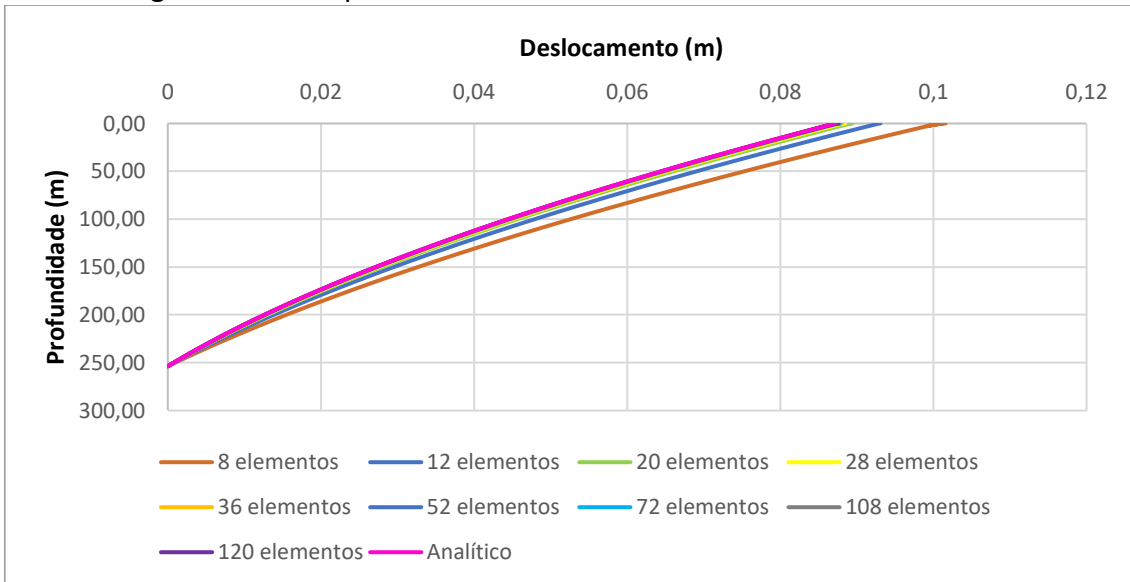
Figura 5.4 – Tempo de execução em relação à quantidade de elementos finitos.



Fonte: Autor.

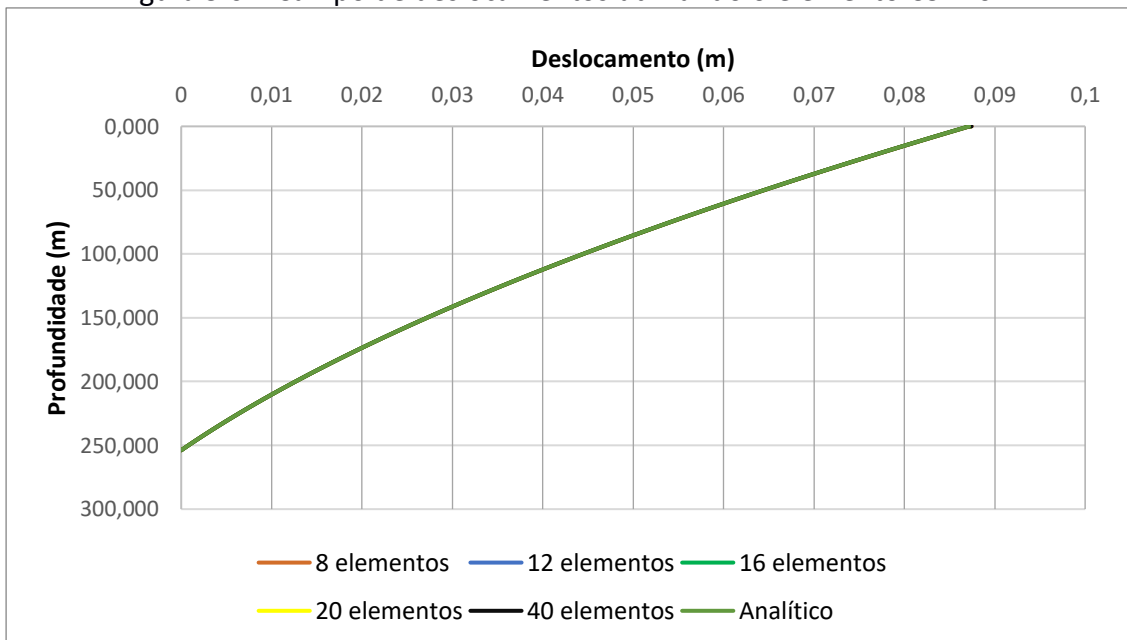
A análise do custo computacional dos modelos é importante para determinar o melhor elemento a ser utilizado nos estudos de caso. Porém, a análise da qualidade dos resultados é a principal avaliação a ser realizada. Sabe-se que a análise através de elementos finitos apresenta resultados de tensão nos pontos de integração, sendo normalmente esses resultados extrapolados para os seus nós, o que pode provocar erros maiores associados a este procedimento. Neste contexto, para minimizar possíveis erros, a análise dos resultados é realizada utilizando a variável primária deslocamentos, que são medidos exatamente nos nós, não existindo procedimentos adicionais que possam incorporar outros erros à avaliação. As Figuras 5.5 a 5.7 apresentam os resultados de campo de deslocamentos para os modelos elaborados em relação à quantidade de elementos finitos ao longo da seção transversal.

Figura 5.5 – Campo de deslocamentos utilizando o elemento C3D8R.



Fonte: Autor.

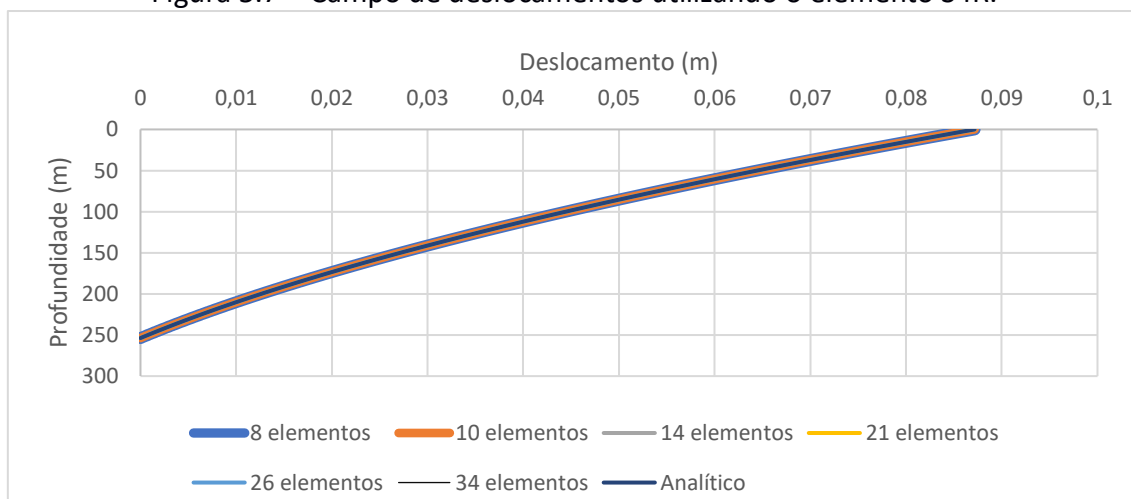
Figura 5.6 – Campo de deslocamentos utilizando o elemento C3D20R.



Fonte: Autor.



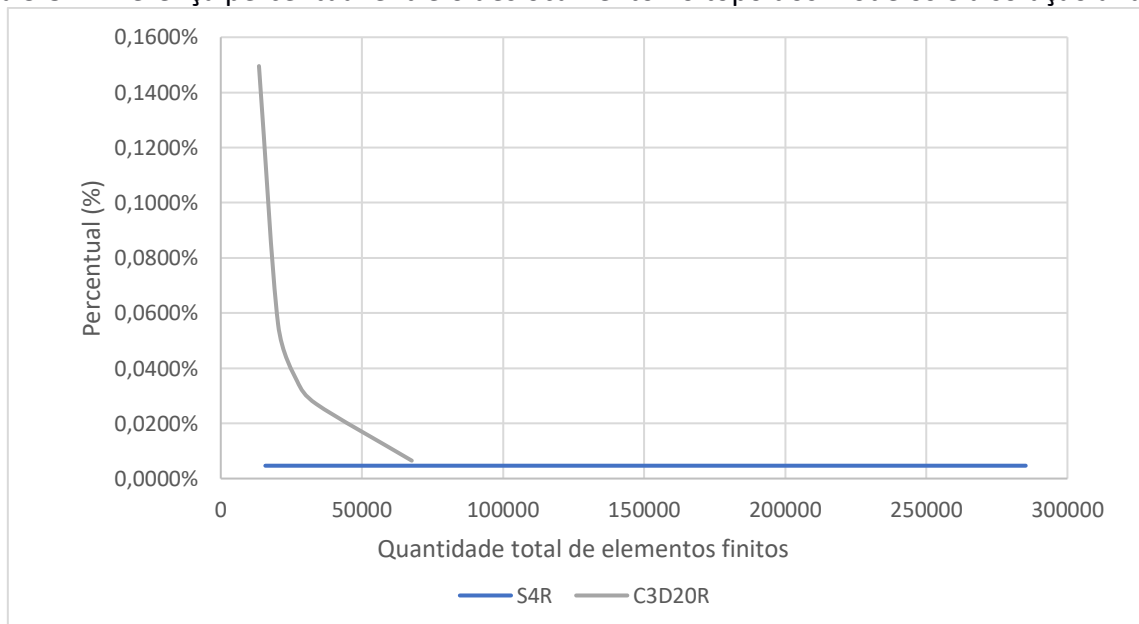
Figura 5.7 – Campo de deslocamentos utilizando o elemento S4R.



Fonte: Autor.

Observando os gráficos, percebe-se que os elementos S4R e C3D20R apresentam resultados bastante similares à solução analítica, enquanto os modelos utilizando o elemento C3D8R necessitam de um maior refinamento da malha. A Figura 5.8 apresenta a comparação do desempenho dos elementos S4R e C3D20R em relação ao deslocamento no topo do modelo avaliado.

Figura 5.8 – Diferença percentual entre o deslocamento no topo dos modelos e a solução analítica.



Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 5.8 que os resultados obtidos utilizando os elementos finitos de casca S4R e sólido C3D20R apresentam boa aproximação com a solução analítica. O modelo utilizando elementos de casca S4R nas simulações apresentam resultados melhores, além de possuir custo computacional bastante reduzido em relação ao elemento C3D20R.

### 5.1.2. Efeito Balão

A análise anteriormente realizada contemplou apenas o carregamento de peso próprio e uma tensão axial que compense os deslocamentos impostos pelos efeitos térmicos e balão. Conhecendo os perfis de pressão externa e interna, é possível aplicar tais carregamentos ao modelo e verificar o comportamento dos deslocamentos.

Utilizando os perfis de pressão apresentados na Figura 4.4 e detalhados nas Equações 4.2 e 4.3, além dos dados do tubular apresentados no Quadro 4.4, são realizadas diversas simulações utilizando os elementos especificados no Quadro 4.6. Para avaliar a coerência dos resultados, são inicialmente avaliados os deslocamentos obtidos no topo do tubular em cada simulação e comparados com os resultados obtidos nas equações analíticas apresentadas neste trabalho.

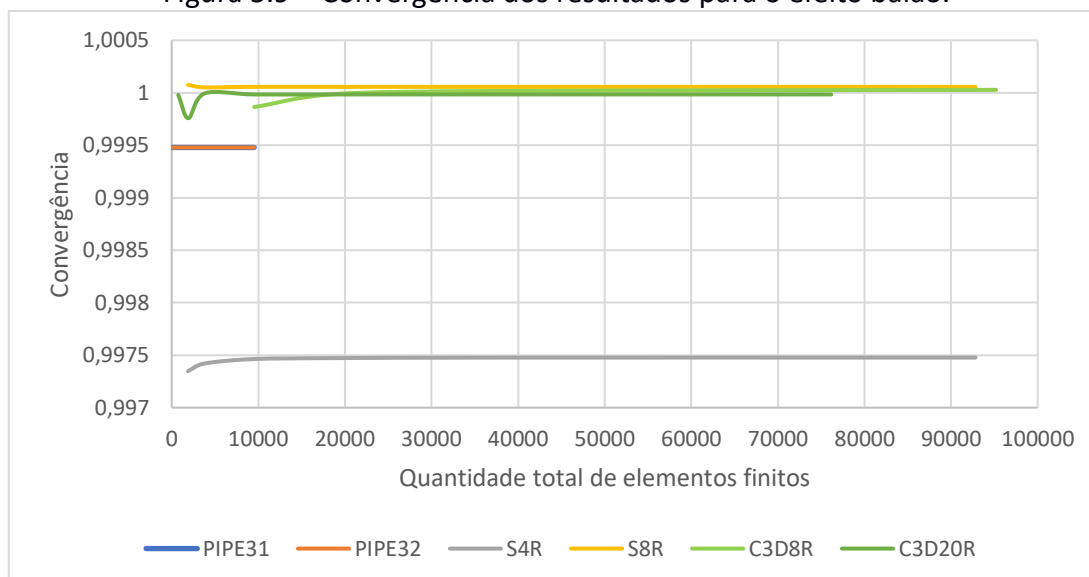
Observando a análise realizada na seção 5.1.1, o refinamento de malha adotado ao longo da seção transversal é de 40 subdivisões. Esse nível de refinamento é escolhido para poder avaliar tanto o elemento finito sólido como o elemento finito de casca, utilizando as funções de interpolação linear e quadrática. Dessa forma, pode-se observar o comportamento do modelo variando o comprimento dos elementos finitos na direção longitudinal, ou seja, ao longo da direção do eixo do poço.

O elemento *pipe*, de natureza unidimensional, tem apenas um elemento que representa a seção transversal do poço avaliado.

O modelo utilizado considera o tubular livre do topo, havendo a liberdade no deslocamento. Para avaliar o comportamento de cada elemento finito no estudo do efeito balão, é calculado o deslocamento total no topo do tubular devido ao efeito das pressões e do peso próprio atuando em conjunto, e é avaliada a convergência dos resultados utilizando as simulações realizadas.

Os resultados alcançados utilizando os elementos finitos selecionados apresentam boa aderência, aproximando-se bem dos resultados analíticos, como mostra a Figura 5.9. Essa figura apresenta um gráfico de convergência, onde o eixo vertical indica a razão entre o deslocamento total obtido nas simulações numéricas e o deslocamento calculado utilizando as equações analíticas, de forma que 1 significa a equivalência entre os resultados. O eixo horizontal do gráfico contém a quantidade total de elementos finitos dos modelos em questão.

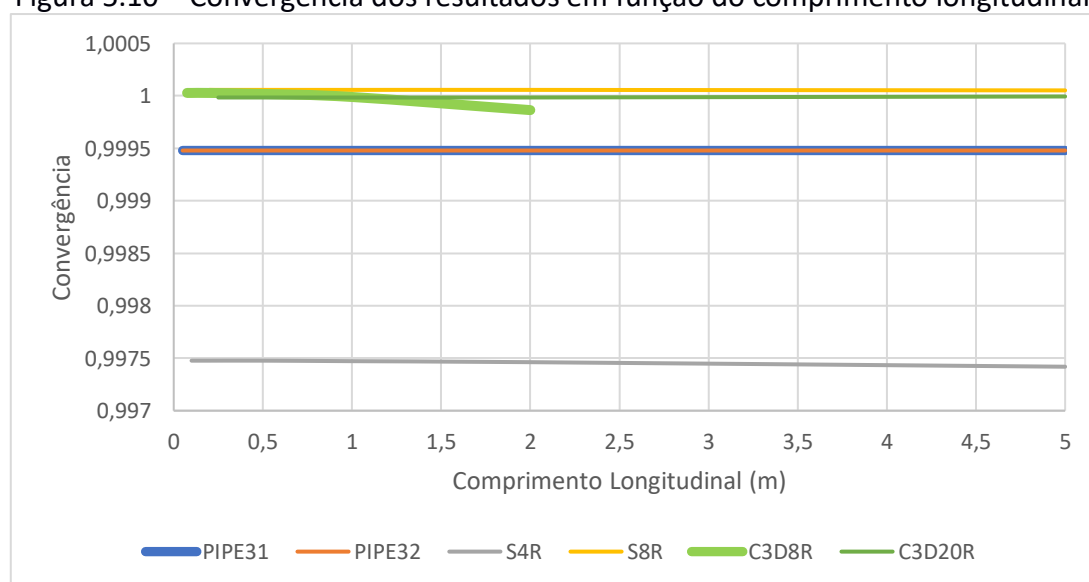
Figura 5.9 – Convergência dos resultados para o efeito balão.



Fonte: Autor.

Uma vez que o número de elementos finitos é mantido ao longo da seção transversal dos modelos, o refinamento de malha total é modificado variando-se o comprimento longitudinal dos elementos do modelo. A Figura 5.10 apresenta a convergência dos resultados em função do comprimento longitudinal dos elementos. Ao contrário da Figura 5.9, quanto menor o comprimento longitudinal mais elementos existem no comprimento do modelo, portanto, mais refinada está a malha. Os elementos finitos utilizados apresentam boa convergência mesmo com elementos de grandes dimensões em sua malha, como ilustra a Figura 5.10. Já o elemento sólido C3D8R, como observado na análise preliminar feita em 5.1.1, necessita de um maior refinamento de malha para alcançar bons resultados, não sendo realizadas modelagens com elementos finitos de grandes dimensões longitudinalmente.

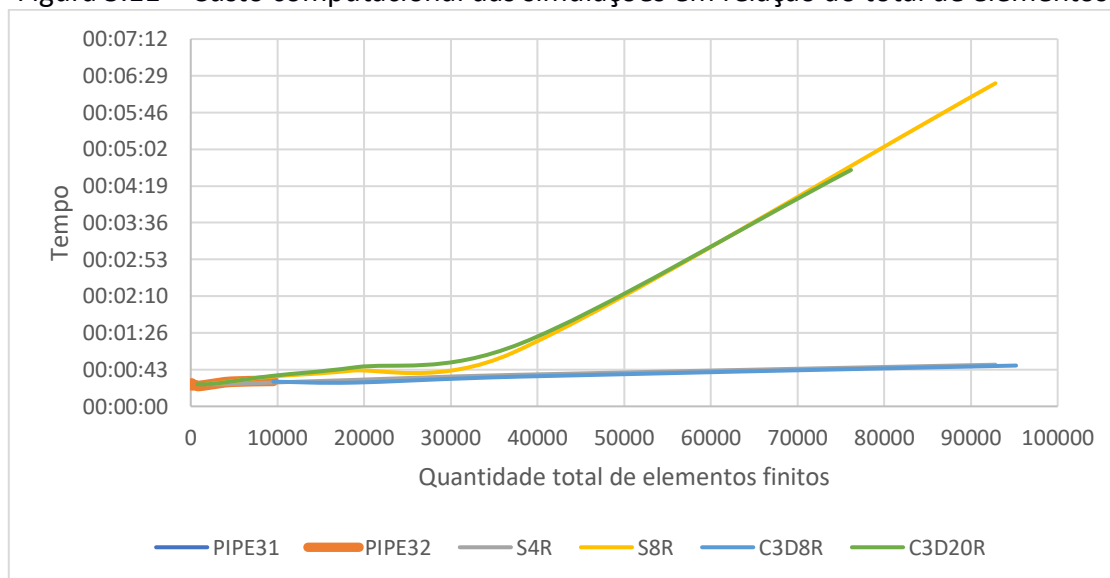
Figura 5.10 – Convergência dos resultados em função do comprimento longitudinal.



Fonte: Autor.

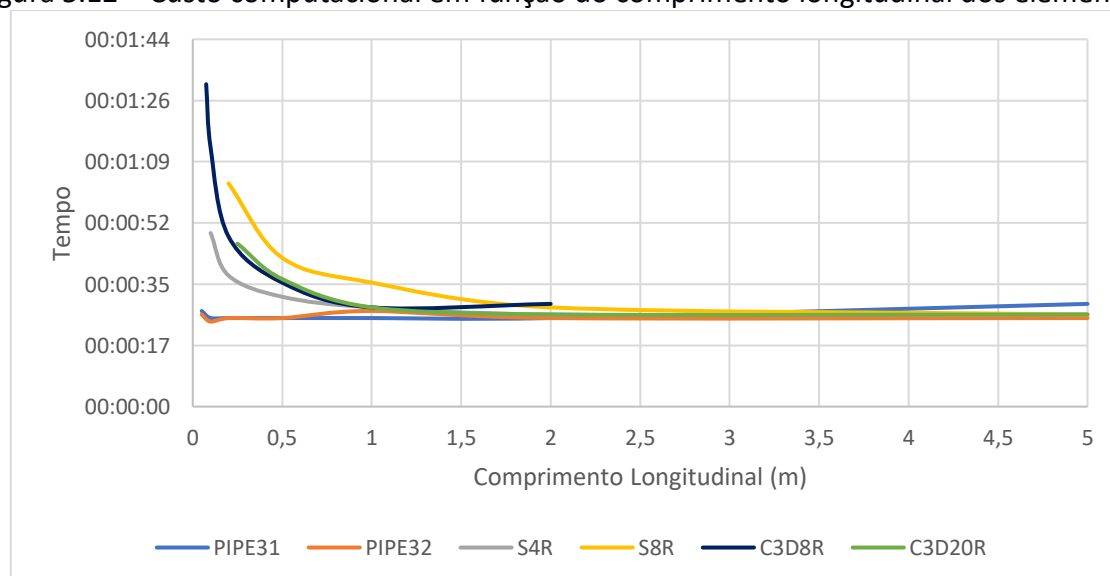
Observa-se boa convergência de todos os elementos, mostrando-se adequados para o estudo do efeito balão. Observa-se que os elementos *pipe* tem uma quantidade inferior de elementos finitos em suas malhas, mesmo utilizando uma modelagem mais refinada, pois para descrever a seção transversal é necessário apenas um elemento finito deste tipo. Dessa forma, realiza-se a análise do custo computacional em função da quantidade total de elementos finitos da malha de cada modelo. Todas as análises são realizadas em um computador pessoal modelo Samsung Book X50, processador Intel Core i7 10ª geração, com 8GB de memória RAM, SSD NVMe M2 256GB, placa de vídeo dedicada MX110 2GB. As Figuras 5.11 e 5.12 detalham o tempo de processamento necessário para a execução de cada simulação.

Figura 5.11 – Custo computacional das simulações em relação ao total de elementos.



Fonte: Autor.

Figura 5.12 – Custo computacional em função do comprimento longitudinal dos elementos.



Fonte: Autor.

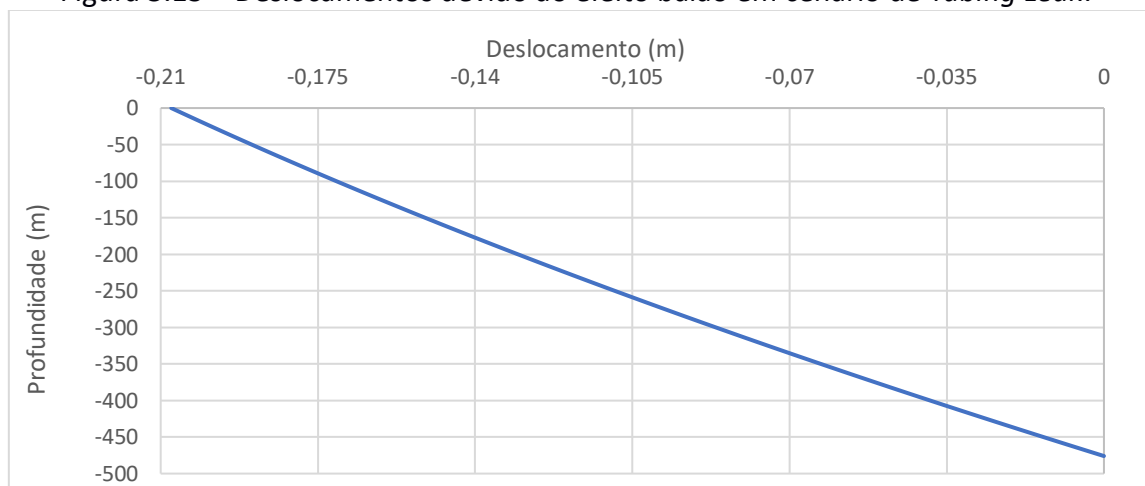
Observa-se que os elementos *pipe* apresentam baixo custo computacional em

relação aos demais, exatamente por apresentarem quantidade de nós bastante inferior, como observado na Figura 4.9. Já entre os elementos sólidos e de casca, observa-se que os elementos que utilizam função de interpolação quadrática têm um grande aumento de custo computacional quando se trata de malhas mais refinadas.

Após validação dos modelos observando bons resultados, entende-se que os elementos são aplicáveis e podem ser utilizados para avaliação do efeito balão. A escolha por cada um dos elementos deve ser feita de acordo com a necessidade de resultados. O elemento finito *pipe* apresenta o menor custo computacional, podendo ser utilizado para a análise de tensões axiais ao longo do comprimento do tubular. Os elementos de casca discretizam a superfície média da seção transversal, então também apresentam resultados ao longo da circunferência do tubular, em troca do aumento do custo computacional para realizar as simulações. Os elementos sólidos discretizam completamente toda a seção transversal, apresentando bons resultados ao longo da espessura da parede do tubular. Porém, também demanda um maior tempo de execução das simulações. Neste contexto, dependendo do tipo de estudo a ser realizado, pode-se escolher o elemento finito mais adequado. Na continuidade deste trabalho, dados os objetivos pretendidos, opta-se pelo uso do elemento *pipe*.

Com os resultados obtidos e os modelos validados, pode-se realizar a análise do cenário proposto por Silva [13] de *Tubing Leak*, sendo um cenário de pressão interna, e também utilizar os mesmos dados para avaliar um cenário de *Full Evacuation* (evacuação total), onde são removidos todos os fluidos internos ao tubular, resultando em um cenário de pressão externa. Esses estudos são realizados utilizando o elemento PIPE32, devido à sua boa convergência e baixo custo computacional. O tubular é modelado utilizando elementos finitos com comprimento longitudinal de 0,2m. Os gráficos ilustrados nas Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os deslocamentos obtidos em cada simulação.

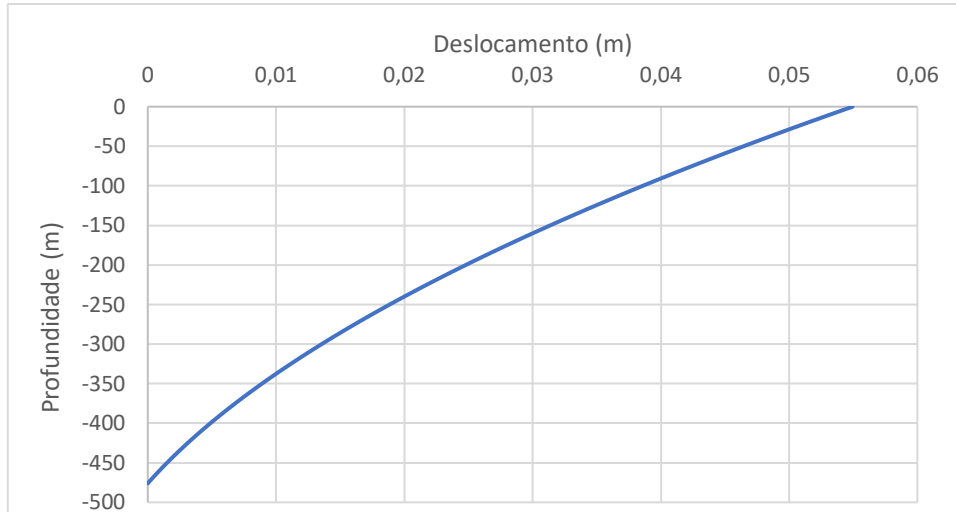
Figura 5.13 – Deslocamentos devido ao efeito balão em cenário de *Tubing Leak*.



Fonte: Autor.

Observa-se nos resultados apresentados na Figura 5.13 deslocamentos negativos ao longo do comprimento do tubular, representando compressão no revestimento devido ao efeito balão no cenário de *Tubing Leak*, que é um cenário de pressão interna.

Figura 5.14 – Deslocamentos devido ao efeito balão em cenário de *Full Evacuation*.

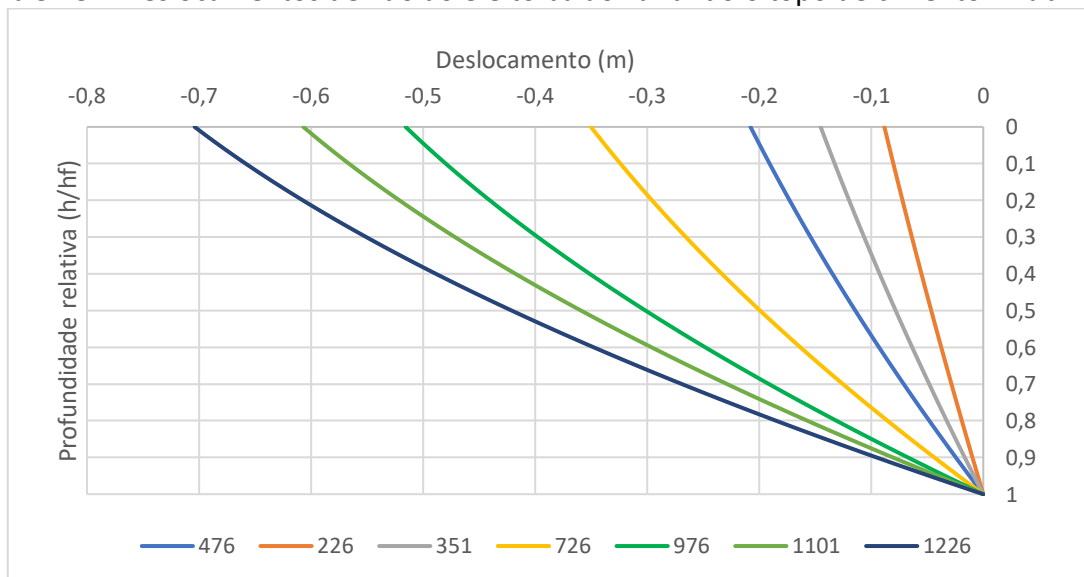


Fonte: Autor.

O cenário de *Full Evacuation*, que é um cenário de pressão externa, apresenta deslocamentos positivos em seu comprimento, como observado na Figura 5.14. Esses resultados representam tração ao longo do tubular.

Utilizando o mesmo cenário, é avaliada também a influência da altura do topo de cimento do tubular, variando seu comprimento longitudinal. Modifica-se o comprimento do tubular, originalmente com 476 metros, para comprimentos maiores e menores modelados na sequência, para se avaliar a influência do comprimento livre nesse cenário. A Figura 5.15 apresenta o comportamento dos deslocamentos para o cenário de *Tubing Leak*, em relação à profundidade relativa  $\frac{h}{h_f}$ , onde 0 representa profundidade  $h = 0$ , sendo então a cabeça do poço, e 1 representa a profundidade máxima do tubular. Observa-se que o quanto maior é o comprimento livre maiores são os deslocamentos.

Figura 5.15 – Deslocamentos devido ao efeito balão variando o topo de cimento – *Tubing Leak*.



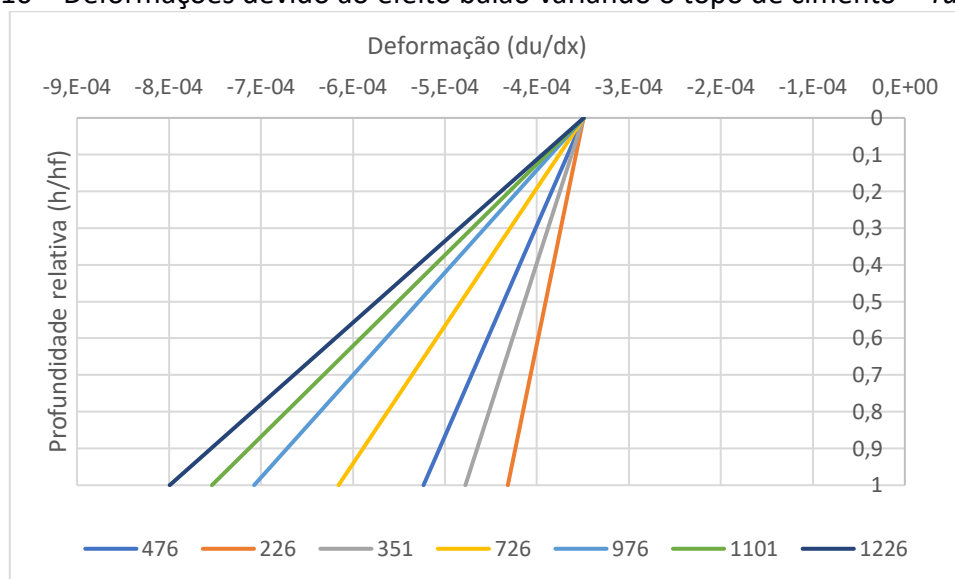
Fonte: Autor.

A Figura 5.15 apresenta os deslocamentos totais em função da profundidade relativa, de modo que se percebe que o comprimento total influencia no deslocamento. Essa relação é esperada, pois observando as relações elásticas da mecânica dos sólidos, detalhada na equação simplificada:

$$u = \frac{FL}{EA}, \quad (5.3)$$

o comprimento  $L$  é diretamente proporcional ao deslocamento. Dessa forma, mantendo constantes a área da seção transversal  $A$ , o coeficiente de elasticidade do material  $E$  e o carregamento axial  $F$ , variando-se o comprimento observa-se também a variação proporcional dos deslocamentos. Desse modo, é avaliada também a deformação  $\frac{du}{dx}$ , onde pode-se observar na Figura 5.16 a influência do comprimento total no efeito balão.

Figura 5.16 – Deformações devido ao efeito balão variando o topo de cimento – *Tubing Leak*.

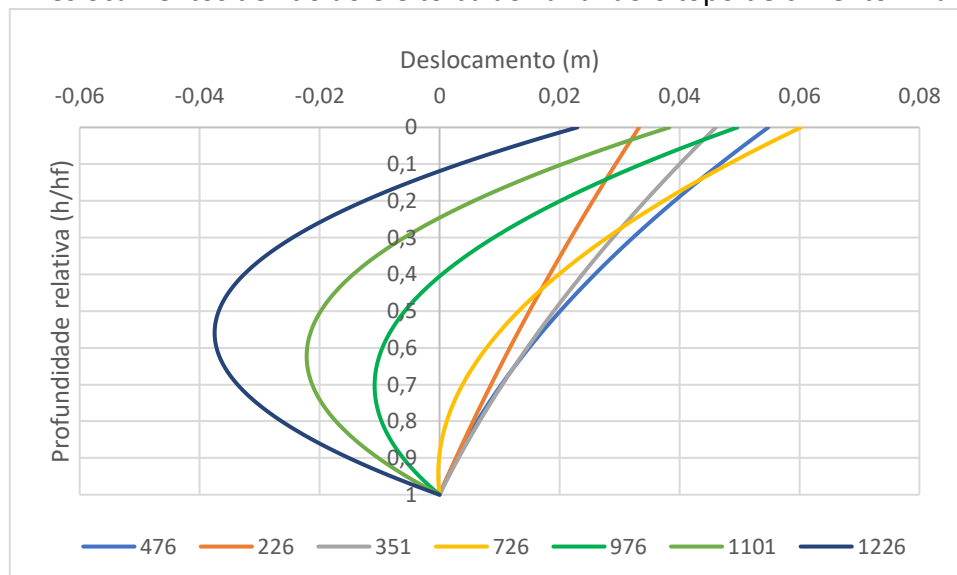


Fonte: Autor.

Percebe-se que com o aumento do comprimento longitudinal a deformação também aumenta, o que indica a influência do efeito balão nas deformações, uma vez que quanto mais profunda a fase, alcança-se pressões maiores, o que passa a influenciar de forma mais pronunciada o comportamento dos deslocamentos do tubular.

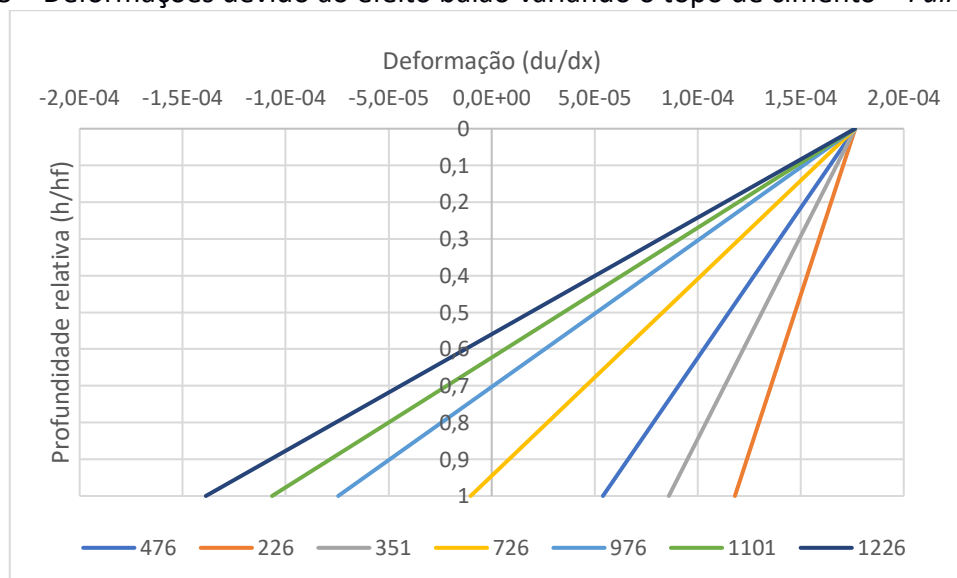
O mesmo estudo é realizado para o cenário de *Full Evacuation*. Os resultados de deslocamentos e deformações são apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18.

Figura 5.17 – Deslocamentos devido ao efeito balão variando o topo de cimento – *Full Evacuation*.



Fonte: Autor.

Figura 5.18 – Deformações devido ao efeito balão variando o topo de cimento – *Full Evacuation*.



Fonte: Autor.

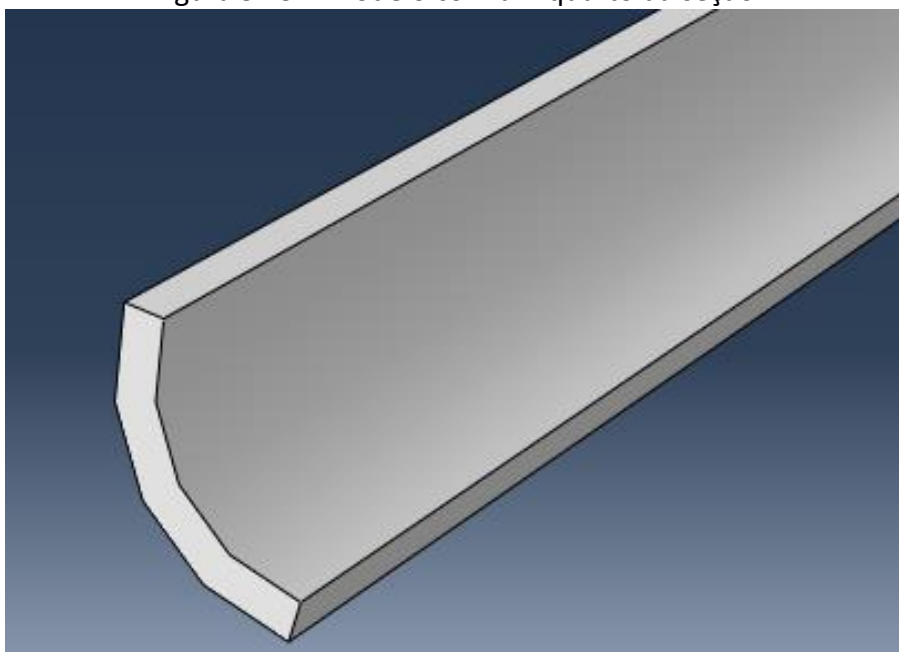
Observa-se que nos tubulares com menor comprimento livre, no cenário de *Full Evacuation*, os deslocamentos são majoritariamente positivos, devido à ação da pressão externa. Com o incremento do comprimento livre, a rigidez axial é reduzida, como observado na Equação 5.3, e os deslocamentos tendem a aumentar em números absolutos. Porém, com o aumento do comprimento tem-se também o aumento do esforço axial associado ao peso próprio em profundidades maiores, o qual, para este caso, gera compressão. Portanto, o aumento do comprimento do tubular reduz as deformações positivas e gera um trecho comprimido. Entende-se que quanto maior for o comprimento axial do tubular, o peso próprio tende a assumir o protagonismo nas deformações.



### 5.1.3. Modelagem com parte da seção transversal

Como observado em Neves [8] e Silva [9], para um problema axissimétrico é possível modelar apenas parte da seção transversal para se reduzir o custo computacional. É realizada essa avaliação utilizando o comprimento total do tubular e avaliando o efeito balão com um quarto da seção transversal modelada, como ilustra a Figura 5.19.

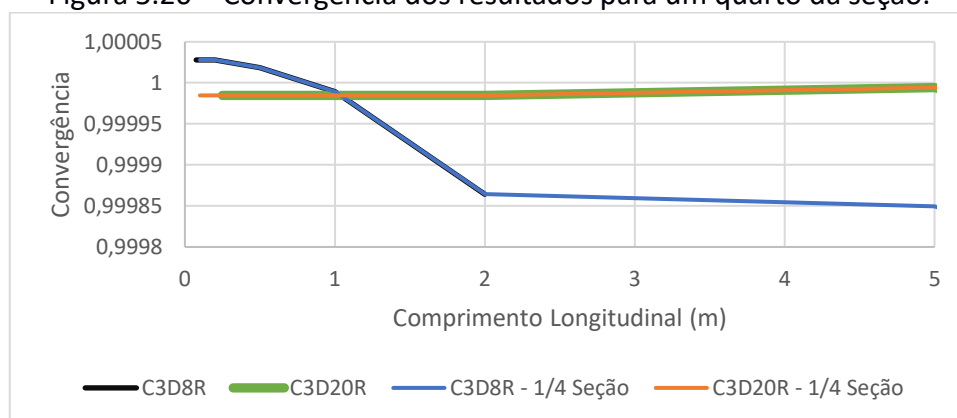
Figura 5.19 – Modelo com um quarto da seção.



Fonte: Autor.

O elemento finito sólido é utilizado para realizar essa avaliação, sendo mantidas as características geométricas e condições de contorno estabelecidas em 5.1.2, adaptando-as para o modelo atual. Com 40 subdivisões na seção transversal completa, um quarto da seção possui 10 subdivisões, e os comprimentos longitudinais são preservados para realizar a análise. A Figura 5.20 apresenta os resultados de convergência dos resultados comparando a seção completa e um quarto da seção.

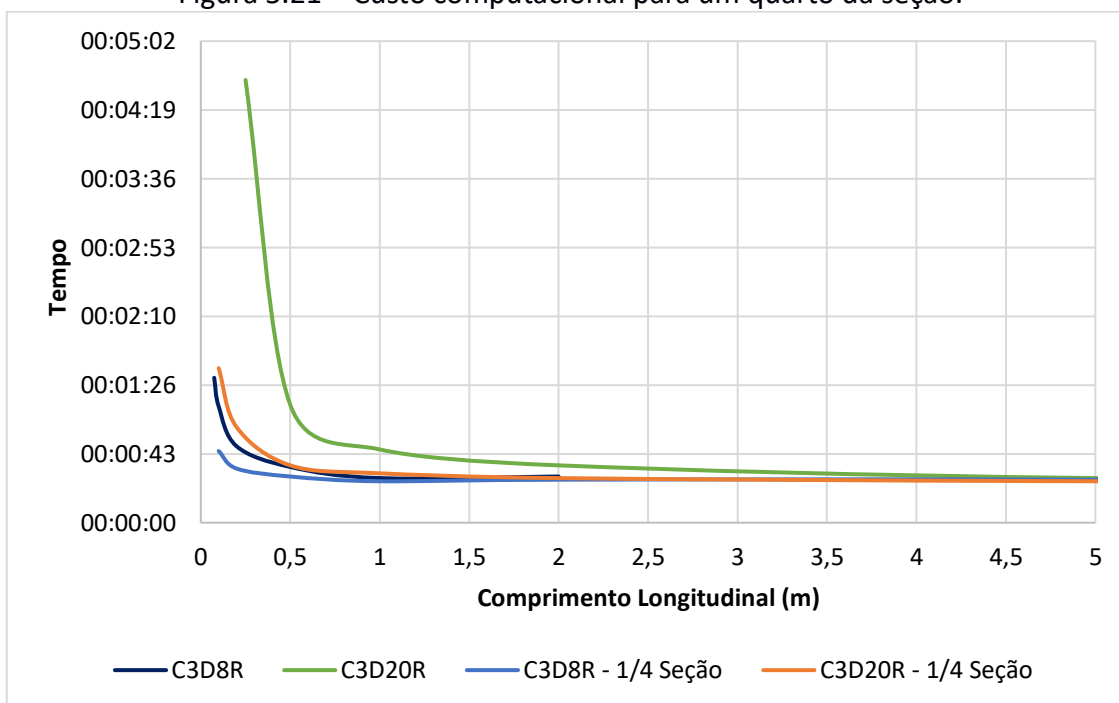
Figura 5.20 – Convergência dos resultados para um quarto da seção.



Fonte: Autor.

Observando a boa convergência, entende-se que esta modelagem pode ser realizada como alternativa à modelagem com seção completa, por reduzir a quantidade total de elementos finitos, reduzindo, portanto, o custo computacional da simulação. A Figura 5.21 mostra que existe uma redução no tempo necessário para realizar as simulações, sendo essa modelagem parcial uma boa alternativa para evitar análises custosas computacionalmente e apresentar bons resultados.

Figura 5.21 – Custo computacional para um quarto da seção.



Fonte: Autor.

#### 5.1.4. Efeito Pistão

Para se adicionar o efeito pistão e avaliar os resultados do modelo, é adotada uma mudança na seção transversal do revestimento de produção do poço avaliado por Liu [25], utilizado no primeiro cenário. Inicialmente, o tubular possuía diâmetro externo  $D_{e1} = 0,244m$  e diâmetro interno  $D_{i1} = 0,22m$ , e considerou-se que houve uma redução em sua seção transversal na metade de seu comprimento total, possuindo então diâmetro externo  $D_{e2} = 0,22m$  e diâmetro interno  $D_{i2} = 0,1946m$ . Observa-se que o novo diâmetro interno deve ser maior que o diâmetro externo da fase seguinte. Para esse caso, a coluna de produção possui  $D_{eCP} = 0,114m$ , portanto existe uma folga adequada entre os tubulares adjacentes.

A conexão entre os tubulares deve ser observada com cuidado, visto que é um elemento adicional que deve realizar a transição entre os tubulares e faz parte do revestimento de maneira geral. Com o avanço da tecnologia e da produção dos materiais, pode-se considerar que a conexão é perfeita entre ambos, ou seja que a interferência da mesma na geometria do tubular não é significativa. A Figura 5.22 ilustra

a esquematização de uma conexão entre dois elementos tubulares.

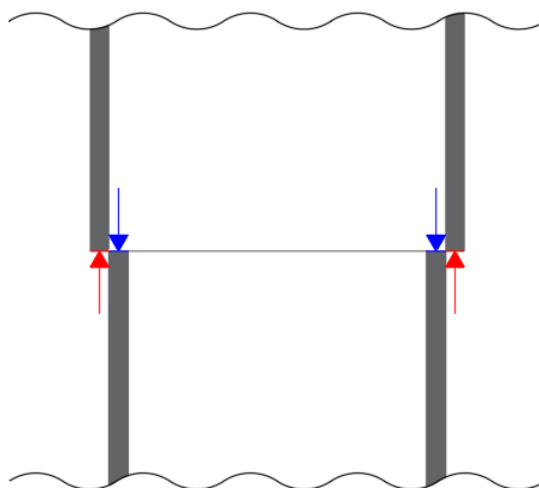
Figura 5.22 – Conexão entre elementos tubulares.



Fonte: Adaptado de Silva [19].

Para utilização no modelo numérico avaliado, é adotada a simplificação ilustrada na Figura 5.23, onde apenas a mudança da seção transversal é considerada, junto com os esforços de pressão atuantes nas seções expostas interna e externamente. O Quadro 5.4 apresenta o cálculo da força resultante a ser aplicada no modelo, a partir dos carregamentos de pressão.

Figura 5.23 – Simplificação da conexão de elementos tubulares de seções diferentes.



Fonte: Autor.

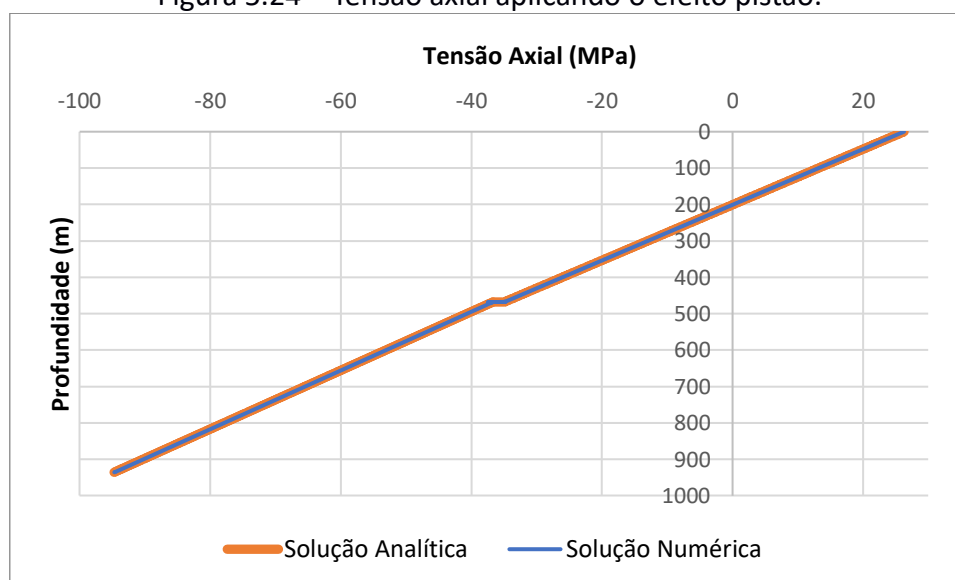
Quadro 5.3 – Carregamento de pressão devido ao efeito pistão.

	Área da Seção ( $A_S$ )  m <sup>2</sup>	Pressão ( $p$ )  N/m <sup>2</sup>	Força atuante ( $F = p * A_S$ )  N	Força resultante ( $F_r = F_e - F_i$ )  N
Seção Externa	$8,746 * 10^{-3}$	4586175	40110,39	2179,7
Seção Interna	$8,271 * 10^{-3}$	4586175	37930,69	

Fonte: Autor.

A Figura 5.24 apresenta os resultados obtidos utilizando a modelagem numérica e a solução analítica do problema. Observa-se a concordância entre os comportamentos de ambos, o que indica uma abordagem adequada da implementação do efeito pistão no modelo numérico utilizado.

Figura 5.24 – Tensão axial aplicando o efeito pistão.

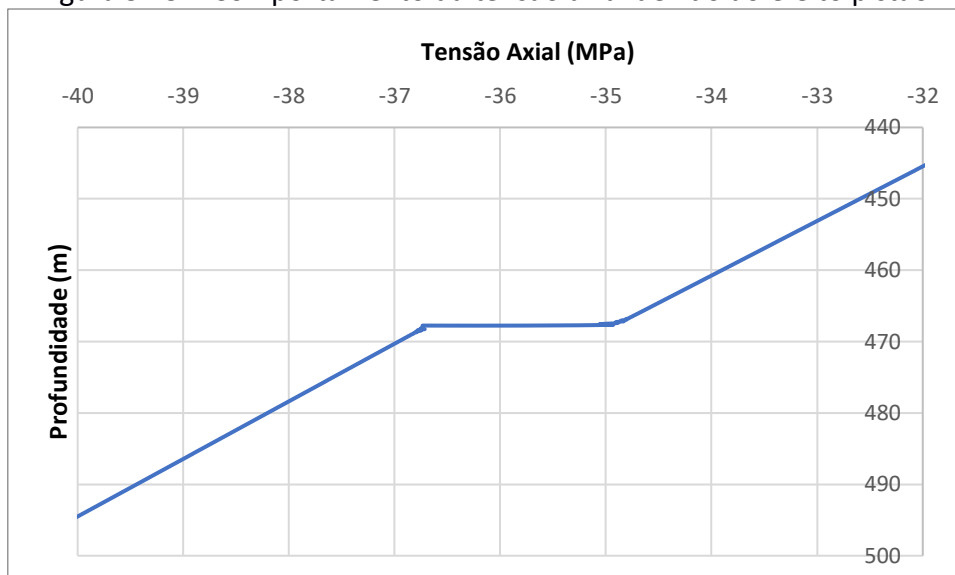


Fonte: Autor.

Observa-se ainda que há um salto no valor de tensão axial atuante no tubular. Logo após o ponto de aplicação do carregamento proveniente do efeito pistão, como observado na Figura 5.25, há um aumento significativo na intensidade da tensão.

Pelo cálculo realizado no Quadro 5.3, o efeito pistão incrementa a tensão axial de tração, o que significa um alívio pontual da compressão exercida sobre o corpo do tubular. Apesar disso, existe uma redução na área da seção transversal, o que representa um aumento na concentração de tensões, seja de tração ou compressão, uma vez que a tensão axial é calculada a partir da Equação 5.2. Portanto, para o caso em questão, como a área da seção é reduzida, a tensão aumenta de intensidade.

Figura 5.25 – Comportamento da tensão axial devido ao efeito pistão.



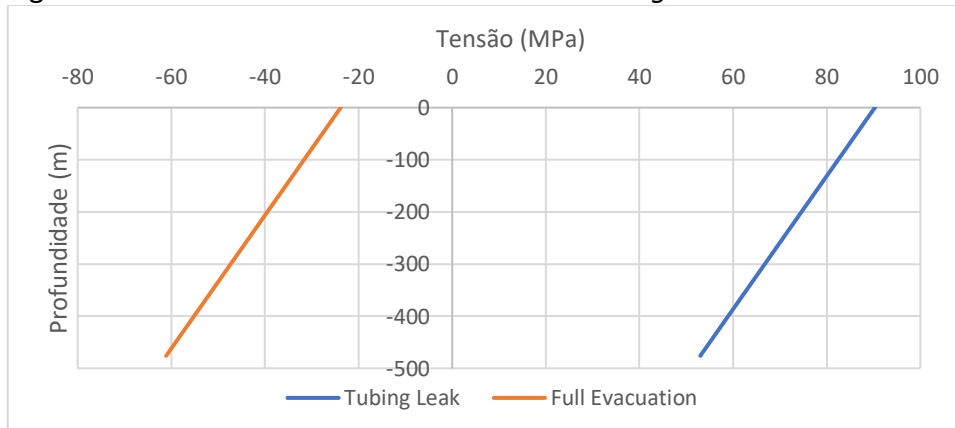
Fonte: Autor.

## 5.2. Verificação da integridade

Para a verificação da integridade do tubular, é necessário inicialmente obter o campo de tensões. Utilizando os modelos validados, modificam-se as condições de contorno, para considerar o travamento que existe na cabeça do poço, adicionando restrições de movimento no topo dos modelos, obtendo o campo de tensões a partir das novas simulações realizadas. Posteriormente, calcula-se a penalização do limite de escoamento utilizando a Equação 2.28, e finalmente calcula-se a resistência ao colapso do tubular utilizando as metodologias de cálculo descritas na subseção 2.3.3.

### 5.2.1. Equacionamento da API/TR 5C3

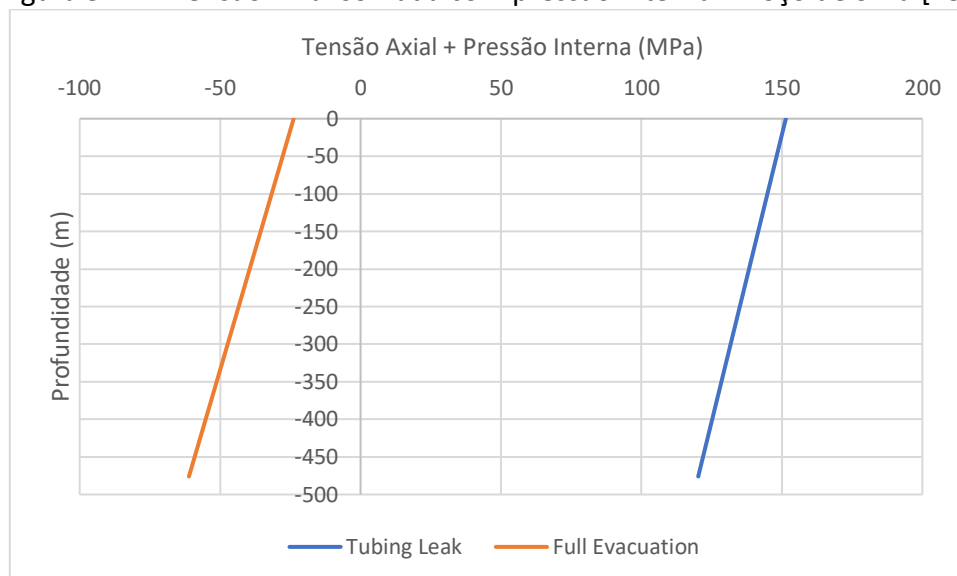
O primeiro resultado avaliado é o campo de tensões axiais, obtidos diretamente do relatório de resultados gerado pela simulação numérica dos modelos, utilizando cenários de *tubing leak* e *full evacuation* apresentados na subseção 5.1.2. Os resultados são apresentados na Figura 5.26.

Figura 5.26 – Tensões axiais nos cenários de *Tubing Leak* e *Full Evacuation*.

Fonte: Autor.

Para aplicar na equação de penalização do limite de escoamento, soma-se as tensões axiais com a pressão interna, quando aplicável, e obtém-se o gráfico apresentado na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Tensão Axial somada com pressão interna – Poço de Silva [13].



Fonte: Autor.

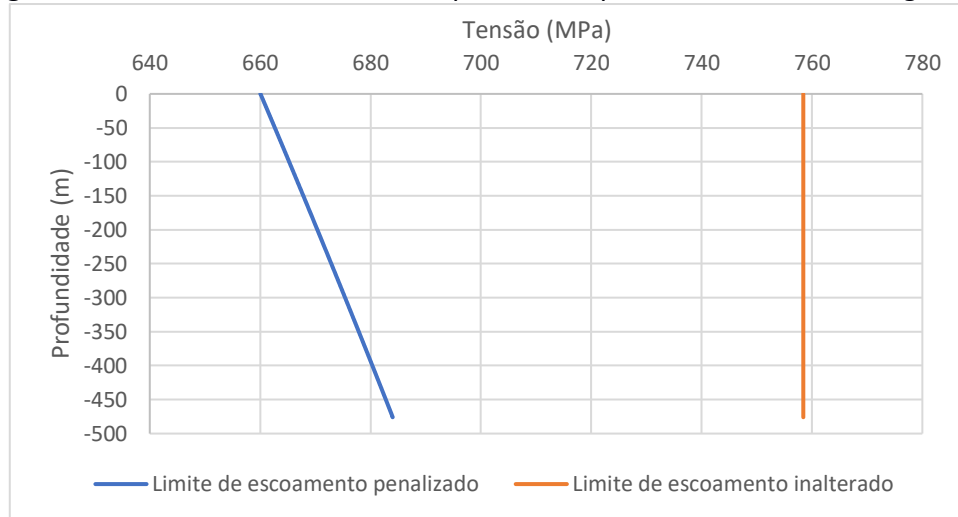
A penalização do limite de escoamento, segundo a API/TR 5C3, limita-se a trechos onde a soma de pressão interna com tensão axial é positiva. Dessa forma, o cenário de *Full Evacuation* pode ser desconsiderado, uma vez que a tensão axial é negativa, representando compressão, e somada com a pressão interna aplicada no tubular apresenta resultados negativos ao longo de todo o comprimento do tubular. Entende-se que o limite de escoamento não é penalizado para o cenário de *Full Evacuation*, e considera-se para a sequência desse estudo apenas o cenário de *Tubing Leak*.

#### 5.2.1.1. Cálculo da penalização do limite de escoamento

Utilizando a Equação 2.28 e os resultados apresentados na Figura 5.27, calcula-se o limite de escoamento já penalizado do material. A Figura 5.28 apresenta os valores do limite de escoamento de acordo com a profundidade do tubular.

Como citado na subseção 5.2.1, a penalização reduz-se a 0 no momento em que a soma da tensão axial e da pressão interna assume valores inferiores a 0 ( $\sigma_z + p_i < 0$ ), que é a condição para invalidar a Equação 2.28 e utilizar apenas o valor original do limite de escoamento do material utilizado.

Figura 5.28 – Limite de escoamento penalizado para o cenário de *Tubing Leak*.



Fonte: Autor.

### 5.2.1.2. Cálculo da resistência ao colapso

A aplicação conjunta de tensão axial e pressão interna, afeta a resistência do tubular em cenários de colapso. Para se realizar a verificação da integridade, deve-se aplicar a metodologia apresentada na Seção 2.3.3, substituindo o limite de escoamento do material pelo limite de escoamento penalizado calculado na Seção 5.2.2. A Figura 5.29 ilustra o comportamento da resistência ao colapso do tubular avaliado ao longo da profundidade. As resistências dos dois cenários são diferentes, o cenário de *Tubing Leak* apresenta a resistência associada à curva da resistência ao colapso penalizada, já o cenário de *Full Evacuation* se associa à resistência ao colapso inalterada.

Figura 5.29 – Resistência ao colapso no cenário de *Tubing Leak*.

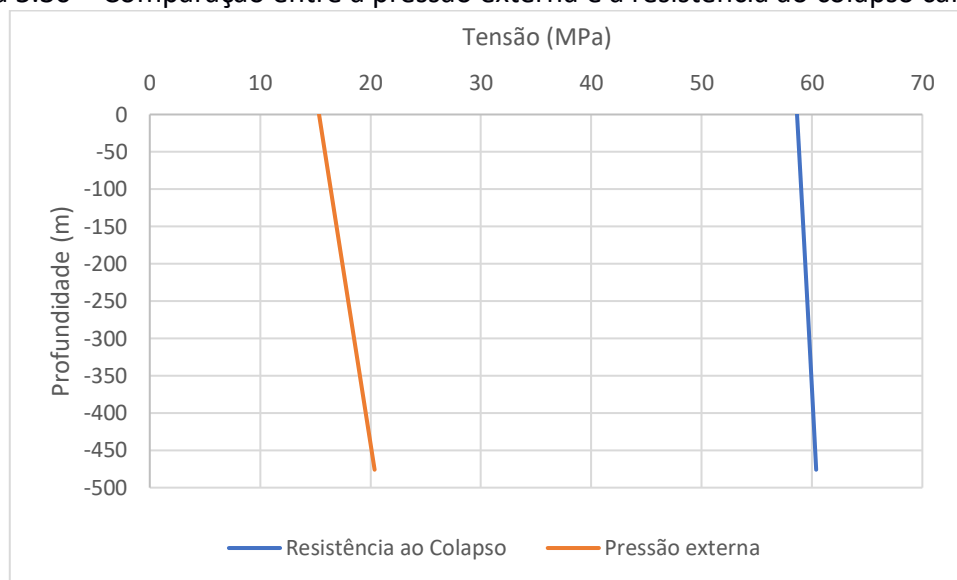


Fonte: Autor.

Observa-se que a resistência ao colapso penalizada é variável de acordo com a

profundidade do tubular. Isso se deve ao fato de que a soma da tensão axial e da pressão interna ( $\sigma_z + p_i$ ) é variável ao longo do comprimento do tubular. Esse perfil afeta diretamente o cálculo do limite de escoamento penalizado, e que, por sua vez, afeta diretamente o cálculo da resistência ao colapso. Observa-se na Figura 5.30 que apesar de se considerar a resistência penalizada, a pressão externa experimentada pela fase, detalhada na Figura 4.4, não excede a resistência calculada.

Figura 5.30 – Comparação entre a pressão externa e a resistência ao colapso calculada.



Fonte: Autor.

### 5.2.2. Modelo de resistência de *Klever-Tamano*

O modelo de *Klever-Tamano* estima a resistência ao colapso de tubulares e já é utilizado como critério de dimensionamento para revestimentos de poços. As Equações 2.23 a 2.26 apresentam o cálculo da estimativa da resistência e os resultados são apresentados no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Resistência ao colapso pelo modelo de *Klever-Tamano*.

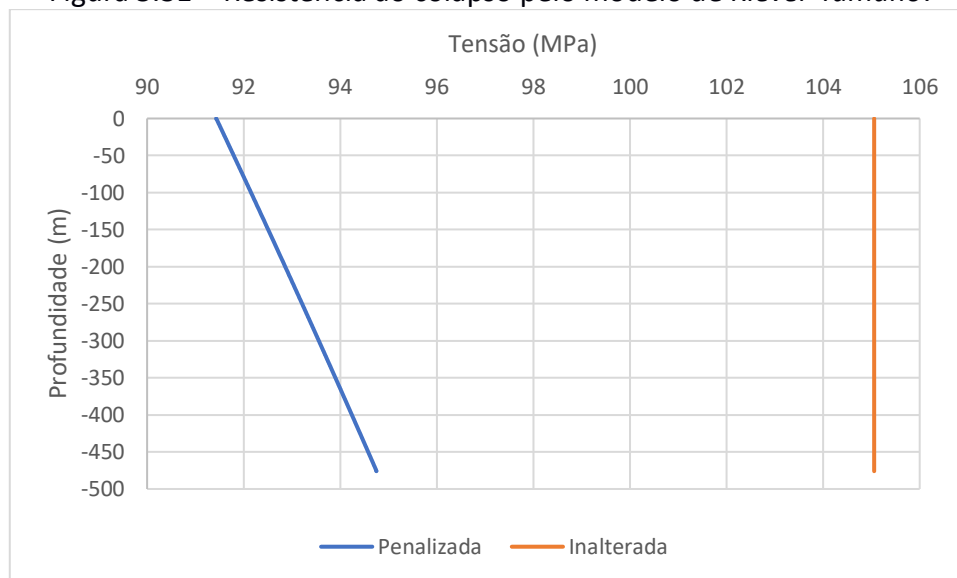
$P_{CEu}(MPa)$	$P_{CYu}(MPa)$	$H_t(MPa)$	$P_c = P_{KT}(MPa)$
175,8914	105,0574	0	105,0574

Fonte: Autor.

Observa-se pelos resultados obtidos que o modelo de *Klever-Tamano* estima que a resistência ao colapso é maior do que os equacionamentos apresentados na normativa API/TR 5C3 [1]. Observa-se também que é possível integrar a Equação 2.28 às equações de *Klever-Tamano*, calculando a estimativa de resistência do tubular considerando a penalização do limite de escoamento devido à presença de tensões axiais e pressão interna. Como observado na Figura 5.29, apenas o cenário de *Tubing Leak* apresenta  $\sigma_z + p_i > 0$ , portanto, a resistência ao longo do comprimento do tubular para este cenário apresenta-se como ilustrado na Figura 5.31.



Figura 5.31 – Resistência ao colapso pelo modelo de *Klever-Tamano*.



Fonte: Autor.

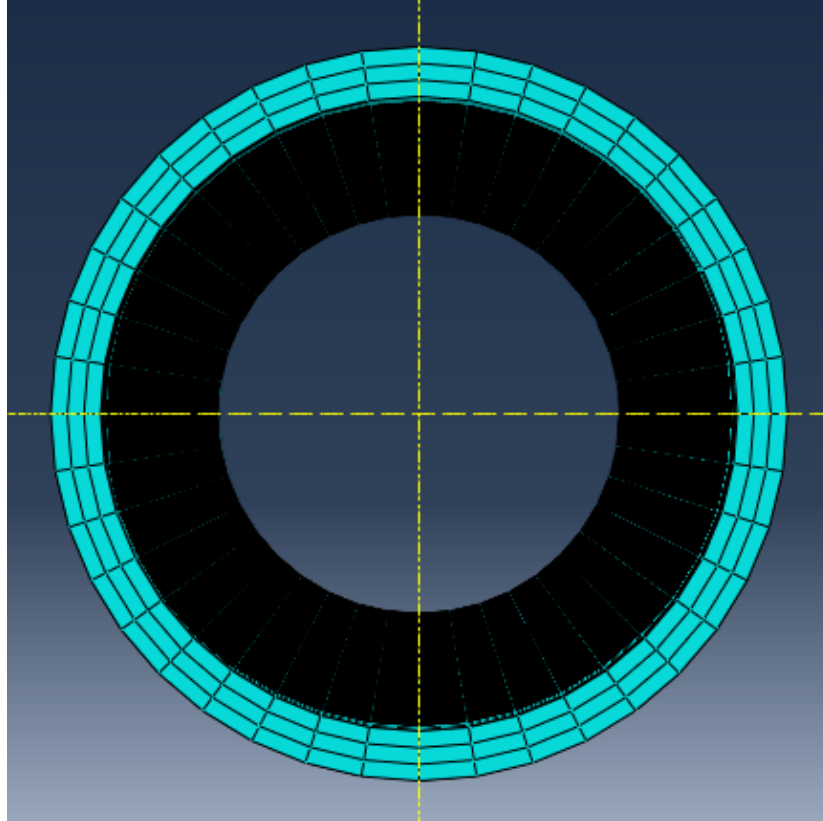
### 5.2.3. Critério triaxial de *von Mises*

Utilizando o critério triaxial de *von Mises*, foi observado o campo de tensões gerado na simulação numérica, a partir do modelo elaborado utilizando o elemento finito sólido. Foi utilizado este elemento por ser possível observar claramente o comportamento das tensões em todas as direções, uma vez que são necessárias as tensões  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_z$ , respectivamente as tensões radial, circunferencial e axial, para aplicar na Equação 2.27.

#### 5.2.3.1. Campos de tensões

Os campos de tensões obtido nas simulações numéricas são apresentados nesta subseção. Foi necessário inicialmente realizar o estudo de convergência das tensões ao longo da parede do tubular, realizando o refinamento da malha na direção radial. Avaliando o cenário de *Tubing Leak*, foi feita a discretização da malha da mesma forma que no estudo do efeito balão, porém, aumentando a quantidade de subdivisões existentes ao longo da parede do tubular. A discretização na malha na direção circunferencial pode ser observada na Figura 5.2, e percebe-se que entre a parede interna e a parede externa existe apenas um elemento finito discretizando a espessura da parede. A Figura 5.32 apresenta a parede do tubular modelada com três subdivisões na direção radial, sendo possível observar o comportamento das tensões ao longo de toda a parede do tubular.

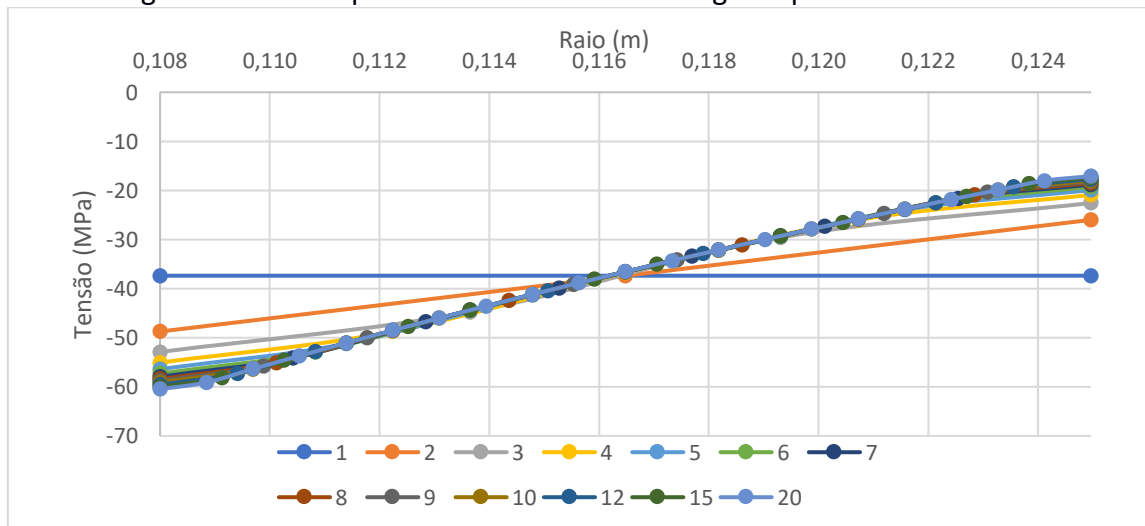
Figura 5.32 – Seção modelada com três subdivisões na direção radial.



Fonte: Autor.

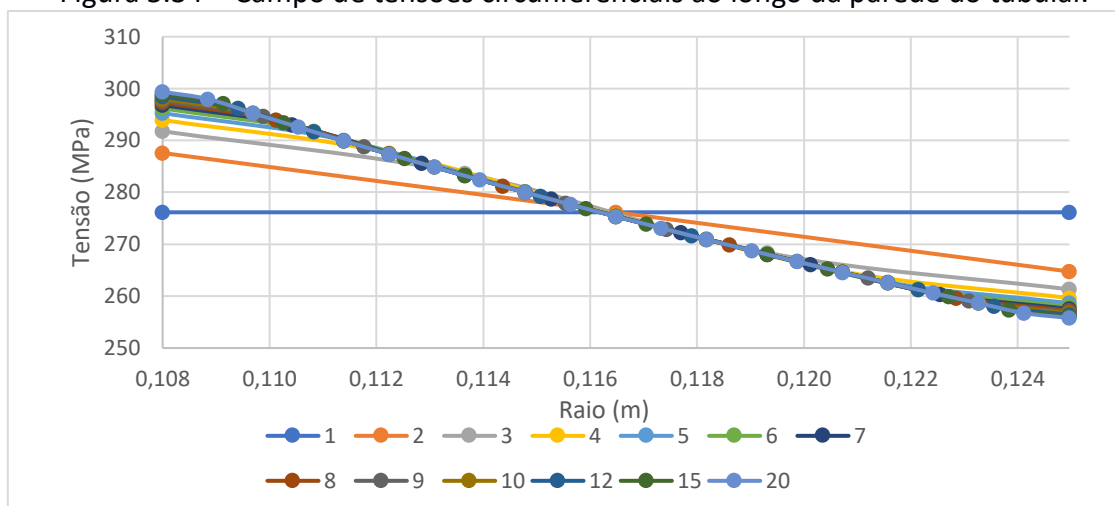
O comportamento dos campos de tensões foi observado variando a quantidade de subdivisões entre um e vinte elementos finitos ao longo da direção radial, aplicando esse refinamento de malha ao longo de todo o comprimento do revestimento avaliado. Para validação do modelo foi definida a metade do comprimento livre do revestimento para obter os resultados. A Figura 5.33 ilustra o campo de tensões  $\sigma_r$ , na direção radial, e a Figura 5.34 apresenta o campo de tensões  $\sigma_\theta$ , na direção circunferencial, ambos em função da quantidade de subdivisões ao longo da parede do tubular.

Figura 5.33 – Campo de tensões radiais ao longo da parede do tubular.



Fonte: Autor.

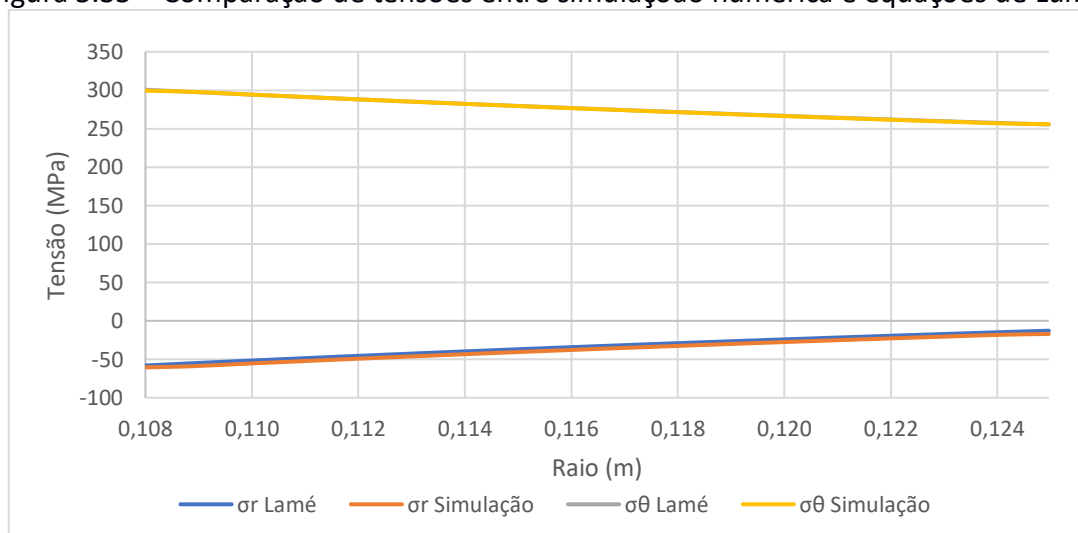
Figura 5.34 – Campo de tensões circunferenciais ao longo da parede do tubular.



Fonte: Autor.

Observa-se pelos campos de tensões obtidos nos resultados que não é possível considerar de maneira correta as tensões com um refinamento de malha pobre. Foi feito o refinamento de malha ao longo da parede do revestimento até obter-se vinte subdivisões na direção radial. A partir desse nível de refinamento de malha é possível observar nitidamente o alto custo computacional para se executar as simulações, visto que a quantidade total de elementos é aumentada significativamente, e observa-se a convergência dos resultados com as equações de Lamé apresentadas na seção 2.2, como ilustrado na Figura 5.35.

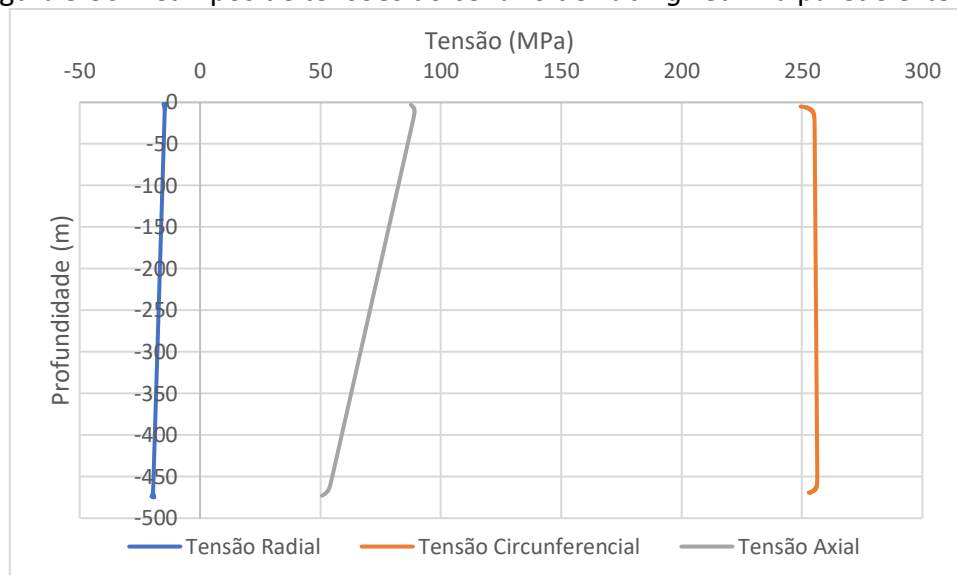
Figura 5.35 – Comparação de tensões entre simulação numérica e equações de Lamé.



Fonte: Autor.

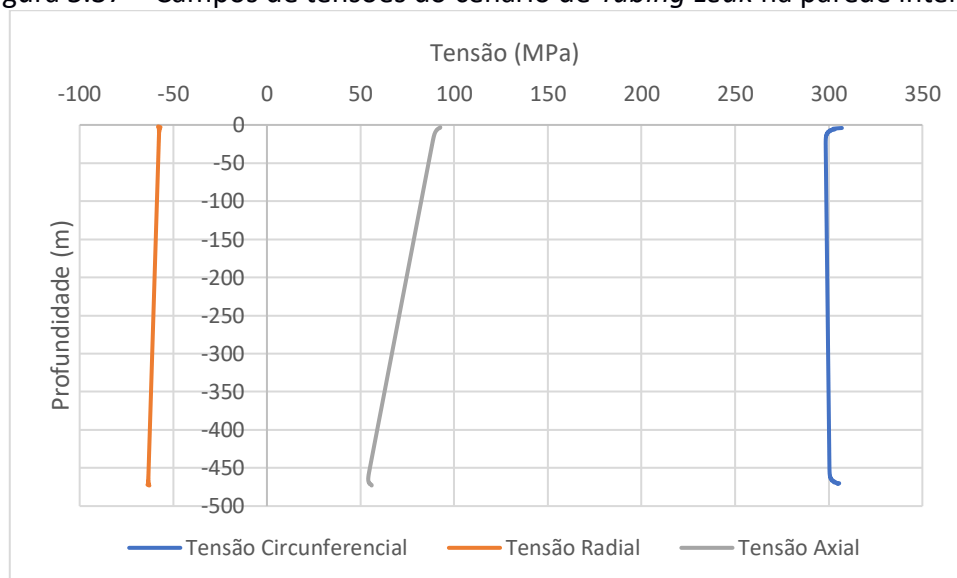
Utilizando o refinamento de malha adotado, realiza-se o estudo das tensões de maneira triaxial, exportando o campo de tensões ao longo de todo o comprimento do tubular. Como pode ser visto nas Figuras 5.33 e 5.34, as tensões variam ao longo da parede do tubular, portanto, foram obtidos resultados nas duas extremidades do revestimento, na parede externa e na parede interna. As Figuras 5.36 e 5.37 apresentam os campos de tensões no cenário de *Tubing Leak*.

Figura 5.36 – Campos de tensões do cenário de *Tubing Leak* na parede externa.



Fonte: Autor.

Figura 5.37 – Campos de tensões do cenário de *Tubing Leak* na parede interna.

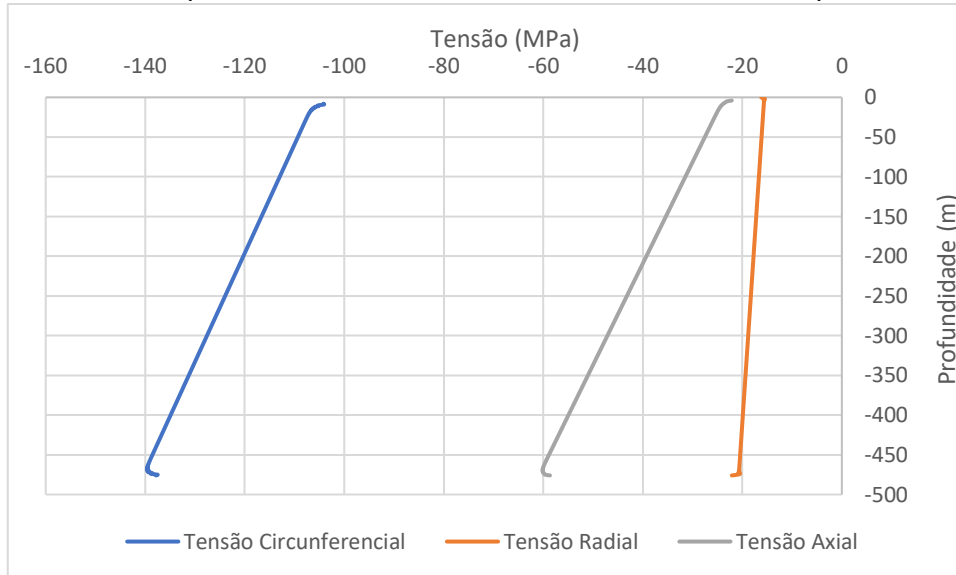


Fonte: Autor.

Observa-se também pelos resultados apresentados que nas proximidades dos apoios existe uma divergência nos valores. Isso acontece devido ao fato de as tensões serem calculadas extrapolando os valores de tensão dos pontos de integração para os nós, portanto podem apresentar tais divergências observadas.

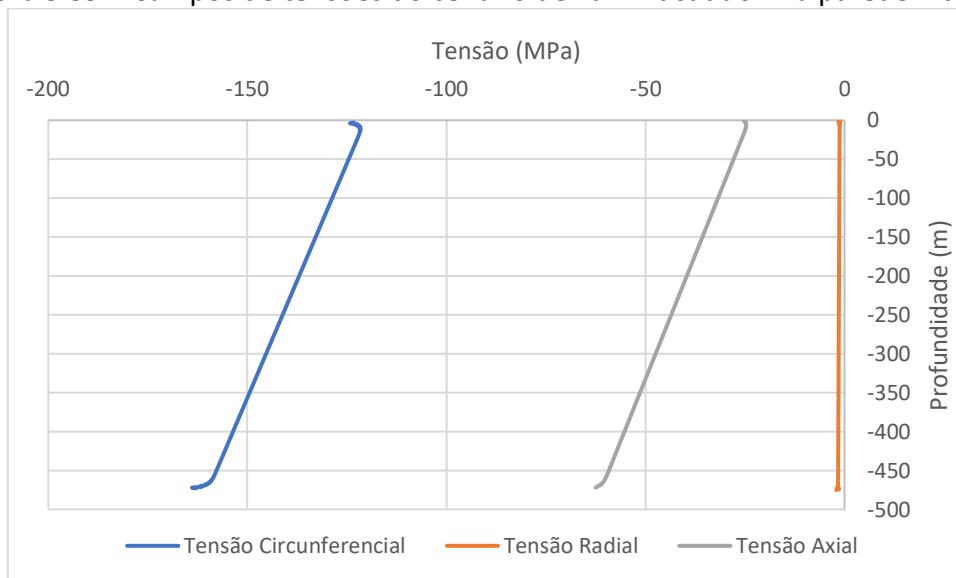
Da mesma forma que as tensões foram obtidas para o cenário de *Tubing Leak*, também foram obtidos para o cenário de *Full Evacuation*, apresentados nas Figura 5.38 e 5.39, sendo respectivamente os resultados de tensões para a parede externa e interna do tubular.

Figura 5.38 – Campos de tensões do cenário de *Full Evacuation* na parede externa.



Fonte: Autor.

Figura 5.39 – Campos de tensões do cenário de *Full Evacuation* na parede interna.



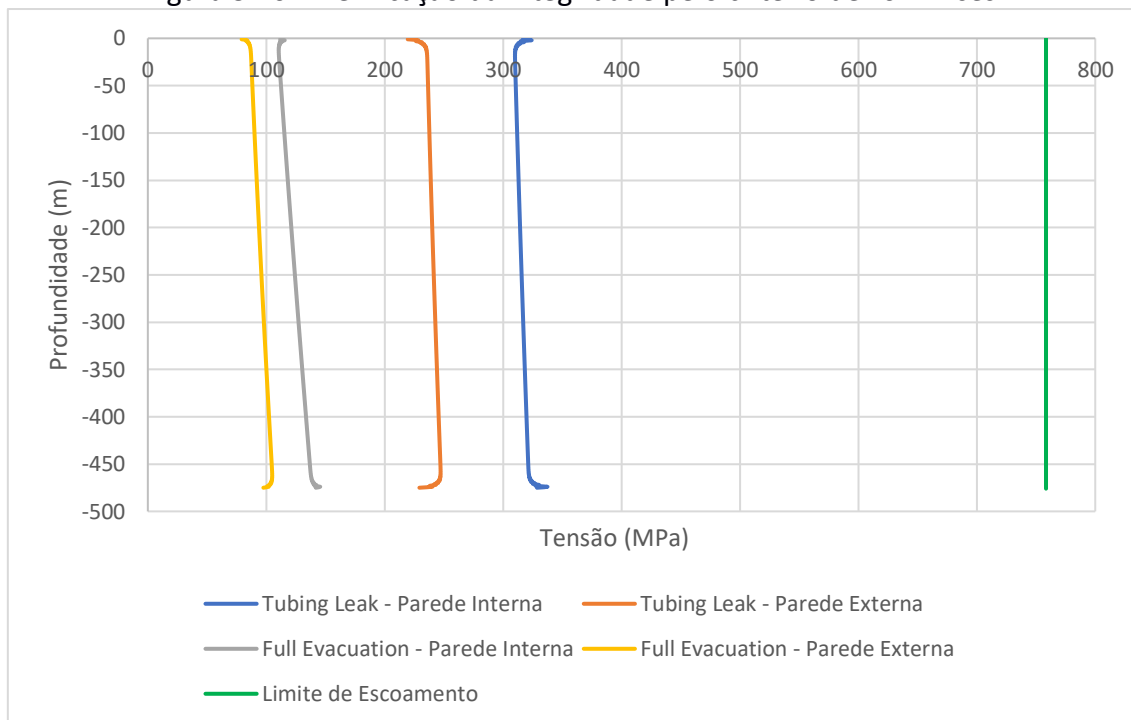
Fonte: Autor.

### 5.2.3.2. Verificação da integridade pelo critério triaxial

Para se realizar a análise do campo de tensões utilizando o critério triaxial, os campos de tensões obtidos na subseção anterior devem ser aplicados na de *von Mises*. Para realização da análise, manipula-se a Equação 2.27 para se obter a equação:

$$f_{ym} > \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_z^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r\sigma_z - \sigma_z\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_r}, \quad (5.4)$$

e os resultados estão apresentados na Figura 5.40.

Figura 5.40 – Verificação da integridade pelo critério de *von Mises*.

Fonte: Autor.

Percebe-se que os ruídos apresentados nos campos de tensões obtidos persistem no cálculo triaxial de tensões. Apesar disso, ambos cenários, nas paredes interna e externa, apresentam boa margem de segurança em relação ao limite de escoamento do material.

## 6. Conclusões e Perspectivas

Este capítulo destina-se a apresentar as conclusões finais, de acordo com os resultados obtidos, e apresentar propostas de estudos futuros visando aprimorar a análise das tensões axiais atuantes em tubulares.

Ao final da execução da metodologia proposta no trabalho, conclui-se que existe uma grande influência da tensão axial aplicada aos tubulares de revestimento no cálculo de sua resistência e, portanto, é importante a sua consideração na verificação da integridade dos revestimentos.

Como observado nos resultados iniciais, os elementos finitos estudados apresentam bons resultados para os estudos em questão, podendo ser utilizados para se avaliar os efeitos propostos pelo trabalho. Cada elemento possui suas peculiaridades na modelagem, além de apresentarem características de simulação e resultados diferentes.

O Quadro 6.1 apresenta as conclusões obtidas a partir das observações feitas sobre cada um dos elementos finitos avaliados.

Quadro 6.1 – Observações sobre elementos finitos.

Elemento Finito	Sólido	Casca	Viga Tubular ( <i>Pipe</i> )
Qualidade dos resultados	Boa	Boa	Boa
Custo computacional	Alto	Alto	Baixo
Quantidade de resultados	Alta	Média	Baixa

Fonte: Autor.

Os elementos finitos *pipe* (viga tubular) apresentam menor custo computacional, tendo a preferência na execução para este trabalho. Porém, em outros estudos pode não apresentar os resultados adequados, uma vez que é modelado unidimensionalmente e seus resultados são obtidos apenas ao longo do comprimento longitudinal.

Os elementos finitos de casca apresentaram um maior custo computacional em relação ao *pipe*, porém pode ser modelado discretizando toda a seção transversal e obtendo resultados ao longo da direção circunferencial da mesma.

Os elementos finitos sólidos também apresentaram elevado custo computacional, porém, a seção transversal é modelada completamente, podendo ser obtidos não só resultados ao longo da direção circunferencial da seção, mas ao longo da espessura da parede do tubular, entre os raios interno e externo. Uma alternativa possível para reduzir o custo computacional é modelar a fase considerando uma análise axissimétrica, modelando apenas parte da seção transversal do tubular, como realizado na Seção 5.1.3.

A consideração dos efeitos térmico e balão pode ser realizada por meio de equações que envolvem os gradientes de temperatura e variações de pressão interna e externa, respectivamente. Para simplificação do sistema e aplicação em um modelo numérico, pode-se considerar que esses efeitos aplicam um deslocamento na cabeça do poço, como equacionado nas Seções 3.4.2 e 3.4.3. Porém, pode-se também encontrar o perfil de pressões atuantes e aplicá-los na simulação numérica, obtendo resultados mais condizentes ao longo do corpo do tubular.

O efeito pistão age no tubular de revestimento como um carregamento localizado, criando uma descontinuidade no campo de tensões. Esse efeito também pode influenciar para tração ou compressão do tubular, a depender da mudança da seção transversal aplicada no revestimento, como exemplificado na Seção 3.4.5.

O comprimento livre do tubular influenciou de formas diferentes em cada cenário. Observou-se que para revestimentos com comprimento longitudinal maior, o peso próprio apresenta maior influência no comportamento dos deslocamentos axiais, porém, a pressão também influencia bastante nesse comportamento e pode assumir o protagonismo para comprimentos livres menores.

## **6.1. Sugestões de trabalhos futuros**

Este trabalho limitou-se a uma análise linear elástica dos tubulares que compõem uma única coluna de revestimento. Porém, esse caso é bastante específico, e podem existir cenários de estudo que envolvam plasticidade e análises de segunda ordem (não-lineares). Portanto, sugere-se a implementação de efeitos geometricamente não-lineares na simulação numérica, assim como a consideração da plasticidade do material. A investigação de flambagem é um dos pontos de interesse. O estudo do comportamento de diferentes fases de revestimento, trabalhando em conjunto a partir, por exemplo, de sua ancoragem no sistema de cabeça de poço, é também possível.

Uma vez que este trabalho se limitou à análise axissimétrica e com a seção dos tubulares isenta de imperfeições, outra sugestão é a avaliação do comportamento das tensões do tubular considerando imperfeições geométricas, como desgaste, ovalização e excentricidade. Dessa forma, avalia-se a redistribuição de tensões ao longo da seção transversal na existência dessas características. Existem trabalhos na literatura que analisam essas imperfeições geométricas em seções específicas do revestimento, pode-se integrar essa análise à modelagem de todo o comprimento da coluna.

Os estudos avaliados por este trabalho limitaram-se a poços verticais, porém, utilizando as equações apresentadas no Capítulo 3 é possível avaliar poços direcionais. Adequações também podem ser feitas para realizar a modelagem numérica de poços inclinados e estudar o comportamento das tensões.

A verificação da integridade a partir do critério triaxial de *von Mises* pode ser realizada com malhas mais refinadas, utilizando equipamentos mais sofisticados e que possam realizar as simulações com mais rapidez e, dessa forma com resultados mais precisos, evitando os ruídos apresentados neste trabalho.



## Referências

- [1] API/TR 5C3. Equations and calculations for casing, tubing, and line pipe used as casing or tubing. Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [2] NORSK SOKKELS KONKURANSEPOSISJON. NORSOK D-010: Well integrity in drilling and well operations. Lysaker, Noruega, 2004. 158 p.
- [3] GALDINO, J. F. Modelagem da propagação de pressão em fluidos de perfuração durante kick de gás. Dissertação de mestrado. UTFPR. Curitiba. 2016
- [4] OLIVEIRA, F. L. Carregamentos aleatórios no dimensionamento probabilístico de revestimentos de poços de petróleo. Dissertação de mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro. 2017.
- [5] SOUZA, M. C. A. SANTOS, J. P. L. LIMA JUNIOR, E. T. GOUVEIA, L. P. ARAÚJO, J. P. N. SILVA, T. B. LIRA, W. W. M. OLIVEIRA, F. L. ANJOS, J. L. R. Avaliação do movimento de cabeça de poço durante a fase de produção: uma análise multistring. Rio Oil and Gas Expo and Conference. Rio de Janeiro, Brasil. 2020.
- [6] SOUZA, C. O. Análise estrutural de poços submarinos: Uma avaliação da influência do topo de cimento do revestimento de superfície. Tese de doutorado. UFRJ. Rio de Janeiro. 2020.
- [7] SILVA, G. T. GOUVEIA, L. P. LIMA JUNIOR, E. T. Modelagem em elementos finitos de ensaio de resistência ao colapso de tubo internamente desgastado. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Maceió. Brasil. 2018.
- [8] NEVES, H. G. Colapso de tubos de revestimento submetidos à tração axial e pressão externa. Dissertação de mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro. 2014.
- [9] SILVA, E. F. P. Estudo numérico-experimental do colapso de tubos de revestimento e produção sob tração axial e pressão externa. Dissertação de Mestrado. UFRJ. Rio de Janeiro. 2018.
- [10] BAI, Y. IGLAND, R. T. MOAN, T. Tube collapse under combined external pressure, tension and bending. Marine Structures 10, Great Britain, p. 389-410. 1997.
- [11] ABREU, L. T. F. Análise do colapso de revestimentos desgastados de poços de petróleo sob pressão externa através do método dos elementos finitos. Trabalho de conclusão de curso. UFRJ. Rio de Janeiro. 2019.
- [12] THOMAS, J. E. TRIGGIA, A. A. CORREIA, C. A. VEROTTI FILHO, C. XAVIER, J. A. D. MACHADO, J. C. V. SOUZA FILHO, J. E. DE PAULA, J. L. DE ROSSI, N. C. M. PITOMBO, N. E. S. GOUVEA, P. C. V. M. CARVALHO, R. S. BARRAGAN, R. V. Fundamentos de engenharia de petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro. Brasil. 2001.
- [13] SILVA, T. B. Contribuição à análise de integridade em sistemas de revestimento via confiabilidade estrutural. Dissertação de mestrado. UFAL. Maceió. 2018.
- [14] API BULL 5C2. Bulletin on performance properties of casing, tubing, and drill pipe. Society of Petroleum Engineers. 1999.

- [15] API SPEC 5CT. Specification for casing and tubing. Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [16] HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7ª edição. Tradução de Arlete Simille Marques. 2010.
- [17] SOUZA, A. S. C. Dimensionamento de elementos e ligações em estruturas de aço. São Carlos, São Paulo. Brasil 2017.
- [18] ABNT NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. ABNT, Rio de Janeiro. 2008.
- [19] SILVA, G. T. Análise numérica da resistência ao colapso em tubulares de revestimento de poços dotados de imperfeições de manufatura e desgaste. Dissertação de mestrado. UFAL. Maceió. 2020.
- [20] GROEHS, A. G. Resistência dos materiais e vasos de pressão. UNISINOS – São Leopoldo, 2002.
- [21] ISO/TR 10400. Petroleum and natural gas industries – Formulae and calculations for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing. Washington, D.C. 2018.
- [22] REPSOL. Drilling and Production Operations. Casing Design Manual. 2000.
- [23] YOUNG, H. D. FREEDMAN, R. A. Física II: Termodinâmica e Ondas. 12ª edição. Pearson, São Paulo, Brasil. 2008.
- [24] JETJONGJIT, R. COLEMAN, S. “Tubing length change due to ballooning.”; Drilling Formulas. 2016. Disponível em: <https://www.drillingformulas.com/tubing-length-change-due-to-ballooning/>. Acesso em 21 de outubro de 2021.
- [25] LIU, X. CHEN, G. CHANG, Y. ZHANG, L. ZHANG, W. XIE, H. Multistring analysis of wellhead movement and uncemented casing strength in offshore oil and gas wells. Pet. Sci. 11, 131–138 (2014). <https://doi.org/10.1007/s12182-014-0324-7>
- [26] SOUZA, M. C. A. Avaliação do movimento da cabeça de poço durante a fase de produção: uma análise multistring (Monografia de Graduação). Universidade Federal de Alagoas – UFAL 2020.
- [27] Abaqus Unified FEA. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence. 2013.
- [28] ABAQUS. Characterizing Elements. 2017. Disponível em: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-elmcharacterelm.htm> . Acesso em 03 de março de 2022.
- [29] ABAQUS. Reduced Integration. 2017. Disponível em: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-ctmreduced.htm> . Acesso em 01 de abril de 2022.
- [30] NETO, M. A., Amaro, A., Roseiro, L., Cirne, J., Leal, R. (2015). Finite Element Method for 3D Solids. In: Engineering Computation of Structures: The Finite Element Method. Springer, Cham.

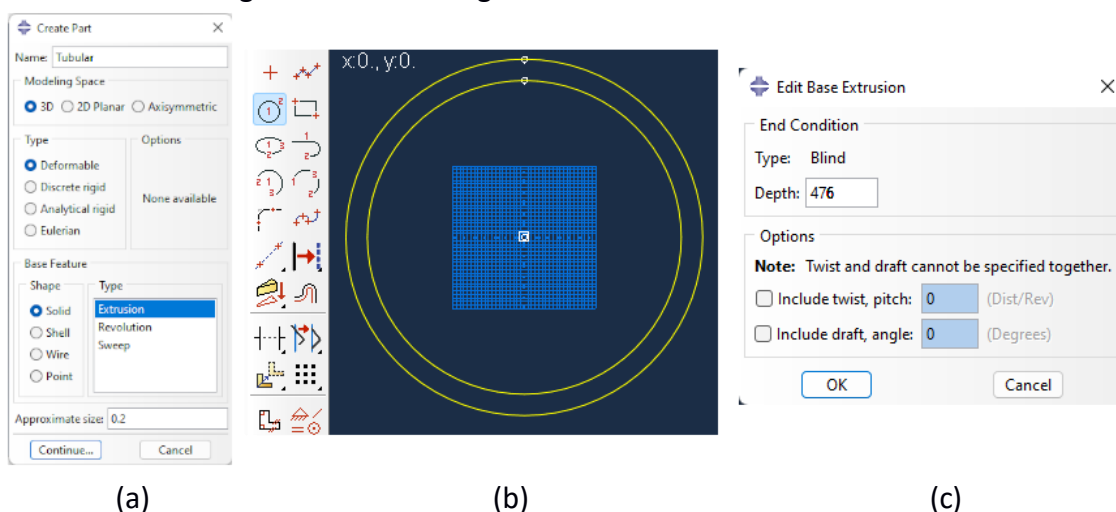
- [31] ABAQUS. About Shell elements. 2017. Disponível em: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-shelloverview.htm> . Acesso em 01 de abril de 2022.
- [32] ABAQUS User's Manual. Providence, Rhode Island, USA: Dassault Systèmes. Simulia Corporation. v6.11. 2011.
- [33] ABAQUS. Generating a Mesh. 2017. Disponível em: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAECAERefMap/simacae-c-mgnconcmeshingoverview.htm> . Acesso em 19 de abril de 2022.
- [34] OWEN, S.J., A survey of unstructured mesh generation technology, in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, October 1998.
- [35] DEMKOWICZ, L. Asymptotic convergence in finite and boundary element methods: Part I: Theoretical results, Computers Math. Applic. 27 (12), 69-84 (1994).

## Apêndice A – Modelagem utilizando elementos finitos sólidos: Tutorial do *Abaqus*

Este apêndice se destina a apresentar a modelagem utilizando os elementos sólidos C3D8R e C3D20R. Todos os passos são realizados utilizando a interface de criação do *Abaqus* e são detalhados a seguir:

- A1. Criação da 'Part' utilizando o método de extrusão, selecionando o ícone 3D, do tipo deformável e forma 'Solid' (Figura A.1 (a));
- A2. Determinação, utilizando o traçado circular, dos diâmetros externo e interno da seção transversal (Figura A.1 (b));
- A3. Determinação do comprimento livre do tubular como profundidade do modelo (Figura A.1 (c));

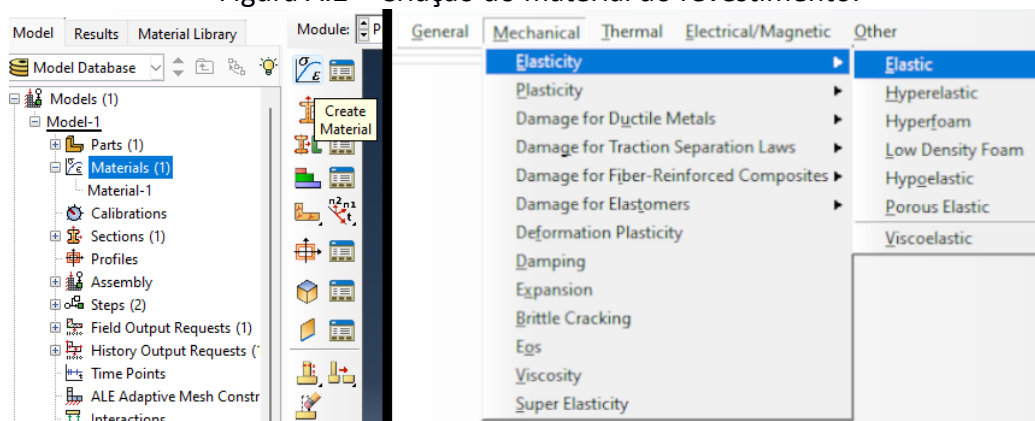
Figura A.1 – Modelagem utilizando elementos sólidos.



Fonte: Autor.

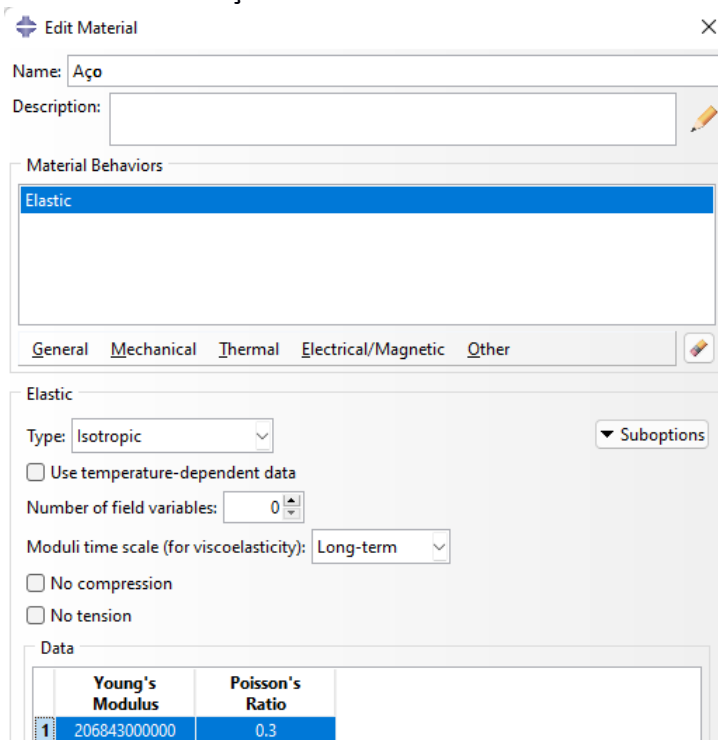
- A4. Criação do material do revestimento (Figura A.2), adicionando suas características elásticas (Módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*) (Figura A.3);

Figura A.2 – Criação do material do revestimento.



Fonte: Autor.

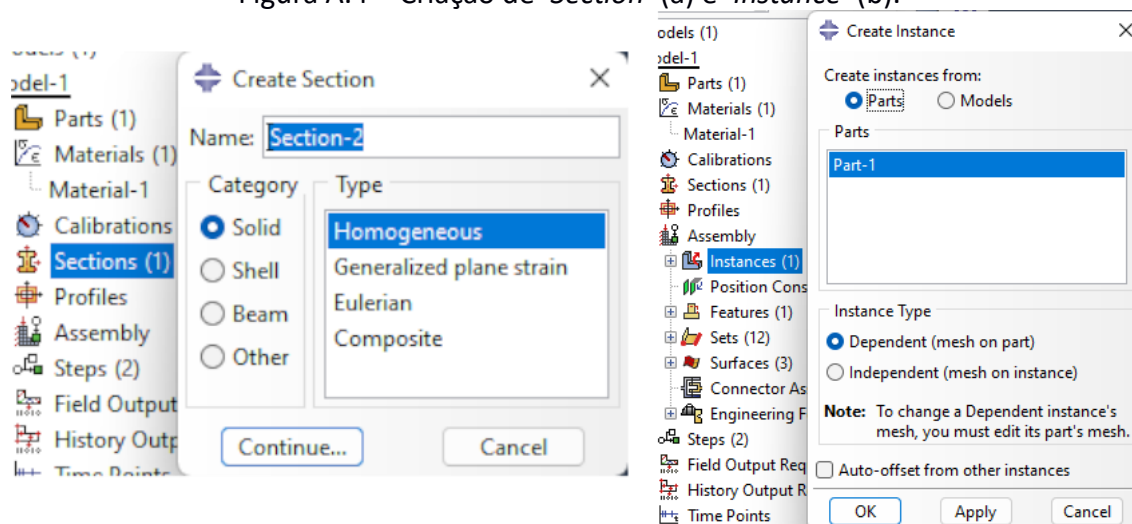
Figura A.3 – Determinação das características elásticas do material.



Fonte: Autor.

- A5. Criação de uma 'Section' adotando uma seção sólida e homogênea (Figura A.4 (a));
- A6. Criação de uma 'Instance' no menu 'Assembly' envolvendo a 'Part' criada em A1 (Figura A.4 (b));

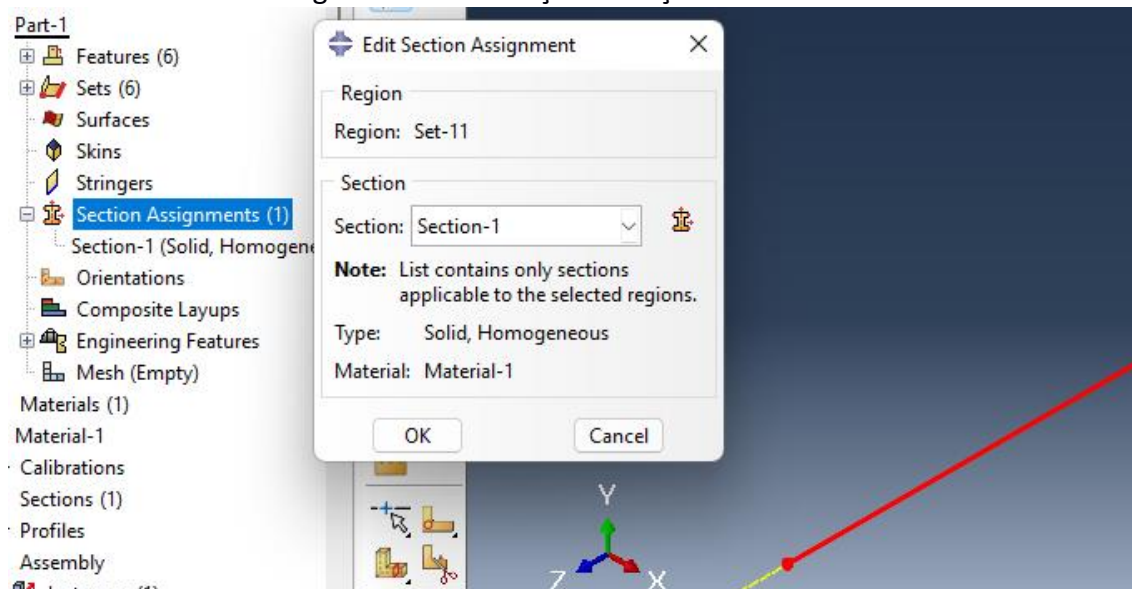
Figura A.4 – Criação de 'Section' (a) e 'Instance' (b).



Fonte: Autor.

- A7. No menu 'Parts', abrir o modelo criado e atribuir seção ao modelo no item 'Section Assignment', selecionar o modelo na interface e atribuir a ele a seção criada em A5 (Figura A.5);

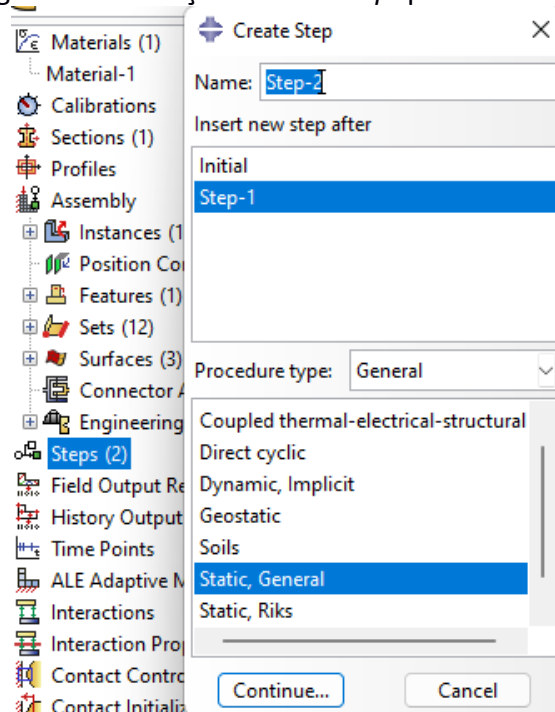
Figura A.5 – Atribuição da seção do modelo.



Fonte: Autor.

A8. Criação de um 'Step' adicional para aplicar os carregamentos (Figura A.6);

Figura A.6 – Criação de um 'Step' para o modelo.

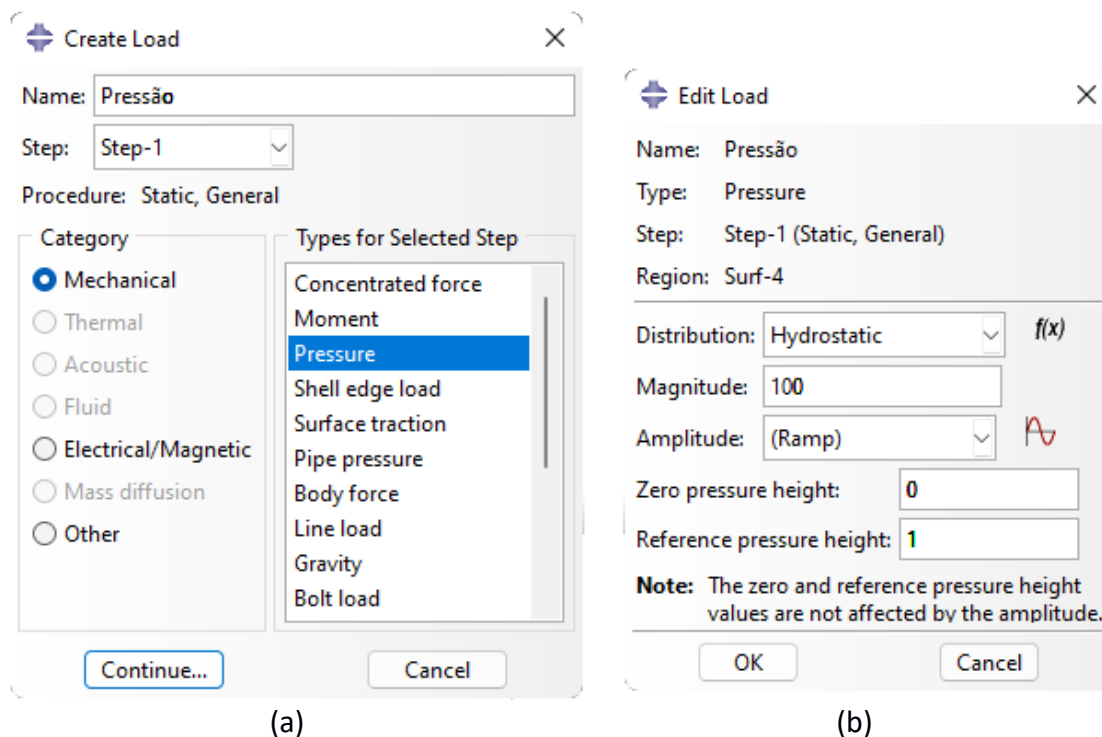


Fonte: Autor.

A9. Criação dos carregamentos de pressão: No menu 'Loads' selecionar a criação de um carregamento de categoria mecânica e do tipo 'Pressure' (Figura A.7 (a)), selecionar a parede interna ou externa e confirmar. Aplicar a distribuição hidrostática, no item 'Magnitude' inserir um valor de referência conhecido de pressão, no item 'Zero pressure height' inserir o ponto de altitude em que a pressão é igual a 0, e no item 'Reference pressure height' inserir a altitude onde

a pressão assume o valor determinado em '*Magnitude*' (Figura A.7(b));

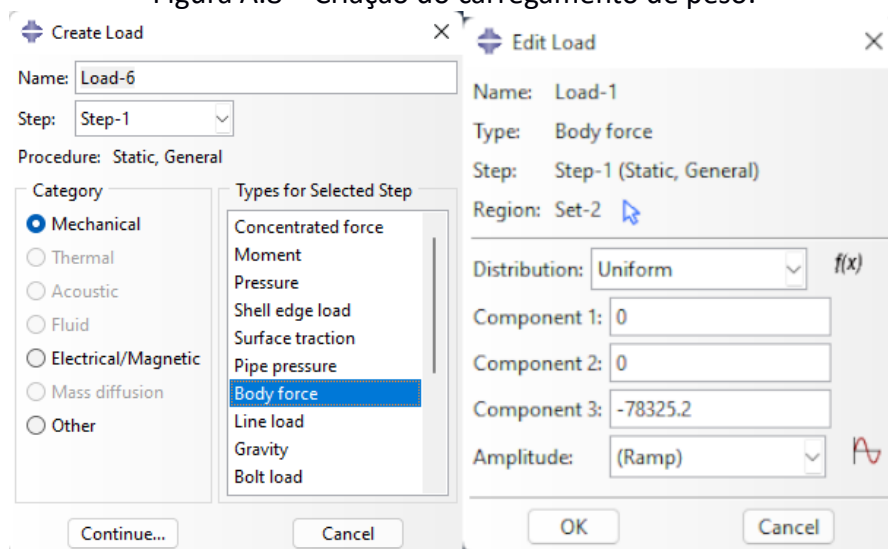
Figura A.7 – Criação do perfil de pressões.



Fonte: Autor.

- A10. Criação do carregamento de peso (Figura A.8): No menu '*Loads*' selecionar a criação de um carregamento de categoria mecânica e do tipo '*Body force*', selecionar o tubular e confirmar, manter a distribuição uniforme do carregamento, e nos componentes, aplicar 0 para componentes 1 e 2, pois representam os eixos X e Y da seção transversal, e para componente 3 aplicar o peso específico do material, com unidade  $FL^{-3}$ ;

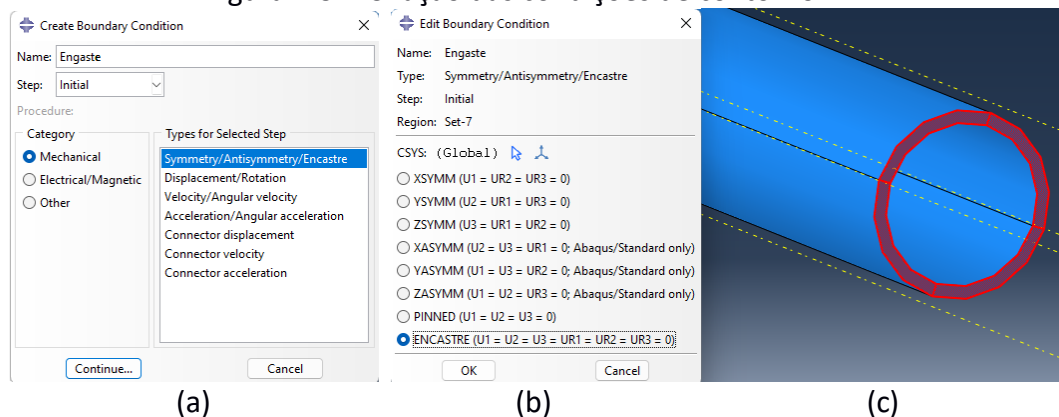
Figura A.8 – Criação do carregamento de peso.



Fonte: Autor.

- A11. Criação das condições de contorno: No menu 'BCs' selecionar a criação de uma condição de contorno de categoria mecânica e do tipo 'Encastre' (Figura A.9 (a)), selecionar o fundo do tubular (Figura A.9(c)), onde o mesmo estará cimentado à formação e confirmar, aplicar o tipo de condição de contorno 'ENCASTRE' (Figura A.9 (b));

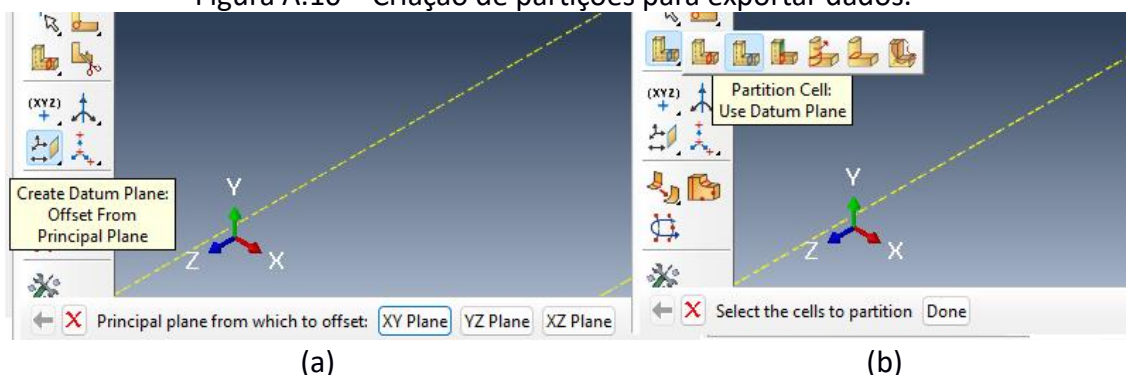
Figura A.9 – Criação das condições de contorno.



Fonte: Autor.

- A12. Criação do caminho de exportação dos dados: No menu 'Mesh' selecionar 'Create Datum Plane', selecionar 'YZ Plane' e aplicar o 'Offset' de 0 (Figura A.10 (a)); pressionar 'Partition Cell: Use datum plane', selecionar o plano na interface representado pelas linhas tracejadas em amarelo (Figura A.10 (b)); No menu 'Assembly', criar uma 'Set' a partir de uma geometria (Figura A.11 (a)) e selecionar uma das bordas das partições criadas (Figura A.11 (b)), dessa forma é possível exportar os resultados seguindo uma linha qualquer de nós ao longo do comprimento longitudinal;

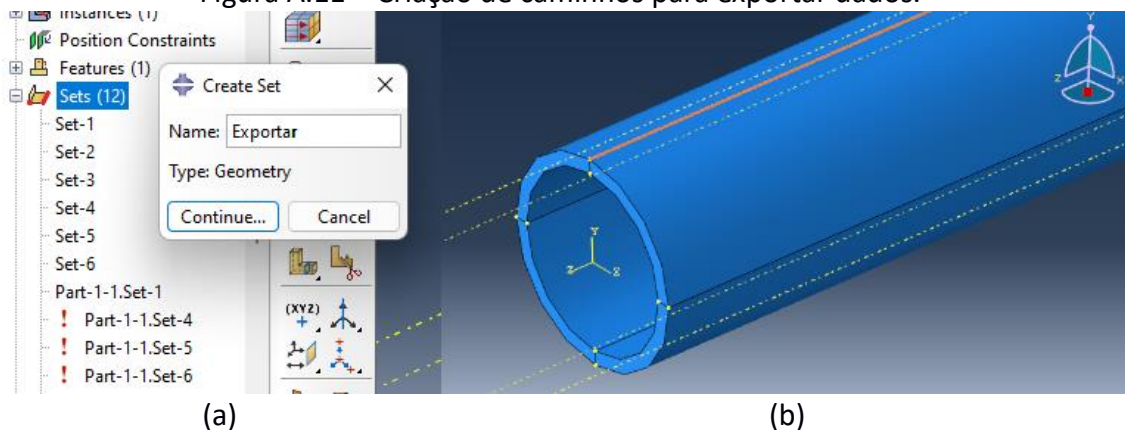
Figura A.10 – Criação de partições para exportar dados.



Fonte: Autor.



Figura A.11 – Criação de caminhos para exportar dados.



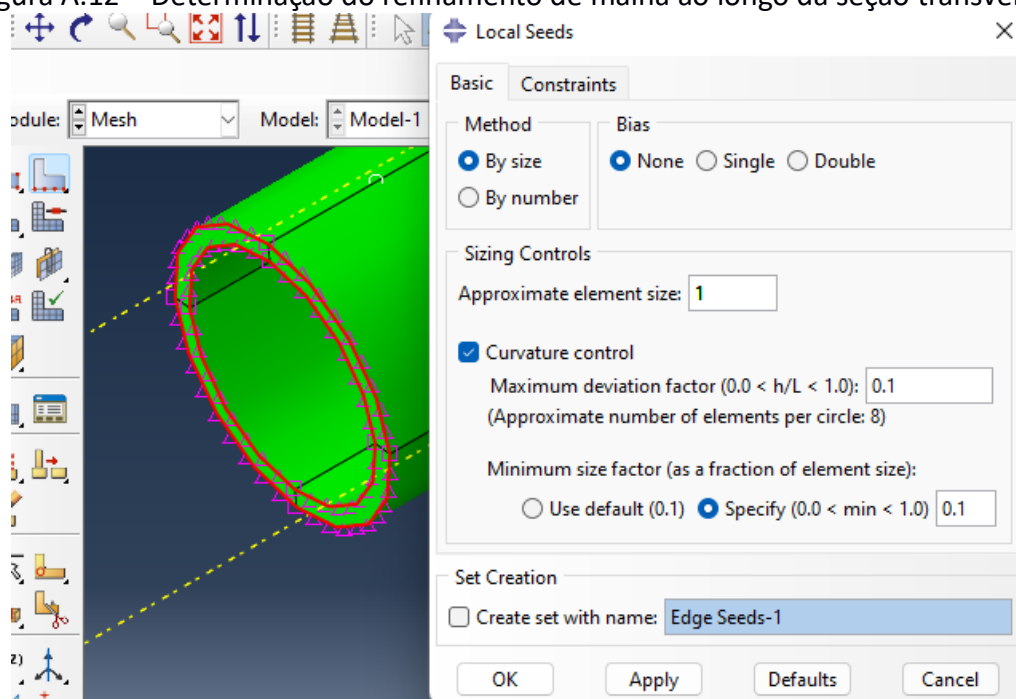
(a)

(b)

Fonte: Autor.

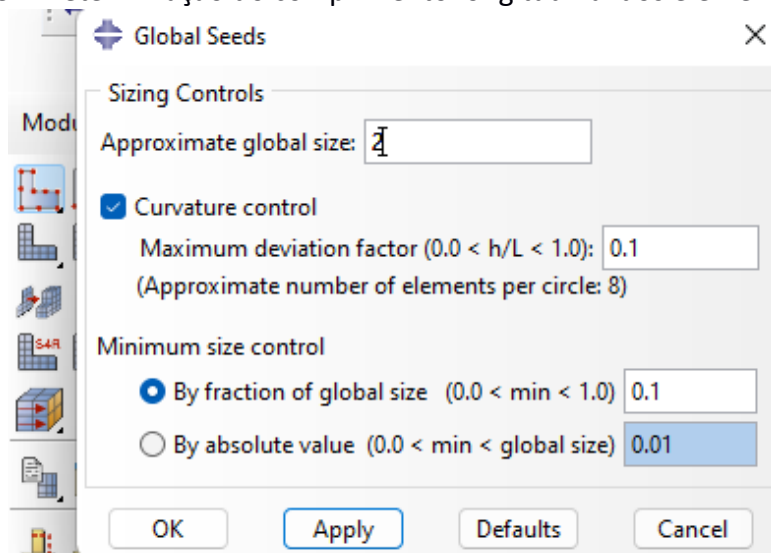
- A13. Geração da malha de elementos finitos: No menu *'Mesh'* selecionar *'Seed edges'* para determinar o refinamento de malha ao longo da seção transversal, selecionar a área do topo ou do fundo para realizar a discretização, em método escolher por tamanho ou por número e determinar em seguida, de acordo com a intenção de tamanho de malha (Figura A.12); selecionar *'Seed Part'* e determinar o comprimento longitudinal aproximado dos elementos (Figura A.13); selecionar *'Assign element type'* para escolher o tipo de elemento a ser utilizado na malha, em *'Geometric Order'* pode-se explicitar o tipo de função de interpolação a se utilizar, linear ou quadrática, sendo então os elementos finitos C3D8 e C3D20, respectivamente. Ainda pode-se escolher formulação híbrida e integração reduzida, de acordo com a necessidade do usuário (Figura A.14). Selecionando *'Mesh part'* o software irá gerar a malha de elementos finitos;

Figura A.12 – Determinação do refinamento de malha ao longo da seção transversal.



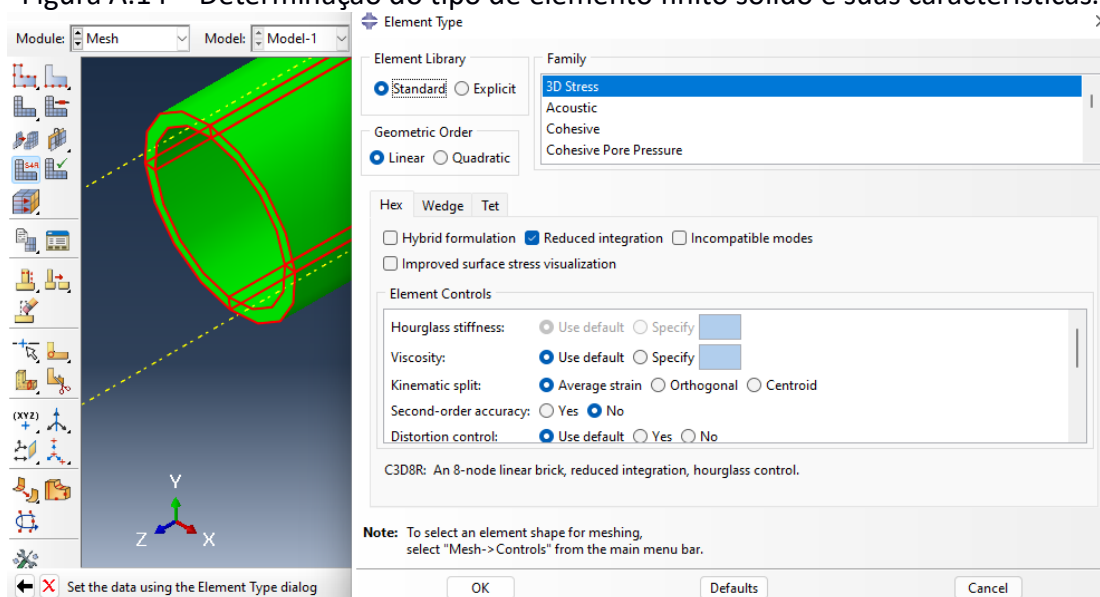
Fonte: Autor.

Figura A.13 – Determinação do comprimento longitudinal dos elementos finitos.



Fonte: Autor.

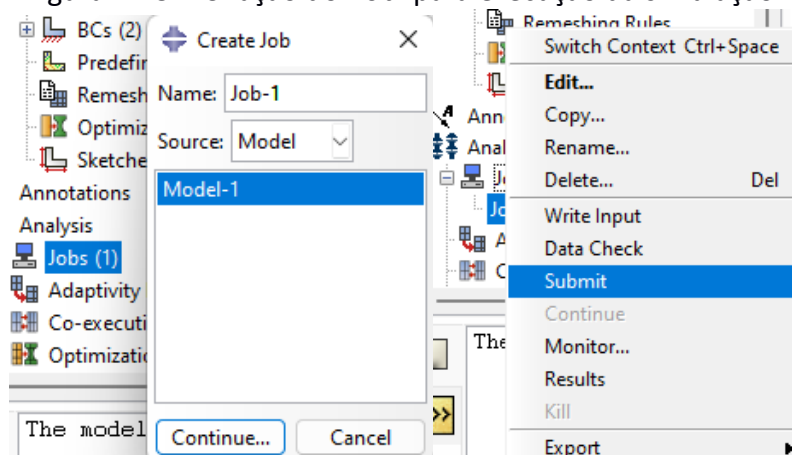
Figura A.14 – Determinação do tipo de elemento finito sólido e suas características.



Fonte: Autor.

A14. Execução da simulação: No menu 'Jobs' criar a função normalmente e executar (Figura A.15);

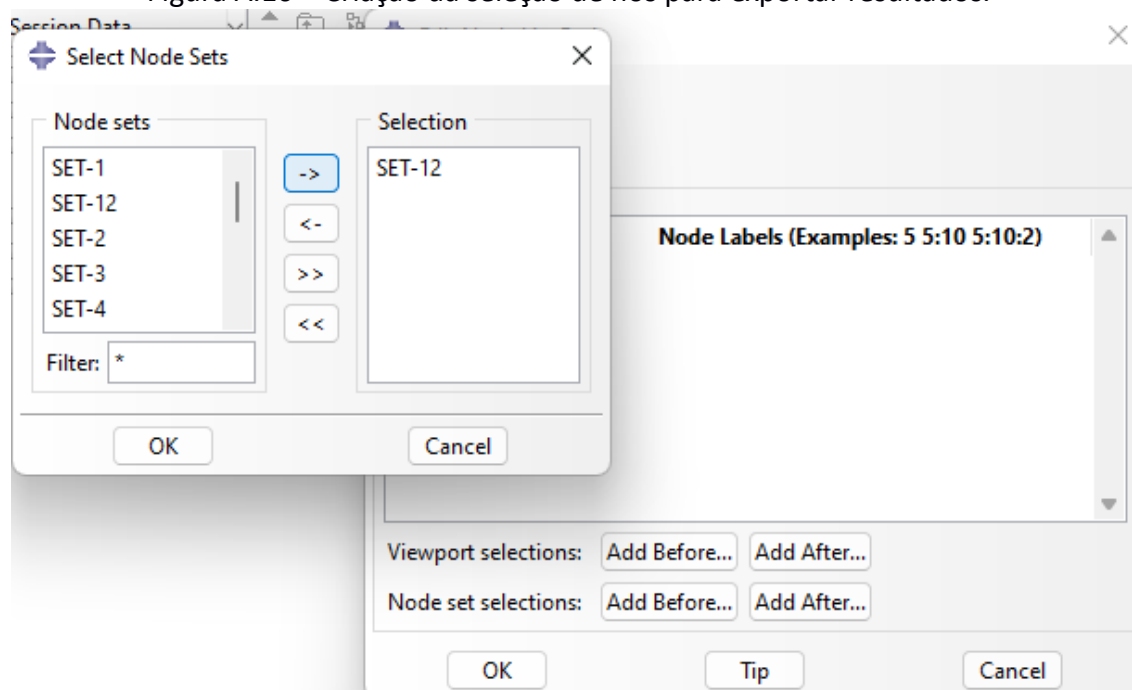
Figura A.15 – Criação do 'Job' para execução da simulação.



Fonte: Autor.

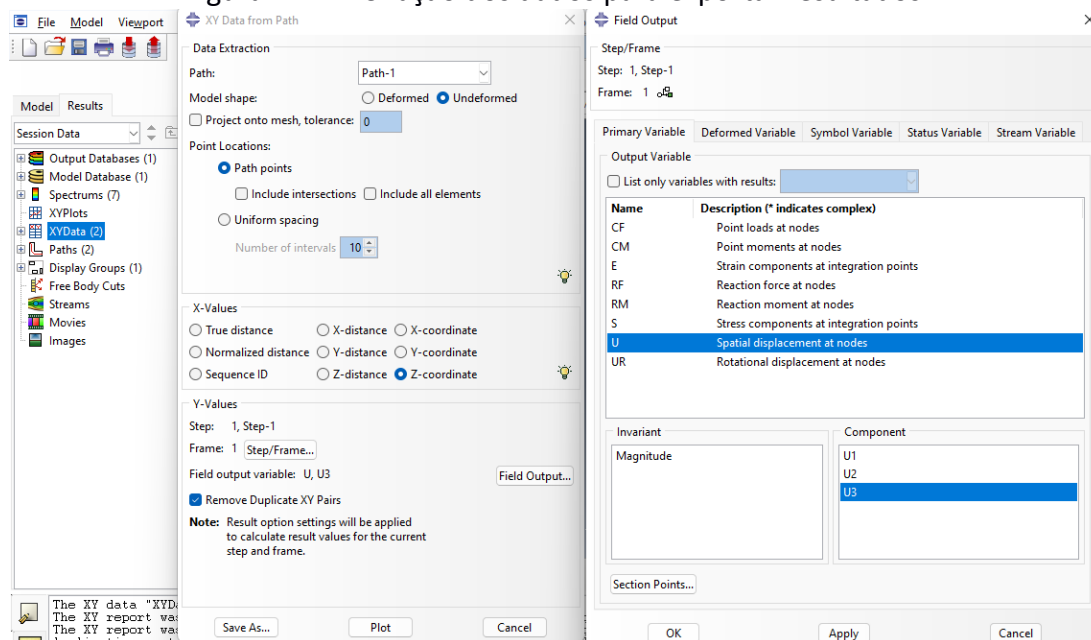
A15. Avaliando os resultados: Criar um 'Path' utilizando uma lista de nós, em 'Node set selections' selecionar 'Add Before...' e adicionar a 'Set' criada em A12 (Figura A.16). Em 'XYData', criar a lista de dados a partir do 'Path' criado e escolher quais os valores de X e Y a serem plotados (Figura A.17). Para este trabalho, os valores foram a coordenada Z original e os deslocamentos ao longo da direção 3, ou seja, deslocamento axial.

Figura A.16 – Criação da seleção de nós para exportar resultados.



Fonte: Autor.

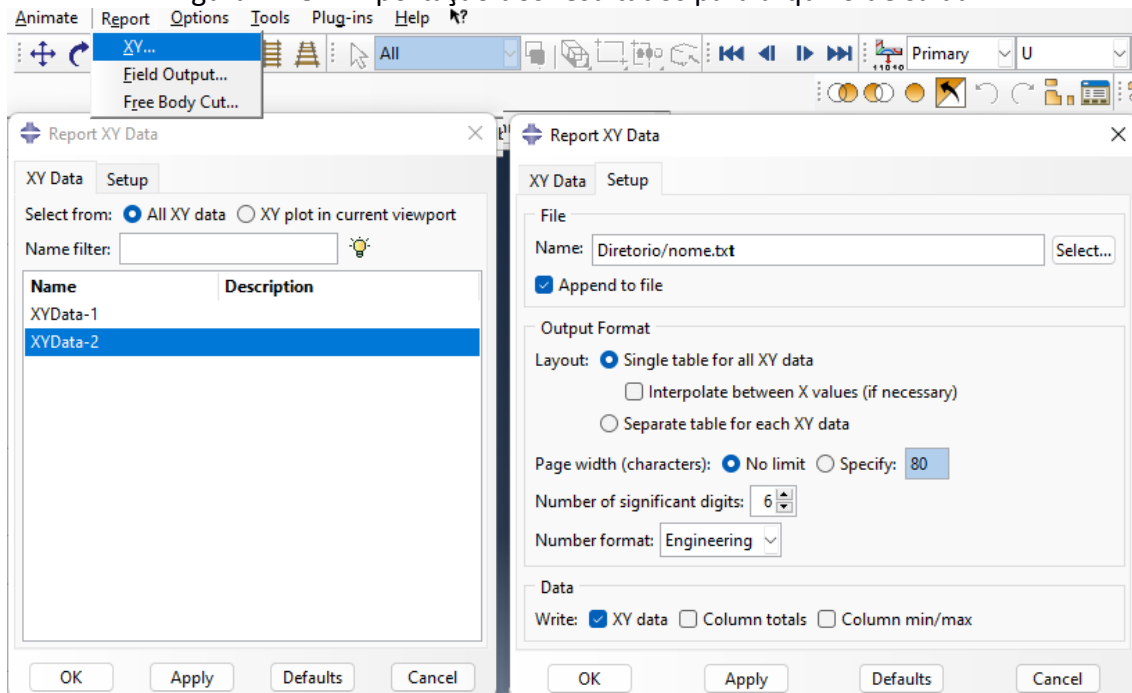
Figura A.17 – Criação dos dados para exportar resultados.



Fonte: Autor.

A16. Para exportar os resultados, selecionar no menu superior 'Report -> XY...' selecionar o 'XYData' de interesse criado em A15, em 'Setup' selecionar o diretório a ser exportado e o nome do arquivo, além de outros detalhes de configurações (Figura A.18).

Figura A.18 – Exportação dos resultados para arquivo de saída.



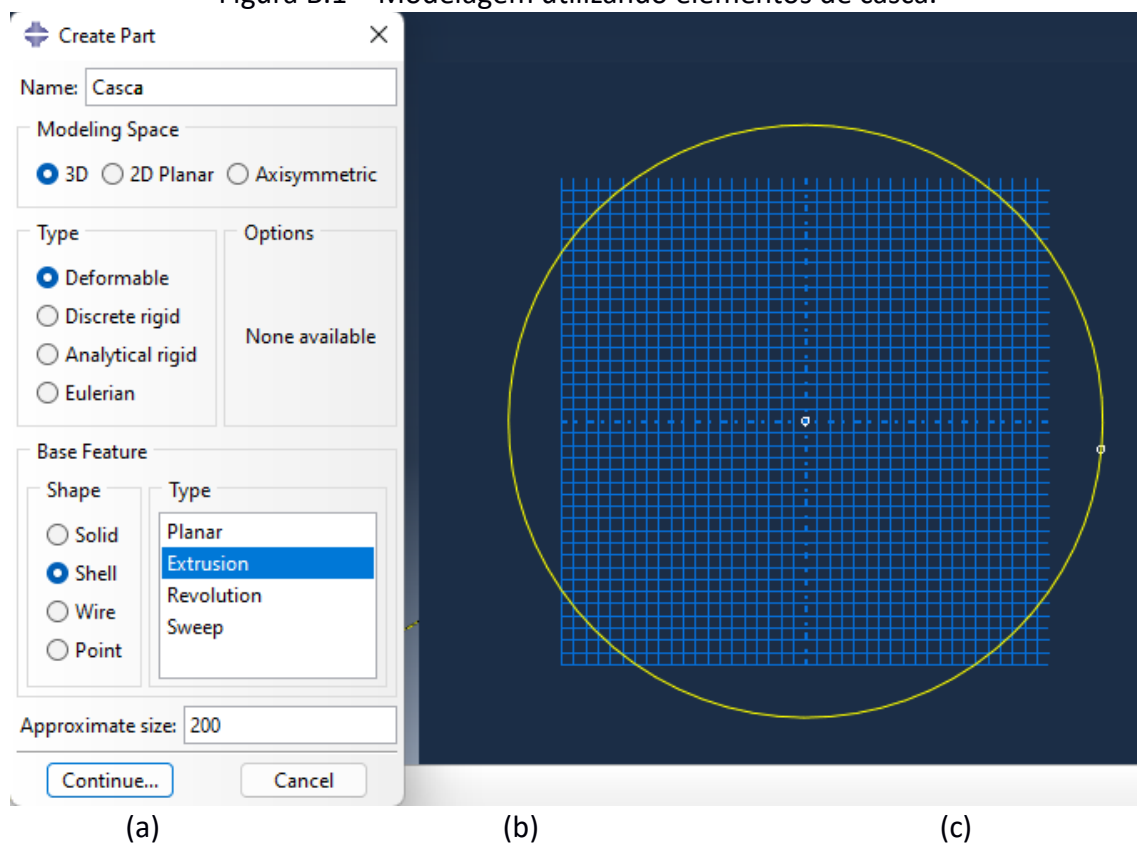
Fonte: Autor.

## Apêndice B – Modelagem utilizando elementos finitos de casca: Tutorial do *Abaqus*

Este apêndice se destina a apresentar a modelagem utilizando os elementos de casca S4R e S8R. Todos os passos são realizados utilizando a interface de criação do *Abaqus* e são detalhados a seguir:

- B1. Criação da '*Part*' utilizando o método de extrusão, selecionando o ícone 3D, do tipo deformável e forma '*Shell*' (Figura B.1 (a));
- B2. Determinação, utilizando o traçado circular, apenas o diâmetro médio da seção transversal (Figura B.1 (b));
- B3. Determinação do comprimento livre do tubular como profundidade do modelo, da mesma forma que o elemento sólido (Figura A.1 (c));

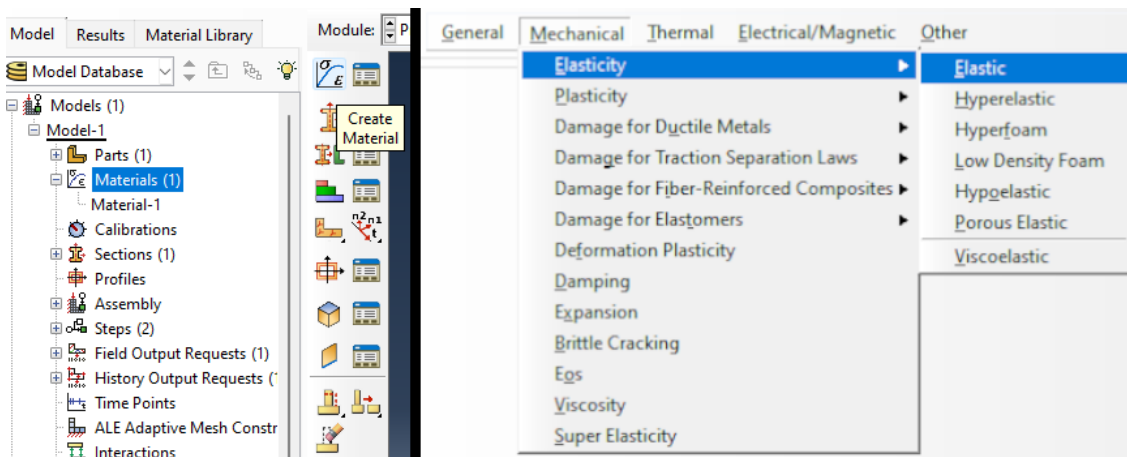
Figura B.1 – Modelagem utilizando elementos de casca.



Fonte: Autor.

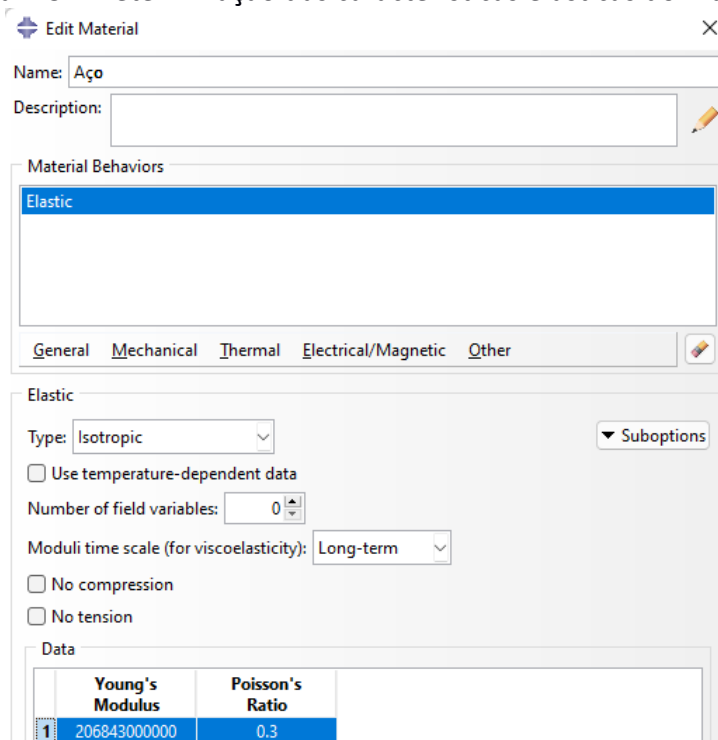
- B4. Criação do material do revestimento (Figura B.2), adicionando suas características elásticas (Módulo de elasticidade de coeficiente de *Poisson*) (Figura B.3);

Figura B.2 – Criação do material do revestimento.



Fonte: Autor.

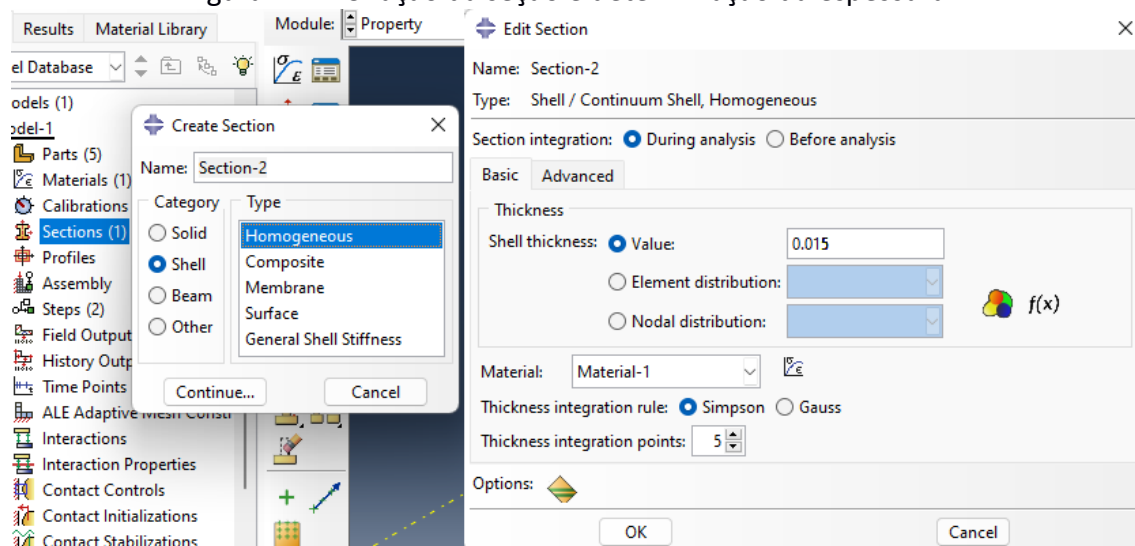
Figura B.3 – Determinação das características elásticas do material.



Fonte: Autor.

- B5. Criação de uma 'Section' adotando uma seção 'Shell' e homogênea, atribuindo a espessura do tubular (Figura B.4);

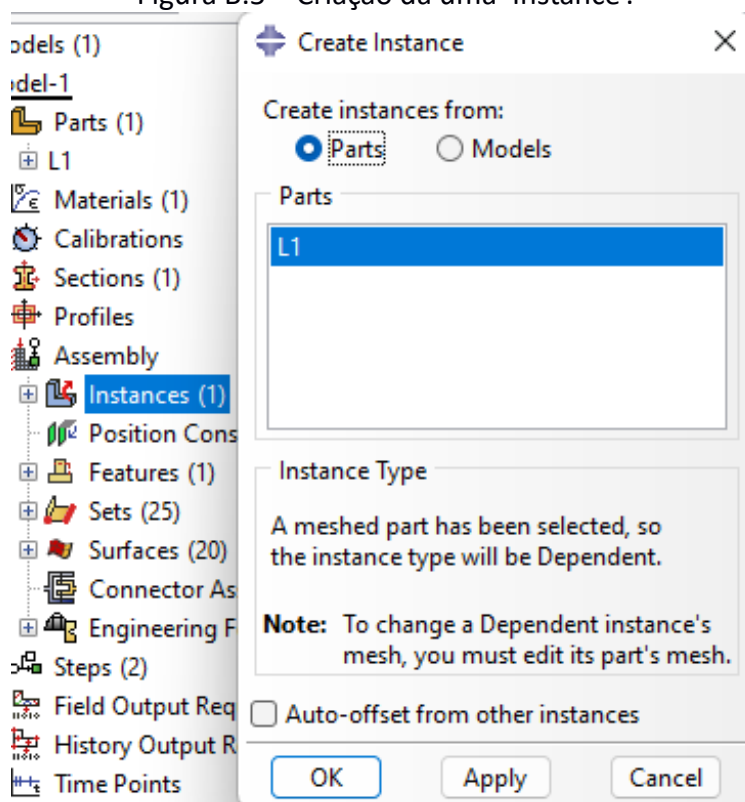
Figura B.4 – Criação da seção e determinação da espessura.



Fonte: Autor.

- B6. Criação de uma 'Instance' no menu 'Assembly' envolvendo a 'Part' criada em B1 (Figura B.5);

Figura B.5 – Criação da uma 'Instance'.

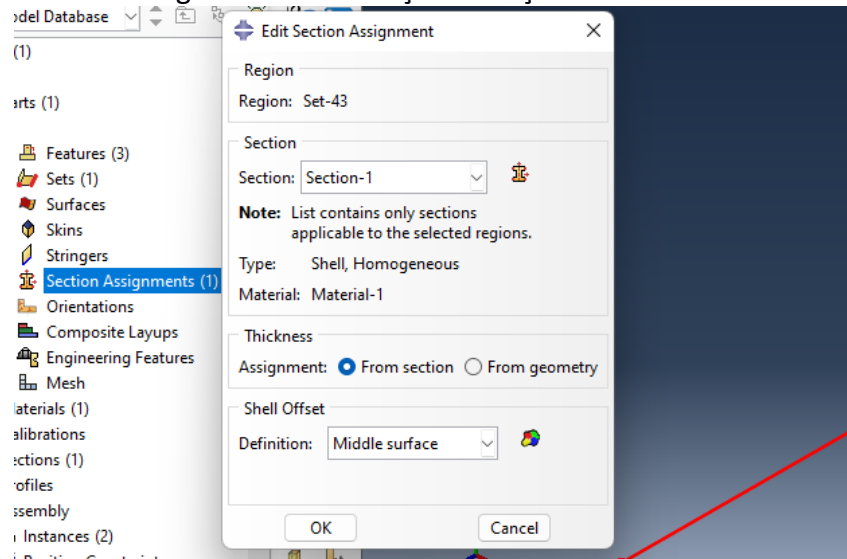


Fonte: Autor.

- B7. No menu 'Parts', abrir o modelo criado e atribuir seção ao modelo no item 'Section Assignment', selecionar o modelo na interface e atribuir a ele a seção criada em B5. A opção 'Shell Offset' determina se o contorno criado em B2 é o diâmetro médio ('Middle surface'), a parede interna ('Bottom surface') ou

externa ('Top surface') (Figura B.6);

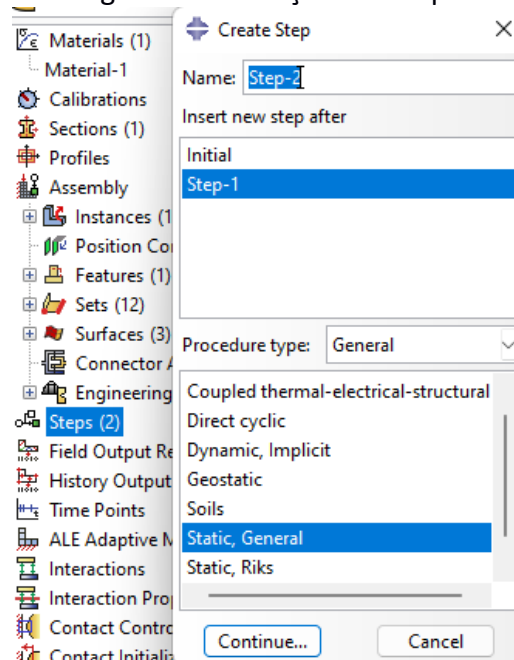
Figura B.6 – Atribuição da seção ao modelo.



Fonte: Autor.

B8. Criação de um 'Step' adicional para aplicar os carregamentos (Figura B.7);

Figura B.7 – Criação do 'Step'.



Fonte: Autor.

B9. Criação dos carregamentos de pressão: No menu 'Loads' selecionar a criação de um carregamento de categoria mecânica e do tipo 'Pressure' (Figura B.8 (a)), selecionar a do tubular e confirmar, para o elemento de casca ainda é necessário determinar o lado de aplicação do carregamento, a Figura B.8 (c) apresenta as duas faces do modelo, para este caso, sendo pressão externa selecionar a opção 'Brown' e para pressão interna selecionar a opção 'Purple'. Aplicar a distribuição



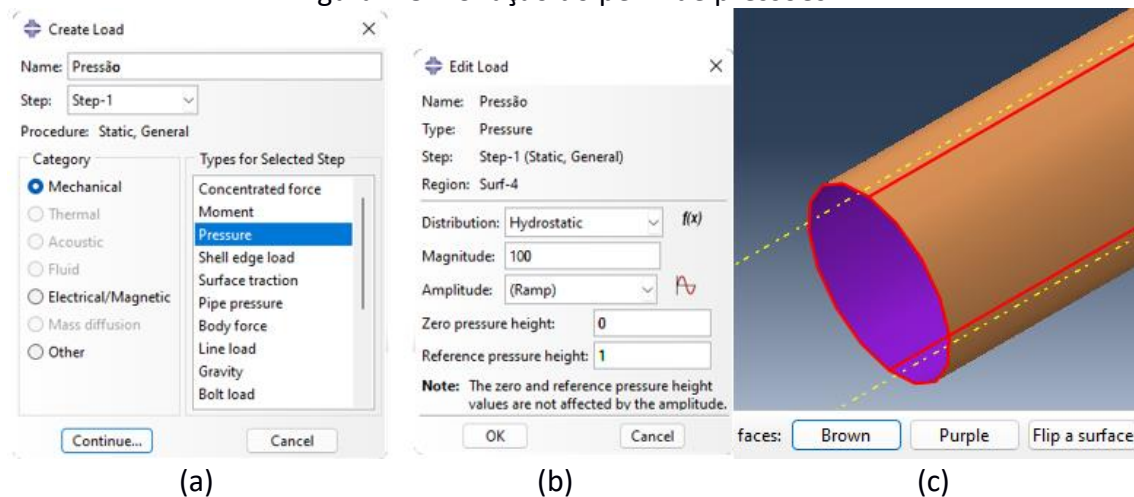
hidrostática, no item '*Magnitude*' inserir um valor de referência conhecido de pressão, no item '*Zero pressure height*' inserir o ponto de altitude em que a pressão é igual a 0, e no item '*Reference pressure height*' inserir a altitude onde a pressão assume o valor determinado em '*Magnitude*' (Figura B.8 (b)). No elemento de casca, apesar de se inserir as características de espessura da parede do elemento, é necessário realizar a correção da intensidade das pressões, pois o software aplica o carregamento no traçado modelado, ou seja, para este caso, aplicaria no diâmetro médio do tubular. A equação a ser utilizada para corrigir o valor das pressões é dado por:

$$p_{i,corr} = p_i * \frac{A_i}{A_m}, \quad (B.1)$$

$$p_{e,corr} = p_e * \frac{A_e}{A_m}, \quad (B.2)$$

Onde  $p_{i,corr}$  e  $p_{e,corr}$  são as pressões corrigidas,  $p_i$  e  $p_e$  são as pressões originais, e  $A_i$ ,  $A_e$  e  $A_m$  são as áreas interna, externa e média da seção.

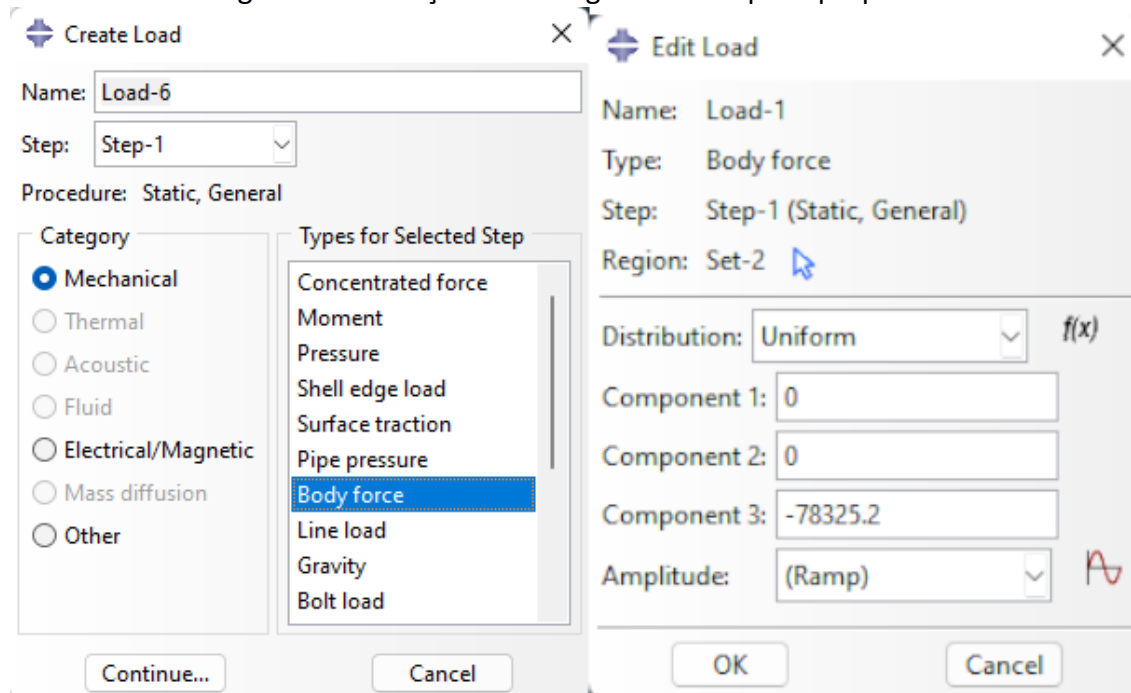
Figura B.8 – Criação do perfil de pressões.



Fonte: Autor.

B10. Criação do carregamento de peso: No menu '*Loads*' selecionar a criação de um carregamento de categoria mecânica e do tipo '*Body force*', selecionar o tubular e confirmar, manter a distribuição uniforme do carregamento, e nos componentes, aplicar 0 para componentes 1 e 2, pois representam os eixos X e Y da seção transversal, e para componente 3 aplicar o peso específico do material, com unidade  $FL^{-3}$ . Diferentemente das pressões, o peso próprio pode ser aplicado igualmente ao elemento sólido, sem precisar ser corrigido (Figura B.9);

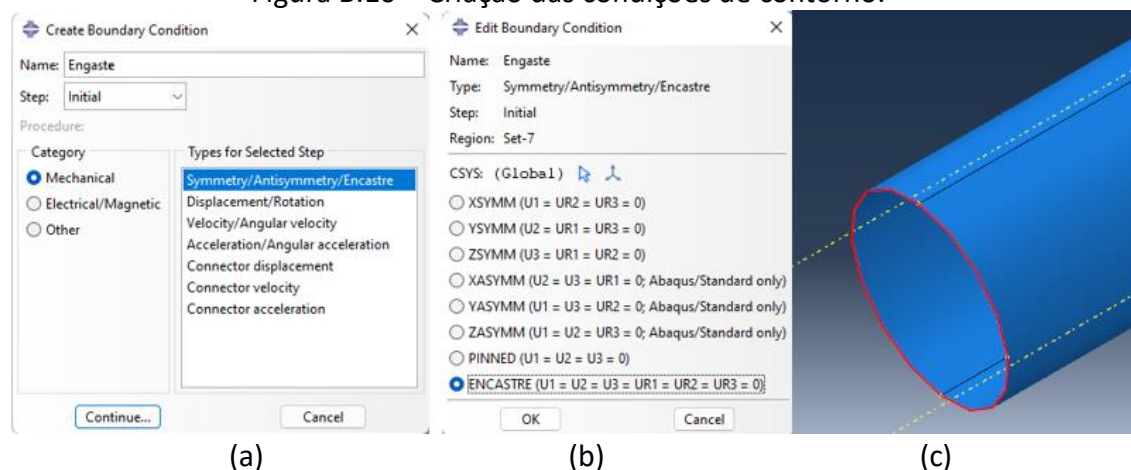
Figura B.9 – Criação do carregamento de peso próprio.



Fonte: Autor.

- B11. Criação das condições de contorno: No menu 'BCs' selecionar a criação de uma condição de contorno de categoria mecânica e do tipo 'Encastre' (Figura B.10 (a)), selecionar o fundo do tubular (Figura B.10 (c)), onde o mesmo estará cimentado à formação e confirmar, aplicar o tipo de condição de contorno 'ENCASTRE' (Figura B.10 (b));

Figura B.10 – Criação das condições de contorno.

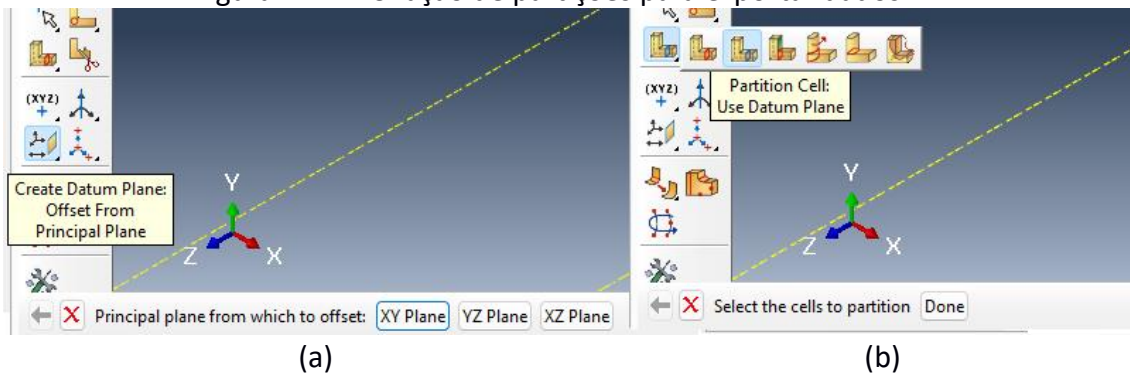


Fonte: Autor.

- B12. Criação do caminho de exportação dos dados: No menu 'Mesh' selecionar 'Create Datum Plane', selecionar 'YZ Plane' e aplicar o 'Offset' de 0 (Figura B.11 (a)); pressionar 'Partition Cell: Use datum plane', selecionar o plano na interface representado pelas linhas tracejadas em amarelo (Figura B.11 (b)); No menu 'Assembly', criar uma 'Set' a partir de uma geometria (Figura B.12 (a)) e selecionar

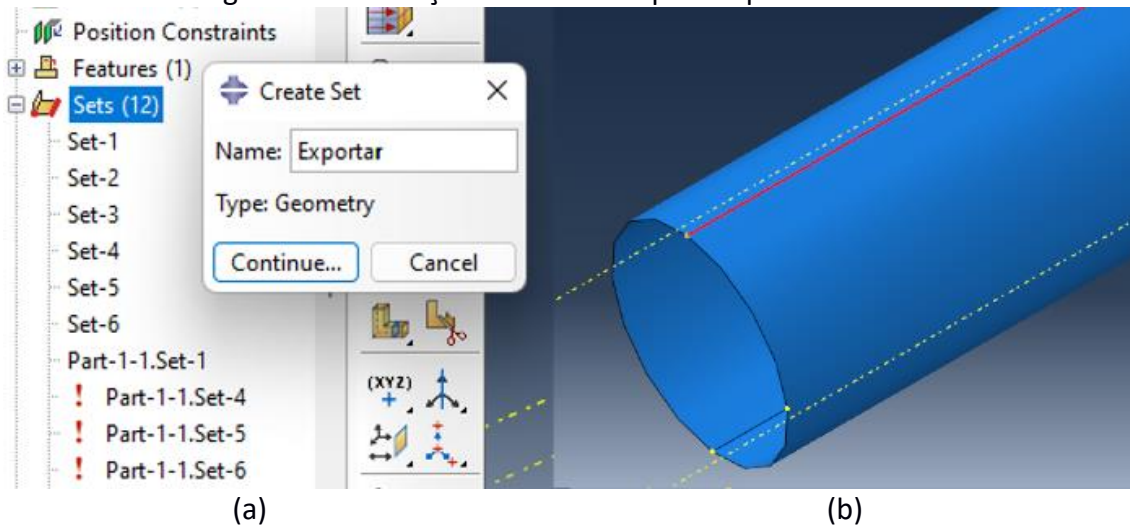
uma das bordas das partições criadas (Figura B.12 (b)), dessa forma é possível exportar os resultados seguindo uma linha qualquer de nós ao longo do comprimento longitudinal;

Figura B.11 – Criação de partições para exportar dados.



Fonte: Autor.

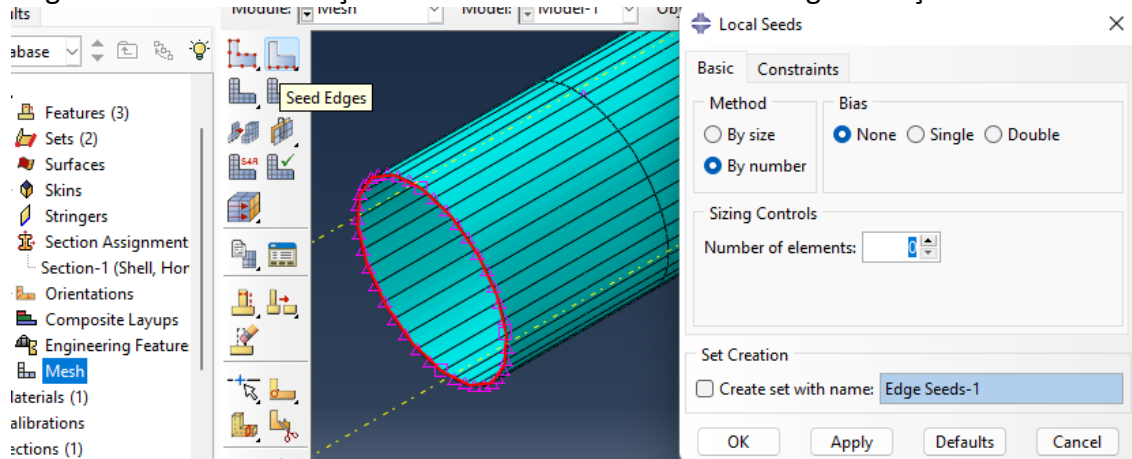
Figura B.12 – Criação de caminhos para exportar dados.



Fonte: Autor.

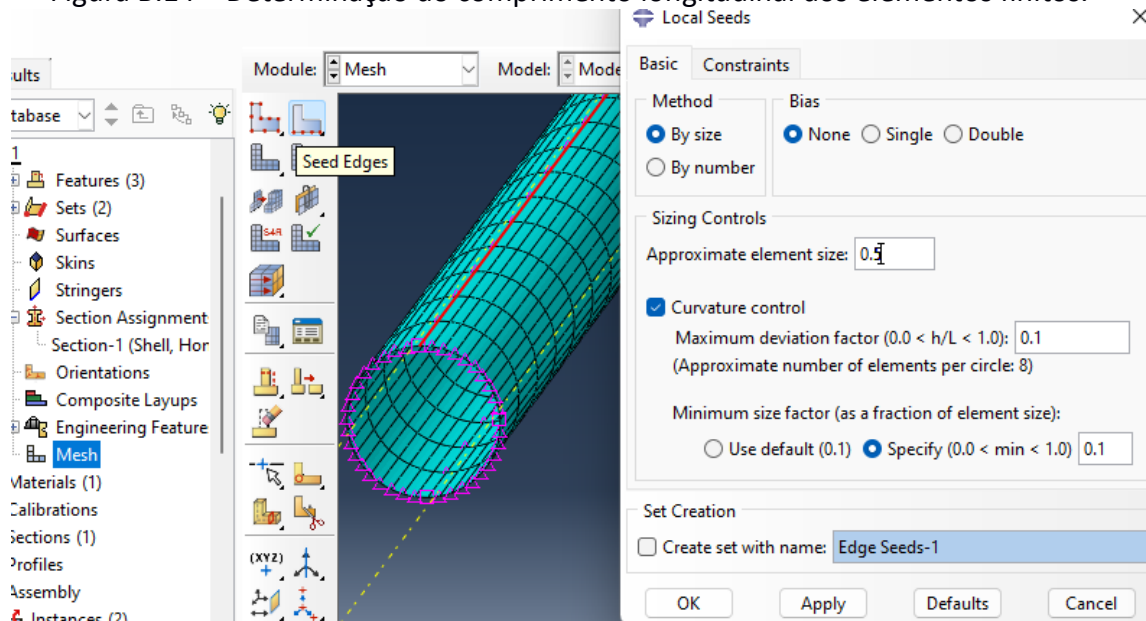
- B13. Geração da malha de elementos finitos: No menu *'Mesh'* selecionar *'Seed edges'* para determinar o refinamento de malha ao longo da seção transversal, selecionar a área do topo ou do fundo para realizar a Discretização (Figura B.13), em método escolher por tamanho ou por número e determinar em seguida, de acordo com a intenção de tamanho de malha; selecionar *'Seed edges'* novamente e selecionar a borda criada em B12 ilustrada na Figura B.14 e determinar o comprimento longitudinal aproximado dos elementos; selecionar *'Assign element type'* para escolher o tipo de elemento a ser utilizado na malha, em *'Geometric Order'* pode-se explicitar o tipo de função de interpolação a se utilizar, Linear ou Quadrática, sendo então os elementos S4 e S8 respectivamente, ainda pode-se escolher utilizar formulação híbrida e integração reduzida, de acordo com o usuário; selecionando *'Mesh part'* o software irá gerar a malha de elementos finitos;

Figura B.13 – Determinação do refinamento de malha ao longo da seção transversal.



Fonte: Autor.

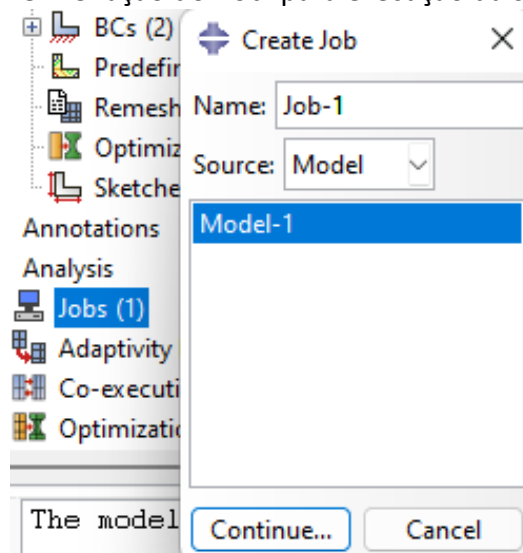
Figura B.14 – Determinação do comprimento longitudinal dos elementos finitos.



Fonte: Autor.

B14. Execução da simulação: No menu 'Jobs' criar a função normalmente e executar (Figura B.15);

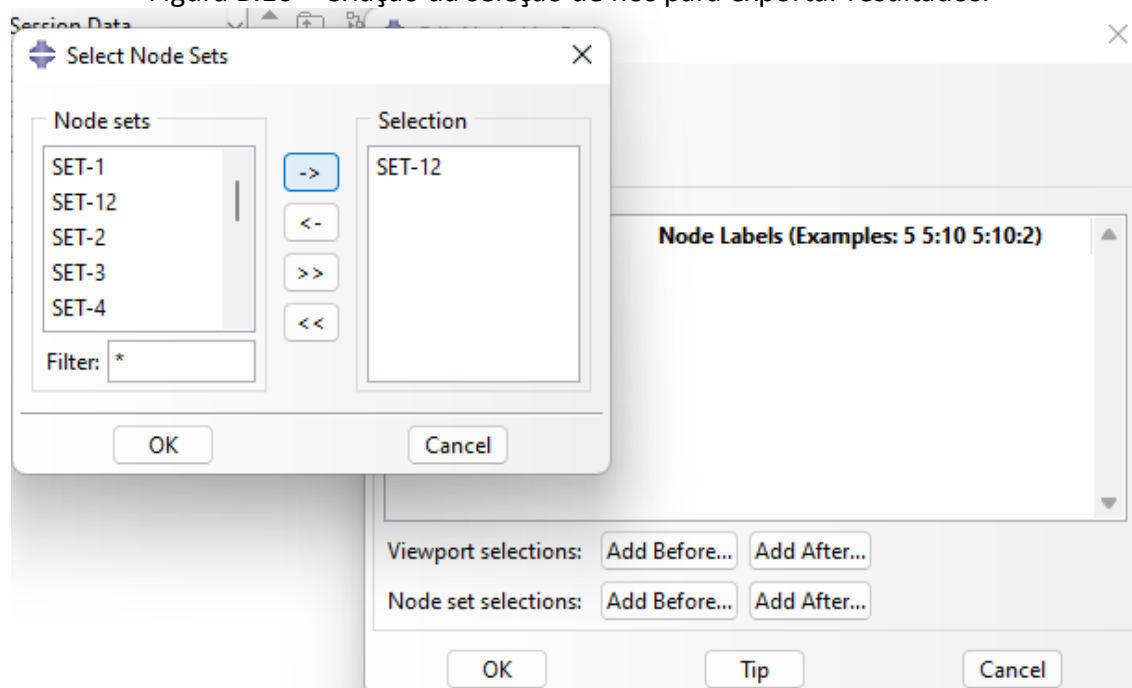
Figura B.15 – Criação do 'Job' para execução da simulação.



Fonte: Autor.

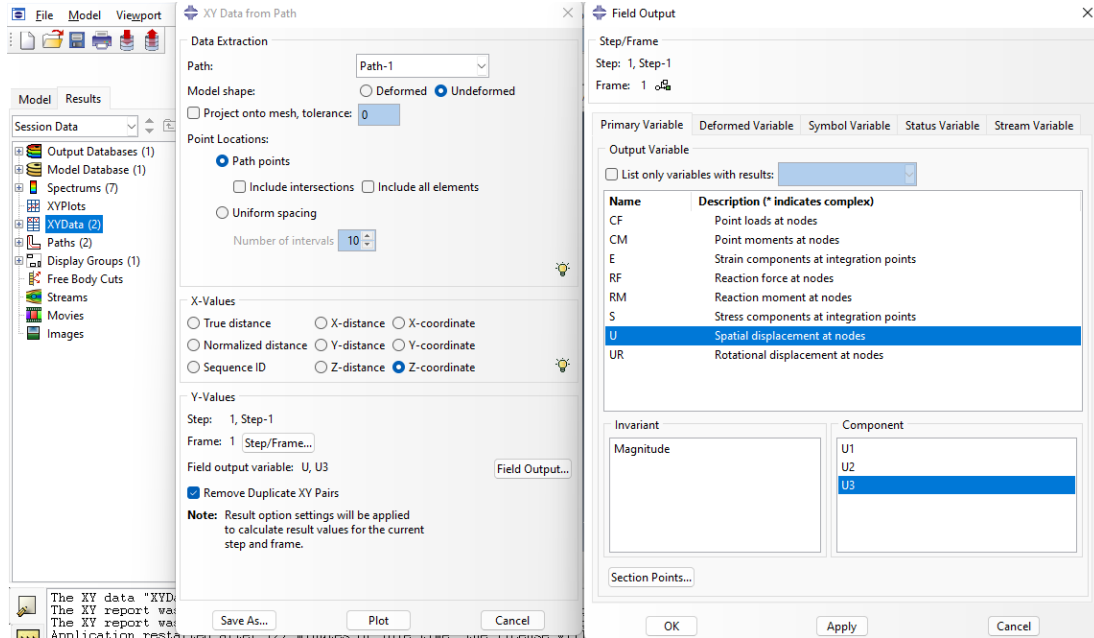
- B15. Avaliando os resultados: Criar um 'Path' utilizando uma lista de nós, em 'Node set selections' selecionar 'Add Before...' e adicionar a 'Set' criada em B12 (Figura B.16). Em 'XYData', criar a lista de dados a partir do 'Path' criado e escolher quais os valores de X e Y a serem plotados (Figura B.17). Para este trabalho, os valores foram a coordenada Z original e os deslocamentos ao longo da direção 3, ou seja, deslocamento axial.

Figura B.16 – Criação da seleção de nós para exportar resultados.



Fonte: Autor.

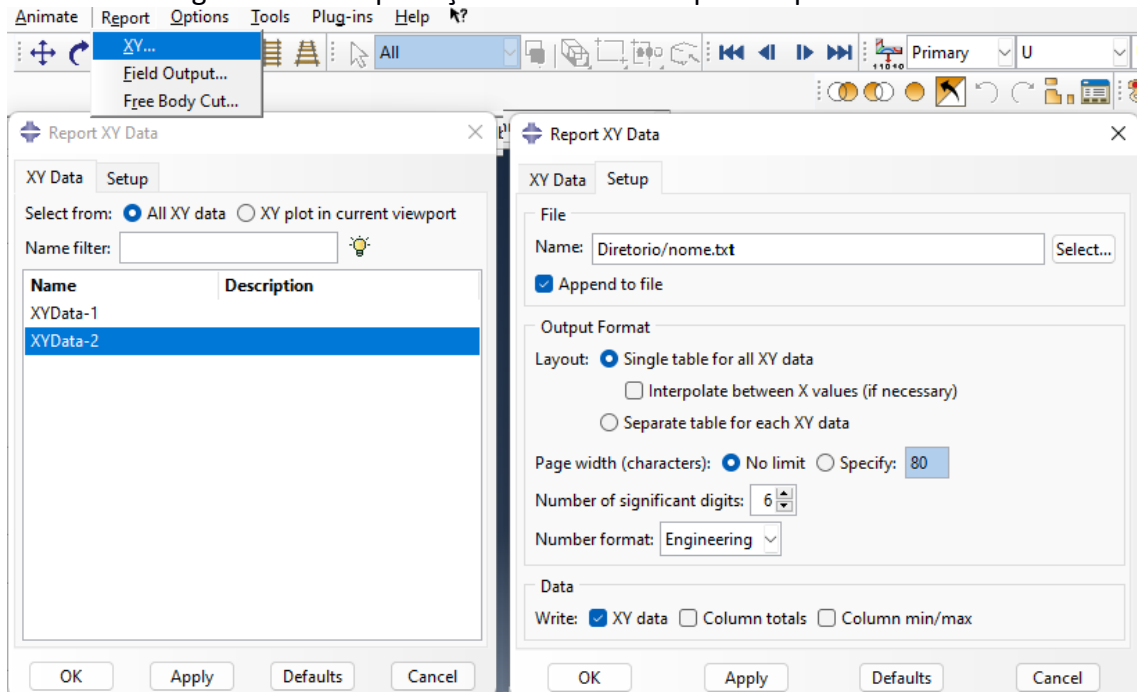
Figura B.17 – Criação dos dados para exportar resultados.



Fonte: Autor.

B16. Para exportar os resultados, selecionar no menu superior 'Report -> XY..' selecionar o 'XYData' de interesse criado em B15, em 'Setup' selecionar o diretório a ser exportado e o nome do arquivo, além de outros detalhes de configurações.

Figura B.18 – Exportação dos resultados para arquivo de saída.



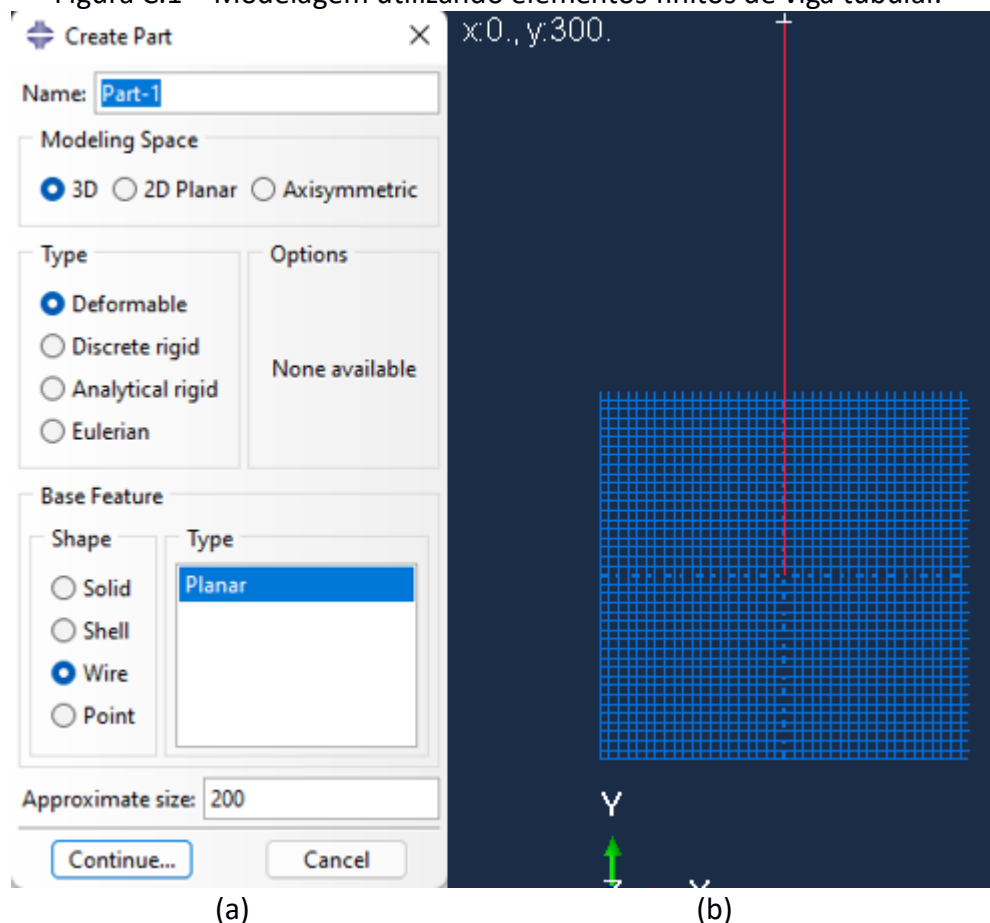
Fonte: Autor.

## Apêndice C – Modelagem utilizando elementos finitos de viga tubulares: Tutorial do *Abaqus*

Este apêndice se destina a apresentar a modelagem utilizando os elementos de viga tubular PIPE31 e PIPE32. Todos os passos são realizados utilizando a interface de criação do *Abaqus* e são detalhados a seguir:

- C1. Criação da 'Part' utilizando modelagem tridimensional, tipo deformável, forma 'Wire' (Figura C.1 (a));
- C2. Discretização do comprimento livre do tubular utilizando a ferramenta de traçado linear (Figura C.1 (b));

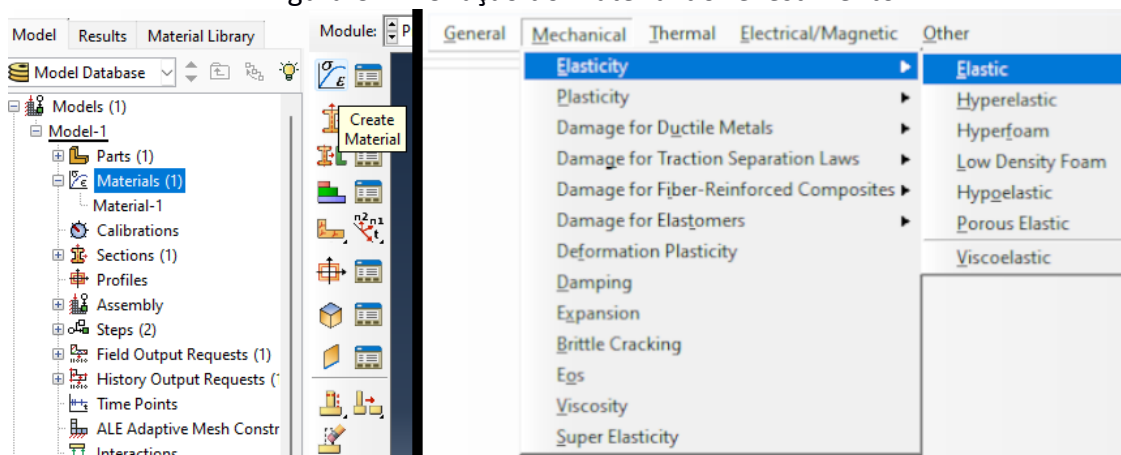
Figura C.1 – Modelagem utilizando elementos finitos de viga tubular.



Fonte: Autor.

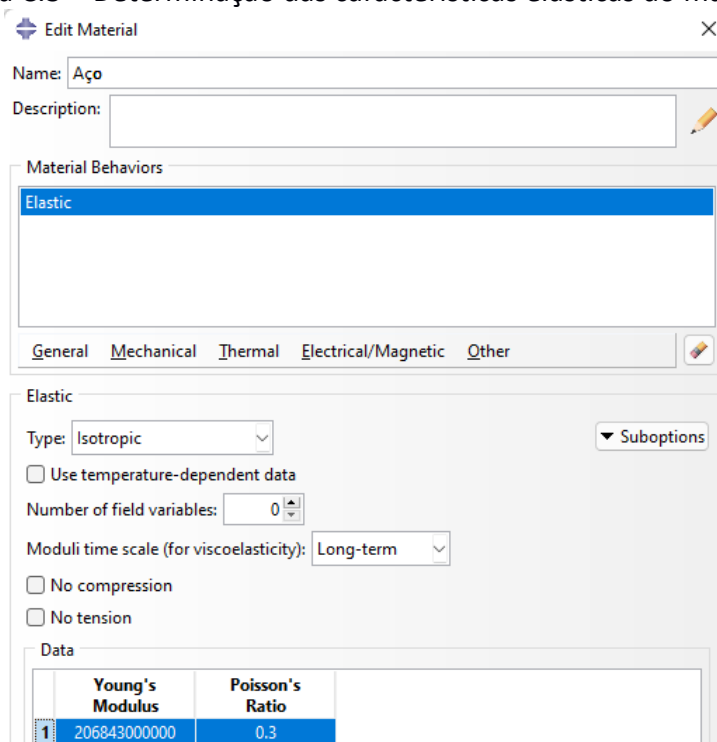
- C3. Criação do material do revestimento (Figura C.2), adicionando suas características elásticas (Módulo de elasticidade de coeficiente de *Poisson*) (Figura C.3);

Figura C.2 – Criação do material do revestimento.



Fonte: Autor.

Figura C.3 – Determinação das características elásticas do material.

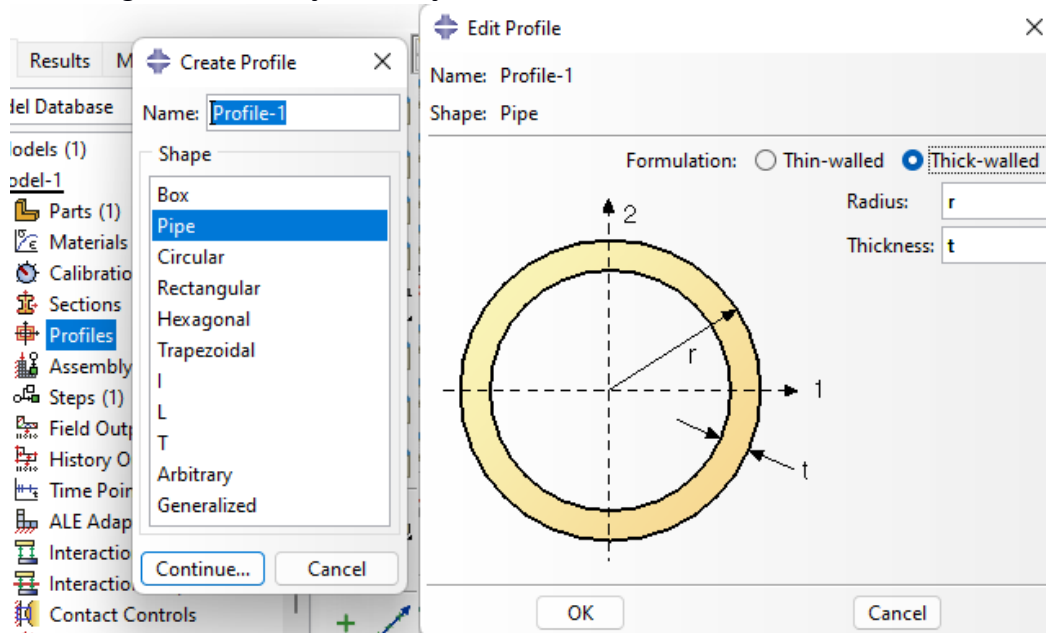


Fonte: Autor.

- C4. Criação de uma 'Profile' para determinar a seção transversal, para esse estudo, cria-se uma seção com parede espessa 'thick-walled' e determinando o raio e espessura (Figura C.4);



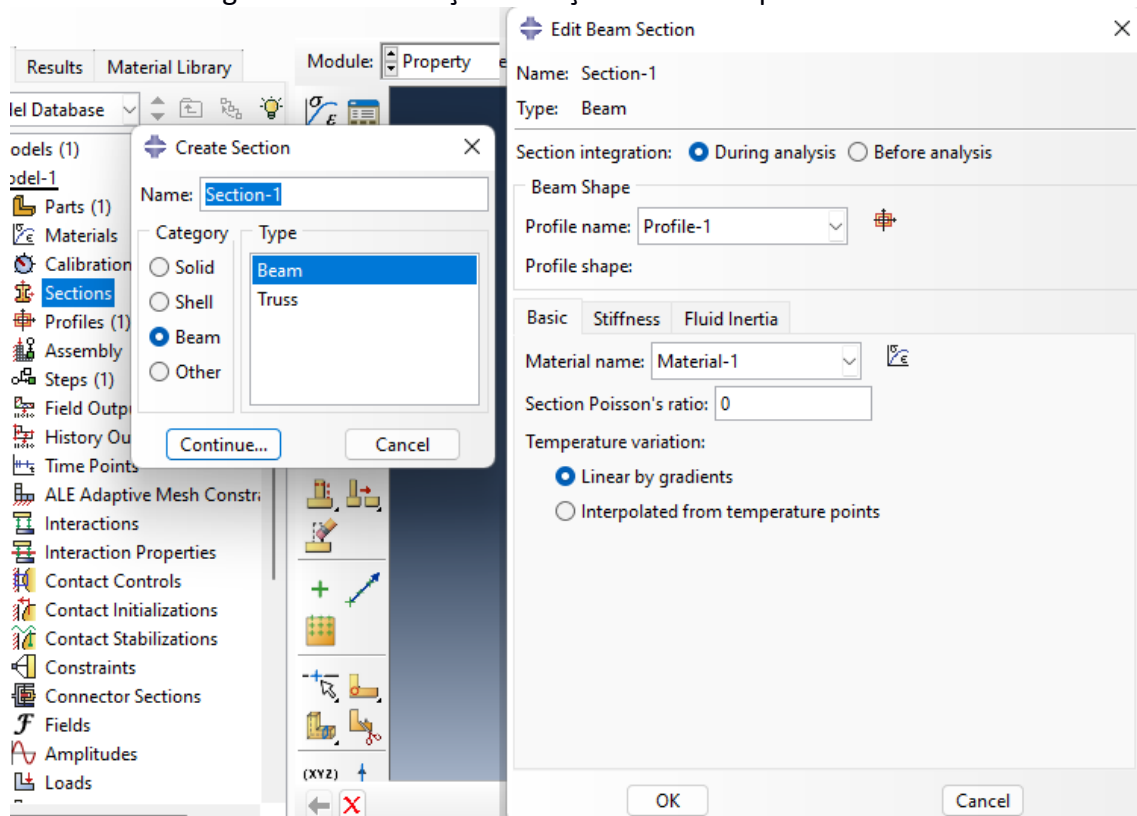
Figura C.4 – Criação da seção transversal a ser atribuída ao modelo.



Fonte: Autor.

- C5. Criação de uma 'Section' adotando uma seção de viga e atribuindo a ela a 'Profile' criada em C4 e as características do material criadas em C3 (Figura C.5);

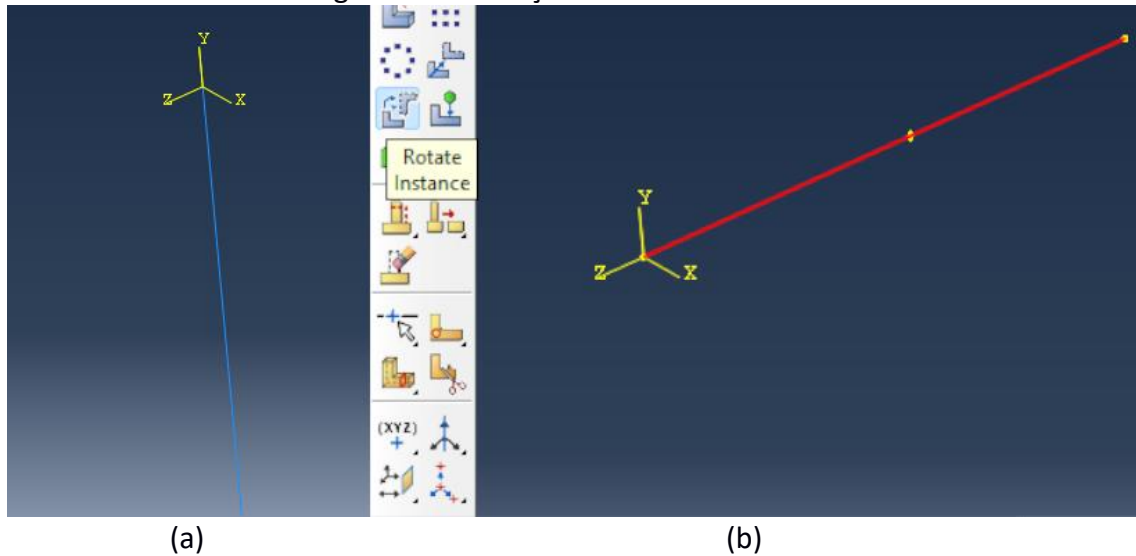
Figura C.5 – Atribuição da seção e material para o modelo.



Fonte: Autor.

- C6. Criação de uma 'Instance' no menu 'Assembly' envolvendo a 'Part' criada em C1. O elemento de viga criado é tradicionalmente criado no plano XY (Figura C.6 (a)), porém para aplicar a pressão hidrostática, o modelo precisa estar com seu comprimento longitudinal na direção Z, portanto precisa ser rotacionado, utilizando a ferramenta 'Rotate instance' (Figura C.6 (b));

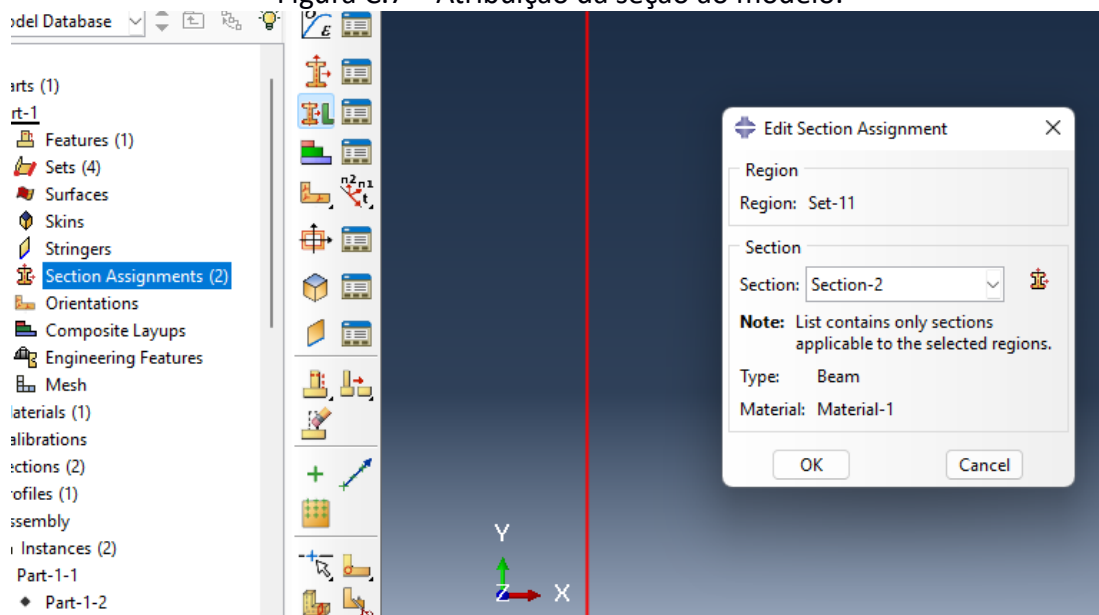
Figura C.6 – Rotação do modelo criado.



Fonte: Autor.

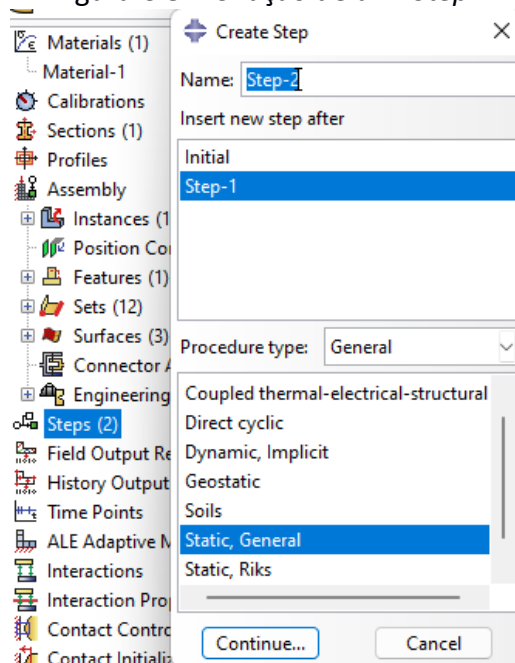
- C7. No menu 'Parts', abrir o modelo criado e atribuir seção ao modelo no item 'Section Assignment', selecionar o modelo na interface e atribuir a ele a seção criada em C5 (Figura C.7);

Figura C.7 – Atribuição da seção ao modelo.



- C8. Criação de um 'Step' adicional para aplicar os carregamentos (Figura C.8);

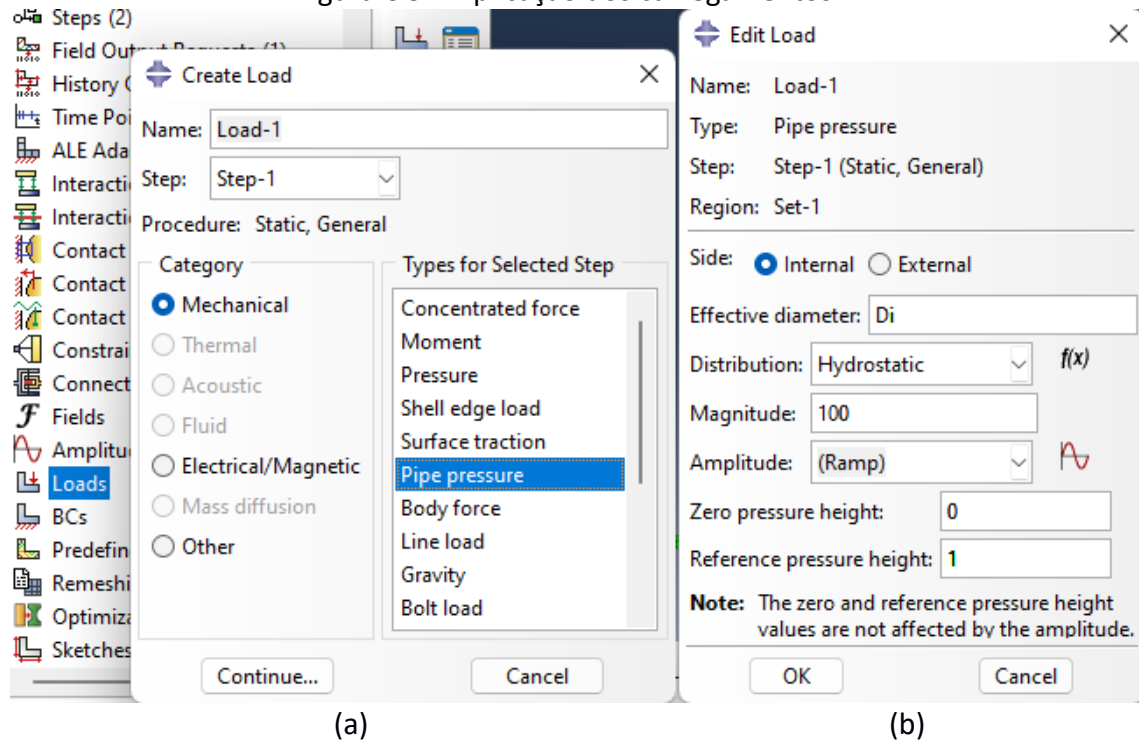
Figura C.8 – Criação de um 'Step'.



Fonte: Autor.

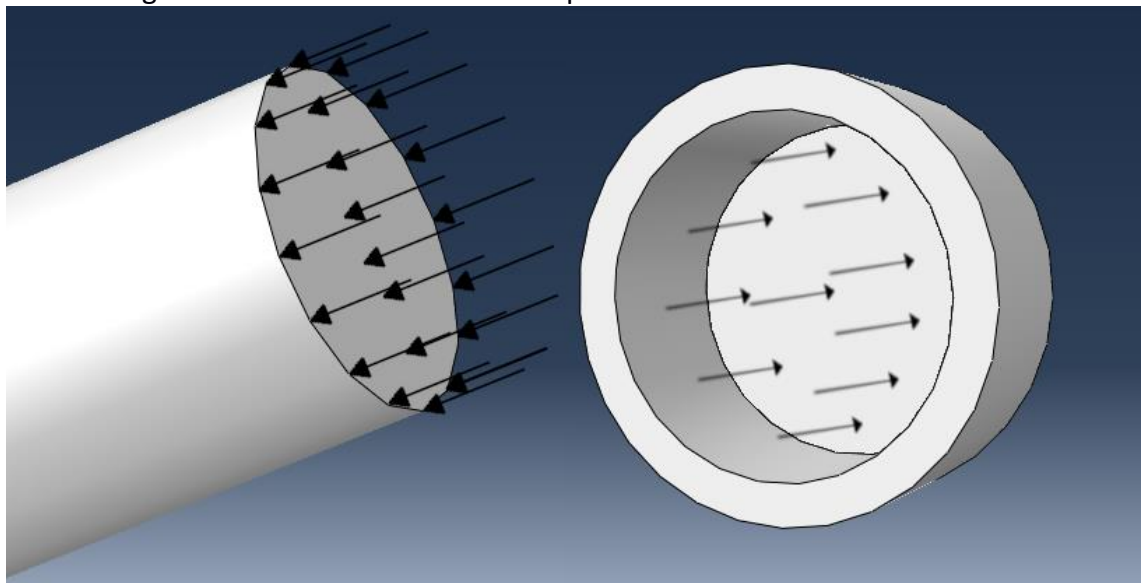
- C9. Criação dos carregamentos de pressão: No menu 'Loads' selecionar a criação de um carregamento de categoria mecânica e do tipo 'Pipe Pressure' (Figura C.9 (a)), selecionar o tubular e confirmar. Selecionar o lado interno ou externo a se aplicar o carregamento, inserir o diâmetro interno ou externo de acordo com o tipo de pressão a ser aplicada, aplicar a distribuição hidrostática, no item 'Magnitude' inserir um valor de referência conhecido de pressão, no item 'Zero pressure height' inserir o ponto de altitude em que a pressão é igual a 0, e no item 'Reference pressure height' inserir a altitude onde a pressão assume o valor determinado em 'Magnitude' (Figura C.9 (b));

Figura C.9 – Aplicação dos carregamentos.



Fonte: Autor.

C10. O elemento *PIPE* é modelado como uma viga de seção fechada nas extremidades, portanto, ao se aplicar o carregamento de pressão no modelo, existirá nas extremidades um carregamento axial devido às pressões externa e interna (Figura C.10).

Figura C.10 – Detalhe do efeito da pressão em elementos *PIPE*.

Fonte: Autor.

Dessa forma, para modelar tubulares de seção aberta é necessário aplicar um carregamento concentrado que anule essa força indesejada nas

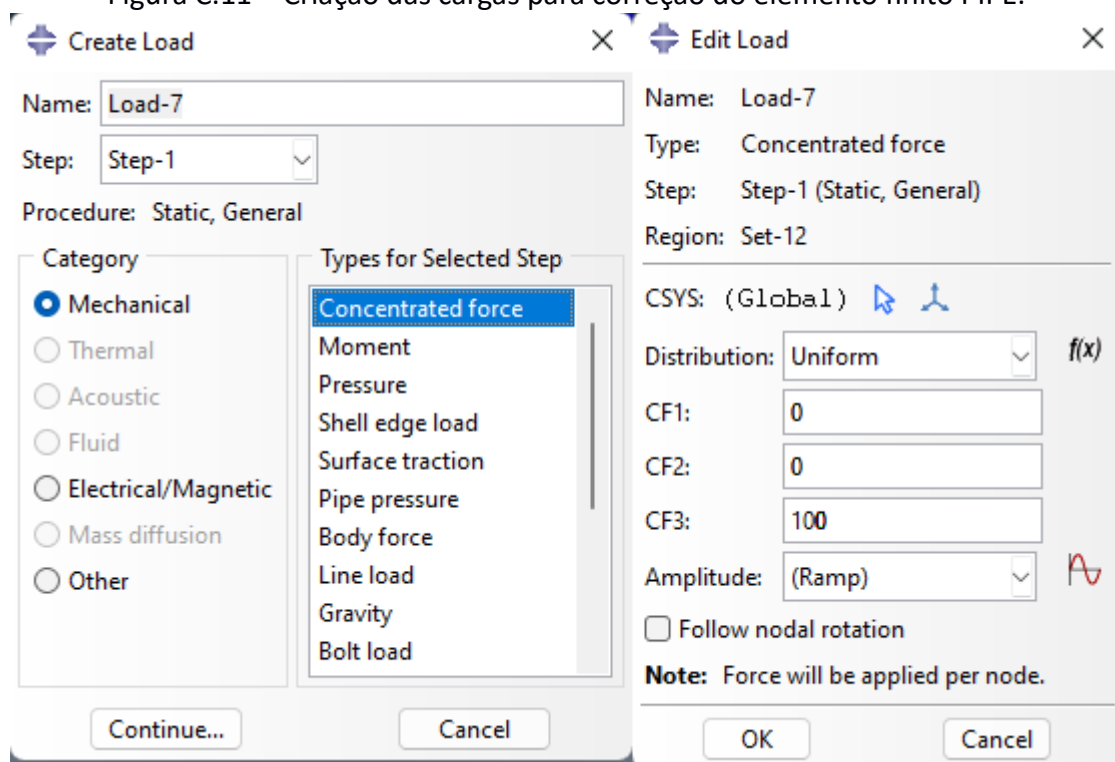
extremidades. As equações utilizadas para calcular essas forças concentradas são:

$$F_{i,comp} = p_{i,ex} * A_i, \quad (C.1)$$

$$F_{e,comp} = p_{e,ex} * A_e, \quad (C.2)$$

Onde  $F_{i,comp}$  e  $F_{e,comp}$  são as forças a serem adicionadas como cargas concentradas para anular o carregamento indesejado nas extremidades,  $p_{i,ex}$  e  $p_{e,ex}$  são as pressões interna e externa na extremidade, respectivamente, e  $A_i$  e  $A_e$  são as áreas interna e externa respectivamente (Figura C.11). Pelas orientações naturais dos carregamentos de pressão,  $F_i$  deve ser aplicada no sentido de compressão do tubular e  $F_e$  deve ser aplicada tracionando o tubular.

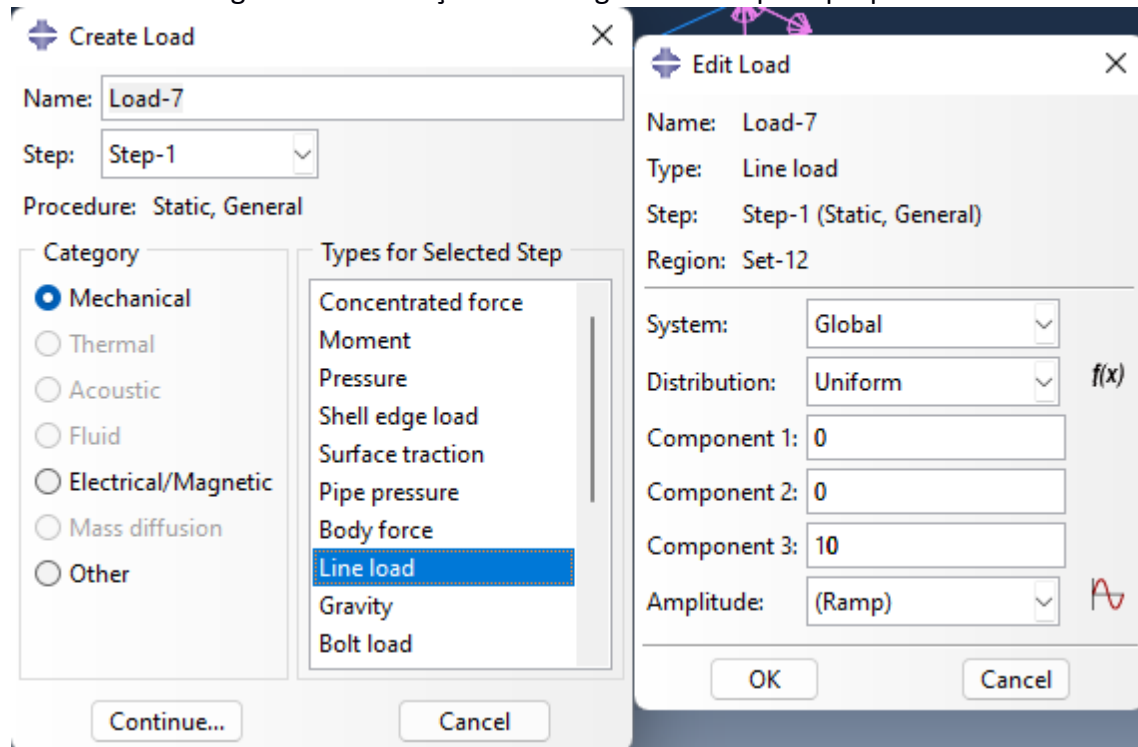
Figura C.11 – Criação das cargas para correção do elemento finito PIPE.



Fonte: Autor.

- C11. Criação do carregamento de peso: No menu 'Loads' selecionar a criação de um carregamento de categoria mecânica e do tipo 'Line load', selecionar o tubular e confirmar, manter a distribuição uniforme do carregamento, e nos componentes, aplicar 0 para componentes 1 e 2, pois representam os eixos X e Y da seção transversal, e para componente 3 aplicar o peso linear do material, com unidade  $FL^{-1}$  (Figura C.12);

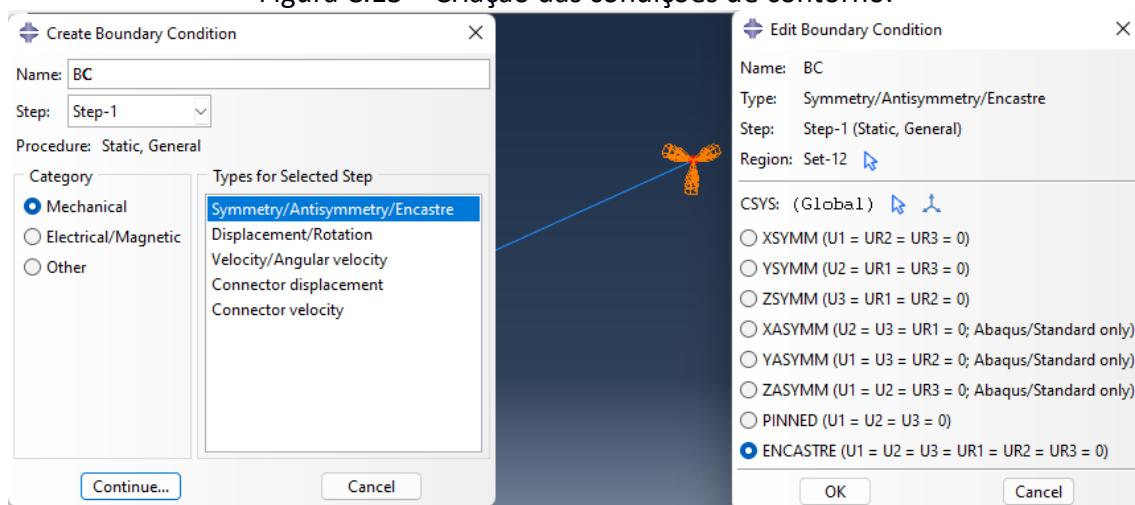
Figura C.12 – Criação do carregamento de peso próprio.



Fonte: Autor.

- C12. Criação das condições de contorno: Da mesma forma que os demais modelos, no menu 'BCs' selecionar a criação de uma condição de contorno de categoria mecânica e do tipo 'Encastre', selecionar o fundo do tubular, que neste modelo será um nó, onde o mesmo estará cimentado à formação e confirmar, aplicar o tipo de condição de contorno 'ENCASTRE' (Figura C.13);

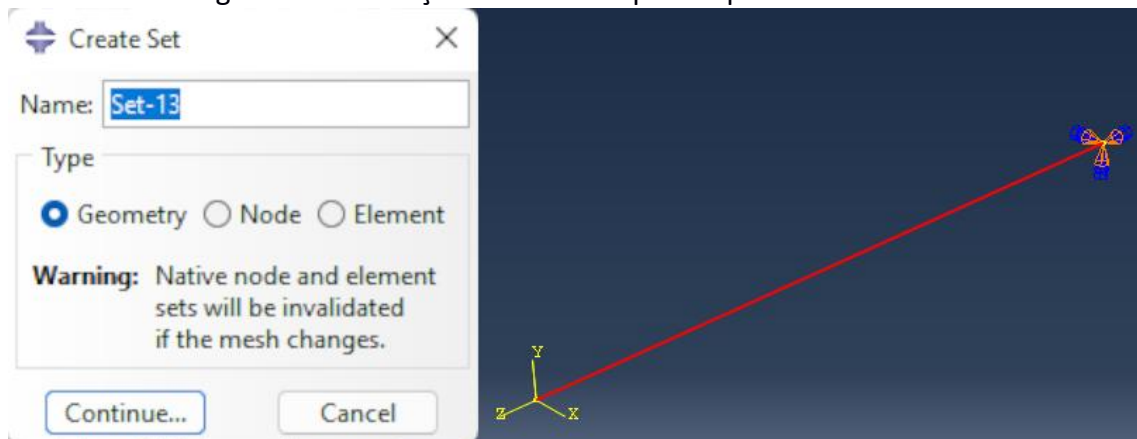
Figura C.13 – Criação das condições de contorno.



Fonte: Autor.

- C13. Criação do caminho de exportação dos dados: No menu 'Assembly', criar uma 'Set' a partir de uma geometria e selecionar o tubular, dessa forma é possível exportar os resultados seguindo todo o comprimento longitudinal (Figura C.14);

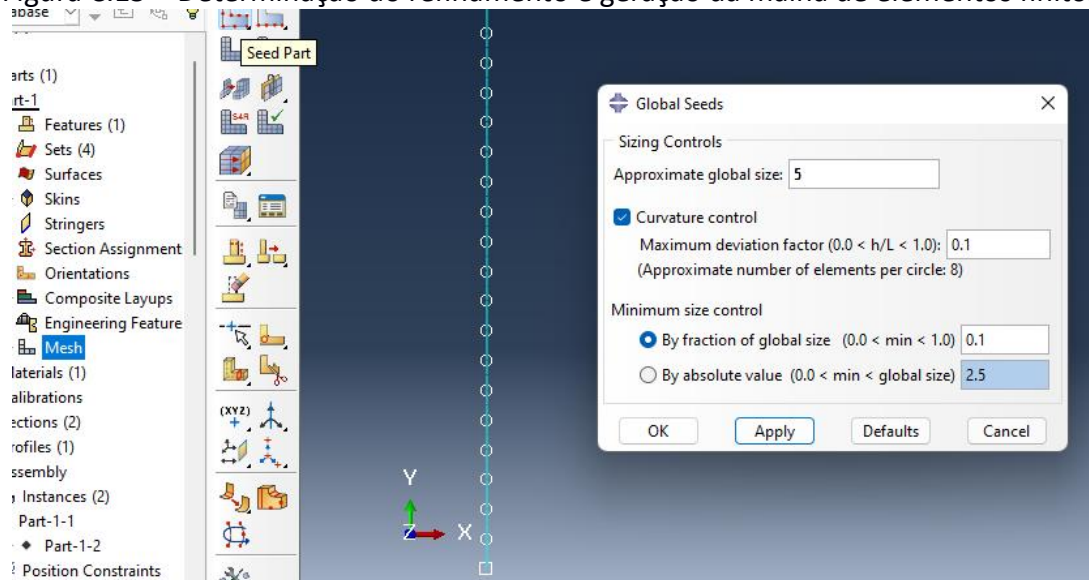
Figura C.14 – Criação do caminho para exportar os dados.



Fonte: Autor.

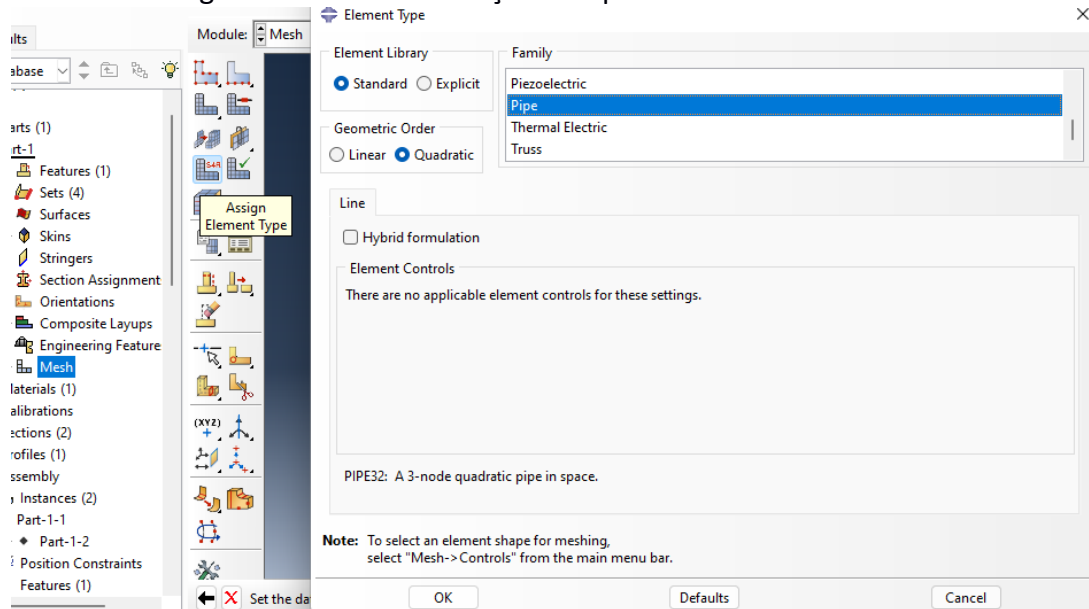
- C14. Geração da malha de elementos finitos: No menu 'Mesh' selecionar 'Seed Part' e determinar o comprimento longitudinal aproximado dos elementos (Figura C.15); selecionar 'Assign element type' para escolher o tipo de elemento a ser utilizado na malha, em 'Geometric Order' pode-se explicitar o tipo de função de interpolação a se utilizar, Linear ou Quadrática, sendo então os elementos PIPE31 e PIPE32 respectivamente, ainda pode-se escolher utilizar formulação, de acordo com o usuário (Figura C.16); selecionando 'Mesh part' o software irá gerar a malha de elementos finitos;

Figura C.15 – Determinação do refinamento e geração da malha de elementos finitos.



Fonte: Autor.

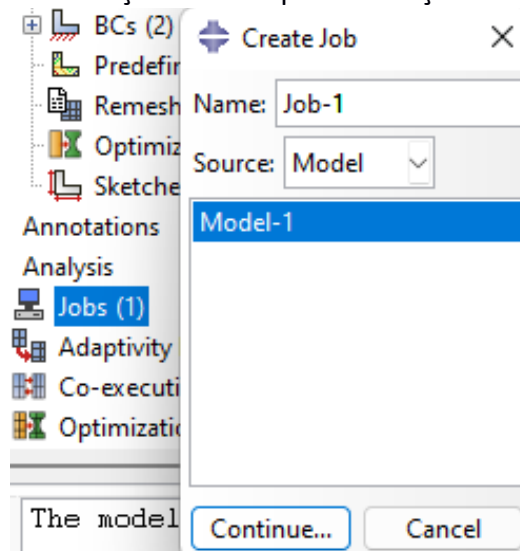
Figura C.16 – Determinação do tipo de elemento utilizado.



Fonte: Autor.

C15. Execução da simulação: No menu 'Jobs' criar a função normalmente e executar (Figura C.17);

Figura C.17 – Criação do 'Job' para execução da simulação.

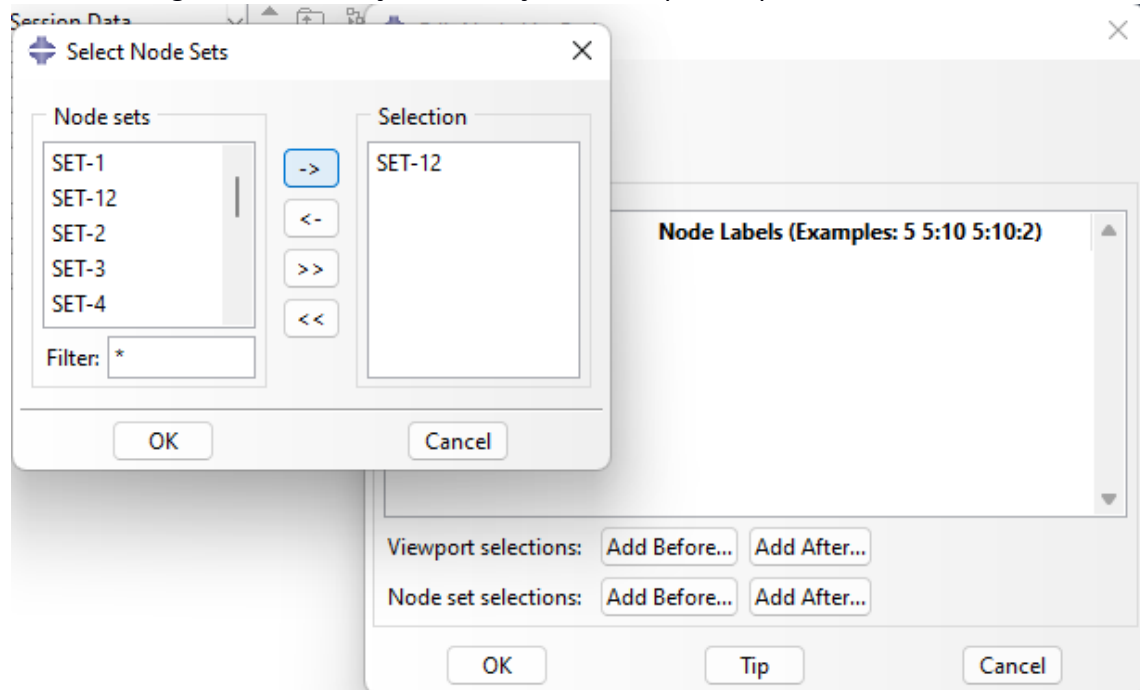


Fonte: Autor.

C16. Avaliando os resultados criar um 'Path' utilizando uma lista de nós, em 'Node set selections' selecionar 'Add Before...' e adicionar a 'Set' criada em C13 (Figura C.18). Em 'XYData', criar a lista de dados a partir do 'Path' criado e escolher quais os valores de X e Y a serem plotados (Figura C.19). Para este trabalho, os valores foram a coordenada Z original e os deslocamentos ao longo da direção 3, ou seja, deslocamento axial.

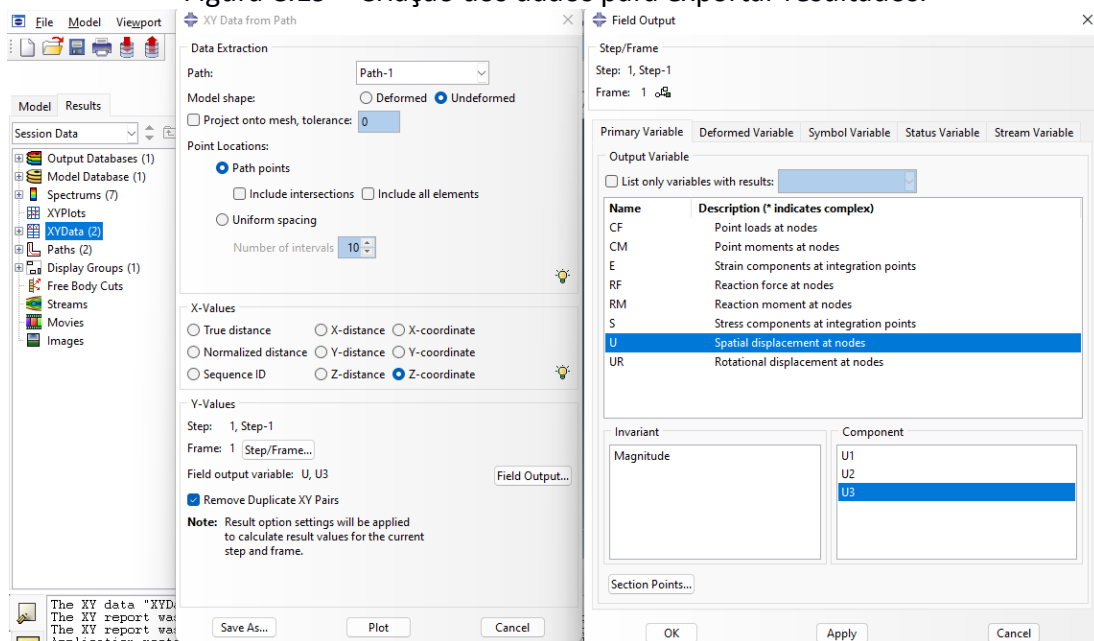


Figura C.18 – Criação da seleção de nós para exportar resultados.



Fonte: Autor.

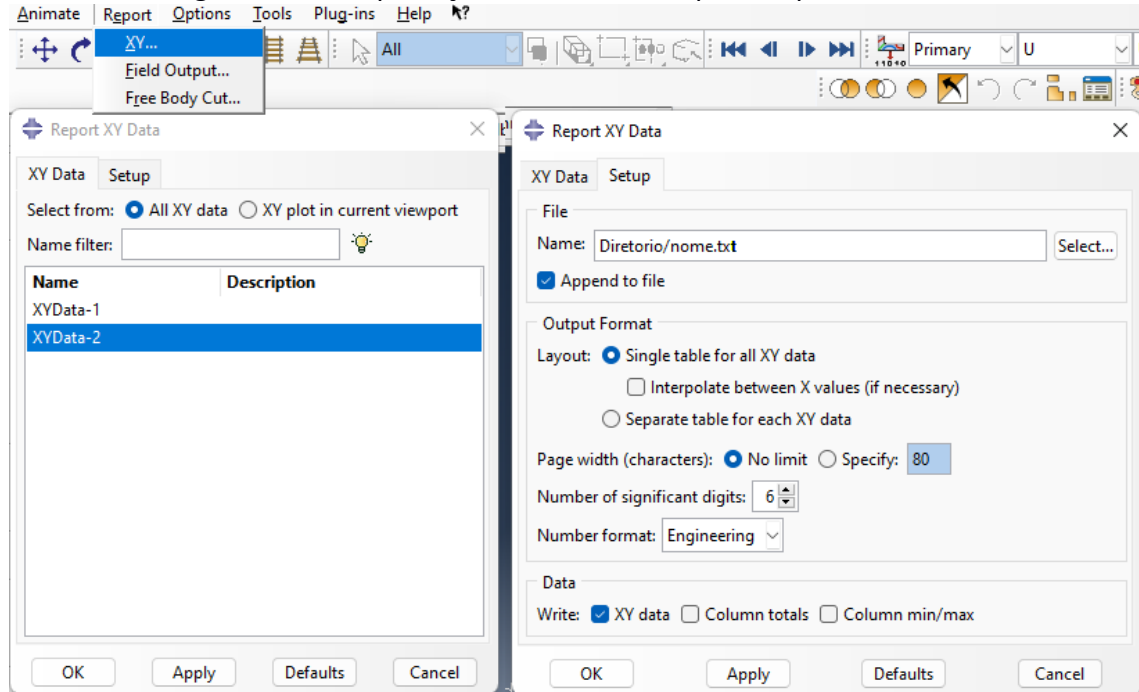
Figura C.19 – Criação dos dados para exportar resultados.



Fonte: Autor.

C17. Para exportar os resultados, selecionar no menu superior 'Report -> XY...' selecionar o 'XYData' de interesse criado em C16, em 'Setup' selecionar o diretório a ser exportado e o nome do arquivo, além de outros detalhes de configurações (Figura C.20).

Figura C.20 – Exportação dos resultados para arquivo de saída.



Fonte: Autor.